Ontwerpnota
Stormvloedkering Oosterschelde

Boek 4:
De sluitingsmiddelen

Inhoud boek 4: De sluitingsmiddelen

Deelnota 1: Algemene introductie

Ten geleide pagina **8**
1. Functies en eisen **9**
1.1 Functie van de sluitingsmiddelen
1.2 Eisen aan de sluitingsmiddelen
1.3 Doorwerking eisen in het ontwerp
2. Ontwikkeling van het ontwerp **12**
2.1 Doorstroomopening
2.2 Brievenbus- versus spleetoplossing
2.3 Onderbouw en sluitingsmiddelen
2.4 Keuze schuiven
2.5 Keuze bewegingswerken
2.6 Beslissen, bedienen, besturen en bewaken
2.7 Enkele en dubbele schuiven
3. Ontwerp stormvloedkering **17**
3.1 Samenvattende beschrijving
3.2 Maattoleranties en vervormingen
3.3 Veiligheidsfilosofie
3.4 Beheer en onderhoud
4. Documentatie **24**

Deelnota 2: Hydraulisch onderzoek

1. Inleiding **28**
2. Onderzoekstrategie voor de schuiven **29**
2.1 Voorbeschouwing
2.2 Belangrijke onderzoeksaspecten
2.3 Beoordeling schuiven
2.4 Onderzoeksplan
3. Trillingsonderzoek **34**
3.1 Geschematiseerde massa-veer modellen
3.2 Elastisch gelijkvormig model
4. Golfklaponderzoek **40**
4.1 Golfklapproblematiek en onderzoeksmethodiek
4.2 Golfklappen op de plaatliggerschuiven
4.3 Golfklappen op de vakwerkliggerschuiven
5. Belastingen op de schuiven **47**
5.1 Onderzoeksopzet
5.2 Golf- en stromingsbelastingen
5.3 Langsbelastingen
5.4 Krachten door langsbelasting
6. Belastingen op de bewegingswerken **53**
6.1 Golf- en stromingsbelasting dwars op de zuigerstangen
6.2 Verticale belastingen hefcilinders
6.3 Dynamische verschijnselen aandrijfsysteem
7. Vergelijking vakwerkliggerschuif met plaatliggerschuif **56**
7.1 Verval-, stromings-, en golfbelastingen
7.2 Golfklapbelastingen
7.3 Trillingen
7.4 Relaties andere onderdelen kering
7.5 Conclusie hydraulische vergelijking
8. Documentatie **57**
9. Literatuur **58**

Deelnota 3: Schuiven

1. Algemeen pagina **62**
2. Randvoorwaarden ontwerp **65**
2.1 Hydraulische randvoorwaarden
2.2 Golf- en vervalbelasting
2.3 IJsbelasting
2.4 Constructieve randvoorwaarden
3. Constructief ontwerp schuiven **72**
3.1 Plaatliggerschuif
3.2 Vakwerkschuif
3.3 Schuifconstructie
3.4 Materiaal en gewicht schuiven
4. Berekening schuiven **78**
4.1 Berekeningsopzet
4.2 *Belasting- en materiaalfactoren*
4.3 Belastingen
4.4 Dynamisch gedrag schuiven
5. Resultaten berekening schuiven **84**
5.1 Statische berekening onderdelen
5.2 Vermoeiing
6. Materiaalproblematiek warmgewalste buizen **99**
6.1 Grofkorrelig materiaal buizen
6.2 Onderzoek materiaaleigenschappen
6.3 Reparatiemethodieken
6.4 Herstelstrategie
6.5 Inspectietechnieken
7. Uitvoering en onderhoud **108**
7.1 Fabricage
7.2 Conservering
7.3 Montage
7.4 *Onderhoud*
8. Documentatie **116**

Deelnota 4: Schuifgeleiding

1. Inleiding **122**
2. Uitgangspunten en ontwerpeisen **124**
2.1 Breedte en positie schuifgeleiding
2.2 Materiaalkeuze schuifgeleiding
2.3 Werking schuifaanslagen
2.4 Werking zijaanslagen
3. Onderzoek **128**
3.1 Materiaalonderzoek schuifgeleidingen
3.2 Materiaalonderzoek ondersabelingsmortel
3.3 Rubberpakketten schuifaanslagen
4. Schuif- en zijgeleiding **132**
4.1 Materiaal schuif- en zijgeleiding
4.2 *Ontwerp schuifgeleiding*
4.3 Ontwerp zijgeleiding
5. Schuifaanslagen **136**
5.1 Verdeling rubberpakketten
5.2 Nokken schuifaanslagen
5.3 Schraper
6. Zijaanslagen **141**

pagina

6.1 Belasting zijaanslagen
6.2 Ontwerp zijaanslagen
6.3 Vermoeiing zijaanslagen
7. Onderaanslagen 146
8. Montage en sponningkuip 148
8.1 Montage verankeringsconstructie
8.2 Aanbrengen epoxymortel
8.3 Sponningkuip
9. Documentatie 150

Deelnota 5: bewegingswerken
1. Inleiding 154
2. Uitgangspunten ontwerp 158
2.1 Capaciteitsbepalende randvoorwaarden
2.2 Kwalitatieve eisen
2.3 Belastingen
2.4 Sterkte toegepaste materialen
3. Algemene beschrijving systeem 172
3.1 Overzicht en hoofdafmetingen
3.2 Overzicht installatie-typen
3.3 Verantwoording ontwerpkeuzen
3.4 Stick-slip en dynamische analyse
3.5 Het mechanisch bewegingswerk
4. Beschrijving onderdelen 183
4.1 Cilinder
4.2 Cardanbalk en staalconstructie onderoog
4.3 Hydraulisch systeem
4.4 Gelijkloopinstallatie
4.5 Conserveringssysteem zuigerstangen
4.6 Containers
4.7 Trappen en bordessen
4.8 Bliksembeveiliging
5. Uitvoeringsaspecten 216
5.1 Risico-onderzoek
5.2 Assemblage en montage
6. Onderhoudsaspecten 218
6.1 Inleiding onderhoud
6.2 Planmatig onderhoud
6.3 Reservedelen
7. Documentatie 221

Deelnota 6: Elektrische installatie
1. Inleiding 226
1.1 Ontwerpfilosofie
2. Uitgangspunten ontwerp en uitvoering 232
2.1 Levensduur
2.2 Betrouwbaarheid en beschikbaarheid
2.3 Uitgangspunten en eisen aan de totale energievoorziening
2.4 Besturings-, bedienings- en bewakingssysteem
3. Energielevering, -opwekking en -distributie 240
3.1 Algemene aspecten energievoorziening
3.2 Energielevering door PZEM
3.3 Dieselcentrales A en B
3.4 Energiedistributie
3.5 Energielevering bijzondere voedingen
3.6 Lokale Elektrische Installatie
4. Centrale besturing, bediening en bewaking 260
4.1 Centraal besturingssysteem
4.2 Computerconfiguratie
4.3 Bedieningsvormen en bedieningsmiddelen
5. Lokale besturing, bediening en bewaking 266
5.1 Hefhoogtemeting/scheefstandsmeting
5.2 Hydraulische installatie
5.3 De Lokale ComputerConfiguratie
5.4 Procesbesturing

pagina

6. Netwerkverbindingen voor besturing, bediening en bewaking 278
6.1 Veilige verbinding
6.2 Alternatieve verbinding
7. Noodsluitsysteem 281
7.1 Peilmeetstations
7.2 Communicatie en verbindingen
7.3 NSS-computersysteem
7.4 Startautomaat
8. Uitvoeringsaspecten 285
8.1 Productieproces
8.2 Ontwerp
8.3 Fabricage
8.4 Beproeving
8.5 Acceptatie
8.6 Assemblage en montage
9. Beheer en onderhoud 290
9.1 Beheer van de stormvloedkering
9.2 Onderhoud van de stormvloedkering
9.3 Communicatiemiddelen beheer en onderhoud
10. Documentatie 296

Deelnota 7: Inspectievoertuig schuiven
1. Inleiding 300
2. Inspectie en onderhoud sluitingsmiddelen 301
2.1 Bereikbaarheid sluitingsmiddelen
3. Inspectievoertuig 305
3.1 Algemene eisen
3.2 Werkgebied
3.3 Vormgeving
3.4 Constructie
3.5 Massa en afmetingen
3.6 Materialen en conservering
3.7 Aandrijving en besturing
3.8 Bediening
3.9 Veiligheid
3.10 Levering
4. Documentatie 313

Deelnota 1: Algemene introductie

Inhoud

Ten geleide

1. Functies en eisen pagina **9**
1.1 Functie van de sluitingsmiddelen
1.2 Eisen aan de sluitingsmiddelen
1.3 Doorwerking eisen in het ontwerp

2. Ontwikkeling van het ontwerp **12**
2.1 Doorstroomopening
2.2 Brievenbus- versus spleetoplossing
2.3 Onderbouw en sluitingsmiddelen
2.3.1 Varianten sluitingsmiddelen
2.3.2 Roosterschuiven
2.3.3 Tolkleppen
2.3.4 Hefschuiven
2.4 Keuze schuiven
2.5 Keuze bewegingswerken
2.6 Beslissen, bedienen, besturen en bewaken
2.7 Enkele en dubbele schuiven

3. Ontwerp stormvloedkering **17**
3.1 Samenvattende beschrijving
3.2 Maattoleranties en vervormingen
3.3 Veiligheidsfilosofie
3.4 Beheer en onderhoud
3.4.1 Beheer
3.4.2 Het bedien- en het beslissysteem
3.4.3 Beveiliging tegen acties van buitenaf
3.4.4 Conditiebewaking
3.4.5 Onderhoud

4. Documentatie **24**

Ten geleide

De Ontwerpnota Stormvloedkering Oosterschelde omvat in totaal 5 boeken. Het boek 'De Sluitingsmiddelen" is het vierde deel in de serie. Het bevat een beschrijving van de sluitingsmiddelen, alsmede een verantwoording van de keuzen die hebben geleid tot het definitieve ontwerp.

Tot de sluitingsmiddelen behoren de volgende onderdelen:
- schuiven (deelnota 3)
- bewegingswerken (deelnota 5)
- elektrische installatie (deelnota 6)

Deze onderdelen spelen een essentiële rol in het functioneren van de stormvloedkering in drieledige zin:
- als doorlaatmiddel voor de dagelijkse getijbeweging op de Oosterschelde houdt een voortdurend geactiveerd systeem de schuiven geheven;
- als kering vormen de gesloten schuiven samen met pijlers, bovenbalken, dorpelbalken en drempel een barrière tegen hoge zeewaterstanden, waarbij opnieuw een voortdurend geactiveerd systeem de schuiven gesloten houdt;
- voor de transformatie van doorlaatmiddel naar kering en terug zijn de schuiven voorzien van een bewegingssysteem, waarvan de werking door de elektrische installatie wordt gestuurd, bewaakt en van energie voorzien.

De schuiven moeten nauwkeurig passen tussen de geprefabriceerde pijlers (boek 3, deelnota 2) en stelden daardoor eisen aan de vormgeving, de plaats en de stand van de pijlers. In een vroeg stadium van het ontwerp van de stormvloedkering is dan ook reeds uitgebreid aandacht besteed aan de daarmee gepaard gaande tolerantie-problematiek. Het raakpunt tussen schuiven en pijlers wordt gevormd door de schuifgeleidingen en het ontwerp hiervan is dan ook in een aparte deelnota beschreven (deelnota 4).

Delen van de bewegingswerken bevinden zich op de hamerstukken (boek 3, deelnota 7) en in de verkeerskokers (boek 3, deelnota 6). Ten behoeve van het onderbrengen van de onderdelen van de bewegingswerken in de verkeerskokers zijn containers ontwikkeld die, in diverse afmetingen, ook zijn toegepast voor het onderbrengen van de elektrische installaties en als werk- en onderzoeksruimten in de verkeerskokers. Het ontwerp van de verschillende typen containers is dan ook beschreven bij de bewegingswerken. Hetzelfde geldt voor de trappen en bordessen waarmee de hamerstukken en de daarop geplaatste delen van de bewegingswerken vanuit de verkeerskokers toegankelijk zijn gemaakt.

Bij de beschrijving van de elektrische installatie (deelnota 6) is onderscheid gemaakt tussen energievoorziening uit het openbare net, de eigen dieselcentrale, de lokale besturing, bediening en bewaking in de verkeerskokers, de centrale bediening en bewaking in het Topshuis, de communicatiemiddelen, de verlichting, het noodsluitsysteem, de bliksembeveiliging en de kathodische bescherming.

Voor het ontwerp van met name de schuiven is het (hydraulisch) onderzoek zó essentieel geweest, dat het zinvol leek hieraan een aparte deelnota (deelnota 2) te wijden. Het overige onderzoek wordt toegelicht in de betreffende deelnota's.

Uitgangspunt van het ontwerp is geweest dat gedurende de levensduur geregeld inspecties plaatsvinden aan de sluitingsmiddelen. Vanwege de moeilijke bereikbaarheid van met name de schuiven en de bovenzijde van de hydraulische cilinders is t.b.v. de inspectie daarvan een apart inspectievoertuig ontwikkeld, dat eveneens is beschreven (deelnota 7).

Tenslotte wordt opgemerkt dat de behandeling van het ontwerp van de sluitingsmiddelen voor de Roompotsluis is ondergebracht in boek 3, deelnota 9, waarin het gehele ontwerp van de schutsluis is behandeld.

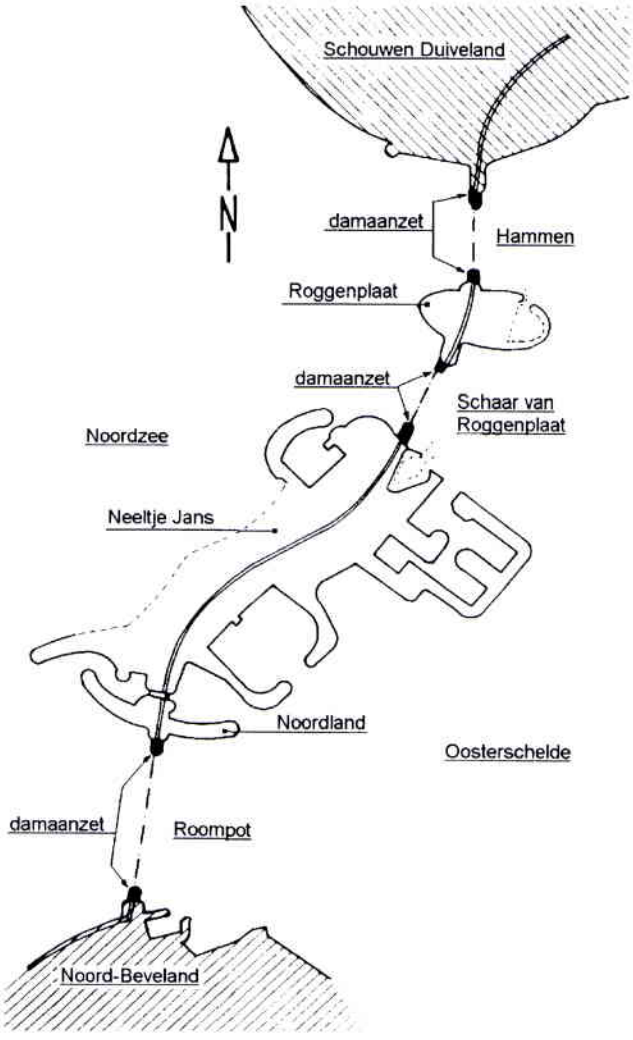
Boek 4 verschijnt om verschillende redenen enkele jaren later dan de andere vier boeken. Het is samengesteld door medewerkers van de vroegere Directie Bruggen, die nu is opgegaan in de Bouwdienst Rijkswaterstaat.

Directie Bruggen heeft alle in dit boek beschreven onderdelen ontworpen, berekend en het benodigde onderzoek begeleid. In totaal acht overeenkomsten waren nodig om de bouw en de installatie van alle sluitingsmiddelen op te dragen.
Veel detailtekeningen zijn, als onderdeel van de bouwopdracht, door aannemers en ingenieursbureaus vervaardigd. Het totale ontwerp ligt vast in enkele tienduizenden tekeningen. In verband met dit grote aantal heeft archivering van alle bouwtekeningen plaats gevonden op een microfiches-systeem.
Alle tekeningen, specificaties, berekeningen en andere documenten zijn overgedragen aan de beheerder van de stormvloedkering, de Directie Zeeland van Rijkswaterstaat, die ze in Middelburg heeft gearchiveerd. Bij de Bouwdienst zijn alleen die zaken bewaard gebleven, die in de toekomst van belang kunnen zijn bij de realisering van soortgelijke projecten.

1. Functies en eisen

1.1 Functies van de sluitingsmiddelen

De schuiven, bewegingswerken en elektrische installaties vormen samen de sluitingsmiddelen van de Oosterscheldekering (figuur 1.1).



Figuur 1.1 Overzicht Oosterscheldekering

Ze spelen een essentiële rol in de dubbele functievervulling van de stormvloedkering. De omschakeling van de functie van doorlaatwerk onder dagelijkse omstandigheden tot de functie van kering in het geval van (mogelijk) optredende stormvloeden moet door de sluitingsmiddelen mogelijk gemaakt worden (figuur 1.2). In boek 1 (Totaalontwerp), deelnota 2 (Ontwerpfilosofie), hoofdstuk 2 (Functionele Analyse) is dit de transformatie-functie genoemd [1].



Figuur 1.2 De sluitingsmiddelen

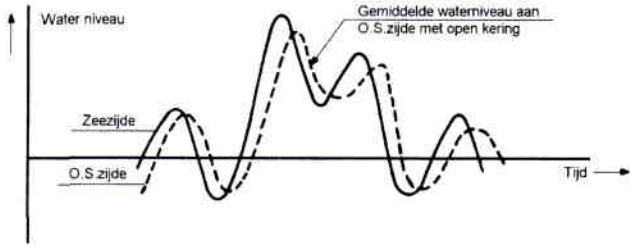
1.2 Eisen aan de sluitingsmiddelen

De eisen die aan de sluitingsmiddelen worden gesteld, vloeien direct voort uit de randvoorwaarden voor de stormvloedkering (deelnota 1.1, hoofdstuk 3 [1]), n.l:

1. Het bieden van een voldoende grote doorstroomopening om een gedefinieerde getijdewerking op de Oosterschelde toe te laten;
2. Het bieden van voldoende veiligheid tegen stormvloeden voor de gebieden rond de Oosterschelde;
3. Vrijheid van beheer: de beslissing van de beheerder omtrent het tijdstip van (vooral) sluiten moet zo min mogelijk worden beïnvloed door de technische mogelijkheden en beperkingen van de kering en de keringsmiddelen;
4. De stormvloedkering als geheel moet 200 jaar kunnen functioneren.

ad 1.
De eis m.b.t. de doorstroomopening is vooral bepalend voor de grootte en het aantal van de sluitingsmiddelen en hun verdeling over de sluitgaten.
ad 2.
De veiligheidseis is voor de sluitingsmiddelen vertaald in een eis dat een maatgevende belasting met een kans van optreden van $2{,}5 \times 10^{-4}$ per jaar moet kunnen worden weerstaan, alsmede een beschikbaarheid-eis. Met dit laatste wordt aangegeven dat de sluitingsmiddelen met een gedefinieerde mate van zekerheid moeten kunnen functioneren wanneer dat nodig is.

ad 3.
De eis van "vrijheid van beheer" wordt specifiek gesteld aan de transformatiefunctie. Deze eis is vertaald in condities m.b.t. waterstandsverschillen over de kering, waarbij de kering moet kunnen worden geopend en gesloten (zie figuren 1.3 t/m 1.5). Van belang is met name de mogelijkheid de kering bij een opkomende stormvloed nog op het laatste moment te sluiten.

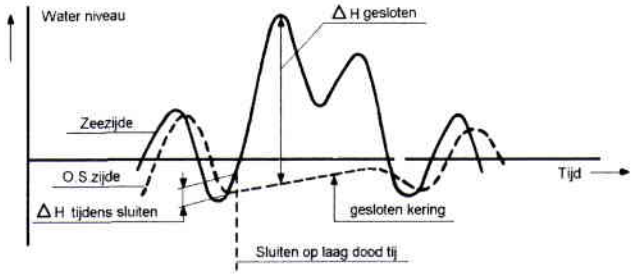


Figuur 1.3 Open kering

Toelichting bij figuur 1.3: Door de traagheid van de waterstroom loopt de waterstandverandering op de Noordzee voor op die van de Oosterschelde. Vooral in stormsituaties is de steilheid van de waterstandverandering groot en gaat de waterstand op zee steeds meer voorlopen op die van de Oosterschelde.

In dit verband wordt in de uitgevoerde voorstudie voor de wijze van beheer van de stormvloedkering (BARCON [3]; zie ook [1] deelnota 1.5, hoofdstuk 1) gesproken over diverse sluiting-strategieën:

- Sluiting van de kering op de laagwaterkentering, resulterend in kleine krachten op de sluitingsmiddelen (door lage stroomsnelheid) tijdens sluiten, maar grote krachten op de kering in gesloten toestand (door groot verval) tijdens de stormvloed;



Figuur 1.4 Sluiten met klein verval

- Sluiting bij het bereiken van een (hoog) alarmpeil, resulterend in grote krachten op de sluitingsmiddelen (door hoge stroomsnelheid) tijdens het sluiten, maar kleine krachten op de kering in gesloten toestand (door klein verval) tijdens de stormvloed;



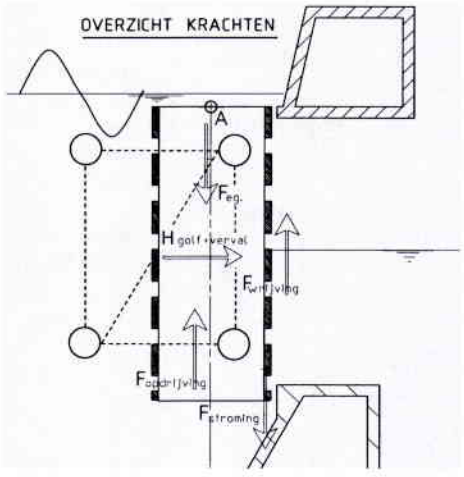
Figuur 1.5 Sluiten met groot verval

Opmerking: Als het verval (nog) niet groot is kan de belasting omkeren. In dat geval wordt de golfbelasting maatgevend.

- Reductorsluiting; bij deze laatste strategie wordt de kering niet geheel gesloten, maar wordt de doorgelaten getijstroom zodanig "geknepen", dat op het Oosterschelde-bekken een zeker getijverschil wordt gerealiseerd maar tevens een bepaald peil niet wordt overschreden.

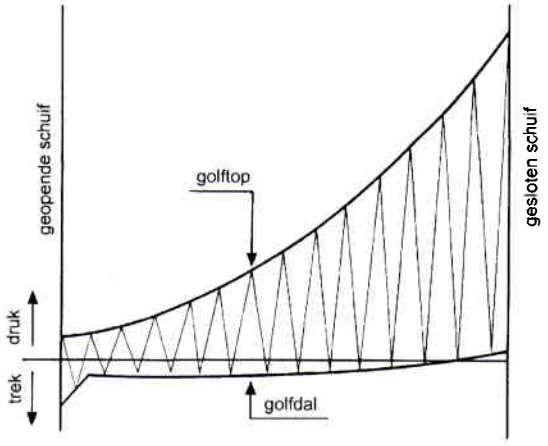
ad 4.
De eis dat de stormvloedkering als geheel 200 jaar moet kunnen functioneren heeft voornamelijk betrekking op die delen van de stormvloedkering die niet of moeilijk te vervangen zijn (zie [1], deelnota 1.1, par. 3.3). Geaccepteerd wordt dat onderdelen die vervangbaar zijn, een kortere levensduur hebben. Als zodanig heeft de levensduureis geen consequenties voor de sluitingsmiddelen, die geacht worden vervangbaar te zijn.

Tijdens het sluiten worden de belastingen van de schuif op het bewegingswerk bepaald door het eigen gewicht van de schuif, opwaartse krachten in het water, stroming, golfklappen op de schuif en door wrijving tussen schuif en geleidingen (figuur 1.6).



Figuur 1.6 Belastingen op schuif

De krachten op de schuif worden ter plaatse van de schuifuiteinden via een scharnierende verbinding overgedragen aan het bewegingswerk. Tijdens sluiten kunnen deze krachten zowel uit trek als druk bestaan (figuur 1.7).



Figuur 1.7 Belasting van schuif op bewegingswerk tijdens sluiten

1.3 Doorwerking eisen in het ontwerp

De doorwerking van de genoemde eisen in het ontwerp van de sluitingsmiddelen is voor verschillende onderdelen daarvan (schuiven, bewegingswerken, elektrische installaties) verschillend. Dit wordt bepaald door de functie van die onderdelen.
Voor de afmetingen van de schuiven is de eis m.b.t. de grootte van de doorstroom-opening in de kering bepalend geweest. Omdat de doorstroom-opening de vorm van de oorspronkelijke stroomgeulen zoveel mogelijk moest volgen, moeten de schuiven in het midden van de stroomgeulen een dieper reikende opening kunnen afsluiten dan aan de randen van de stroomgeulen. De schuiven zijn in het midden van de stroomgeulen daardoor hoger dan aan de randen. Doordat de pijlers in principe op vaste afstanden van elkaar zijn opgesteld, zijn alle schuiven ongeveer even breed. De veiligheidseis is vooral bepalend voor de sterkte van de schuiven.

De eis van vrijheid van beheer heeft ertoe geleid dat de schuiven ontworpen zijn op een laagwaterkentering-sluiting; een sluitingstrategie die bij stormvloeden leidt tot het grootste verval over de kering in gesloten toestand.

Het ontwerp van de bewegingswerken wordt, qua sterkte en afmetingen, bepaald door de tijdens het bewegen op de schuiven werkende krachten, de wijze van bewegen (glijden) en de hoogte van de schuiven, een en ander met in achtname van de eis voor vrijheid van beheer. Daardoor is de alarmpeilsluiting, welke leidt tot de grootste krachten tijdens sluiten, bepalend geweest voor de dimensionering van de bewegingswerken. De schuifhoogte, variërend met de plaats in de oorspronkelijke stroomgeulen, is bepalend voor de slag van de bewegingswerken voor de verschillende schuiven en daarmee voor de lengte-afmetingen. Bij het hele ontwerp van de bewegingswerken, inclusief de aandrijf-installatie, is de beschikbaarheidseis een belangrijk aandachtspunt geweest.

Voor de elektrische installaties, te onderscheiden in een installatie voor de energievoorziening en installaties voor bediening en besturing van de bewegingswerken, is de energie-behoefte van de bewegingswerken, het grote aantal en de spreiding over grote afstand hiervan, alsmede het uitgangspunt van een centrale bediening en een decentrale besturing bepalend geweest voor de eerste opzet in grote lijnen. Bij de nadere uitwerking van het ontwerp is vooral de beschikbaarheidseis en later ook de eis van vrijheid van beheer bepalend geweest.

In verband met de levensduureis van de stormvloedkering, kan worden geconstateerd dat alle onderdelen van de sluitingsmiddelen vervangbaar zijn; afhankelijk van o.a. de grootte, het een wat makkelijker dan het andere. Bovendien is er, binnen de begrenzingen van de plaatselijke omstandigheden, rekening gehouden met een redelijke toegankelijkheid voor onderhoud en reparatie. De levensduureis van 200 jaar is dan ook in het ontwerp van de meeste sluitingsmiddelen niet gerealiseerd. Waar vermoeiing maatgevend is, is gedimensioneerd op een levensduur van tenminste 50 jaar (o.a. de schuiven). Waar een langere levensduur kon worden gekozen zonder dat daaraan merkbaar hogere kosten waren verbonden, (o.a. de cilinders van het hydraulische bewegingsysteem) is dat niet achterwege gelaten.

Onderdelen waarvan de noodzaak tot vervanging wordt bepaald door slijtage of veroudering (achteruitgang van materiaal-eigenschappen), hebben een veelal veel kortere levensduur. Regelmatige vervanging is dan onvermijdelijk. In het ontwerp is met die vervanging rekening gehouden door goede montage- en demontage-mogelijkheden, alsmede een redelijke bereikbaarheid te verzorgen. Daar waar ontwikkelingen in de techniek zijn te verwachten, is rekening gehouden met de mogelijkheid van toekomstige ombouw (o.a. cilinderafdichtingen van het hydraulische bewegingsysteem).

2. Ontwikkeling van het ontwerp

2.1 Doorstroomopening

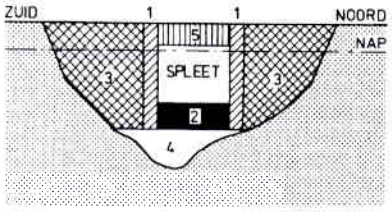
In mei 1976 verschijnt de zogenaamde Blauwe Nota [7], het eindrapport van het "Onderzoek naar de mogelijkheid van de afsluiting van de Oosterschelde met een gedeeltelijk geprefabriceerde stormvloed-kering". Het onderzoek werd uitgevoerd in de periode november 1974 tot mei 1976. De nota geeft een overzicht van de onderzochte varianten van een stormvloedkering met een effectief doorstroomprofiel van 11.500 m^2 ter handhaving van een getijverschil te Yerseke van ca. 65 % van het getijverschil vóór afsluiting. Daarnaast wordt gekeken naar de consequenties van een stormvloedkering met een effectief doorstroomprofiel van 20.000 m^2, waarmee ca. 90 % van het oorspronkelijke getijverschil te Yerseke kan worden gerealiseerd.

Uitgangspunt is dat de afsluitbare stormvloedkering wordt gebouwd in de drie stroomgeulen Hammen, Schaar van Roggenplaat en Roompot tussen Schouwen en Noord-Beveland, waarbij op de ter plaatse aanwezige zandplaten kunstmatige eilanden met een damvak worden aangelegd. Ook ter plaatse van Schouwen en Noord-Beveland sluit de stormvloedkering via een damconstructie aan op de bestaande, nog te versterken dijken. De debietverdeling over de drie sluitgaten, uitgedrukt in percentages van het totale debiet, moet ongeveer gelijk blijven aan de verdeling in de oorspronkelijke situatie.

2.2 Brievenbus- versus spleetoplossing

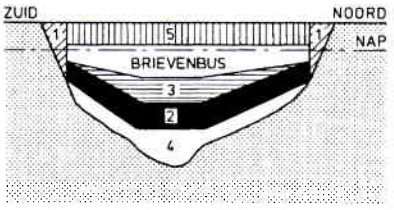
De bovengenoemde effectieve doorstroomprofielen vormen slechts een deel van het oorspronkelijk aanwezige doorstroomprofiel in de monding van de Oosterschelde (ca. 80.000 m^2). De vormgeving van de doorstroomprofielen in het afsluitbare deel van de stormvloedkering is dan nog vrij. In extremo wordt onderscheid gemaakt tussen een "spleet"- en een "brievenbus"-oplossing. De spleetoplossing staat voor een korte stormvloedkering waarbij een klein aantal diepe doorlaatopeningen in de diepste delen van de sluitgaten zijn aangebracht (figuur 2.1). Bij de brievenbusoplossing is de stormvloedkering veel langer, omdat ondiepe doorlaatopeningen over een groot deel van de breedte van de sluitgaten worden gesitueerd (figuur 2.2).

De spleet geeft een aanzienlijk ongunstiger stroombeeld dan de brievenbus, die tot een fraaie stroomverdeling in de sluitgaten leidt. De uiteindelijk gekozen vormgeving van de doorstroomprofielen in het afsluitbare deel van de kering is te beschouwen als een brievenbus-oplossing. Daarbij is er voor gekozen met de onderkant van de afzonderlijke doorstroomopeningen ruwweg de bodemligging van de sluitgaten te volgen. Op grond daarvan reiken de doorstroomopeningen in het midden van de sluitgaten het diepst en worden ze naar de randen van de sluitgaten toe ondieper.



1. Overgangsconstructie
2. Constructie - kering
3. Aansluitende dammen
4. Drempel
5. Bovendeel - kering

Figuur 2.1 Spleetoplossing



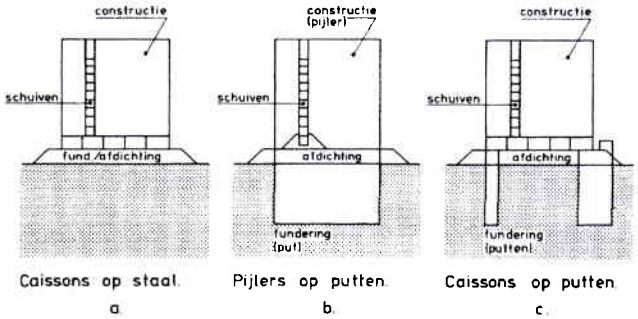
1. Landhoofdconstructie
2. Constructie - kering
3. Dorpelbalken
4. Drempel
5. Bovendeel - kering

Figuur 2.2 Brievenbusoplossing

2.3 Onderbouw en sluitingsmiddelen

Bij de keuze tussen al dan niet doorgaan met alternatieven nam de uitvoerbaarheid en de situatie in de bouwfase een belangrijke plaats in. Vanwege de zware fysische omstandigheden in de monding van de Oosterschelde is er steeds voor gekozen zoveel mogelijk te prefabriceren en de verblijftijd in de Oosterschelde tijdens de bouw zo kort mogelijk te doen zijn. Langzamerhand tendeerden de oplossingen naar een drietal varianten:

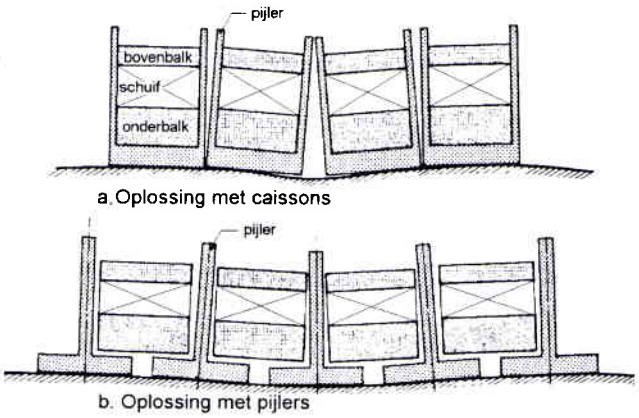
1. Caissons gefundeerd op staal;
2. Pijlers gefundeerd op putten;
3. Caissons gefundeerd op putten.



Figuur 2.3 Oplossingen met caisson of pijler

Het is altijd de bedoeling geweest dat het doorstroomprofiel in de stormvloedkering ter grootte van 11.500 resp. 20.000 m^2 op de een of andere manier met beweegbare afsluitmiddelen zou kunnen worden afgesloten ten tijde van stormvloeden.

Voor de afsluitmiddelen is er een belangrijk verschil tussen de caisson- en de pijleroplossingen. Een caisson vormt een vormvast raamwerk van staal of beton waarbinnen de afsluitmiddelen (kleppen of schuiven) kunnen bewegen om vaste assen of tussen vaste geleidingen. De werking van de afsluitmiddelen wordt niet beïnvloed door de stand van de caissons.
Als schuiven of kleppen worden aangebracht tussen individueel gefundeerde pijlers zijn ze echter, qua vrijheid om te bewegen, gevoelig voor de positionering en de standzekerheid van de pijlers.



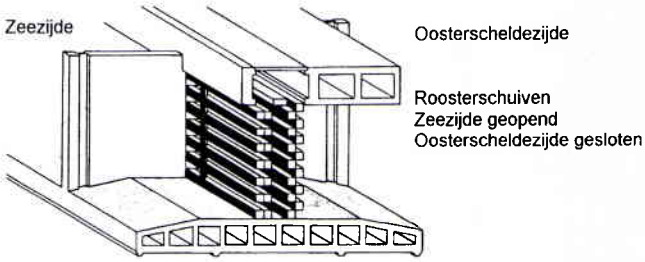
Figuur 2.4 Vervorming kering

Een ander belangrijk verschil tussen de caisson- en de pijleroplossing betreft de afmetingen van de afsluitmiddelen. Om de caissons voldoende stijfheid te kunnen geven, moeten de afmetingen van de afsluitmiddelen beperkt blijven tot overspanningen van 10 à 20 meter. Bij de pijleroplossing kunnen veel grotere overspanningen van de afsluitmiddelen worden toegepast. Voorwaarde is wel dat de pijlers de belastingen op de afsluitmiddelen kunnen afvoeren naar de fundatie. Overspanningen van de afsluitmiddelen van 30 tot 60 m zijn dan mogelijk. Het aantal afsluitmiddelen is bij een caisson-oplossing dan ook ca. tweemaal zo groot als bij de pijleroplossing. De keuze van de uiteindelijke afmetingen moest voortkomen uit een optimalisatie-proces. Dit proces heeft pas na 1976 voor de pijleroplossing plaatsgevonden.
De hiervoor genoemde spleetoplossing was typisch geschikt voor de bouw van een stormvloedkering waarbij gebruik wordt gemaakt van caissons, aangezien deze van nature al een grote diepgang hebben. In de caissons zouden de afsluitmiddelen reeds vóór plaatsing gemonteerd kunnen worden.

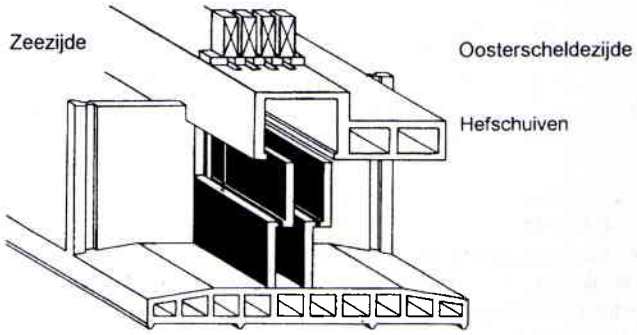
2.3.1 Varianten sluitingsmiddelen

Natuurlijk hebben de spleet- en de brievenbusoplossing verschillende implicaties voor de vormgeving van de afsluitmiddelen. Daarvan is een groot aantal bekeken, die naar haalbaarheid zijn in te delen in drie groepen.

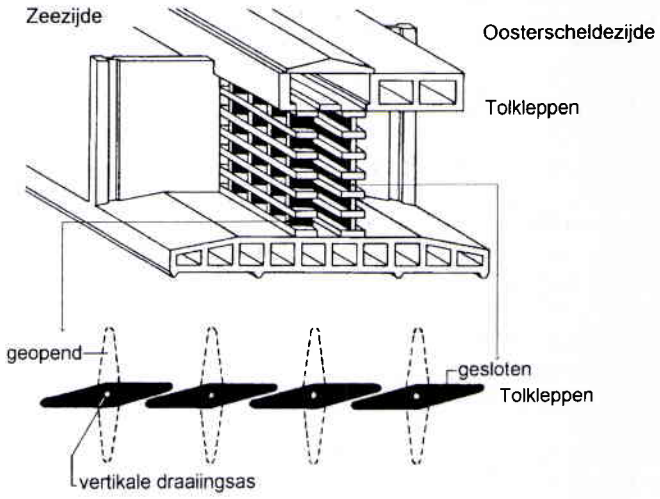
Groep 1
De echte kanshebbers; het best bestudeerd:
1. Roosterschuiven met een vast en een beweegbaar rooster (figuur 2.5)
2. Hefschuiven van staal of beton (figuur 2.6)
3. Tolkleppen draaiend om verticale assen (figuur 2.7)



Figuur 2.5 Roosterschuif met vast en beweegbaar rooster



Figuur 2.6 Hefschuif van staal of beton

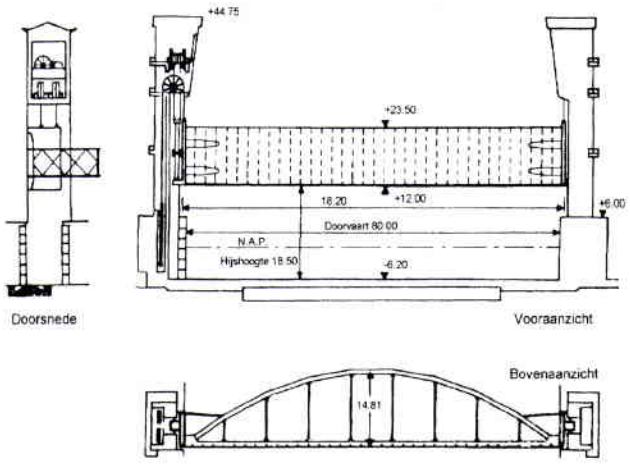


Figuur 2.7 Tolklep draaiend om verticale as

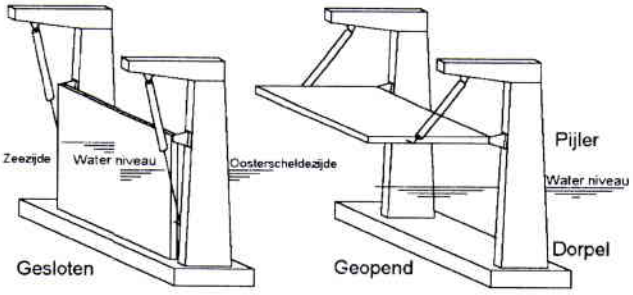
Groep 2

Interessant, maar minder grondig bestudeerd:

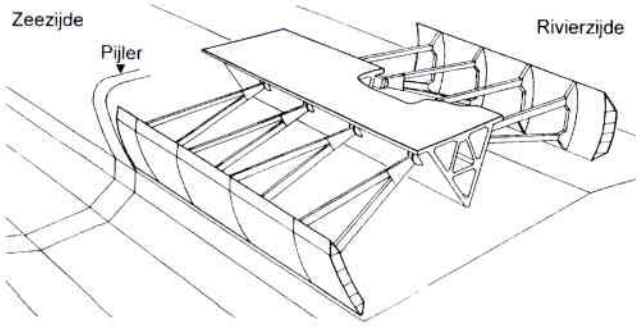
1. Hefschuiven met loopwielen en afdrukinrichtingen (figuur 2.8)
2. Draaikleppen draaiend om een horizontale as (figuur 2.9)
3. Segmentschuiven van het Haringvliettype, voor grote overspanningen (figuur 2.10)



Figuur 2.8 Hefschuif met loopwielen en afdrukinrichtingen



Figuur 2.9 Draaiklep draaiend om een horizontale as

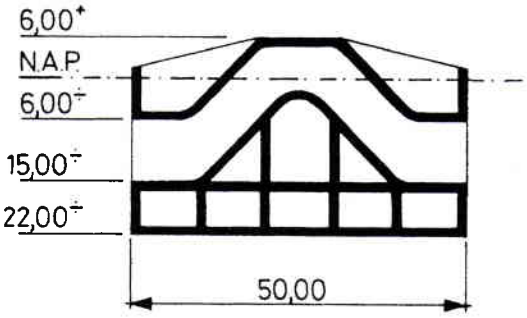


Figuur 2.10 Segmentschuif van het Haringvliettype

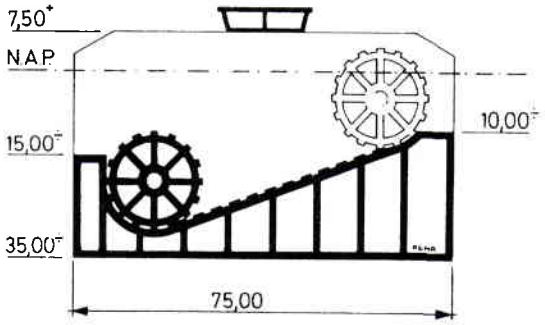
Groep 3

Wel genoemd, maar niet interessant t.o.v. de reeds genoemde typen:

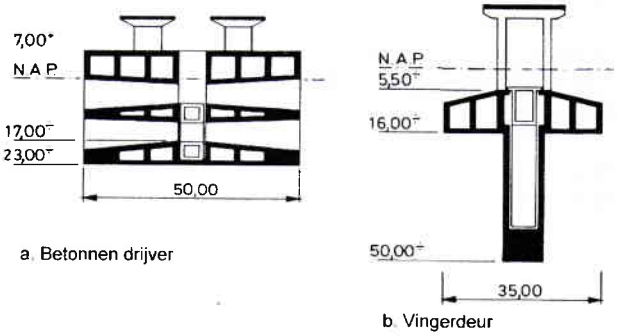
1. Hevels (figuur 2.11)
2. Betonnen cilinders (figuur 2.12)
3. Drijvende hefschuiven in verschillende vormen (figuur 2.13)
4. Gelede hefschuiven of rolluiken, die in geopende stand in ruimten onder de verkeersweg kunnen worden opgeborgen (figuur 2.14)



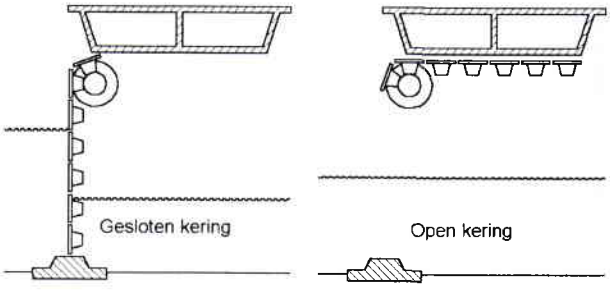
Figuur 2.11 Hevel



Figuur 2.12 Betonnen cilinder



Figuur 2.13 Drijvende hefschuiven



Figuur 2.14 Gelede hefschuif of rolluik

Onder de alternatieven in groep 3 zijn zeer verrassende ideeën ingebracht, die sterk afwijken van de uiteindelijk gekozen oplossing. Dat deze ideeën uiteindelijk niet verder zijn uitgewerkt, is voornamelijk het gevolg van de grote tijdsdruk die in de studiefase aanwezig was, hierdoor zijn alternatieven waarvoor problemen werden gevreesd, zonder dat er een oplossing bij de hand was, afgeschreven. In het kort worden hier de belangrijkste karakteristieken van de oplossingen uit groep 3 toegelicht.

Onderzocht is ondermeer een hevel (figuur 2.11). De gebruikszekerheid daarvan is groot, aangezien afsluitmiddelen ontbreken en de constructie ook verder zeer beperkte mechanische voorzieningen vereist. Maar met deze constructie bleek het niet mogelijk voldoende doorstroomopening te creëren. Bovendien werd gevreesd dat de hevel bij extreem hoog water toch weer zou aanslaan en als doorlaatmiddel zou gaan functioneren.

Een aardig idee, dat ook tot grote overspanningen gebouwd zou kunnen worden, betrof een betonnen cilinder als afsluitmiddel (figuur 2.12). De cilindervormige afsluiter huist in normale gevallen in de bodem van een caisson en is gevuld met water. Bij stormvloed wordt het water eruit gepompt en wordt de cilinder met behulp van een kabel langs een getande helling omhoog getrokken. De constructieve en uitvoeringtechnische problemen die werden voorzien, leidden ertoe dat dit idee verder niet is uitgewerkt.

Andere ontwerpen hadden betonnen kokerschuiven als afsluitmiddel (figuur 2.12 en 2.13a). De kokers konden hierbij allerlei vormen hebben (rechthoekig, trapeziumvormig, cilindrisch). Er bestond zorg over de grootte van de uit te oefenen krachten, zodat voorstellen werden gedaan om dit soort kokerschuiven uit te voeren als balans of als drijver. Door uitpompen van water zou de koker gaan drijven en zou dan de doorstroomopening afsluiten. Vanwege de zorg om de beheersbaarheid van dergelijke grote, drijvende lichamen is ook dit idee niet verder uitgewerkt. Iets dergelijks geldt ook voor het idee van de vingerdeuren (figuur 2.13b). Deuren die normaal in een diepe put liggen verzonken en die door uitpompen van water drijvend worden gemaakt, zodat de afsluiting tot stand komt.

2.3.2 Roosterschuiven

Een roosterschuif bestaat uit een vast en een beweegbaar rooster (figuur 2.5). Het beweegbare rooster hangt vóór het vaste rooster. In geopende toestand liggen de openingen en de dichte gedeelten van de beide roosters precies achter elkaar. Om de constructie te sluiten wordt het beweegbare rooster over een kleine afstand verschoven totdat de dichte gedeelten ervan de openingen van het vaste rooster afsluiten. Roosterschuiven leveren door hun vorm een goede afvoer- en stroomverdeling op. Een belangrijk voordeel is verder dat voor het openen of sluiten van de schuiven slechts een kleine verticale verplaatsing, ter grootte van één roosterbalk, nodig is. Roosterschuiven zijn alleen toepasbaar bij beperkte overspanningen t.o.v. de hoogte van de roosterbalken (spleetoplossing). Ze zijn dus typisch geschikt voor toepassing bij een caissonoplossing. Aan de roosterschuiven is hydraulisch onderzoek verricht door het Waterloopkundig Laboratorium, in samenwerking met het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium en het Nederlands Scheepsbouwkundig Proefstation (thans MARIN).

De proeven hebben aangetoond dat met volledig geopende schuiven een goede afvoer verkregen kan worden. Reeds geringe aangroei van zoutwaterorganismen heeft echter een sterk negatieve invloed op de afvoercoëfficiënt. Dit was de belangrijkste reden om deze variant niet verder uit te werken. Het onderzoek heeft verder aangetoond dat in stromend water grotere krachten op elk afzonderlijk rooster ontstaan dan aanvankelijk was voorzien. De zuigkrachten die tijdens het bewegen op de schuif als geheel worden uitgeoefend, bleken daarentegen kleiner te zijn dan was geschat. Uit proeven ter bepaling van de trillingsgevoeligheid van roosterschuiven blijkt dat men dienaangaande goede resultaten kan verkrijgen door de roosters onderling te koppelen. Een bevestiging van deze resultaten in een proef op grote schaal heeft niet meer plaatsgevonden.

2.3.3 Tolkleppen

Het afsluiten van kleine waterstromen geschiedt in veel gevallen met vlinderkleppen. Een afgeleide vorm daarvan is de tolklep (figuur 2.7). Hele series tolkleppen, draaiend om vertikale assen in een vertikaal geplaatst raamwerk in een caisson of tussen pijlers, zouden een fraaie doorlaat geven met een goede afvoercoëfficiënt, alsmede een degelijke sluiting in stormvloedomstandigheden. De constructie bleek echter erg gevoelig voor belastingen tijdens openen en sluiten, hetgeen tot onaantrekkelijk zware constructies van de aandrijvingen zou leiden.

Waarschijnlijk zou ook de gevoeligheid van de afvoercoëfficiënt voor aangroeiing, net als bij de roosterschuiven, uiteindelijk tot een negatief oordeel over dit type kering hebben geleid. De studie naar dit type afsluitmiddel is dan ook gestaakt op grond van het aspect kwetsbaarheid.

2.3.4 Hefschuiven

Hefschuiven worden veelal uitgerust met wielen voor de geleiding (figuur 2.8). De beweegkrachten onder verval zijn dan relatief klein door de geringe rollende wrijving. Wielgeleidingen kunnen echter maar beperkte krachten per wiel dragen en vereisen voor grote krachten een zware railconstructie en daarmee zeer ruim bemeten sponningen. Als men wil voorkomen dat de wielen ook de vervalkrachten moeten overdragen in stormvloedsituaties, moet bovendien een afdrukinrichting worden aangebracht. Een dergelijke inrichting maakt dat de wielen in de gesloten toestand van de schuif vrij zijn van de rail en dat de vervalkrachten op de schuif via bv. grote zadels naar de pijlers worden overgedragen. Bij toepassing van wielen moet er ook voor worden gezorgd dat deze draaibaar blijven; in een zoutwater milieu is dat vaak een probleem, met name als de wielen zelden draaien.

Een oplossing is de schuiven als glijschuif uit te voeren. Er ontstaat dan een veel goedkopere en minder onderhoudsgevoelige constructie. De grotere wrijvings-krachten bij bewegen onder verval moeten dan voor lief genomen worden. Gewoonlijk zijn hefschuiven van hout (kleine schuiven) of staal. Met stalen schuiven bestaat een uitgebreide ervaring.

Onderzocht is of het ook mogelijk was de hefschuiven uit te voeren in beton in plaats van staal. De zuigkrachten op de betonnen schuiven bleken niet groot te zijn; wèl kwam tijdens de proeven naar voren dat de vormgeving van de betonnen schuiven aanleiding kan geven tot trillingen van de gehele schuif. Eenvoudige wijzigingen in de vormgeving van de schuiven zouden deze trillingen waarschijnlijk kunnen voorkomen, maar zijn niet verder onderzocht. Door haar vormgeving biedt deze schuif een glad oppervlak aan zeezijde, waardoor ze weinig gevoelig is voor golfklappen. De schuif is verhoudingsgewijs veel stijver dan een stalen schuif, waardoor ze wèl voor een caissonoplossing in aanmerking zou komen, maar minder voor een pijleroplossing.

2.4 Keuze schuiven

Het zal niet verbazen dat op grond van de voorgaande beschouwingen gekozen is voor stalen hefschuiven als afdichtingsmiddel in de stormvloedkering (figuur 2.6). De geleiding van de schuif wordt verzorgd door aanslagen op de schuif en glijplaten in de pijlersponning. Bovendien bleek de keuze voor een glijdende hefschuif te leiden tot de goedkoopste oplossing, al waren de verschillen niet groot. De keuze paste ook goed bij de beslissing te kiezen voor een pijler-oplossing, omdat schuiven zich lenen voor grote overspanningen, dus relatief kleine aantallen pijlers.

Sterkte en stijfheid van de stalen hefschuif worden verkregen door plaat- of door vakwerkliggers. Bij proeven met de plaatliggers bleek dat golven het grote oppervlak ervan zeer zwaar belasten. De liggers zijn daarom uitgevoerd als vakwerkliggers bestaande uit ronde buizen, die het door golven te raken oppervlak tot een minimum beperken en een gunstige hydraulische vormgeving hebben.

2.5 Keuze bewegingswerken

Als aandrijfsysteem van zowel roosterschuiven als glijschuiven en tolkleppen is steeds gesproken over een hydraulisch bewegingsmechanisme. Voor roosterschuiven en tolkleppen is dit vanzelfsprekend: er is sprake van een relatief korte af te leggen weg (1 à 2 meter) en een grote kracht. Een aandrijving met korte slag hydraulische cilinders is daarvoor de aangewezen oplossing; mechanische aandrijvingen met tandheugels of schroefspindels kunnen daar qua kosten niet mee concureren.

Oplossingen met lierwerken komen niet in aanmerking, omdat reeds in een vroeg stadium duidelijk was dat de roosterschuiven niet alleen omhoog getrokken moeten kunnen worden om te openen, maar ook omlaag gedrukt zullen moeten kunnen worden om te sluiten. Slechts met een ingewikkeld stelsel van omloopschijven zou zo'n beweging met lierwerken te realiseren zijn.

De Blauwe Nota [7] geeft aan dat voor de aandrijving de keuze is gevallen op een hydraulisch bewegingswerk met lange slag. De in de Blauwe Nota genoemde kosten hebben dan ook betrekking op een dergelijke aandrijving. Dat het laatste woord over het meest gewenste type schuifaandrijving toen nog niet was gezegd, zou later blijken.

2.6 Beslissen, bedienen, besturen en bewaken

Inzicht over de wijze waarop de beslissingen m.b.t. het beheer (met name sluiten en openen) van de kering tot stand moeten komen, ontstaat pas later, voornamelijk in de BARCON-studie [3]. In de visie van de opstellers van de Blauwe Nota is de elektrische installatie geheel volgend t.o.v. de eisen die uit andere hoofde aan de kering worden gesteld. De bediening en de bewaking van de schuifstanden is van meet af aan centraal gedacht en de besturing lokaal per schuif.

Voor de energievoorziening wordt in de Blauwe Nota nog uitgegaan van het plaatsen van één dieselaggregaat in de kering per drie schuiven, waarbij het aggregaat op afstand gestart wordt met behulp van een accu. Daarnaast is er voor de centrale bediening en bewaking eveneens een eigen energiebron voorzien.

2.7 Enkele en dubbele schuiven

In de Blauwe Nota wordt uitgebreid aandacht besteed aan de keuze tussen enkele en dubbele schuiven. Voor het ontwerp van de schuiven maakt een dergelijke keuze in principe niets uit: het aantal wordt eenvoudig verdubbeld. De pijlers worden bij toepassing van dubbele schuiven omvangrijker. Het toepassen van enkele schuiven betekent dat hogere eisen worden gesteld aan de bedrijfszekerheid van de bewegingswerken en bijbehorende installaties. In de Blauwe Nota wordt dit verband nog niet onderkend; wèl wordt opgemerkt dat bij het toepassen van enkele schuiven de standzekerheid van de kering en de waterstand op het Oosterscheldebekken niet in gevaar komen bij het weigeren van één of enkele schuiven. Van de eventuele aantasting van de bodembescherming als gevolg van het weigeren van één enkele schuif wordt gesteld dat deze problematiek oplosbaar wordt geacht.

De aanbeveling van de Blauwe Nota is de kering uit te rusten met enkele schuiven, maar de pijlers wèl te voorzien van dubbele sponningen, zodat de mogelijkheid wordt opengelaten later alsnog een tweede stel schuiven aan te brengen, indien de inzichten zouden wijzigen. Pas na 1976 wordt de golfklapproblematiek van schuifconstructies in zee ten volle duidelijk en blijkt zelfs het hebben van voorzieningen voor tweede schuiven ongunstiger dan de tweede schuiven en hun voorzieningen geheel weg te laten.

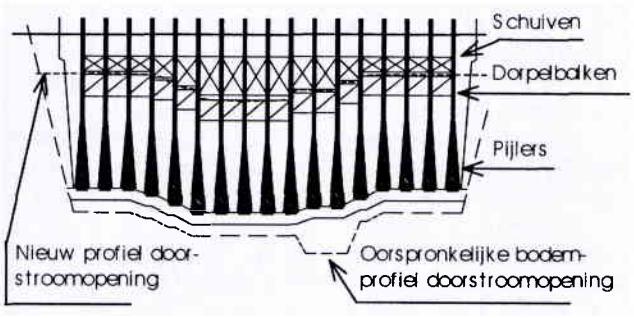
3. Het ontwerp van de stormvloedkering

3.1 Samenvattende beschrijving

In het vorige hoofdstuk zijn de relaties tussen het ontwerp van de sluitingsmiddelen en het ontwerp van de stormvloedkering als geheel reeds schetsmatig aangegeven. In de volgende deelnota's zal dit nog verder aan de orde komen. Voor een beter begrip hiervan, wordt hierna een korte samenvatting gegeven van de totale constructie van de kering, min of meer toegespitst op de sluitingsmiddelen.

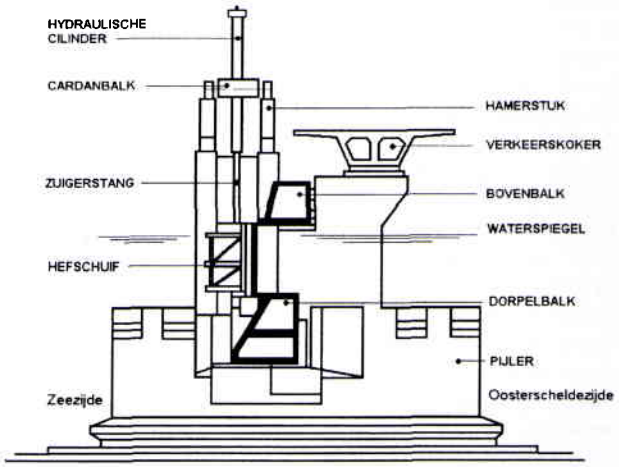
In hoofdzaak bestaat de stormvloedkering uit een vast (permanent waterkerend) deel en een afsluitbaar deel. Het permanent waterkerende deel omvat de damvakken op de eilanden Roggeplaat en Neeltje Jans, de damaanzetten vanaf deze damvakken en de oevers van Schouwen en Noord-Beveland, alsmede de Roompotsluis.
Het afsluitbare deel, de stormvloedkering in engere zin, is verdeeld over drie sluitgaten in de stroomgeulen Hammen, Schaar van Roggenplaat en Roompot. Het afsluitbare deel heeft een bruto doorstroomprofiel van ca. 18.000 m^2 beneden N.A.P. (zie [1] deelnota 1.1, hoofdstuk 3). Gegeven de vormgeving van de doorstroomopeningen in het afsluitbare deel, resulteert dat in een netto doorstroom-opening van 14.400 m^2 beneden N.A.P.

Elk sluitgat wordt door pijlers onderverdeeld in doorstroomopeningen met een dagmaat van nominaal 39,5 m. De doorstroomopeningen volgen de bodemlijn van de sluitgaten (figuur 3.1). Zo bedraagt het aantal doorstroomopeningen in de Hammen 15, de Schaar van Roggenplaat 16 en de Roompot 31.



Figuur 3.1 Profiel doorstroomopeningen in een sluitgat

De vaste constructies in de sluitgaten bestaan uit een met stortsteen opgebouwde drempel, waarin de voet van de afzonderlijk gefundeerde pijlers is opgenomen, met daarboven een betonnen raamwerk, opgebouwd uit de pijlerschachten, dorpelbalken en bovenbalken (figuur 3.2). De openingen in het raamwerk kunnen door stalen schuiven met hun bewegingswerken worden afgesloten; in dat geval vormen de pijlers, boven- en dorpelbalken en schuiven de waterkering in de sluitgaten.



Figuur 3.2 Onderdelen van de kering

Over de pijlers loopt nog een verkeersbrug, bestaande uit betonnen kokers met uitkragingen (verkeerskokers).
De pijlers en de dorpelbalken rusten op een funderingsbed bestaande uit geprefabriceerde filtermatten op een kunstmatig verbeterde en verdichte ondergrond van zand.

Hiermee bestaat het afsluitbare deel van de kering uit:
- Een systeem van passieve onderdelen, waaraan hoofdzakelijk eisen worden gesteld met betrekking tot sterkte, vorm en levensduur,
- Een systeem van actieve onderdelen, waaraan naast eisen betreffende vorm en sterkte, ook eisen worden gesteld die betrekking hebben op bedrijfszekerheid en bediening.

De passieve, betonnen onderdelen zijn alle afzonderlijk geprefabriceerd. Het betreft de volgende onderdelen:
- De pijlers die de draagconstructie vormen van het afsluitbare deel van de kering (met uitzondering van de drempel), en waarvan de schachten zijn voorzien van sponningen voor de geleiding van de schuiven en voor het opnemen van de reactiekrachten van de schuiven;
- De dorpelbalken en bovenbalken, die met opleggingen (die een zekere flexibiliteit toelaten) op de pijlers rusten; pijlers, dorpelbalken en bovenbalken vormen samen de bovengenoemde raamwerken die de individuele doorstroomopeningen begrenzen;
- De hamerstukken die met een starre verbinding op de pijlerschachten zijn gemonteerd en die worden benut als steunpunt voor de hydraulische cilinders waarmee de schuiven kunnen worden bewogen;
- De verkeerskokers, flexibel rustend op de pijlers, die voor de wegverbinding over het afsluitbare deel van de kering zorgen;

het inwendige van de verkeerskokers wordt benut voor het onderbrengen van de hydraulische en een deel van de electrische installaties, alsmede voor doorgaande leidingen van allerlei aard. Het inwendige van de verkeerskokers biedt een beschermde toegangkelijkheid tot veel essentiële onderdelen van de kering, ook onder zeer slechte weersomstandigheden.

De hoogte van de waterkering in de drie stroomgeulen wordt bepaald door de bovenkant van de bovenbalken. In de stroomgeulen Schaar en Roompot ligt deze bovenkant nominaal op N.A.P.+5,80 m, in de stroomgeul Hammen op N.A.P.+5,60 m. Wanneer de schuiven gesloten zijn, is in de stroomgeulen een gesloten front van de Oosterscheldebodem via drempel, dorpelbalken, schuiven en bovenbalken tot N.A.P.+5,80 m, resp. N.A.P. +5,60 m aanwezig.

De onderkant van de bovenbalken vormt de bovenbegrenzing van de doorstroomopening van de kering en ligt nominaal op N.A.P.+ 1,00 m in Schaar en Roompot en op N.A.P.+0,80 m in de Hammen. Als gevolg van de keuze van de hoogtemaat van dit vaste deel van de kering behoeft de onderzijde van de schuiven in principe niet hoger geheven te kunnen worden dan tot N.A.P.+1,00 m, resp. N.A.P.+0,80 m.

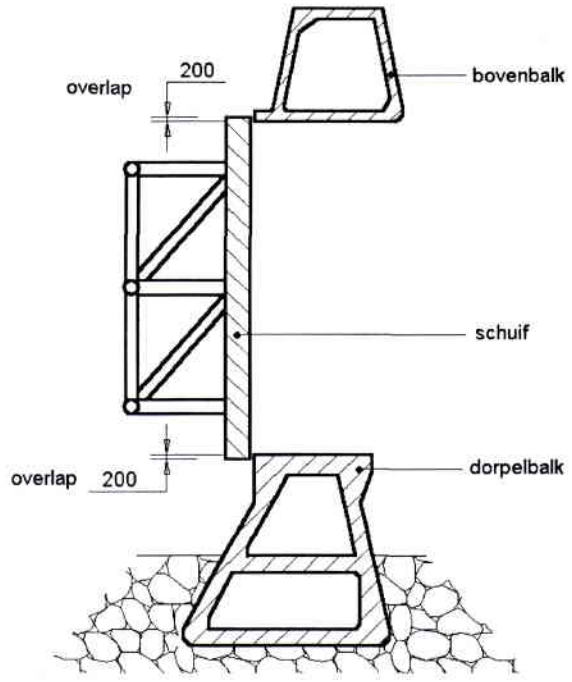
Teneinde het oorspronkelijke stroombeeld in de drie stroomgeulen zo goed mogelijk te handhaven, zijn twee maatregelen genomen:

- Het bruto-doorstroomprofiel van 18.000 m^2 onder N.A.P. is zodanig over de drie delen van de afsluitbare kering verdeeld dat de onderlinge verhouding van de drie debieten ongeveer gelijk is gebleven;
- De diepte van de doorstroomopeningen in de kering volgt zo goed mogelijk het oorspronkelijke bodemprofiel in elk van de stroomgeulen; op plaatsen waar de stroomgeulen diep zijn, reiken ook de doorstroomopeningen dieper.

De diepte van de doorstroomopeningen varieert dus met de plaats in de stroomgeulen. De diepte wordt bepaald door de diepteligging van de dorpelbalken. Zo varieert de nominale peilmaat van de bovenkant van de dorpelbalken van N.A.P.-4,50 m aan de rand van de sluitgaten, in stappen van 1 m, tot -10,50 m in het midden van de Roompot . De hoogte van de doorstroomopeningen varieert hiermee dus van 5,50 m tot 11,50 m.

De diepste openingen in het afsluitbare deel van de kering in de stroomgeul Schaar reiken tot N.A.P.-7,50 m. De diepste openingen in de kering in de Hammen zouden oorspronkelijk reiken tot N.A.P.-8,50 m. Tijdens de uitvoering van het werk is echter besloten om alle peilmaten voor de kering in de stroomgeul Hammen met 0,20 m te verlagen, waardoor de kerende hoogte daar op N.A.P.+5,60 m ligt en de onderkant van de bovenbalken op N.A.P.+0,80 m (zie [1] deelnota 1.1,par. 3.2). De bovenkant van de dorpelbalken varieert daar in stappen van 1 meter van N.A.P.-4,70 m tot N.A.P.-8,70 m (zie [1], deelnota 1.1, par. 3.2 en [2], deelnota 2.6, par. 7.7). Op het ontwerp van de sluitingsmiddelen heeft deze wijziging echter geen invloed gehad.

De gesloten schuiven overlappen in verticale zin de randen van de dorpelbalken en de bovenbalken met 0,20 m. Elke schuif is derhalve 0,40 m groter dan de doorstroomopening die ze afsluit (figuur 3.3). Opdat de schuiven vóór de balken langs kunnen bewegen, blijven ze in horizontale zin daarvan vrij. De afdichting van de schuiven is dus niet absoluut, hetgeen aanvaardbaar is omdat het bekken van de Oosterschelde bij gesloten kering een zekere buffercapaciteit heeft voor lekkage.



Figuur 3.3 Verticale overlap schuiven

In totaal bestaan de drie afsluitbare delen van de kering in de drie stroomgeulen uit 62 doorstroomopeningen. Voor het vervullen van de kerende functie van de afsluitbare kering wordt elk van deze doorstroomopeningen afgesloten gehouden met behulp van een hydraulisch aangedreven schuif. De gesloten stand van elke schuif wordt continu bewaakt.

Voor het vervullen van de doorlaatfunctie wordt de schuif van elke doorstroomopening geheven gehouden met het hydraulische bewegingssysteem. De geheven stand wordt continu bewaakt. Afwijkingen van de geopende stand worden automatisch gecorrigeerd, zolang ze zich binnen vooraf gestelde grenzen bevinden. Calamiteuze afwijkingen worden naar de centrale bediening doorgegeven, vanwaar bijzondere, corrigerende maatregelen kunnen worden getroffen. Voor het vervullen van de transformatiefunctie van de afsluitbare kering worden de schuiven gesloten dan wel geopend met behulp van het hydraulische bewegingssysteem. De bediening daarvan geschiedt in principe centraal. Lokale bediening is mogelijk. Tijdens de beweging wordt de werking van het bewegingssysteem bewaakt; afwijkingen binnen vooraf gestelde grenzen worden automatisch gecorrigeerd. De stand van alle schuiven wordt centraal bewaakt. Het besturingssysteem voor het bewegen van de schuiven is lokaal.

Elke schuif is uitgevoerd als een vertikaal bewegende glijschuif. In de sponningen van de twee belendende pijlerschachten zijn aluminium-bronzen schuifgeleidingen aangebracht. De schuif glijdt met schuifaanslagen hierlangs. De krachten ten gevolge van wind, waterstandverschillen en golven worden via deze aanslagen en geleidingen aan de pijlers overgedragen en zo naar de fundering afgevoerd. Scheef inlopende golven zouden de schuif dwars op de stroomrichting van het water kunnen bewegen; de krachten die daarvan het gevolg zijn kunnen met schuifaanslagen op de kopse einden van de schuif naar een derde schuifgeleiding op het lijf van elke pijlerschacht worden afgevoerd.

De schuiven zijn aangebracht aan de zeezijde van de bovenbalk en de dorpelbalk. Ten behoeve van de waterkerende functie zijn

schuiven voorzien van een schaalvormige beplating aan de Oosterscheldezijde. Het draagsysteem moest om bouwtechnische redenen aan Noordzeezijde worden aangebracht. Het is daar gevoelig voor golfklappen, met name i.v.m. de eis van vrijheid van beheer (onder relatief ruwe zee-omstandigheden moet nog gesloten kunnen worden). Teneinde de gevoeligheid voor golfklappen zo klein mogelijk te houden is het hoofddraagsysteem uitgevoerd als vakwerkligger opgebouwd uit ronde buizen, en niet als plaatligger.

Als bewegingssysteem is voor elke schuif gekozen voor twee hydraulische cilinders, scharnierend verbonden aan de schuifuiteinden en met een cardanconstructie bevestigd op de hamerstukken op de pijlerschachten. De cilinders zijn in staat de schuif omlaag te drukken (ook bij alarmpeil-sluitingen), ze gesloten te houden, te openen en geopend te houden. De hydraulische aggregaten voor de cilinders zijn in aparte containers ondergebracht in de verkeerskoker. Via hydraulische leidingen wordt vanaf de aggregaten olie onder druk naar de cilinders gevoerd of van de cilinders afgevoerd.

Aangezien de twee cilinders van een schuif geheel onafhankelijk van elkaar worden bestuurd, is een gelijkloopinstallatie aangebracht, die de stand van de twee schuifuiteinden meet en vergelijkt. Bij afwijkingen tussen vooraf gestelde grenzen wordt gecorrigeerd. De cilinders zijn vanuit de verkeerskoker bereikbaar via bordessen en trappen die op de hamerstukken en tussen hamerstukken en verkeerskoker zijn aangebracht.

De energie voor het bewegen van de schuiven wordt onttrokken aan een 10 kV distributiesysteem dat over de hele lengte van de stormvloedkering is aangebracht. Op de eilanden Roggeplaat en Neeltje Jans zijn grondkabels aanwezig en ter plaatse van de drie stroomgeulen van de kering is het distributienet in de verkeerskokers aangebracht. Transformator- en schakelstations in de verkeerskokers zorgen voor distributie van een werkspanning van 380V naar de hydraulische aggregaten.

De energie wordt opgewekt in een tweetal centrales met diesel-generatoren in het centraal bedieningsgebouw (Topshuis). Daarnaast is een aansluiting op het openbare elektriciteitsnet aanwezig met een vermogen waarmee één schuif tegelijk kan worden bewogen (onderhoud).
De besturing van de hydraulische aggregaten voor het bewegen en geopend of gesloten houden van de schuiven geschiedt lokaal. Ook de bewaking, waarvoor de signalen via de gelijkloopinstallatie binnen komen, vindt lokaal plaats. De schuifstand zelf wordt naar de centrale bediening doorgegeven t.b.v. het beheer van de kering. Ook indien een schuif weigert te sluiten, wordt dit doorgegeven naar de centrale bediening, van waaruit corrigerende maatregelen kunnen worden genomen. Indien de schuif weigert te sluiten als gevolg van een storing in een hydraulisch aggregaat, kan lokaal worden overgeschakeld op het naastgelegen aggregaat.

Indien vanuit de centrale bediening geen sluitproces in gang wordt gezet wanneer het alarmpeil is bereikt, sluit de kering automatisch met behulp van het centraal aangebracht noodsluitsysteem. Via autonome verbindingen worden daartoe enkele waterstanden op zee in het Topshuis gesignaleerd.

3.2 Maattoleranties en vervormingen

Omdat gekozen is voor een fundering op staal en een constructiewijze is gevolgd waarbij geprefabriceerde elementen in situ worden samengebouwd, mocht er niet op worden gerekend dat het samenstel van pijlers, dorpelbalken en bovenbalken geheel maatvast is en blijft. (Zie [1], deelnota 1.2, hoofdstuk 5).

Rekening moest worden gehouden met:
- Verschillende maatafwijkingen tijdens de bouw, vooral de plaatsingsnauwkeurigheid van de pijlers en vlakheid van het funderingsbed, resulterend in een mogelijke variatie in de positie van de pijlers onderling en afwijkingen van de vertikale stand van de afzonderlijke pijlers;
- Mogelijke zettingen en elastische vervormingen van de fundering tijdens de levensduur van de kering.

Van alle mogelijke maatafwijkingen is een studie gemaakt, waarvan de resultaten zijn vastgelegd in de zogenaamde tolerantie-nota's [4], [5] en [6]. Daarin zijn tolerantie-eisen gesteld aan de verschillende onderdelen van de kering, waaraan bij de uitvoering moest worden voldaan, uitgedrukt in een toelaatbare gemiddelde afwijking en een spreiding.

Deze mogelijke maatafwijkingen hebben ook consequenties gehad voor het ontwerp en de fabrikage van de sluitingsmiddelen, met name voor de maatvoering en constructie van de schuiven en de breedte van de schuifgeleidingen, alsmede voor de wijze van ondersteuning van de hydraulische cilinders van de bewegingswerken.

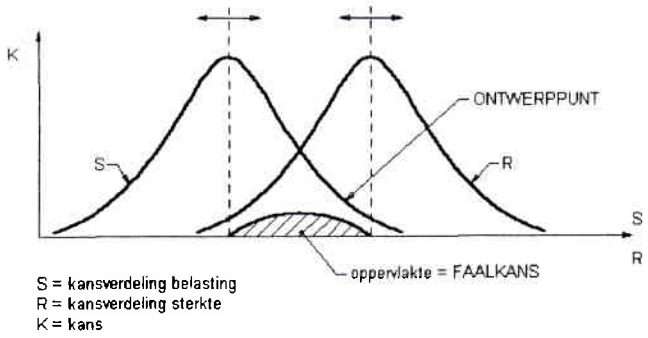
In [1], deelnota 1.2, ontwerpfilosofie, par 1.1 is reeds aangegeven hoe er in het ontwerp van de kering is gestreefd naar een zo flexibel mogelijk ontwerp, waarbij parallele processtromen mogelijk zouden zijn. Zo maakte de lange bouwtijd van de schuiven het nodig met de fabrikage te beginnen, vóórdat de pijlers, waartussen de schuiven zouden worden gemonteerd, waren geplaatst. In het ontwerp moest er daarom rekening mee worden gehouden dat de schuiven in een laat stadium alsnog "passend" gemaakt moesten kunnen worden.

3.3 Veiligheidsfilosofie

De sluitingsmiddelen spelen een belangrijke rol in de veiligheid van de stormvloedkering. Zie [1], deelnota 1.2, ontwerpfilosofie, hoofdstuk 3 veiligheidsanalyse, pag 92 e.v. Daarbij is sprake van een aantal principieel verschillende gebeurtenissen die de veiligheid van de stormvloedkering op enigerlei wijze kunnen beïnvloeden:
1. De schuiven, als elementen met een waterkerende functie, bezwijken
2. De schuiven kunnen niet (tijdig) worden gesloten
3. De schuiven kunnen niet (tijdig) worden geopend

De gevallen 1 en 2 kunnen leiden tot een te groot debiet door de stormvloedkering en daarmee tot mogelijkerwijs te hoge waterstanden op het Oosterscheldebekken. Geval 3 kan ertoe leiden dat de waterstand op het Oosterscheldebekken langer stagnant blijft dan goed is voor het milieu. In geval 1 gaat het om een ontwerpproces dat in het algemeen kan worden gekarakteriseerd door:
- belastingaannamen
- sterkteberekeningen (modellering van het krachtenverloop)
- aannamen van materiaaleigenschappen.

Dit ontwerpproces moet met voldoende zekerheden (veiligheidscoëfficiënten) worden omringd om tot de vereiste faalkans te leiden. Voor de schuiven, de andere maatgevende staalconstructies en de hydraulische cilinders is daartoe de berekening op een semi-probabilistische wijze uitgevoerd. Daarbij wordt gerekend met een karakteristieke waarde van de belasting S_k en een karakteristieke



Figuur 3.4 Semi-probabilistische ontwerpmethode

waarde van de sterkte R_k (figuur 3.4). Een veiligheidscoëfficiënt γ met een voorgeschreven waarde zorgt voor voldoende afstand tussen sterkte en belasting.

In de gevallen 2 en 3 gaat het vooral om bedrijfszekerheidsaspecten in het ontwerp van het bewegingsysteem van de schuiven en de betrouwbaarheid van de menselijke organisatie die dit systeem in werking moet stellen. Daarbij valt onder bewegingsysteem te denken aan de bewegingswerken van de schuiven, de energievoorziening en de besturinginstallatie.

Bij het optreden van een storing in het hydraulische bewegingswerk (een cilinder of het hydraulische pomp- en leidingensysteem) weigert één schuif te bewegen. Het weigeren van een tweede schuif is weer een geheel onafhankelijke gebeurtenis. Valt de besturing van een individuele schuif uit, dan geldt daarvoor hetzelfde. Valt echter de energievoorziening, de centrale besturing of de bediening uit, dan kunnen daardoor grotere aantallen schuiven tegelijk en, in een ongunstig geval, alle schuiven in een sluitgat of zelfs in alle drie sluitgaten weigeren te openen of te sluiten.

Naar de gevolgen van het weigeren van één of meer schuiven is uitgebreid onderzoek gedaan. Vanwege het bergend vermogen van het Oosterscheldebekken blijkt het niet-sluiten van vier of minder schuiven in stormvloedsituaties niet maatgevend. Wél kan het weigeren van één enkele schuif negatieve gevolgen hebben voor de bodembescherming, aangezien, bij grote waterstandsverschillen over de kering, een sterk geconcentreerde stroomaanval door de enkele doorstroomopening op de bodem achter de kering kan optreden. Als zodanig is ook het weigeren van één enkele schuif een ongewenste gebeurtenis. Aan de kans op het weigeren van één of meer schuiven zijn dan ook beperkende eisen gesteld in de vorm van maximaal toelaatbare faalkansen. Daarmee werd voor de elementen van het bewegingsysteem een zuiver probabilistische ontwerpbenadering geïnitieerd.

3.4 Beheer en onderhoud

Beheer, bewaking en onderhoud van de kering is behandeld in [1] (deelnota 1.5, p. 221 e.v.).

3.4.1 Beheer

Beheer onder normale omstandigheden
Onder normale omstandigheden is het beheer gericht op het instandhouden van de kering. Om dit te bereiken wordt onderhoud uitgevoerd (zie 3.4.5).

Beheer bij stormvloedsituaties
De kering kan in beginsel worden gesloten wanneer een bepaalde gemeten waterstand (meting van alarmpeil) overschreden wordt, of wanneer verwacht wordt dat een andere waterstand overschreden zal worden (voorspelling van overschrijden sluitpeil).

- Meting van **alarmpeil**. Indien het alarmpeil aan de buitenzijde van de kering daadwerkelijk wordt overschreden sluit de kering automatisch (sluitautomaat) en ontstaat op de Oosterschelde een waterstand die ongeveer gelijk is aan de hoogte van het alarmpeil.
- Voorspelling van overschrijden **sluitpeil**. Het sluitpeil zal lager zijn dan het alarmpeil. Een voorspelling is in het algemeen ca. 12 uur voor de vloed beschikbaar. In het geval dat voorspeld wordt dat het sluitpeil zal worden overschreden wordt de kering door bedienend personeel gesloten. In beginsel kunnen dan op de Oosterschelde nog verschillende, min of meer vaste, peilen worden ingesteld. Deze strategie wordt **sluiten op binnenpeil** genoemd. Als het voorspelsysteem faalt dient de sluitautomaat, ingesteld op het alarmpeil, als noodsluitsysteem (NSS).

Bij een meertopstorm is het mogelijk de stormvloedkering na het eerste en het tweede hoogwater te openen en voor het volgende hoogwater weer te sluiten, opdat een nieuw lager binnenpeil wordt gerealiseerd. Deze gebruikswijze wordt de **wisselstrategie** genoemd. De kering kan op grond van een voorspelde waterstand in beginsel ook gedeeltelijk worden gesloten. Het moment waarop met de sluiting wordt begonnen en de grootte van de resterende opening bepalen dan het verloop van de binnenwaterstand. Deze gebruikswijze wordt de **reductorstrategie** genoemd. Gezien vanuit de constructie van de kering en beheerstechnisch oogpunt zijn aan deze strategie echter aanzienlijke bezwaren verbonden, omdat de kans op fouten in de bediening en in het besturingsysteem worden vergroot. Op grond hiervan is de reductorstrategie, voor wat betreft stormvloedsituaties, niet verder in de beschouwingen betrokken. Voor het nevengebruik van de stormvloedkering kan deze strategie in beginsel wel worden gehanteerd.

Gebruik voor nevendoeleinden
Naar de mogelijkheden tot het gebruik van de sluitingsmiddelen buiten stormvloedsituaties is een onderzoek verricht. Op grond van een analyse van de mogelijkheden blijkt sluiting van de kering effectief te zijn wanneer hierdoor:

- De gevolgen van dijkval en opgetreden stormschade beperkt kunnen worden;
- De bestrijding van olievervuiling efficiënter ter hand kan worden genomen;
- Ernstige schade aan dijken ten gevolge van drijfijs kan worden voorkomen.

3.4.2 Het bedien- en het beslissysteem

Er wordt onderscheid gemaakt tussen het bedienen van de kering en het beslissen over keringsoperaties.

Bedieningsysteem
De bediening van de sluitingsmiddelen zal in stormsituaties plaatsvinden vanuit het centrale bedieningsgebouw van de kering. De bediening loopt via de Centrale Computer Configuratie (CCC). Daarbij bedient een operator de CCC. Met behulp van deze CCC kunnen via een datanet signalen worden verzonden naar de Lokale Computer Configuratie (LCC of lokale besturing) van elk van de 62 schuiven. Met dat signaal stuurt de LCC de schuif naar geheel of gedeeltelijk gesloten of geopende stand. De schuiven kunnen individueel naar willekeurige posities worden gestuurd.

Hiervan vindt terugmelding plaats (actie gerealiseerd, schuif weigert, etc.).

Bediening kan ook plaatsvinden via de zogenaamde "veilige bediening". Daarbij bedient een operator de "veilige bediening" die, buiten de CCC om, direct op de lokale besturingen van de schuiven werkt. Hiermee kunnen de schuiven uitsluitend simultaan voor een beweging naar beneden of naar boven gestart of gestopt worden.

Het geheel van bedieningspersoneel, CCC, datanet en lokale besturingseenheden wordt aangeduidt als "bedieningsysteem". Het bedieningsysteem voert opdrachten van de "beslisser" tot sluiten/openen van de kering uit. Het bedieningsysteem heeft bij falen van de operator een reserve in de vorm van een sluitautomaat (Noodsluitsysteem of NSS).

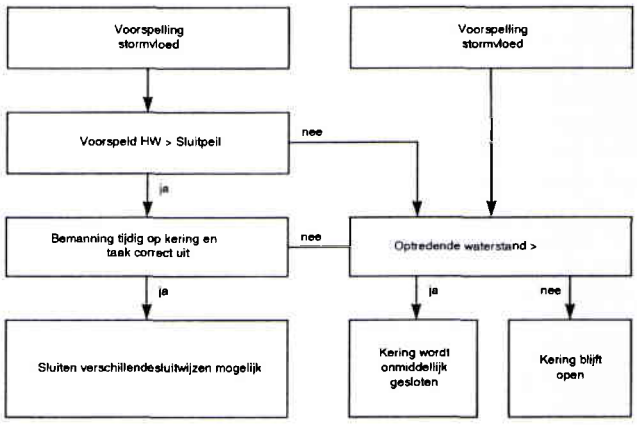
Beslissysteem
De basisopzet van het beslissysteem voorziet in de integratie van een primair en een secundair systeem (figuur 3.5). In het primair systeem beslist de operator op grond van voorspelde waterstanden. In het secundair systeem, het Noodsluitsysteem (NSS), beslist een automaat op basis van gemeten, dus actuele, waterstanden.

Het primaire beslissysteem.
Het beslissen zal evenals de bediening van de sluitingsmiddelen in stormsituaties plaatsvinden vanuit het centrale bedieningsgebouw van de kering. Het (automatisch) oproepbare beslisteam wordt ondersteund door een gecomputeriseerd Beslissimulatiesysteem (BSS) met betrekking tot:
- De presentatie van, voor de beslissing relevante, actuele gegevens uit de omgeving;
- De beslissing over het al dan niet sluiten en, in het geval van sluiten, de keuze van de sluitstrategie;
- Het volgen en bewaken van de acties die voortkomen uit de genomen beslissing.

Het BSS heeft een vaste verbinding met:
- De leveranciers van waterstandvoorspellingen, het KNMI en de SVSD;
- De leverancier van storingsmeldingen van de kering, het bewakingsysteem.

Naast het beslisteam wordt ook ander benodigd operationeel personeel opgeroepen. Het inwerking treden van het Noodsluitsysteem activeert eveneens via het BSS het oproepen van personeel, wanneer dat niet reeds eerder heeft plaatsgevonden. Hoewel primair bedoeld voor stormvloedsituaties kan het BSS ook soortgelijke functies vervullen bij eventuele andere calamiteiten. Tevens dient het als, voornamelijk informatief, hulpmiddel voor het dagelijks beheer van de kering.

Het secundaire of noodsluitsysteem (NSS).
Het primaire beslissysteem heeft een ingewikkelde structuur waarvan ook menselijke beslissingen deel uitmaken. De faalkans van primaire systeem wordt sterk bepaald door het correct handelen van het personeel. Door aan het NSS zeer hoge betrouwbaarheideisen te stellen is het toelaatbaar de eisen aan het primaire systeem tot een realistisch niveau terug te brengen. Het NSS heeft een eenvoudige structuur en is meervoudig uitgevoerd. Het NSS is voorzien van een aantal direct gekoppelde waterstandsensoren in de binnen- en buitenhaven van de Roompotsluis. Indien de waterstanden aan de binnen- en buitenzijde van de kering een tevoren ingesteld criterium overschrijden, gaat een sluitcommando naar de



Figuur 3.5 Basisopzet beslissysteem

schuiven via de directe verbinding met het *veiligbediensysteem*. Omgekeerd zal er een opencommando uitgaan indien de waterstanden een tevoren ingesteld criterium onderschrijden.

Het NSS werkt in principe onafhankelijk van het BSS maar heeft er wel een tweewegverbinding mee voor informatieoverdracht en beperkte beïnvloeding. De informatieoverdracht van NSS naar BSS betreft dat:
- De werking van het NSS door het BSS wordt bewaakt;
- Bij sluiting van de kering door het NSS het oproepsysteem (BSS) moet worden geactiveerd;
- Informatie over waterstanden aan het BSS wordt geleverd.

De beperkte beïnvloeding van het NSS door het BSS betreft:
- De binnenwaterstandcriteria voor noodsluiten en automatisch openen door het NSS zijn binnen beperkte grenzen in te stellen via het BSS.

3.4.3 Beveiliging tegen acties van buitenaf

Door de uitgestrektheid van het object en de betrekkelijk afgelegen ligging is de stormvloedkering vrij makkelijk bereikbaar voor acties om schade aan te richten. Het totaal onklaar raken van de kering wordt als ernstig gevolg van mogelijke schade aangemerkt. Beveiliging richt zich daarom ook tegen acties die uitgaan van een duidelijke motivatie en waarschijnlijk gericht zullen zijn op het bereiken van een maximaal effect. Hierop zal niet verder worden ingegaan. Omdat de gevolgen van vernielingen op de kering zich waarschijnlijk zullen beperken tot een enkele doorstroomopening (schuif), valt de kwetsbaarheid van de volledige kering weer mee.

Naast de beveiliging tegen gemotiveerde acties moet ook rekening worden gehouden met het toebrengen van schade aan het object door ongemotiveerde acties, met andere woorden door "baldadigheid". Hiertegen zijn maatregelen genomen door de meest kwetsbare onderdelen van de kering voor het publiek ontoegankelijk te maken. Het onderbrengen van de lokale besturing, de hydraulische aandrijving van de bewegingswerken en alle leidingen in de verkeerskokers, is hiervan een voorbeeld.

3.4.4 Conditiebewaking

Het bouwwerk van de stormvloedkering is een unieke constructie zonder directe voorbeelden waaruit ervaring kon worden geput. De uitgangspunten voor het ontwerp van de stormvloedkering berusten op aannamen van belastingen en sterkte, die aan de hand van studies, proeven, etc., zo goed mogelijk zijn afgeschat. Door de probabilistische aanpak van het ontwerp zijn de onzekerheden

zo klein dat deze toetsbaar voldoen aan de gestelde kwaliteitseis die kan worden samengevat in een faalkans van maximaal 10^{-7} per jaar ten opzichte van de topgebeurtenis "delen van Zeeland lopen onder water". Een verkeerde inschatting van deze onzekerheden kan wel gevolgen hebben voor de beheersvrijheid van de stormvloedkering.
Samen met onderhoud vormt conditiebewaking de kwaliteitsbeheersing van de stormvloedkering (zie [1], deelnota 1.5). Het doel van onderhoud is er op gericht het bouwwerk blijvend te laten voldoen aan de er aan ten grondslag liggende ontwerpuitganspunten. Het doel van de conditiebewaking is na te gaan in hoeverre de, bij het ontwerp toegepaste, uitgangspunten juist zijn geweest. Wordt een afwijking ten opzichte van een uitgangspunt geconstateerd, dan worden eventueel maatregelen getroffen om hiermee toch te blijven voldoen aan de gestelde kwaliteitseis in de vorm van de faalkans.

De metingen voor conditiebewaking voor het onderdeel constructie hebben tot doel het verloop van krachten die door de natuurrandvoorwaarden zijn opgelegd als het ware te volgen door de constructie heen. Het meetsysteem voor het onderdeel constructie is toegesneden op het bepalen van het gedrag van de schuiven en de bovenbalk en op de belastingafdracht via de pijlers naar de fundering. Voor de metingen aan de schuiven en de bovenbalken zijn de schuiven R13 en R21 en de bovenbalk R20 van instrumentatie voorzien. De metingen zijn gericht op de volgende aspecten ([8] Projectplan condits):

- Eigenfrequenties van de gehele schuiven;
- Responsies van vakwerkstaven en de gehele schuif op stromingsexcitaties;
- Vermoeiingsterkte van de knooppunten;
- Golfklappen tegen schuiven en bovenbalken;
- Horizontale en verticale dwarsbelasting op de schuiven

3.4.5 Onderhoud

Onderhoud van de stormvloedkering heeft tot doel de bij de aanleg gerealiseerde kwaliteit te handhaven. Daarbij is de gerealiseerde kwaliteit dus uitgangspunt voor het te definiëren onderhoud. Een andere benadering van de doelstelling van onderhoud die wordt genoemd, luidt:

- Het voorkomen van een zodanige kwaliteitsvermindering van het object dat de gewenste functievervulling in gevaar komt.

Hierbij is het voldoende functioneren van de stormvloedkering dus richtpunt van de onderhoudinspanning. Deze twee onderhoudsbenaderingen suggereren dat er sprake zou kunnen zijn van een zekere marge tussen de gerealiseerde kwaliteit van de stormvloedkering en de minimaal vereiste kwaliteit daarvan. Dat bij de sluitingsmiddelen van een dergelijke marge sprake is, is evident: er worden nieuwe onderdelen en materialen gebruikt, die i.v.m. te verwachten slijtage en corrosie, ruimer worden bemeten dan nodig is om aan de eisen te voldoen. Na verloop van tijd slijten materialen en nemen maatgevende eigenschappen af, zoals afmetingen die door corrosie verminderen, tot de ondergrens wordt onderschreden. Te verwachten is dat het onderhoud erop gericht zal zijn te voorkomen dat de bovengenoemde grens wordt onderschreden. Dit kan worden aangeduid als preventief onderhoud. Wordt pas onderhoud uitgevoerd nadat deze grens is onderschreden, dan is sprake van correctief onderhoud.

In het onderhoud wordt gebruik gemaakt van inspectie of "conditiebewaking". Inspectief onderhoud heeft tot doel te signaleren, en liever nog te voorspellen, wanneer de eisen aan maatgevende eigenschappen worden onderschreden, dus om (dreigend) falen te bemerken. Er worden grofweg drie inspectiemethoden toegepast:

- Een aantal kritieke onderdelen van de sluitingsmiddelen wordt continu electronisch bewaakt door een opnemer die disfunctioneren meldt aan de CCC in het centrale bedieningsgebouw en de lokale besturing (LCC).
- Een aantal andere kritieke onderdelen die niet electronisch kunnen worden bewaakt wordt periodiek geïnspecteerd met een functioneringstest.
- Waar ook een functioneringstest geen practische mogelijkheid is, of waar een onderdeel geen sterk verband met het falen van de kering heeft, worden volgens een bepaald schema andere inspecties toegepast, zoals visuele- en meet-inspecties.

In de sluitingsmiddelen zijn onderdelen aanwezig die na een standtijd van een aantal jaren zullen moeten worden vervangen om aan de kwaliteitseisen van de stormvloedkering als geheel te kunnen blijven voldoen. Bovendien heeft een aantal onderdelen meer te lijden van stilstand dan van gebruik; voor deze onderdelen is de zeer lage gebruikfrequentie van de stormvloedkering geen voordeel. O.a. om die reden is ervoor gekozen de schuiven van de stormvloedkering geregeld te bewegen. Een tweede reden voor het geregeld bewegen van de schuiven is dat in de schuifbewegingmechanismen veel onderdelen aanwezig zijn die onbemerkt kunnen falen. Door de schuiven te bewegen neemt de betrouwbaarheid globaal toe naarmate dit falen eerder wordt bemerkt. Dat daarbij gestreefd moet worden naar een optimum tussen beproevinginspanning enerzijds en zekerheid anderzijds, zal duidelijk zijn. Uiteindelijk is gekozen voor een beproeving van elke schuif met een frequentie van éénmaal per 14 dagen.

Bij het onderhoud zijn faalkans, beschikbaarheid van de bewegingswerken voor hun functie en kosten de leidende begrippen. De kans dat bij een vraag tot sluiten een of meer schuiven niet sluiten moet blijven voldoen aan de bij het ontwerp gestelde faalkanseisen. Ditzelfde geldt uiteraard ook bij de vraag tot openen. Het uitvoeren van onderhoud aan een bewegingswerk impliceert in veel gevallen dat de schuif voor de betreffende doorstroomopening niet beschikbaar is. De toelaatbare niet-beschikbaarheid van de sluitingsmiddelen wordt gebruikt voor onderhoud van de schuiven, bewegingswerken en de electronische installaties. Uitvoeren van onderhoud dat nog niet nodig is kan als verspilling van geld en toelaatbare niet-beschikbaarheid aangemerkt worden. Er wordt onderscheid gemaakt tussen vast en variabel onderhoud.

Onderhoud is ook in te delen als:

- Gebruiksafhankelijk onderhoud (GAO): hoeveelheid bedrijfsbelasting in uren, meters afgelegde weg, etc.;
- Toestandsafhankelijk onderhoud (TAO): slijtage in de vorm van materiaalafname, verandering in oppervlakteruwheid of materiaaleigenschappen, etc.;
- Storingsafhankelijk onderhoud (SAO): niet voldoen aan functionele eisen als niet sluiten of niet openen, etc.

Direct na de bouw is in eerste instantie uitgegaan van storingsafhankelijk onderhoud (SAO) in combinatie met inspecties om de toestand van de onderdelen te beoordelen (TAO). De verwachting is daarbij dat het gaat om onderhoud van een beperkte omvang en hoeveelheid, het zogenaamd "klein onderhoud". Gebruik van de kering is in hoge mate gericht op het beschikbaar zijn voor de verwachte stormvloed met een frequentie van ca. eenmaal per stormseizoen (oktober tot en met april). Op enkele onderdelen na, van het bewegingswerk draaien de spanpompen continu, worden de meeste onderdelen buiten de tweewekelijkse testbeweging van de schuif niet in werking gesteld. Oorzaak van slijtage moet dan ook meer worden gezocht in aantasting door tijdafhankelijke afbraakprocessen bij stilstand, zoals spleetcorrosie, dan in materiaalafname in relatie met beweging. Bij het ontwerp en de fabricage is veel aandacht gegeven aan het voorkomen van deze afbraakprocessen op kritieke onderdelen als de conservering van de schuiven, de

schuifgeleidingen, zuigerstangen en lagers van de draaipunten in cardan en onderoog.

Tien jaar na oplevering is een analyse gemaakt om te bepalen hoe groot-onderhoud aan de sluitingsmiddelen verantwoord moet worden aangepakt. Een optimaal onderhoudscenario streeft naar minimale kosten (netto contante waarde) bij acceptabele faalkans en beschikbaarheid. Uitgangspunt is dat volgens [9] ca. 8 schuiven per jaar buiten het stormseisoen, dus van 1 mei tot 1 oktober, tegelijkertijd "niet beschikbaar" mogen zijn. Ongeveerd de helft van dit aantal is nodig voor het conserveren van de schuiven. De overige vier "niet-beschikbare" schuiven, kunnen bijv. worden gebruikt voor onderhoud van de bewegingswerken.

4. Documentatie

[1] Ontwerpnota SVKO, boek 1, totaalontwerp; RWS.

[2] Ontwerpnota SVKO, boek 2, de waterbouwkundige werken; RWS.

[3] B.F. Coeller, A.F. Abrahamse, etc.; BARCON-rapporten; Rand Corporation;

- Summary report; R-2121/1-NETH Volume I, december 1977;
- Assessment of security from flooding; R-2121/2-NETH Volume II, april 1977;
- Summary report; R-2444/1-NETH Volume I, september 1979;
- Sensitivity analysis; R-2444/2-NETH Volume II, september 1979;
- Predicting North Sea water levels; R-2444/3-NETH Volume III, september 1979;
- Basin response to North Sea water levels; the Barcon SIMPLIC model; R-2444/4-NETH Volume IV, september 1979.

[4] Tweede nota toleranties en deformatie-eisen; RWS document 50TOLE-N-80001, januari 1980.

[5] ir H. Nederend; Derde nota toleranties en deformatie-eisen deel 1; RWS document UMTOLE-M-84016, augustus 1984.

[6] ir F. de Graaf; Derde nota toleranties en deformatie-eisen deel 2; RWS document UMTOLE-N-86001, november 1986.

[7] Blauwe nota "Onderzoek naar de mogelijkheid van de afsluiting van de Oosterschelde met een gedeeltelijk geprefabriceerde stormvloedkering". RWS document, april 1976.

[8] Projectplan condits; Conditiebewaking Oosterscheldekering. RWS document N209H102, mei 1987.

[9] S.J.P. Vereeke; Aantal gelijktijdig te conserveren schuiven in de SVKO; RWS *notitie* BNW-M-96022 (BSE-M-96004), 21 mei 1996.

Deelnota 2: Hydraulisch onderzoek

Inhoud

1. Inleiding pagina **28**

2. Onderzoekstrategie voor de schuiven **29**
2.1 Voorbeschouwing
2.2 Belangrijke onderzoeksaspecten
2.3 Beoordeling schuiven
2.4 Onderzoeksplan

3. Trillingsonderzoek **34**
3.1 Geschematiseerde massa-veer modellen
3.2 Elastisch gelijkvormig model
3.2.1 Ontwerp en ijking elastisch gelijkvormige model
3.2.2 Resultaten van het trillingsonderzoek
3.3 Het vakwerkliggerschuifontwerp

4. Golfklaponderzoek **40**
4.1 Golfklapproblematiek en onderzoeksmethodiek
4.2 Golfklappen op de plaatliggerschuiven
4.2.1 Onderzoek in stijve modellen
4.2.2 Onderzoek in het elastisch gelijkvormige model
4.2.3 Alternatieve plaatliggervormen
4.3 Golfklappen op de vakwerkliggerschuiven

5. Belastingen op de schuiven **47**
5.1 Onderzoeksopzet
5.2 Golf- en stromingsbelastingen
5.2.1 Schuiven met plaatliggers
5.2.2 Schuiven met vakwerkliggers
5.3 Langsbelastingen
5.4 Krachten door langsbelasting

6. Belastingen op de bewegingswerken **53**
6.1 Golf- en stromingsbelasting dwars op de zuigerstangen
6.2 Verticale belastingen hefcilinders
6.2.1 Krachten hefcilinders bij bewegen schuif
6.2.2 Krachten hefcilinders door golfklappen
6.3 Dynamische verschijnselen aandrijfsysteem

7. Vergelijking vakwerkliggerschuif met plaatligger-schuif **56**
7.1 Verval-, stromings-, en golfbelastingen
7.2 Golfklapbelastingen
7.3 Trillingen
7.4 Relaties andere onderdelen kering
7.5 Conclusie hydraulische vergelijking

8. Documentatie **57**

9. Literatuur **58**

1. Inleiding

In deze deelnota wordt het hydraulische onderzoek beschreven dat is uitgevoerd voor de sluitingsmiddelen. Hydraulisch onderzoek was nodig om inzicht te krijgen in de optredende stromings- en golfverschijnselen en in het effect daarvan op de sluitingsmiddelen. Het verkrijgen van voldoende kennis en inzicht was noodzakelijk om alternatieven te kunnen ontwikkelen en te vergelijken, om gefundeerde beslissingen in het ontwerpproces mogelijk te maken en om te komen tot een verantwoord eindontwerp.

Zoals in deelnota 1 is beschreven, worden de sluitingsmiddelen gevormd door verticaal beweegbare stalen schuiven, die in sponningen in de betonnen pijlers zijn geplaatst. Iedere schuif is opgehangen aan, en wordt bewogen door, twee hydraulische cilinders en sluit in laagste stand een opening af tussen een betonnen bovenbalk en een betonnen dorpelbalk, die beide eveneens tussen de pijlers zijn aangebracht. De schuif bevindt zich aan de zeezijde van de balken en heeft in neergelaten stand een kleine overlap met zowel de dorpelbalk als de bovenbalk. Dit ontwerp is het resultaat van een ontwerpproces, waarbij andere oplossingen om uiteenlopende redenen zijn afgevallen (zie hiervoor "Ontwikkeling van het ontwerp", deelnota 1).

De kering wordt gesloten wanneer de veiligheid van het achterliggende gebied dit nodig maakt. Vrijheid van beheer vereist dat de schuiven onder stormomstandigheden en in stromend water kunnen worden bewogen. In gesloten stand kan er zowel een positief verval (waterstand Noordzee hoger dan waterstand Oosterschelde) als een kleiner negatief verval ontstaan. Bij het onderzoek aan de sluitingsmiddelen zijn de hydraulische randvoorwaarden (waterstanden, golven) geselecteerd die zijn gebaseerd op een probabilistische analyse van waterstanden op zee, golfspectra en golfrichtingen.

De wijze waarop de kering wordt gesloten en het moment waarop begonnen wordt met sluiten heeft invloed op de hydraulische condities tijdens sluiten en op het verval over de kering nadat deze gesloten is. De verschillende sluitings- en openingsstrategieën zijn in deelnota 5 van boek 1 behandeld. In het hydraulische onderzoek aan de sluitingsmiddelen zijn de verschillende strategieën via het gekozen randvoorwaardengebied meegenomen. Inbegrepen zijn ook situaties waarbij de bewegingswerken van een of meerdere schuiven niet naar behoren functioneren, waardoor deze schuiven geheel of gedeeltelijk open blijven tijdens een stormvloed (weigerende-schuifsituaties).

In het onderzoek aan de sluitingsmiddelen heeft het onderzoek naar stromingsgeïnduceerde trillingen en golfklappen een belangrijke plaats ingenomen. De gevolgde onderzoeksstrategie wordt in hoofdstuk 2 van deze deelnota nader uiteengezet. Een schuifontwerp waarin zich zware trillingen voordoen is niet acceptabel in verband met vermoeiing van de constructie. De verschillende schuifontwerpen zijn daarom in het relevante randvoorwaardengebied gecontroleerd op de mogelijkheid van het ontstaan van trillingen en zonodig zijn maatregelen getroffen om de trillingen te voorkomen. Het trillingsonderzoek wordt beschreven in hoofdstuk 3.

Golfklappen kunnen extreem zware belastingen tot gevolg hebben en aanleiding geven tot een ontwerp met forse afmetingen. Bij het onderzoek aan de sluitingsmiddelen was het streven de golfklapbelastingen zo laag mogelijk te houden. Het golfklaponderzoek wordt beschreven in hoofdstuk 4.

Stromings- en golfbelastingen zijn in belangrijke mate afhankelijk van de vormgeving van de constructie waarop ze werken. De maatgevende verticale belastingen voor de schuiven konden daarom pas definitief worden vastgesteld nadat de twee hoofdsporen in het onderzoek, te weten het onderzoek naar trillingen en het onderzoek naar golfklappen, waren doorlopen en de vormgeving van de schuiven naar de eindoplossing was geëvolueerd. Voor de maatgevende horizontale golf- en vervalbelasting zijn de waarden van de plaatliggerschuiven overgenomen voor de vakwerkschuiven. In hoofdstuk 5 wordt op de stromings- en golfbelasting nader ingegaan. Ook wordt hier de langsbelasting op de schuiven ten gevolge van scheef inlopende golven behandeld. In hoofdstuk 6 komt de belasting op de bewegingswerken aan de orde; daarbij zijn ook inbegrepen de dynamische verschijnselen als gevolg van het bewegen van de schuiven over de glijdopleggingen. In hoofdstuk 7 tenslotte wordt een vergelijking gemaakt tussen de twee schuifontwerpen die zijn onderzocht.

Het hydraulische onderzoek heeft na realisatie van de kering een vervolg gekregen in de vorm van metingen tijdens gebruiksomstandigheden. Deze metingen zijn verricht in het kader van de 'Conditiebewaking' van de kering (project CONDITS) en hadden o.a. ten doel om een toetsing uit te voeren van het voorspelde gedrag van de kering en van onderdelen van de kering ten gevolge van externe belastingen, alsmede een toetsing van de voor het ontwerp gehanteerde randvoorwaarden. In boek 1, deelnota 5, is uitvoerig op dit project ingegaan.

2. Onderzoeksstrategie

2.1 Voorbeschouwing

De onderzoeksstrategie die in dit hoofdstuk uiteen wordt gezet, heeft betrekking op de schuiven in de gerealiseerde kering. Bij aanvang van dit onderzoek lag het basisconcept van de kering reeds vast en waren belangrijke keuzes al gemaakt. In grote lijnen hield dit in dat de kering zou worden opgebouwd uit betonnen pijlers gefundeerd op staal, betonnen boven- en dorpelbalken als begrenzing van de doorstroomopeningen en stalen hefschuiven voor de afsluiting. Ter bescherming van de bodem en als overgang naar de kering was een filterconstructie, opgebouwd uit loskorrelig materiaal, voorzien. Over de pijlers zou een betonnen verkeersbrug worden gebouwd. Alle elementen zouden als prefab elementen worden uitgevoerd en ter plaatse worden gemonteerd. Deze opzet had als voordelen dat parallelle ontwerp- en productiestromen in gang konden worden gezet (gunstig in verband met het te realiseren tijdschema) en dat activiteiten op de bouwplaats konden worden beperkt (minder werkzaamheden onder risicovolle omstandigheden).

Vooronderzoek had reeds plaats gevonden voor twee alternatieve keringontwerpen, namelijk de caisson-oplossing en de pijlers-opputten oplossing, beide ontwerpen met een dubbel uitgevoerde schuifconstructie (zie boek 1, deelnota 1, hoofdstuk 4 'Ontwikkeling van het ontwerp'). Dit vooronderzoek was met name gericht op het ontstaan van golfklappen op de schuiven en op de betonnen elementen. Het had deels een innoverend karakter en leverde nieuwe kennis op over het effect van opgesloten, of in het water opgeloste, lucht op de grootte van de golfklapbelasting. Daarnaast werden nieuwe ideeën ontwikkeld voor het opschalen van in schaalmodellen gemeten golfklapdrukken. Bij het latere onderzoek kon hier gebruik van worden gemaakt.

In het gekozen pijler ontwerp bestaan de hefschuiven uit een systeem van horizontale liggers, eindkokers, een verticaal koppelverband en een afdichtende beplating (figuur 1).

De beplating, die bestaat uit schaaldelen, bevindt zich aan de Oosterscheldezijde van de schuif en overlapt deels de bovenbalk en de dorpelbalk. In de beginfase van het ontwerp was aan de Noordzeezijde nog een tweede beplating aanwezig bestaande uit damwandplanken. Deze beplating is in de loop van het ontwerpproces vervallen. De schuifhoogte varieert, afhankelijk van de plaats in de sluitgaten, met stappen van 1 m tussen 5,9 m en 11,9 m hoogte. De hoge schuiven hebben drie liggers, de lage schuiven twee. In het schuifontwerp is torsie-slapheid nagestreefd opdat de schuiven ongelijke zettingen van de pijlers zonder hoge spanningen kunnen volgen.

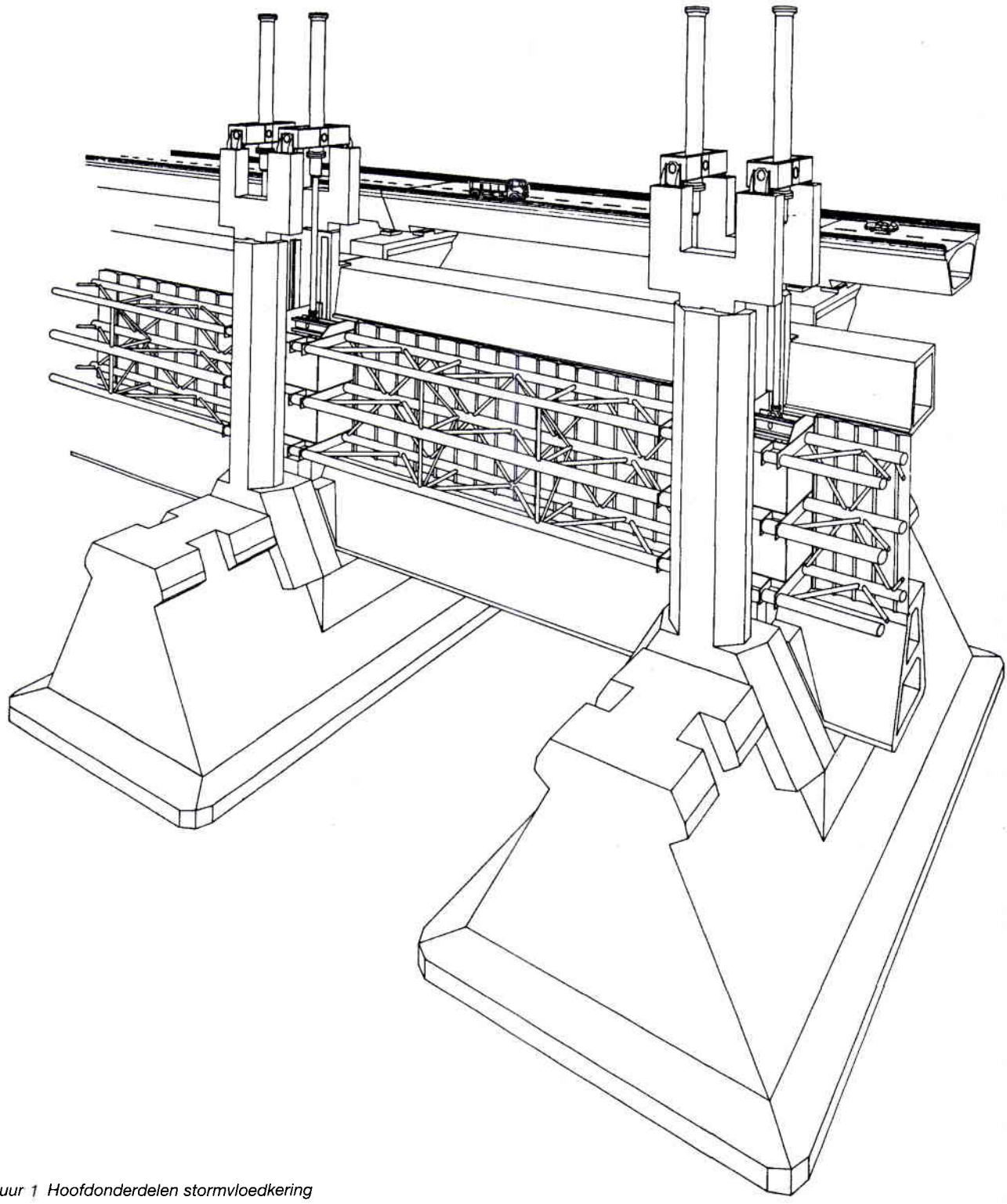
De onderkant van geopende schuiven bevond zich in de ontwerpfase op N.A.P.+1,20 m. Het peil van de onderkant van de bovenbalken is N.A.P.+1,0 m (in de Hammen lag de onderkant van de schuiven op N.A.P.+1,0 m en de onderkant van de bovenbalken op N.A.P.+0,8 m). Bij hogere zeewaterstanden worden bovenbalken en schuiven door het stromende water en door inlopende golven belast. Ten gevolge van de corrossieproblematiek van de zuigerstangen worden geopende schuiven thans opgetrokken tot hun onderkant op NAP +2,40 m komt te liggen.

Wanneer de kering gesloten of geopend wordt gaan de schuiven door de waterspiegel, hierbij kunnen golfklappen op de liggers in de schuiven optreden. Naarmate de schuiven verder worden neergelaten en de doorstroomopening kleiner wordt, neemt het verval over de kering toe en daarmee ook de stroomsnelheid in de resterende opening. Trilling (van delen) van de schuif behoort dan tot de mogelijkheden. Doordat de schuiven met enige speling voorlangs de bovenbalk en dorpelbalk bewegen, blijft er in de situatie met volledig neergelaten schuiven een lekspleet aan boven- en onderzijde open, waarbij het hier doorheen stromende water eveneens trillingen zou kunnen veroorzaken.

De schuiven glijden met aanslagen over vlakke geleidingsconstructies in de sponningen. Deze geleidingen dienen ook voor afdracht van de horizontale belastingen (zie deelnota's 3 en 4). De constructie is zodanig dat de aanslagen in onbelaste toestand van de schuiven al enigszins zijn ingedrukt, de schuiven zijn met een voorspankracht in de sponningen ingeklemd. Klapperen van de schuiven in de sponningen bij wisselende belastingen wordt hiermee tegengegaan. De wrijvingskracht die bij bewegen over de geleidingen ontstaat is groter naarmate de horizontale belasting op de schuiven groter is. De totale horizontale belasting op de opleggingen neemt echter pas toe wanneer de belasting op de schuiven groter wordt dan de voorspankracht in de aanslagen; daarvóór is de totale belasting op de opleggingen constant en gelijk aan de voorspankracht. De situatie bij einde sluiten is maatgevend voor wat betreft de vervalbelasting. Golven geven een wisselende horizontale belasting op de schuiven, waardoor de totale belasting varieert. Dientengevolge varieert ook de wrijvingskracht. Bij het bewegen doen zich stick-slip verschijnselen voor in de aanslagen; deze zijn een functie van het verschil tussen de dynamische en statische wrijvingscoëfficiënt, normaalbelasting in het glijvlak en voortbewegingssnelheid.

De hydraulische cilinders aan beide uiteinden van de schuiven, die als verticale ophanging en als aandrijving dienst doen, worden in verticale zin belast door de combinatie van eigen gewicht van de schuiven en verticale belastingen door stroming en golven, waarbij de wrijvingskracht in de aanslagen mee of tegen kan werken. De zuigerstangen van de hydraulische cilinders bevinden zich deels onder water wanneer de schuiven neergelaten zijn en worden door golven en stroming belast.

Tussen de kopse kanten van de schuiven en de pijlerwanden is enige speling aangebracht om vastlopen van de schuiven te voorkomen in geval van scheefstand van de pijlers. Door deze speling hebben de schuiven in lengterichting een horizontale vrijheids-



Figuur 1 Hoofdonderdelen stormvloedkering

graad (de hefcilinders zijn cardanisch opgehangen). Langsbewegingen van de schuif kunnen op gang worden gebracht door scheef inlopende golven in combinatie met vervallen in langsrichting over de eindkokers van de schuiven. De langsbeweging wordt afgestopt wanneer de zijaanslag tegen de zijgeleiding op de pijlerwand aan komt. Er kunnen hierbij stootkrachten optreden.

2.2 Belangrijke onderzoeksaspecten

Essentieel in de veiligheidsfilosofie voor de kering is dat de schuiven voldoende sterk zijn en dat de bedrijfszekerheid in voldoende mate is verzekerd. Dit vereist o.a. dat de overschrijdingskans van belastingen met voldoende mate van betrouwbaarheid bekend is en dat er zich geen omstandigheden mogen voordoen waarbij de spanningen in een interactief proces met de schuifbewegingen (trillingen) tot onaanvaardbaar hoge niveaus oplopen of tot snelle vermoeiing aanleiding geven.

De belastingen kunnen worden onderscheiden in quasi-statische belastingen, dit wil zeggen belastingen waarop de schuiven niet of nauwelijks dynamisch reageren, en dynamische belastingen die in de een of andere vorm trillingen in de schuiven tot gevolg hebben. Tot deze laatste categorie behoren o.a. golfklapbelastingen (die een stootkarakter hebben), turbulente stromingen, en belastingen die samenhangen met wisselende stroombeelden, bijvoorbeeld als gevolg van het verplaatsen van het loslaatpunt van de stroming. Sterke, niet te onderdrukken trillingen kunnen ontstaan wanneer (toevallige) schuifbewegingen tot stroombeeldfluctuaties en daardoor krachtswisselingen aanleiding geven die de schuifbewegingen weer versterken (zelf-exciterende trillingen).

Op voorhand zijn golfklappen en stromingsgeïnduceerde trillingen moeilijk voorspelbaar en kwantificeerbaar. Ze zijn echter bepalend voor het ontwerp in die zin, dat de schuiven zodanig zijn ontworpen dat zelf-exciterende trillingen niet kunnen optreden en golfklappen zoveel mogelijk vermeden worden. Dit kan worden bereikt door de keuze van een goede hydraulische vorm en/of een geschikte stijfheid, alsmede de toepassing van dempers.

Voor de schuiven heeft dit geleid tot een twee-sporen onderzoek:
- Onderzoek gericht op stromingsgeïnduceerde trillingen.
- Onderzoek gericht op golfklappen.

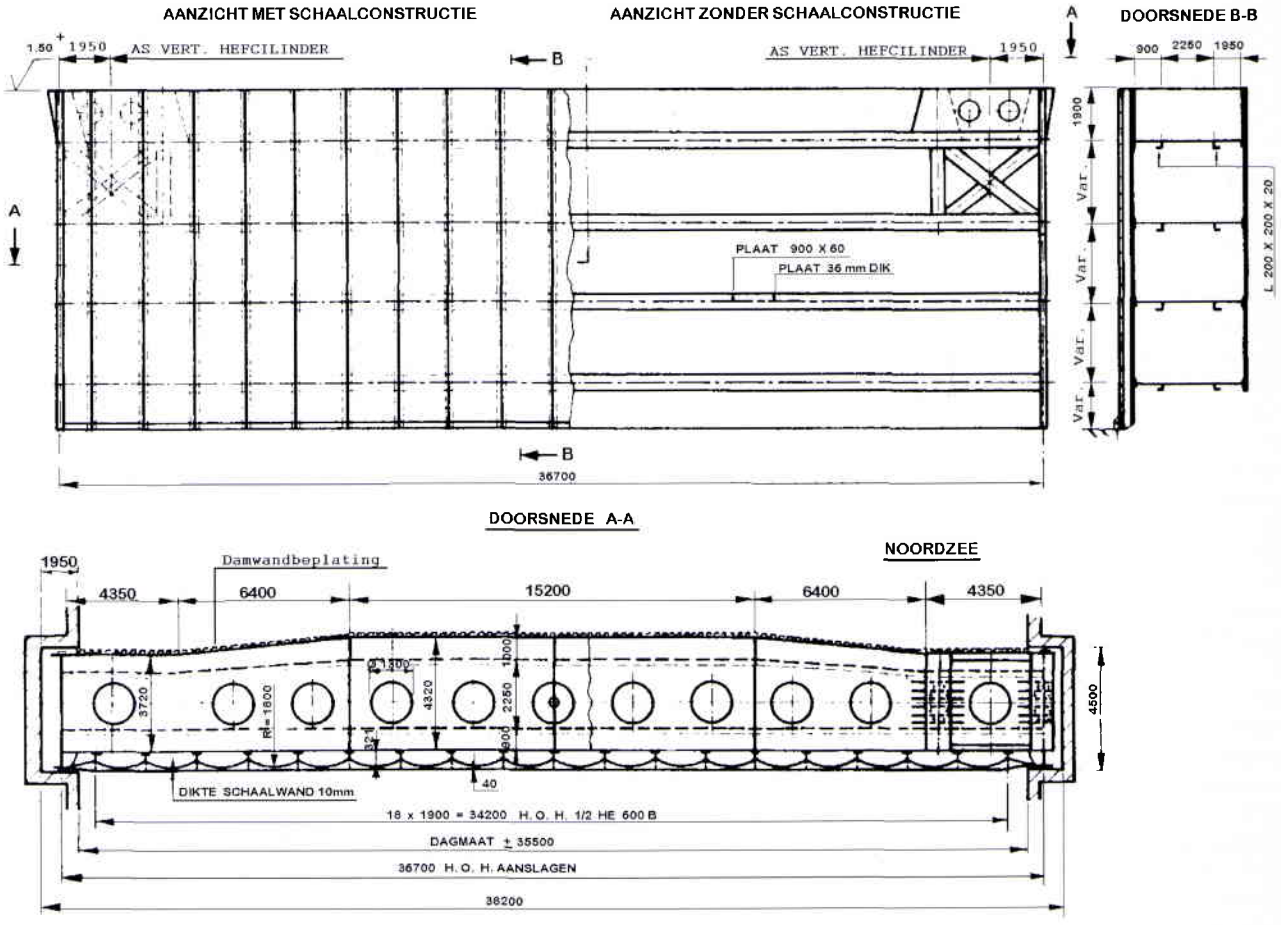
De onderzoeken hebben na elkaar plaats gevonden. Daarnaast was het ook noodzakelijk dat de quasi-statische stroom- en golfbelastingen werden gekwantificeerd, opdat gelijkertijd een nadere uitwerking van het schuifontwerp plaats kon vinden. Gedurende de loop van het trillings- en golfklaponderzoek is daarom steeds aandacht besteed aan de quasi-statische belastingen. Pas nadat de definitieve vormgeving van de schuiven was benaderd zijn deze belastingen definitief vastgesteld.

2.3 Beoordeling schuiven

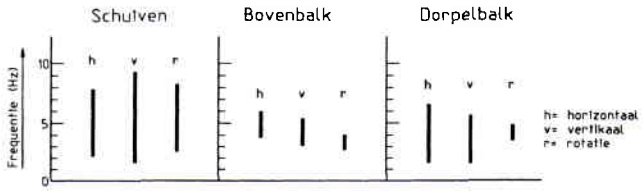
Voorafgaande aan het onderzoek is een analyse gemaakt van de dynamische eigenschappen van de schuiven en is het eerste ontwerp beoordeeld op een mogelijke gevoeligheid voor trillingen en op de mogelijkheid van het optreden van golfklappen. In het eerste schuifontwerp bestond het hoofddraagsysteem uit plaatliggers (figuur 2).

Allereerst zijn de eigenfrequenties bepaald van de schuiven bij de eerste harmonische uitbuigingsvormen in horizontale en verticale zin en voor de rotatiebewegingen. Daarbij is de invloed van de hydrodynamische massa alsmede van opleg- en ophangstijfheden meegenomen. Voor de zeven verschillende schuifhoogtes en voor verschillende indompelingsdieptes resulteerde dat in een frequentiegebied zoals aangegeven in figuur 3.

Eenzelfde analyse is uitgevoerd voor de betonnen boven- en dorpelbalken (op dat moment nog rechthoekig van vorm en bestaande uit twee gestapelde delen). Uit figuur 3 blijkt dat het aldus globaal berekende frequentiegebied van balken en schuiven



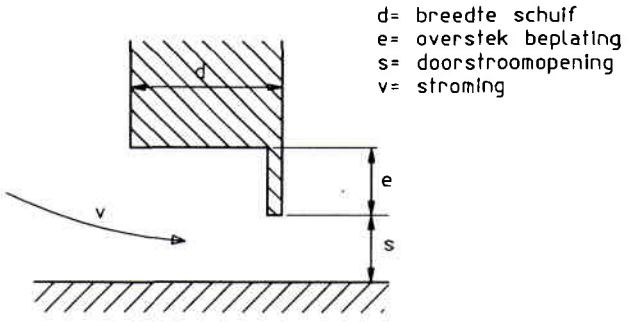
Figuur 2 Ontwerp plaatliggerschuif met dubbele waterkerende beplating



Figuur 3 Buig- en torsiefrequentiebereik van schuiven en balken

samenvalt en ligt tussen 1,5 Hz en 9 Hz. Vanwege het overlappende frequentiegebied werd geoordeeld dat de mogelijkheid bestond van gekoppelde trillingen in schuiven en balken. De laagste eigenfrequentie van de schuiven van 1,5 Hz was een factor 3 boven de hoogste golffrequentie van 0,5 Hz (golfperiode ca. 2 s), waardoor golfbelastingen als quasi-statische belastingen konden worden beschouwd.

De vormgeving van de schuifonderzijde (zie figuur 4) is zodanig dat de stroming (bij vloed), afhankelijk van schuifstand en stromingscondities, zowel van de bovenstroomse liggerrand als van de onderzijde van de schaalbeplating kan loslaten. Dit kan aanleiding geven tot instabiliteiten in de vrije grenslaag en tot trillingen. Tenslotte werd voor de situatie met neergelaten schuiven de lekstroming langs boven- en onderrand als een potentiële bron van trillingen gezien.



Figuur 4 Vormgeving onderzijde schuiven

Uit het vooronderzoek was al bekend dat vooral de passage van de hoofdliggers door de stilwaterlijn bij sluiten en openen kritisch was in verband met golfklappen. Een ander beoordelingsaspect was de aanval door de stroming op de bodembescherming aan de Oosterscheldezijde. Tijdens sluiten wordt de doorstroomopening kleiner en neemt de stroomsnelheid toe. De straalrichting is daarbij afhankelijk van de vormgeving van de doorstroomopening, dus afhankelijk van de vorm van onderkant schuif, bovenkant dorpelbalk en aanstortingen aan Noordzee- en Oosterscheldezijde. Ingeschat werd dat de straal, afhankelijk van de schuifstand, zowel omhoog als omlaag gericht zou kunnen zijn. In het laatste geval was een heviger aanval op de bodembescherming te verwachten.

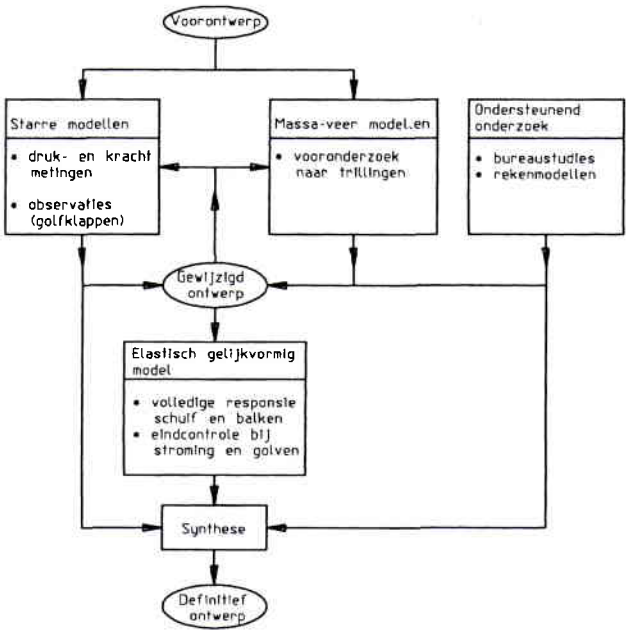
Uitgaande van deze beoordeling en met gebruikmaking van de kennis uit het vooronderzoek is een onderzoeksstrategie voor de schuiven opgesteld. Dit onderzoek vond voornamelijk plaats met schaalmodellen. Hiervoor is gekozen omdat stromingsgeïnduceerde trillingen in samengestelde constructies, zoals de schuiven met boven- en onderbalken, niet rekenkundig of anderszins voorspelbaar en kwantificeerbaar zijn, en ook omdat situaties met stroming en golven rond deze constructies nog nauwelijks voor berekening toegankelijk zijn (afgezien van golf- en vervalbelastingen bij gesloten kering).

2.4 Onderzoeksplan

Doel van het onderzoek was het verkrijgen van inzicht in de optredende hydraulische verschijnselen en in het responsiegedrag (trillingen, buigende momenten, oplegreacties) van de schuiven onder alle relevante operationele condities. In deze analyse is ook het effect van de verschillende sluitingsstrategieën op de waterstand in de Oosterschelde nagegaan (zie o.a. boek 1, deelnota 3).

Het onderzoek had verder ten doel om oplossingen aan te dragen in het geval dat zich gevaarlijke trillingen zouden voordoen of wanneer de golfklapbelastingen onaanvaardbaar hoog zouden zijn. Voorts maakte een kwantificering van de stromings- en golfbelastingen deel uit van het onderzoek.

De doelstellingen zijn gerealiseerd in een gefaseerde onderzoeksopzet met een verkennende fase en een controlerende fase. In figuur 5 is het onderzoeksplan in een schema weergegeven.



Figuur 5 Structuur onderzoeksopzet

In het onderzoeksplan zijn drie soorten schaalmodellen opgenomen:

- Geometrisch gelijkvormige, stijve modellen
  Deze modellen zijn gebruikt voor observatie van stroom- en golfbeelden, van golfklappen en voor druk- en krachtmetingen. Vanwege het overwegend tweedimensionale karakter van zowel stromingen door de kering als van loodrecht inkomende golven, kon veelal worden volstaan met weergave van slechts een deel van de schuiven met omringende geometrie (sectiemodel).
- Geschematiseerde massa-veer modellen
  Deze modellen zijn geometrisch geschaald en zijn opgehangen in veren waardoor er een vrijheidsgraad voor rotatie en/of translatie aanwezig is. De massa en de veerstijfheden zijn zodanig geschaald dat verplaatsingen en frequenties van een vooraf bepaalde (hoofd)bewegingsvorm op schaal konden worden weergegeven. Deze modellen geven niet het volledige responsiegedrag van de constructie weer maar zijn goed bruikbaar om een verkenning uit te voeren. Ze kunnen gemakkelijk worden aan-

gepast zowel wat betreft vormgeving als massa, veerstijfheid en bewegingsvrijheden. Massa-veer modellen zijn daarom gebruikt in het verkennende deel van het onderzoek. Met name voor het onderzoek naar trillingen als gevolg van stroming door de lekspleten bij neergelaten schuiven

- Elastisch gelijkvormige modellen

Een elastisch gelijkvormig model is wat betreft geometrie, massa en stijfheid van de hoofddelen volledig op schaal. De statische en dynamische vervormingen in de hoofdbewegingsrichtingen onder invloed van de belastingen zijn een geschaalde weergave van de werkelijkheid. Van *schuiven*, *bovenbalken* en dorpelbalken is in de controlerende fase van het onderzoek een elastisch gelijkvormig model gemaakt, waarmee het dynamisch gedrag nader is onderzocht.

In het elastisch gelijkvormige model is de responsie van de schuiven bij golfklappen op de liggers gemeten. De optredende golfklapdrukken zijn gemeten in een stijf model. Door middel van een massa-veer rekenmodel zijn responsie en golfklapdrukken aan elkaar gerelateerd, waardoor een berekening van de maatgevende golfklapimpuls kon worden gemaakt. Daarnaast zijn er ook aanvullende bureaustudies verricht, met name op het gebied van de hydrodynamische massa, langsbelastingen als gevolg van waterspiegelverschillen over de eindkokers, stick-slip verschijnselen bij bewegen van de schuiven.

3. Trillingsonderzoek

In dit hoofdstuk wordt het trillingsonderzoek voor de schuiven besproken. Achtereenvolgens komen het onderzoek in geschematiseerde massa-veer modellen en het onderzoek in het elastisch gelijkvormig model met begeleidende bureaustudies aan de orde.

3.1 Geschematiseerde massa-veer modellen

De eerste fase in het trillingsonderzoek betrof onderzoek in geschematiseerde schaalmodellen, allereerst voor omstandigheden die in de vooranalyse als mogelijk trillingsgevaarlijk waren aangemerkt. Onderzocht is de situatie met neergelaten schuiven en stroming door de lekspleten aan boven- en onderzijde van de schuiven (mogelijkheid van horizontale trillingen), en de situatie met gedeeltelijk neergelaten schuiven en wisselende stroombeelden onder de schuiven (mogelijkheid van verticale trillingen). In beide situaties met stroming vanuit zee. Na deze eerste reeks proeven is het gehele operationele gebied van de schuiven doorgemeten.

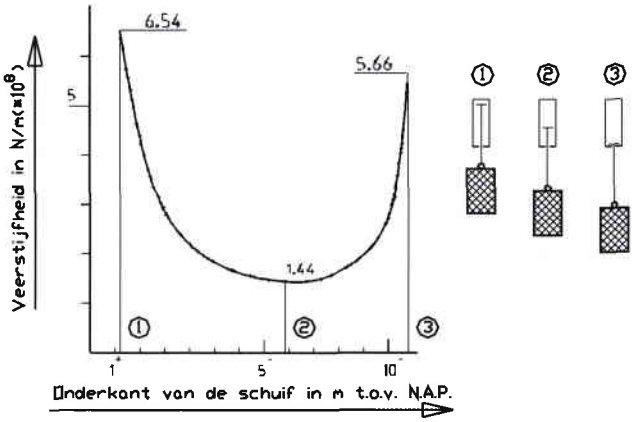
Het toenmalige schuifontwerp voorzag in een hoofddraagsysteem bestaande uit twee of drie plaatliggers, die waren voorzien van gaten in de lijven voor waterdoorvoer, en een beplating zowel aan Noordzee- als aan Oosterscheldezijde (zie figuur 2). De beplating aan de Noordzeezijde had als doel om verticale waterbewegingen in de schuiven te beperken en om de liggers af te schermen tegen golfklappen. De lengte van de schuiven was gebaseerd op een hart op hart afstand van de pijlers van 40 m. Dit is later gewijzigd in 45 m.

De eigenfrequentie-gebieden van de schuiven zijn voor de hoofdbuigrichtingen als volgt afgeschat:

horizontale doorbuiging: 6 à 7 Hz
verticale verplaatsingen: 2,5 à 7 Hz (inclusief het effect van de stijfheid van de hefcilinders).

De frequenties gelden voor de schuiven in lucht (zgn. 'droge' frequenties), bij onderdompeling in water zijn de frequenties als gevolg van de toegevoegde hydrodynamische massa lager (zgn. 'natte' frequenties). De verticale frequenties zijn afhankelijk van de constructiehoogte van de schuif en de stijfheid van de hefcilinders. De stijfheid daarvan wordt bepaald door de schuifstand (figuur 6).

In de verkennende fase van het onderzoek is het mogelijke randeffect van de pijlers op het dynamische gedrag van de schuiven verwaarloosd. Er kon daarom worden volstaan met onderzoek aan een sectie van 20 m breed met twee-dimensionale stroom- en golfcondities. Dit sectiemodel is gebouwd op schaal 1:40 en onder stroom- en golfomstandigheden vanaf Noordzeezijde beproefd. Het schuifmodel was bevestigd in een frame en kon òf in horizontale richting òf in verticale richting worden opgehangen aan bladveren, waarvan de veerstijfheid instelbaar was. Stijve ophanging behoorde ook tot de mogelijkheden. In geval van een verende ophanging zijn in de ophangpunten de reactiekrachten (responsie) bij dynamische belasting gemeten, bij een stijve ophanging is de belasting zelf gemeten.

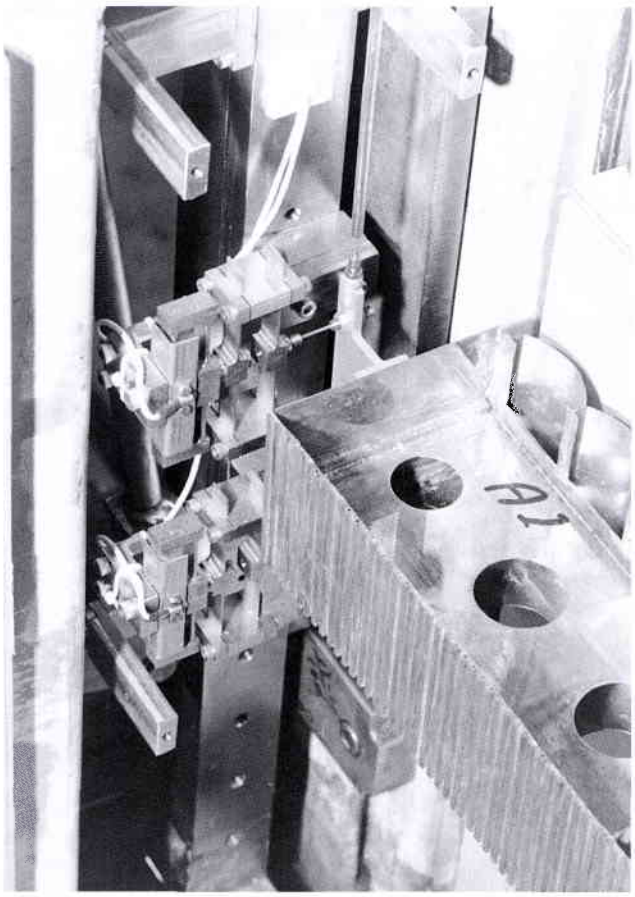


Figuur 6 Stijfheid hefcilinders als functie van de schuifstand

Er is zowel een hoge schuif als een lage schuif met plaatliggers onderzocht. Responsiemetingen (trillingsmetingen) zijn zowel voor het schuiftype mét als zónder beplating aan Noordzeezijde uitgevoerd. De dorpelbalken waren bij dit onderzoek rechthoekig van vorm. De figuren 7 en 8 geven een impressie van het sectiemodel.

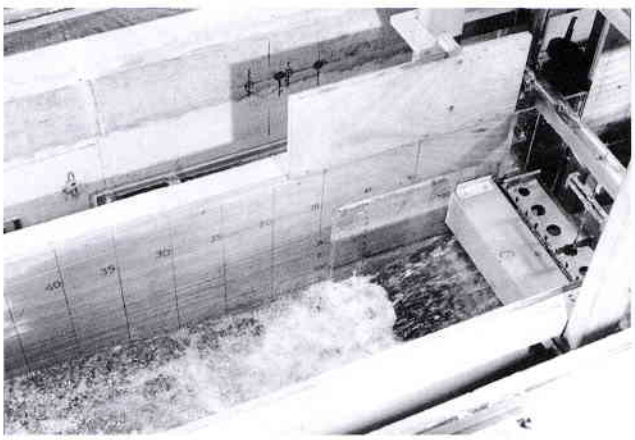
Bij het modelonderzoek is een ruim gebied van eigenfrequenties ingesteld. Naar de lagere frequenties toe is het gebied aanzienlijk ruimer gekozen dan het frequentiegebied van de prototype-schuiven, allereerst omdat uit excitatiemetingen bleek dat de turbulente-stromingsenergie zich vooral concentreerde in het gebied met lagere frequenties en ook om het effect van een mogelijk minder stijve schuifconstructie (bijvoorbeeld als gevolg van relatief slappe schuifaanslagen) te kunnen nagaan. De verwachting was voorts dat zelf-exciterende trillingen zich eerder voor zouden doen bij lagere frequenties dan bij hogere frequenties.

In de situatie met neergelaten schuiven zijn horizontale, zelf-exciterende trillingen geconstateerd als gevolg van stroming door de spleet tussen schuif en dorpelbalk. Deze trillingen zijn een functie van spleetbreedte, lengte van de overlap en eigenfrequentie van de schuiven. De trillingen bleken op te schuiven naar een groter verval wanneer de eigenfrequentie bij horizontaal bewegen op een hogere waarde werd ingesteld, de overlap kleiner werd gekozen of de spleetbreedte groter werd ingesteld. Bij een korte overlaplengte van 0,2 m en bij realistische eigenfrequenties (de hogere frequenties in het onderzochte gebied) zijn de trillingen in het gebied met relevante randvoorwaarden niet meer teruggevonden, zodat geen

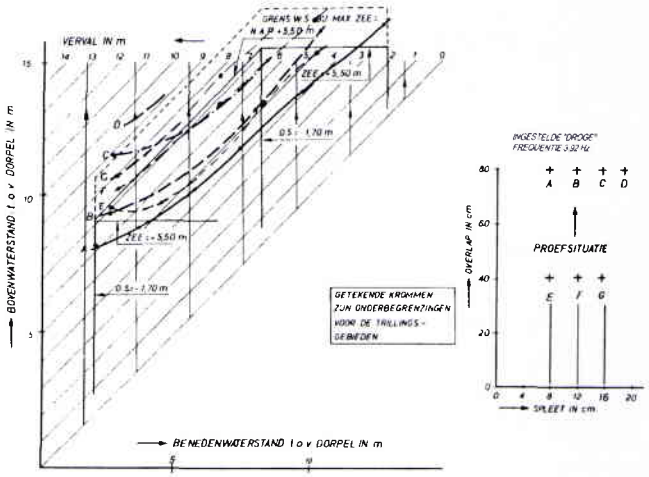


Figuur 7 Horizontale metingen lage schuif in model M1424, verende ophanging

verdere maatregelen behoefden te worden getroffen om de trillingen tegen te gaan. Ter illustratie zijn in figuur 9 enkele gevonden trillingsgebieden als functie van waterstanden en voor verschillende combinaties van spleetbreedte en overlaplengte weergegeven. De figuur geldt voor een hoge schuif met een horizontale eigenfrequentie van 3,9 Hz (droge frequentie geldig voor de schuif boven water; de gemeten natte frequenties waren een factor 2 à 3 lager).



Figuur 8 Verticale metingen lage schuif in model M1424, verende ophanging



Figuur 9 Spleettrillingen hoge schuif

Ernstige verticale trillingen zijn geconstateerd bij het schuiftype met een damwandbeplating aan Noordzeezijde in geval van een gedeeltelijk neergelaten schuif. Deze trillingen konden worden gereduceerd door de onderzijde van de damwandbeplating aan zeezijde getand uit te voeren. Hiermee werd een verstoring van het trillingveroorzakende stromingspatroon bereikt.

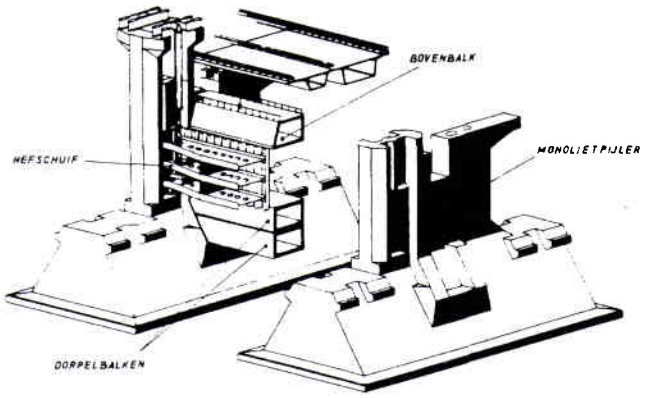
Bij uitvoering van de schuif zonder damwandbeplating zijn geen zware regelmatige trillingen in verticale richting gevonden, waarschijnlijk dank zij de secundaire stroming door de gaten in de lijfplaat van de onderste hoofdligger. Beperkte onregelmatige trillingen als gevolg van turbulenties en stroombeeldfluctuaties onder de schuif bleven zich voordoen, maar werden niet als problematisch gezien. Een zelf-exciterende trilling werd gevonden bij een gedeeltelijk neergelaten, lage schuif als gevolg van de stroming over de schuif en door de spleet tussen schuif en bovenbalk. Deze trilling kon door wijziging van de vorm van de bovenbalk worden tegengegaan (zie ook paragraaf 3.2).

Bij het schuiftype met damwandbeplating aan Noordzeezijde zijn veelvuldig golfklappen geconstateerd op de onderste plaatliggers en ook op de tussengelegen plaatliggers als gevolg van interne waterbewegingen in de schuif. Omdat de afschermende werking van de damwandbeplating beperkt is, en voor de waterkerende functie niet onmisbaar, is de beplating aan Noordzeezijde uit het ontwerp verwijderd. Hiermee is tevens een gunstiger stroombeeld onder de schuiven verkregen voor wat betreft verticale trillingen.

Het onderzoek in het sectiemodel leverde een eerste beeld op van de stromingsbelastingen en golfbelastingen op de schuiven. Veel proeven gedaan bij zeer extreme condities teneinde de maatgevende ontwerpbelastingen (bij kleine kans van optreden) te kunnen vaststellen. Parallelle modelonderzoeken gericht op golfbelastingen (zie hoofdstukken 4 en 5) completeerden dit beeld.

3.2 Elastisch gelijkvormig model

Het vooronderzoek met geschematiseerde massa-veer modellen had voldoende kennis opgeleverd omtrent het trillingsgedrag van de schuiven in stromingsomstandigheden om de ingeslagen weg te vervolgen. De stroom- en golfbelastingen op de schuiven waren inmiddels voldoende nauwkeurig bekend om een gedetailleerd schuifontwerp mogelijk te maken.



Figuur 10 Hoofdonderdelen elastisch gelijkvormig model

In dit verbeterde ontwerp bleven de plaatliggers gehandhaafd. Voornamelijk vanwege de relatief eenvoudige constructie ten opzichte van het alternatief, een ruimtelijk vakwerk van buisprofielen. De dorpelbalk in het keringontwerp bestond nog uit twee gestapelde rechthoekige balken, later is dit gewijzigd in een enkele, trapeziumvormige balk. De hart op hart afstand van de pijlers was inmiddels in een optimalisatieslag al vergroot van 40 m tot 45 m. In figuur 10 is het keringontwerp ten tijde van het onderzoek in het elastisch gelijkvormige model weergegeven.

3.2.1 Ontwerp en ijking elastisch gelijkvormige model

In schaalmodellen met een vrij waterspiegeloppervlak dient het zogenaamde Froude getal te worden gereproduceerd. Dit getal stelt de verhouding voor van massatraagheidskracht en zwaartekracht werkend op een waterdeeltje. Uitgaande van deze eis en van het gegeven dat de soortelijke massa van water in het model hetzelfde is als in de werkelijkheid kunnen schaalregels worden afgeleid voor alle andere te schalen grootheden.

Voor een elastisch gelijkvormig model leidt dit tot de eis dat de elasticiteits- en glijdingsmodulus op lengteschaal moet worden gereproduceerd. Voor de stalen schuiven moest een materiaal worden gevonden met een elasticiteitsmodulus die een factor n_L (lengteschaal) kleiner was dan die van staal. Tegelijkertijd moest voor de betonnen bovenbalken en dorpelbalken, die vanwege mogelijke dynamische interacties met de schuiven eveneens als elastisch geschaalde elementen in het model werden opgenomen, een zelfde vraag worden opgelost. Gekozen is voor pvc als constructiemateriaal voor schuiven en balken. De elasticiteitsmodulus van staal is een factor 65 groter dan van pvc, die van beton een factor 10. Dit betekent dat staal en beton niet tegelijkertijd in één en hetzelfde geometrisch gelijkvormige model kunnen worden weergegeven. De oplossing is gevonden door af te wijken van een zuivere geometrische gelijkvormigheid. In modellen waar doorbuiging en torsie de maatgevende vervormingsgrootheden zijn, zijn de buigstijfheid EI en de torsiestijfheid GI_w geschaald. Correctie van de niet goed weergegeven elasticiteitsmodulus E en de glijdingsmodulus G is gebeurd door het aanpassen van de traagheidsgrootheden I en I_w.

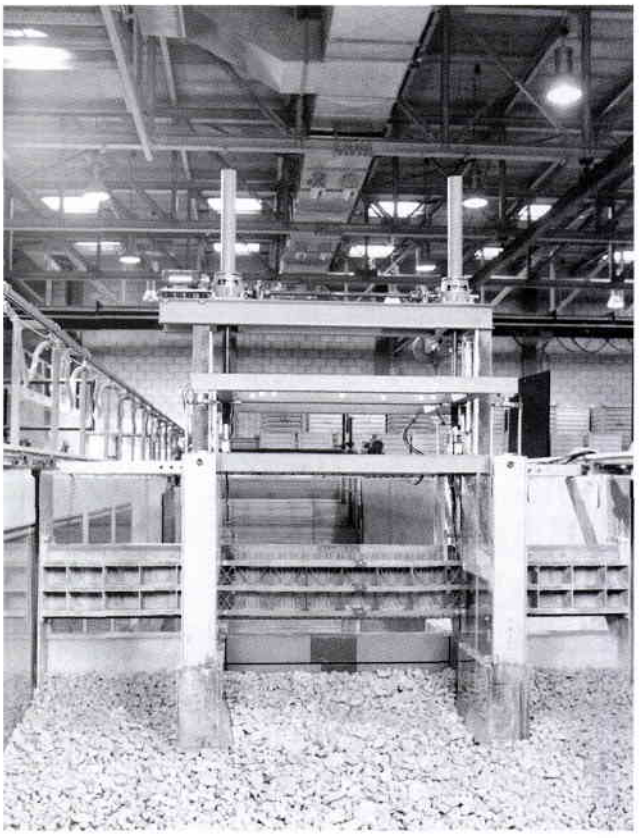
Gekozen is voor een lengteschaal $n_L = 40$. Bij deze lengteschaal konden de buigstijfheid EI en torsiestijfheid GI_w goed worden geschaald door de flenzen en lijfplaten van de hoofdliggers van de schuiven iets dikker te maken en de wanden van de bovenbalken en dorpelbalken iets dunner. De consequentie hiervan was dat lokale buigstijfheden (lijfplaten van hoofdliggers in de schuiven en wanden van de betonbalken) niet geheel op schaal waren. Voor het trillingsonderzoek was dit niet van belang, doch voor het golfklaponderzoek met golfklappen op de plaatliggers en op de bovenbalken moest door middel van responsieberekeningen een correctiefactor worden vastgesteld.

De soortelijke massa van pvc is lager dan van die van staal en beton. Dit had als gevolg dat de elastisch gelijkvormige modellen te licht waren en correctie door middel van kleine loodblokjes noodzakelijk was.

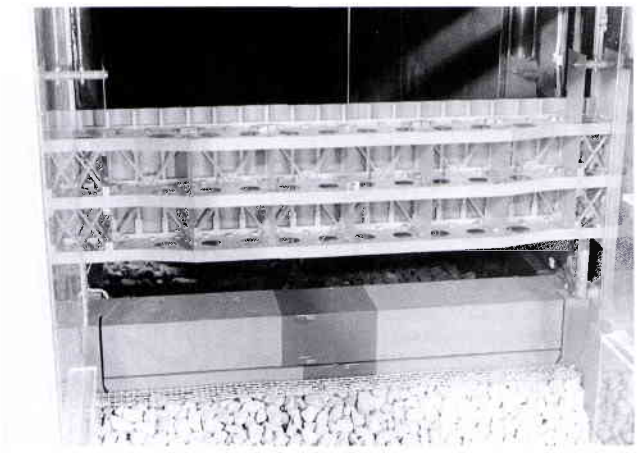
In het model zijn achtereenvolgens een diepe sectie met een drieregelige hoge schuif en een ondiepe sectie met een twee-regelige lage schuif gereproduceerd. De schuifmodellen zijn in horizontale zin ingespannen in draden waarin krachtmeters en veren waren opgenomen, en in verticale zin opgehangen aan pendelstaven met instelbare bladveren en krachtmeters. Tevens waren de schuifmodellen voorzien van rekstrookjes waarmee buigende momenten konden worden gemeten, en waren in drie verticale doorsnedes versnellingsopnemers aangebracht voor het meten van trillingen. De schuiven konden door middel van een frame op en neer worden bewogen (figuur 11).

Het model omvatte één complete overspanning tussen twee pijlers (de meetsectie) en de helft van de twee aansluitende overspanningen. Deze laatsten zijn als stijve, geometrisch gelijkvormige elementen uitgevoerd (figuur 12).

De elastisch gelijkvormige schuifmodellen zijn zowel statisch als dynamisch gecontroleerd. Bij een statische belasting is de doorbuiging in de hoofdrichtingen gemeten. Deze is vergeleken met de doorbuigingen bij dezelfde belasting die voor de pvc schuifmodellen is berekend met een eindige elementen programma. Vergelij-



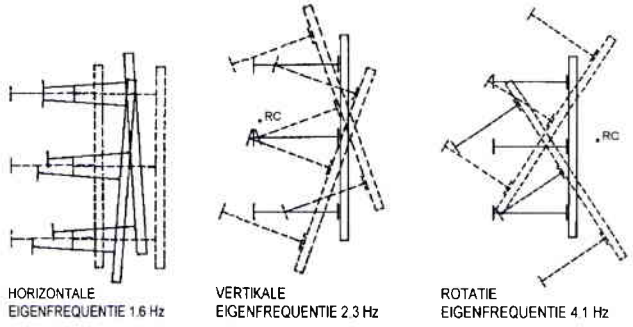
Figuur 11 Aanzicht van zeezijde van het hoge schuifmodel



Figuur 12 Overzicht diepe situatie elastisch gelijkvormig model

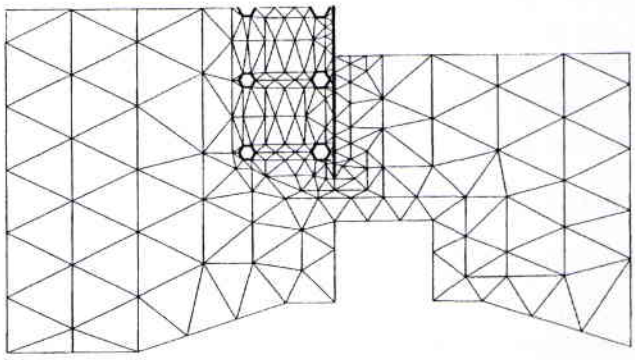
king van de doorbuigingen gaf aanwijzingen voor de wijze van modelleren van de schuiven in het eindige-elementen programma. De doorbuigingen van de pvc schuifmodellen zijn vergeleken met de resultaten van de eindige elementen berekening van de prototype schuiven. Deze vergelijking gaf aanleiding om de schuifmodellen nog enigszins te wijzigen. De buigstijfheden en torsiestijfheid waren wat aan de lage kant en een verbetering bleek mogelijk door de diagonaalstaven in het verticale vlak te lijmen in plaats van met schroeven te bevestigen.

Bij de dynamische controle zijn eigenfrequenties en eigenbewegingen van de schuifmodellen bepaald en vergeleken met de eindige elementen berekeningen voor de stalen schuiven. In figuur 13 zijn enkele bewegingsvormen weergegeven die met het eindige elementen programma zijn berekend voor een drie-regelige schuif.



Figuur 13 Eigenbewegingen van drie-regelige plaatliggerschuif

Wanneer de schuiven (gedeeltelijk) ondergedompeld zijn in water worden de eigenbewegingen en eigenfrequenties beïnvloed door het omringende water. De belangrijkste invloed gaat uit van de inertie van het water, die bij versnellingen van de constructie een hydrodynamische traagheidskracht oplevert. Deze kracht kan als een virtuele, hydrodynamische massa worden opgevat, die bij de eigen massa van de schuiven kan worden opgeteld. Om de eigenbewegingen van de ondergedompelde schuiven te kunnen bepalen is de hydrodynamische massa vooraf bepaald en toegevoegd aan het eindige elementen rekenmodel. Daarbij zijn twee methoden gehanteerd. Bij de eerste methode is de hydrodynamische massa in een verticaal, twee-dimensionaal vlak bepaald met behulp van een electrisch analogon (gebaseerd op potentiaalstromingstheorie) en is de aldus bepaalde massa in de vorm van puntmassa's ingevoerd in het eindige elementen programma. Bij deze methode is impliciet verondersteld dat de hydrodynamische massa constant is in lengterichting van de schuiven, hetgeen bij benadering het geval is voor de eerste harmonische doorbuigingsbewegingen. Bij de tweede methode is een meer geavanceerd eindige elementen programma (Strucad) gebruikt om een hydrodynamische massamatrix te berekenen, die direct aan de massamatrix van het schuifmodel kon worden toegevoegd. Het elementennet dat is gebruikt voor de hydrodynamische massaberekening van een drie-regelige schuif is in figuur 14 weergegeven (elementennet vakwerkschuif). De omvang van het net is om praktische redenen en om rekenkosten te besparen in lengterichting van de schuif beperkt. Dit was mogelijk omdat koppeltermen tussen verschillende doorsnedes in lengterichting van de schuif bij de veronderstelde eerste harmonische buig- en torsiebewegingen gering zijn. Met dit net is een deelmassamatrix gevonden. De massamatrix voor de volledige schuif is hiervan afgeleid door cyclische toekenning van relevante delen van de deelmatrix aan opeenvolgende doorsnedes van de schuif.



Figuur 14 Elementennet hydrodynamische-massaberekening

Voor de schuifmodellen zijn door middel van excitatieproeven de volgende eigenfrequenties bij de hoofdbewegingsvormen gemeten:

schuifbeweging	hoge schuif		lage schuif	
	'droog'	'nat'	'droog'	'nat'
hor. doorbuiging	5,8 Hz	1,6 Hz	6,3 Hz	2,1 Hz
vert. doorbuiging	5,1 Hz	2,3 Hz	3,7 Hz	1,5 Hz
torsie	8,2 Hz	4,1 Hz	9,0 Hz	4,2 Hz

n.b.: 'nat' = schuif neergelaten en geheel onder water.

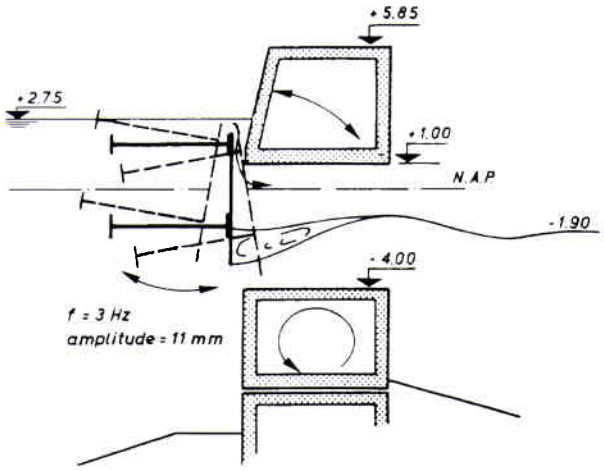
De gemeten eigenfrequenties bleken redelijk goed overeen te komen met de eigenvectoren die waren berekend met het eindige elementen programma.

3.2.2 Resultaten van het trillingsonderzoek

Het onderzoek in het elastisch gelijkvormige model is voor een ruim hydraulisch randvoorwaardengebied uitgevoerd. De grenzen van dit gebied hadden een kleinere kans van optreden (en waren dus extremer) dan de condities waarop de kering is ontworpen, teneinde zeker te zijn dat geen gevaarlijke trillingen over het hoofd zijn gezien. Ook speelde mee dat schaalmodellen niet een volledige weergave van de werkelijkheid kunnen geven en er dus met enige onzekerheid en onnauwkeurigheid rekening moet worden gehouden. Naast een controle in het gehele randvoorwaardenge-

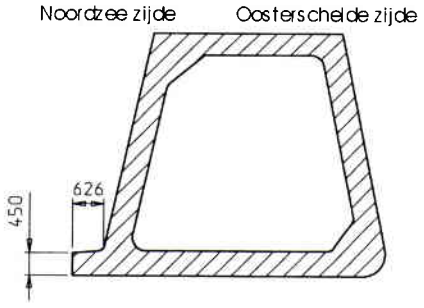
bied bij stationaire omstandigheden zijn ook sluitings- en openingsprocedures in het model gesimuleerd met de bijbehorende veranderende hydraulische condities. Het onderzoek leverde een drietal zelf-exciterende trillingssituaties op die hieronder worden besproken.

- In de ondiepe sectie werd een zelf-exciterende trilling gevonden bij een gedeeltelijk neergelaten schuif en bij stroming van Noordzee naar Oosterschelde. De trillingsbeweging is in figuur 15 weergegeven.



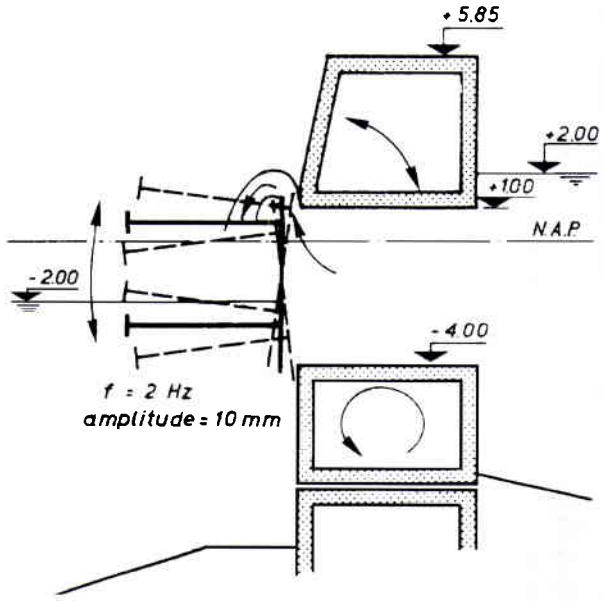
Figuur 15 Trilling bij gedeeltelijk neergelaten schuif, ondiepe sectie

De trilling was eerder gevonden in het geschematiseerde massa-veer model. De oorzaak van de trilling lag in de stroming tussen schuif en bovenbalk en bleek gemakkelijk te kunnen worden tegengegaan door het aanbrengen van een 'neusje' op de bovenbalk (figuur 16).



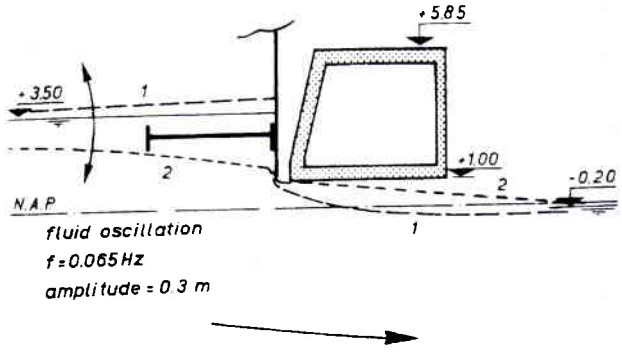
Figuur 16 'Neusje' op de bovenbalk

- In de ondiepe sectie werd bij een gedeeltelijk geheven schuif en een stroming van Oosterschelde naar Noordzee een zelf-exciterende trilling geconstateerd. Deze trilling werd veroorzaakt door de stroming door de spleet tussen schuif en bovenbalk (figuur 17). De hydraulische condities waarbij deze trilling zich voordoet hebben zo'n lage kans van optreden dat geen zorg is besteed aan het ontwikkelen van preventieve maatregelen.
- In de diepe sectie werd in de situatie van een weigerende schuif, waarbij de onderrand van de schuif op gelijke hoogte ligt met de onderkant van de bovenbalk, een traag slingerverschijnsel met een frequentie van 0,065 Hz (periode 15,4 s) geconstateerd. Dit verschijnsel ontstaat doordat de stroming een instabiel loslaatpunt vormt op de onderrand van de schaalbeplating.



Figuur 17 Trilling bij gedeeltelijk geheven schuif, ondiepe sectie

Er ontwikkelt zich hierdoor een stroombeeld waarbij het wateroppervlak afwisselend tegen het voorste deel van de bovenbalk aanligt en daar van vrij is (figuur 18). Deze slingering veroorzaakt een wisselende belasting op de schuif (en de bovenbalk). De belasting is evenwel gering vergeleken met de golfbelasting en maatregelen ter voorkoming van het verschijnsel zijn niet genomen, mede omdat de frequentie veel lager is dan de eigenfrequenties van de schuif en de bovenbalk.



Figuur 18 Trilling bij weigerende schuif, diepe sectie

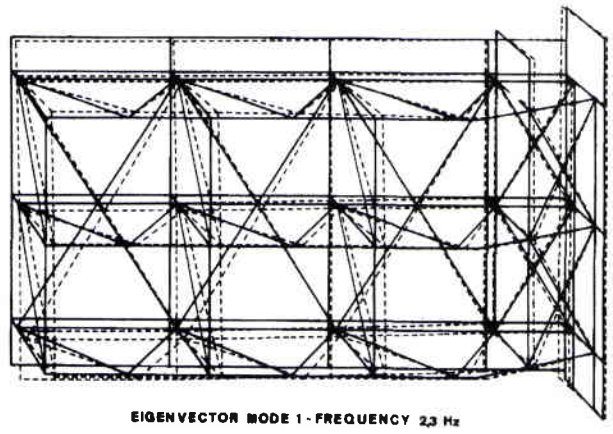
In het trillingsonderzoek zijn een hoge en een lage schuif onderzocht. Voor tussenliggende schuifhoogtes kon op basis van de resultaten van het uitgevoerde onderzoek, de eigenfrequenties en de optredende stromingscondities de verwachting worden uitgesproken dat zich geen andere zelf-exciterende trillingen zouden voordoen. Dit heeft geleid tot de conclusie dat het ontwerp van de schuiven met een draagsysteem bestaande uit plaatliggers, en met een enkele beplating aan de Oosterscheldezijde, voldoet aan de eisen voor zover het de dynamische belastingen onder de stromingsomstandigheden betreft.

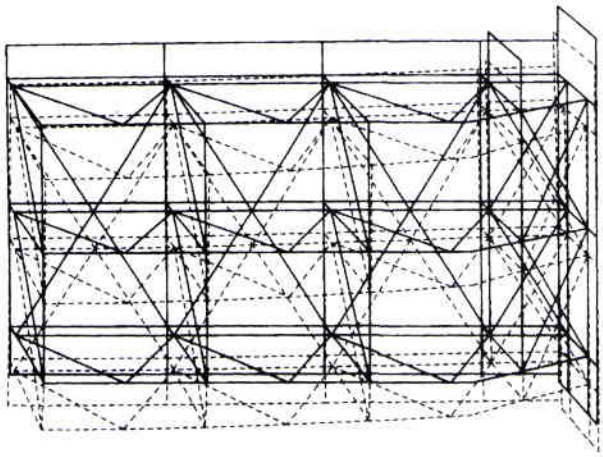
3.3 Het vakwerkligger schuifontwerp

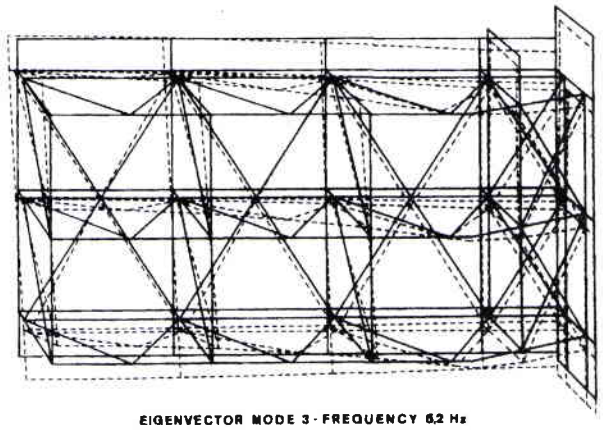
Het golfklaponderzoek dat gedeeltelijk parallel en gedeeltelijk na het trillingsonderzoek is uitgevoerd (zie hoofdstuk 4) liet dermate

hoge golfklapbelastingen op de plaatliggers van de schuiven zien, dat besloten werd om de vakwerkliggerschuif nader te onderzoeken. De liggers van dit schuifontwerp bestaan uit een horizontaal vakwerk van ronde buisprofielen, terwijl een verticaal verband, eveneens opgebouwd uit buisprofielen, is aangebracht nabij de schaalbeplating.

Met behulp van een eindige elementenmodel zijn de eigenfrequenties van deze schuiven bepaald. Daartoe is eerst, op gelijke wijze als was gedaan voor de plaatliggerschuiven, de hydrodynamische massamatrix berekend en opgeteld bij de massamatrix van de schuif. In figuur 19 worden de aldus berekende laagste drie eigenvectoren van een drie-regelige schuif getoond.





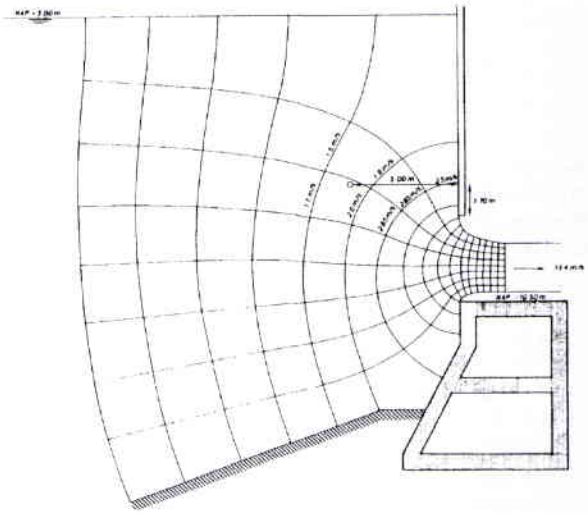


Figuur 19 Eigenbewegingen van een drie-regelige vakwerkschuif

Een vergelijking van de vakwerkliggerschuiven met de plaatliggerschuiven laat zien dat de eigenfrequentie bij de eerste harmonische *buigbeweging in* horizontale richting iets hoger is (buigstijfheid en hydrodynamische massa zijn ongeveer gelijk), maar dat de eigenfrequentie bij buigbewegingen in verticale richting ruim hoger is. Dit laatste als gevolg van de veel geringere hydrodynamische massa van de open vakwerkliggers. Gezien vanuit het oogpunt van stromingsgeïnduceerde trillingen is dit een gunstige verandering. De torsiestijfheid van de vakwerkligger-schuif is hoger dan van de plaatliggerschuif.

De trillingsgevoeligheid van de vakwerkliggerschuif is door middel van een bureaustudie nagegaan. Ingeschat werd dat de situatie met gesloten schuiven en stroming door de spleten bij bovenbalk en dorpelbalk niet anders zou zijn dan bij de plaatliggerschuif en dus geen aanleiding zou geven tot trillingen. Bij gedeeltelijk neergelaten schuiven is de situatie wel anders, de stroming vindt nu meer plaats door de schuiven heen, waarbij de vakwerkstaven door het stromende water worden belast. Om inzicht te krijgen in de trillingsgevoeligheid van de schuiven zijn de volgende acties uitgevoerd:

- Met behulp van een electrisch analogon zijn maatgevende stroomsnelheden bepaald in het vakwerk. Het schema van het analogon voor één van de geanalyseerde situaties is weergegeven in figuur 20.



Figuur 20 Schema electrisch analogon voor diepe sectie en schuifopening 4,0 m

- Bij de gevonden snelheden is nagegaan of afzonderlijke vakwerkstaven in trilling zouden kunnen geraken.
- Vervolgens is nagegaan of de gehele schuif in trilling zou kunnen geraken wanneer een staaf van het vakwerk door een 'witte ruis' excitatiespectrum wordt belast, of wanneer wervels van deze staaf zouden loslaten met een frequentie gelijk aan de eigenfrequentie van de schuif. Hierbij is geen rekening gehouden met de als regel gunstige (want verstorende) invloed van excitatie van andere vakwerkstaven.

De studie gaf aan dat beperkte trillingen in de afzonderlijke vakwerkstaven mogelijk zijn, maar voor de schuif als geheel zijn geen belangrijke trillingen gevonden. De conclusie is daarom getrokken dat de vakwerkligger-schuif onder stromingsomstandigheden een volwaardig alternatief is voor de plaatliggerschuif.

4. Golfklaponderzoek

In dit hoofdstuk wordt het onderzoek naar golfklappen op de schuiven behandeld. Eerst wordt een introductie gegeven in de complexe golfklapproblematiek die zich bij het onderzoek aandiende. Vervolgens worden het schaalmodelonderzoek en de ondersteunende studies voor de plaatliggerschuiven en het onderzoek naar mogelijke golfklapreducerende maatregelen beschreven. Tenslotte wordt ingegaan op het schaalmodelonderzoek en de begeleidende studies voor de vakwerkliggerschuiven.

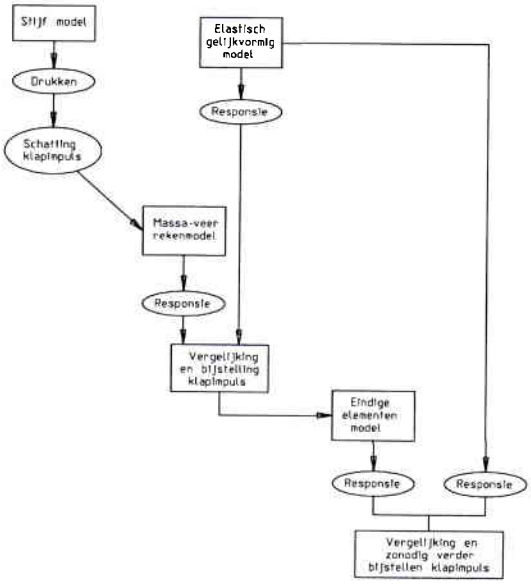
4.1 Golfklapproblematiek en onderzoeksmethodiek

Uit voorgaand onderzoek (o.a. voor het caissonontwerp van de kering) was naar voren gekomen dat golven hoge golfklapbelastingen kunnen geven wanneer het bewegende wateroppervlak abrupt door een constructiedeel wordt afgestopt. Bij de hefschuiven bleek dit opnieuw, er werden hoge golfklapdrukken op de liggers gemeten wanneer deze liggers zich in de nabijheid van de stilwaterlijn bevonden.

Golven kunnen met name tot hoge golfklapdrukken aanleiding geven wanneer het wateroppervlak parallel aan het constructieoppervlak nadert. Dit laatste is echter een zeldzame gebeurtenis, vrijwel altijd wordt de constructie niet gelijktijdig over het gehele oppervlak geraakt, waardoor er een spreiding van de golfklap in de tijd plaatsvindt. De drukken blijven in de praktijk ook beperkt doordat er elastische elementen aanwezig zijn. Het water is enigszins compressibel en deze compressibiliteit neemt toe wanneer er zich luchtbelletjes in het water bevinden. Lucht die ingesloten wordt tussen het wateroppervlak en de constructie werkt als een verend element en ook de constructie zelf is elastisch. In de praktijk is het slapste element bepalend voor de hoogte van de golfklapdruk. Ingesloten lucht verraadt zichzelf veelal in drukregistraties doordat de gecomprimeerde luchtbel pulsaties vertoont die als min of meer regelmatige drukfluctuaties in de dalende flank van de piekwaarde zijn terug te vinden. Bij geventileerde golfklappen, dit wil zeggen bij golfklappen waar de lucht zijdelings wegstroomt voordat het wateroppervlak de constructie raakt, is het drukverloop aanzienlijk steiler en lopen de piekdrukken in de regel hoger op.

Lucht speelt dus een belangrijke rol in golfklapverschijnselen. In schaalmodellen waar de luchtdruk niet wordt geschaald (schalen van de luchtdruk kan alleen in een afgesloten tank met regelbare druk) doet zich het bijzondere probleem voor dat ingesloten lucht door de te hoge luchtdruk als een te stijf element werkt. Bij de vertaling van de in model gemeten golfklapdruk moet hier rekening mee worden gehouden. Ook kan de responsie van een elastisch model anders zijn dan bij geschaalde luchtdruk het geval zou zijn geweest. Hier kan veelal berekeningsgewijs voor worden gecorrigeerd. Een deel van het uitgevoerde golfklaponderzoek was aan deze bijzondere schalingsproblematiek gewijd.

Het grootste deel van het onderzoek is gericht op het in kaart brengen van kritieke golfklapsituaties en daarnaast op de ruimtelijke verdeling van de golfklappen op liggers en schaalbeplating van de schuiven. Om een beeld te krijgen van de totale golfklapbelasting was het nodig dat het ruimtelijke drukbeeld in de tijd werd gevolgd, immers integratie van de golfklapdruk over het aangeslagen oppervlak in de tijd levert de totale golfklapimpuls. Een onderzoeksmethodiek is ontwikkeld waarbij de golfklapimpuls zowel van de drukmetingen in stijve modellen is afgeleid, als is teruggerekend uit de gemeten responsie in het elastisch gelijkvormige model. Voor dit laatste is gebruik gemaakt van een eenvoudig massa-veer rekenmodel. Ter verificatie is de afgeleide golfklapimpuls ook als input gebruikt in een eindige elementen model van de schuiven. De met dit rekenmodel berekende responsie is vergeleken met de in het elastisch gelijkvormige model gemeten responsie, waardoor de mogelijkheid bestond van een nadere bijstelling van de golfklapimpuls (figuur 21).



Figuur 21 Onderzoeksmethodiek golfklappen

Een bijzonder probleem diende zich aan bij het afschatten van de kans van voorkomen van de golfklapbelastingen. Een dergelijke afschatting was nodig omdat het ontwerp is gebaseerd op probabilistische belastingen, waarbij belastingen in combinatie met de kans van voorkomen gegeven moeten zijn. Het onderzoek wees uit dat er geen eenduidige relatie was tussen de golfklappen en de inkomende golven (gedefinieerd op enige afstand van de kering). Een verband tussen golfparameters en golfklapparameters kon dus niet worden gelegd. Wel bleek een aanpak mogelijk waarbij overschrijdingsverdelingen van gemeten golfklapdrukken werden

gekoppeld aan combinaties van hydraulische randvoorwaarden met een bekende kans van voorkomen. Op deze wijze kon indirect de kans van voorkomen van de golfklapbelastingen worden afgeschat.

4.2 Golfklappen op de plaatliggerschuiven

4.2.1 Onderzoek in stijve modellen

In stijve, geometrisch geschaalde modellen is onderzoek uitgevoerd naar de wijze van ontstaan van golfklappen en naar de meest ongunstige situaties voor het ontstaan van golfklappen. Voorts zijn onderzocht de amplituden van de optredende golfklapdrukken, de ruimtelijke verdeling van de golfklapdrukken, het verloop van de golfklapdrukken in de tijd en de mogelijke invloed van lucht op het golfklapverschijnsel.

Er is uitgegaan van één basismodel, schaal 1:50, dat zodanig was gebouwd dat wijziging van de ligger-geometrie mogelijk was. Dit model was geplaatst in een 2 m brede windgolfgoot en omvatte een diepe sectie uit de stroomgeul Roompot. Deze sectie is gekozen nadat uit vooronderzoek was gebleken dat de zwaarste golfklappen met name hier konden ontstaan. Ook was uit vooronderzoek de indicatie verkregen dat loodrecht inkomende golven de meest frequente en zwaarste golfklappen geven, reden waarom het onderzoek bij loodrecht inkomende golven is uitgevoerd. De ingestelde golfcondities volgden uit een probabilistische analyse van zeewaterstanden en daarmee corresponderende golfspectra in de monding van de Oosterschelde. In het onderzoek is de golfhoogteverdeling (met bijbehorend spectrum) gebruikt met de grootste kansdichtheid. In eerste instantie werden ééntoppige spectra gebruikt, later ook twee-toppige spectra. De relaties tussen zeewaterstand, golfhoogte en golfperiode zijn voor het ééntoppige spectrum als volgt geformuleerd:

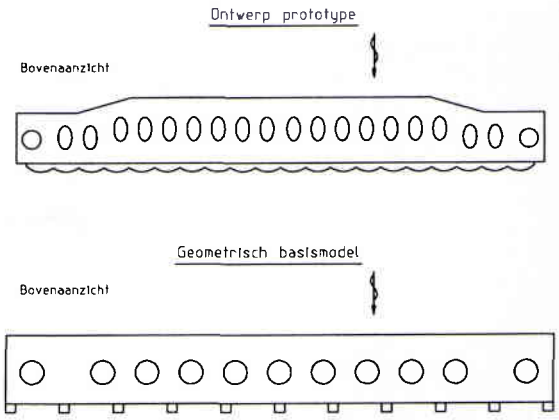
$H_s = 0{,}6 * (h + 2{,}8)$
$H_s = 0{,}08 * T_m^{2,1}$
$T_p/T_m = 1{,}8$

h = zeewaterstand t.o.v. N.A.P.
H_s = significante golfhoogte; deze is indien de golfhoogten een Rayleighverdeling volgen ongeveer gelijk aan de golfhoogte met een overschrijdingskans van 13,5%
T_m = gemiddelde periode van het golfspectrum
T_p = topperiode van het golfspectrum, d.w.z. de periode waarbij de energiedichtheid maximaal is

Voor een zeewaterstand h van N.A.P.+3,00 m resulteert dit in:
$H_s = 3{,}5$ m, $T_m = 6{,}0$ s, $T_p = 10{,}9$ s

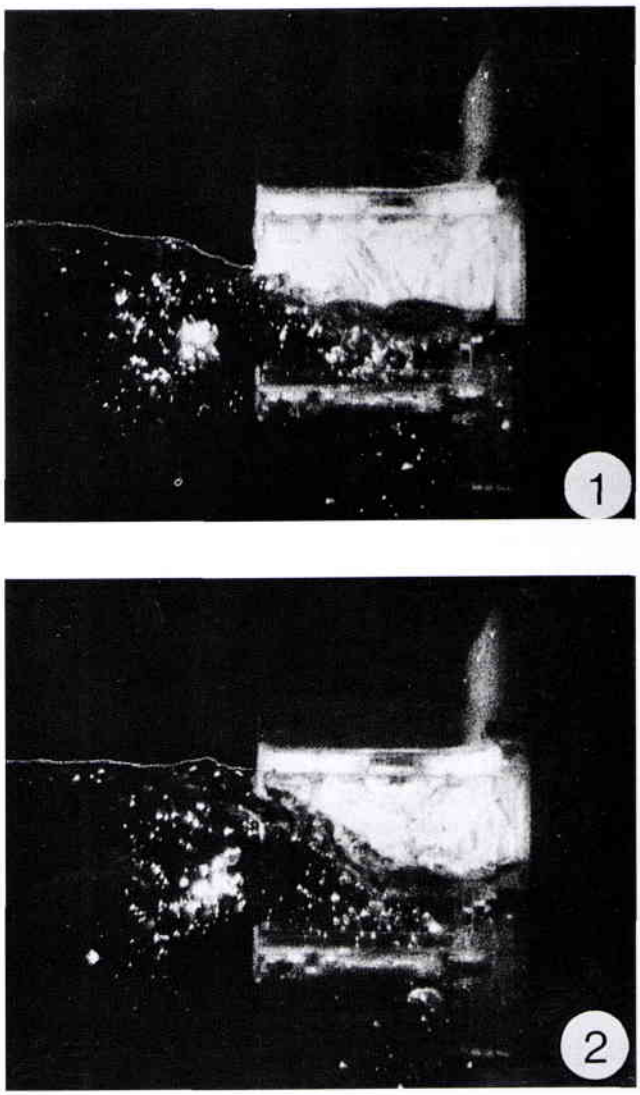
Karakteristieke grootheden van het twee-toppige spectrum bij een zeewaterstand h van N.A.P.+3,00 m zijn:
$H_s = 2{,}7$ m, $T_{p1} = 10{,}7$ s, $T_{p2} = 4{,}7$ s (windsnelheid 20 m/s)

De schuif is bij het onderzoek steeds zodanig gepositioneerd, dat één van de plaatliggers zich op het niveau van de stilwaterlijn bevond. Het merendeel van de proeven is uitgevoerd met een schuif zonder damwandbeplating aan zeezijde, in een enkele situatie is de afschermende werking van een damwandbeplating beproefd. De liggers van het schuifmodel waren voorzien van een gatenpatroon zoals aangegeven in figuur 22. Ter vergelijking is in deze figuur ook het gatenpatroon van het prototype van het schuifontwerp getekend.

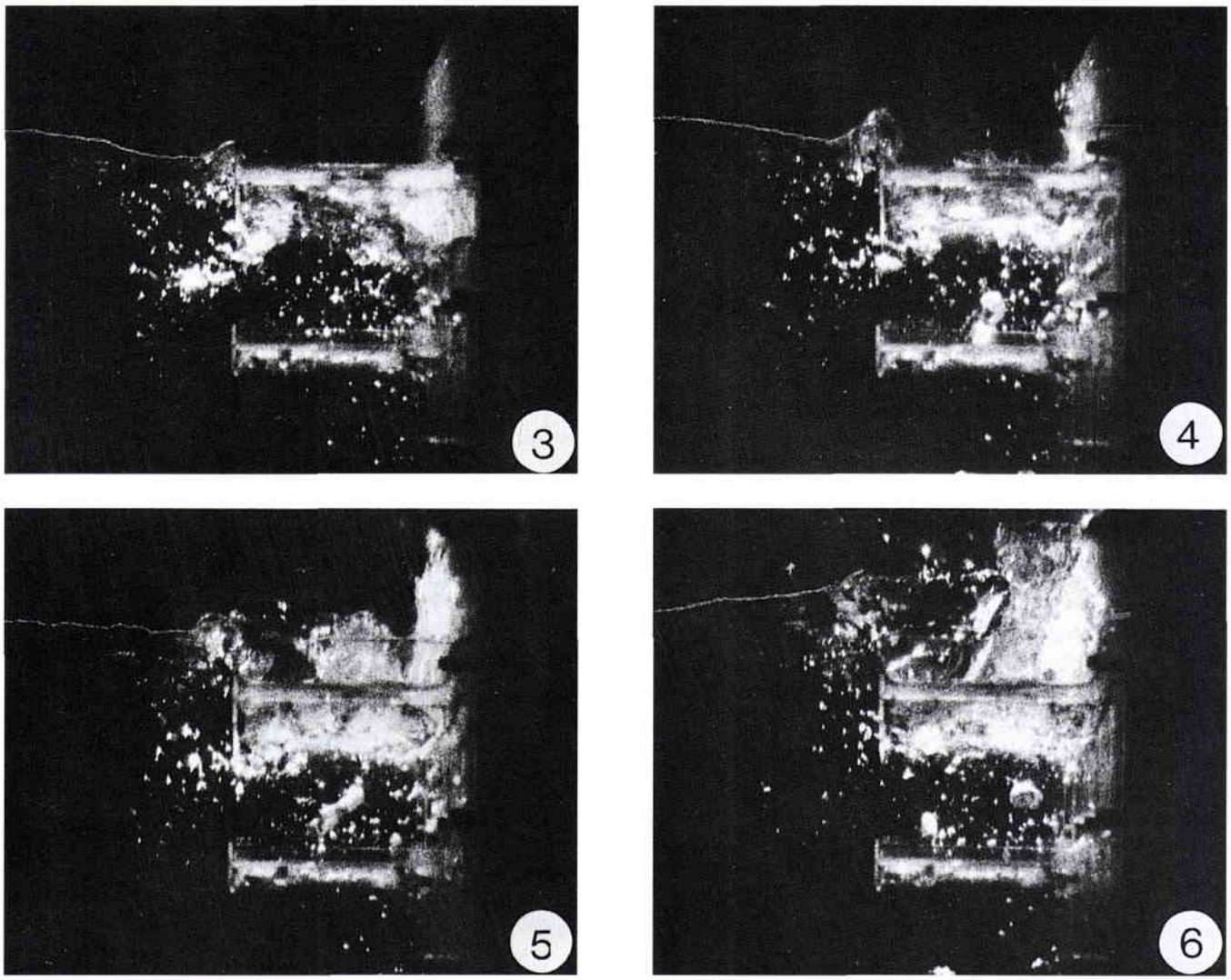


Figuur 22 Plaatliggers in schuifmodel en in schuifontwerp

De liggers zijn in perspex uitgevoerd. Doordat het model voor een raam in de windgolfgoot was geplaatst konden visuele observaties van het golfklapverschijnsel worden gedaan. Met camera's zijn opnamen gemaakt om de ontwikkeling van de golfklappen nader te bestuderen. Een voorbeeld is te zien in de fotoserie van figuur 23, waar een golfklap tegen de onderzijde van de bovenste plaatligger optreedt.



Figuur 23 Ontwikkeling golfklap tegen onderzijde bovenste plaatligger



Vervolg figuur 23 Ontwikkeling golfklap tegen onderzijde bovenste plaatligger

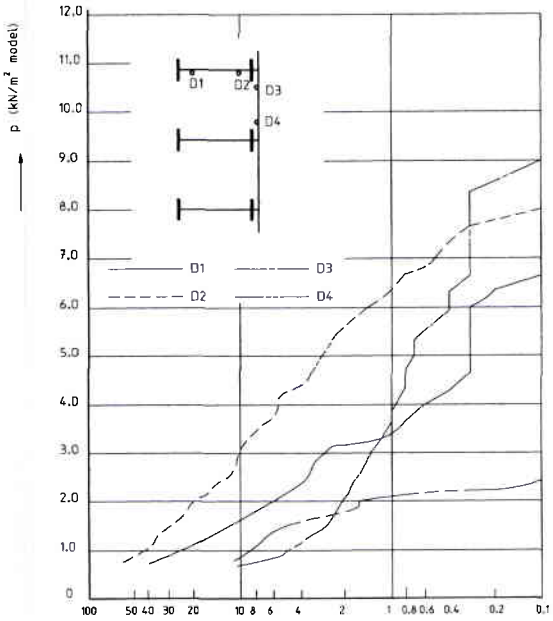
Globaal blijken twee typen golfklappen zich voor te doen:

- Golfklappen tegen de onderzijde van een ligger.
  Bij deze golfklappen wordt het opwaarts bewegende water direct door de ligger afgestopt. Aan de Noordzeezijde achter de flens van de ligger vindt luchtinsluiting plaats. Bij de meer in het midden gelegen plaatvelden, die het zwaarst worden belast, wordt de lucht meestentijds verdrongen. Op grond hiervan is de conclusie getrokken dat lucht geen belangrijke invloed kon hebben op de piekdrukken op de liggers en dat de gemeten maximale drukken als stromingsdrukken zouden kunnen worden behandeld in de vertaling van modelwaarden naar prototypewaarden. Registraties van golfklapdrukken lieten wel drukoscillaties zien in de dalende flank van de golfklapdrukfiguur die konden worden toegeschreven aan luchtbellen, maar van deze oscillaties is aangenomen dat ze geen belangrijke invloed hebben op de totale golfklapimpuls. Na de golfklap tegen de onderzijde van de ligger volgt er een uitstraling naar andere delen van de schuif. De schaalbeplating, die de achterzijde van het compartiment vormt, wordt veelal direct getroffen.

- Golfklappen op de bovenzijde van een ligger.
  De golfklappen op de bovenzijde van een ligger treden op als gevolg van een over de flens van de ligger stortende hoeveelheid water. Meestal optredend na een golfklap tegen de onderzijde van de ligger. Bij een golfklap aan de bovenzijde wordt veel lucht ingesloten. De golfklap gaat vaak gepaard met een straal water langs de schaalbeplating, opspuitend uit het er onder gelegen compartiment als gevolg van de golfklap tegen de onderzijde van de ligger. Dit type golfklap blijkt tot een minder hoge golfklapimpuls aanleiding te geven dan de golfklap tegen de onderzijde van de liggers en is in het verdere verloop van de studie niet meer intensief bestudeerd. In het geval dat er damwandbeplating aan de Noordzeezijde aanwezig was, was dit type golfklap kritischer. De oorzaak hiervan was dat enerzijds de relatief gladde damwand leidde tot een sterkere reflectie van de golf en tot een sterkere golfoverslag over de flens van de bovenste ligger, en dat anderzijds de straal water langs de schaalbeplating ontbrak, waardoor de schaalbeplating direct door het overstortende water werd geraakt. Dit laatste had hogere golfklapdrukken op de schaalbeplating tot gevolg. De afschermende werking van de damwand bleek hierdoor voor de bovenste ligger beperkt te zijn, hetgeen er toe leidde dat deze beplating niet in alle gevallen als een effectieve golfklap-reducerende mogelijkheid kon worden beschouwd. De damwandbeplating is mede daarom niet in het schuifontwerp toegepast (zie ook hoofdstuk 3).

De ongunstigste condities voor wat betreft golfklappen blijken op te treden in de situatie met de bovenste ligger op het niveau van de zeewaterspiegel tijdens stormvloedcondities (ca N.A.P.+3,00 m) en met een relatief kleine schuifopening. Een verklaring hiervoor is dat bij afnemende schuifhoogte het debiet afneemt en de reflectie toeneemt, evenals de lokale golfhoogte, hetgeen oorzaak kan zijn van grotere golfklappen.

In het stijve model zijn golfklapdrukken op de schaalbeplating gemeten en in een later stadium (na vervanging van de perspex liggers door stalen liggers) ook op de bovenste en middelste hoofdligger. Van de gemeten golfklapdrukken (d.w.z. van de topwaarde in de golfklappen) zijn overschrijdingsverdelingen gemaakt (figuur 24).

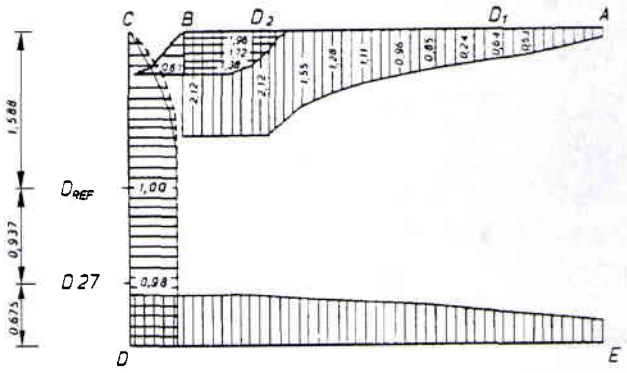


Figuur 24 Overschrijdingsverdeling golfklapdrukken

In figuur 24 zijn de golfklapdrukken uitgedrukt in modelwaarden en de overschrijdingswaarden zijn gebaseerd op het aantal van 1000 watergolven in de proef. Bij de onderlinge vergelijking van proefsituaties (er waren verschillen in golfspectrum, schuifstand en plaats waar de schuif werd getroffen) zijn steeds modelwaarden gebruikt. Pas nadat duidelijkheid was verkregen over de wijze waarop de gemeten drukken moesten worden vertaald naar het prototype, is bij enkele maatgevend geachte golfklappen een vertaling gemaakt naar een ontwerp-golfklapbelasting. Daarbij zijn de topwaarden vertaald volgens schaalregels volgend uit het slamming-model van Chuang. Van het oscillerende deel in de dalende flank van de golfklap is aangenomen dat deze wordt veroorzaakt door ingesloten luchtbellen, dit deel is volgens de schaalregels van het niet-lineaire compressiemodel geschaald.

Ingesloten lucht kan invloed hebben op de drukamplitude en het verloop van de druk in de tijd, maar heeft niet of nauwelijks invloed op de golfklapimpuls. Immers de golfklapimpuls, die gelijk is aan de integraal van de golfklapdruk over het aangeslagen oppervlak en de golfklapduur, wordt voornamelijk bepaald door de hoeveelheid water die, naderend met een zekere snelheid, moet worden afgestopt. Over de schaling van de golfklapimpuls bestond daarom geen onzekerheid. Dit bood de mogelijkheid om met het eindige elementen model van de schuiven responsieberekeningen uit te voeren bij een gekozen golfklapimpuls, daarbij de golfklapduur (en dus de golfklapamplitude) variërend binnen een realistisch gebied om zo tot de meest ongunstige spanningsituatie te komen.

De ontwerp-golfklapimpuls is zowel op basis van statistische als deterministische gegevens vastgesteld. Zo zijn golfklappen gekozen die in het schaalmodel bij het ingestelde golfspectrum (met een geringe kans van voorkomen) een golfklapdruk op de achterwand van het bovenste compartiment veroorzaakten met een overschrijdingskans van 1,5% op 1000 watergolven. Uit een statistische analyse volgde dat de corresponderende totale golfklapbelasting daarmee voldeed aan de geaccepteerde kans van 2,5 x 10^{-4} per jaar voor ontwerpbelastingen. Bij de berekening van de totale golfklapbelasting op de schuif dienden de op de bovenste ligger en achterwand gemeten golfklapdrukken als uitgangsdrukken. De drukken werkend op andere delen van de schuif zijn hiervan afgeleid door middel van diffractieberekeningen. Er zijn geen faseverschillen in rekening gebracht in verticale en horizontale richting van de schuif (geringe faseverschillen zijn in het model wel gemeten). De golfklapbelasting die voor een verticale doorsnede is bepaald wordt geacht gelijktijdig over de gehele lengte van de schuif aan te grijpen. Ter illustratie is de berekende drukverdeling in het bovenste compartiment van een hoge schuif weergegeven (figuur 25). De referentiedruk Dref op de achterzijde van het compartiment is als eenheidsdruk gekozen.

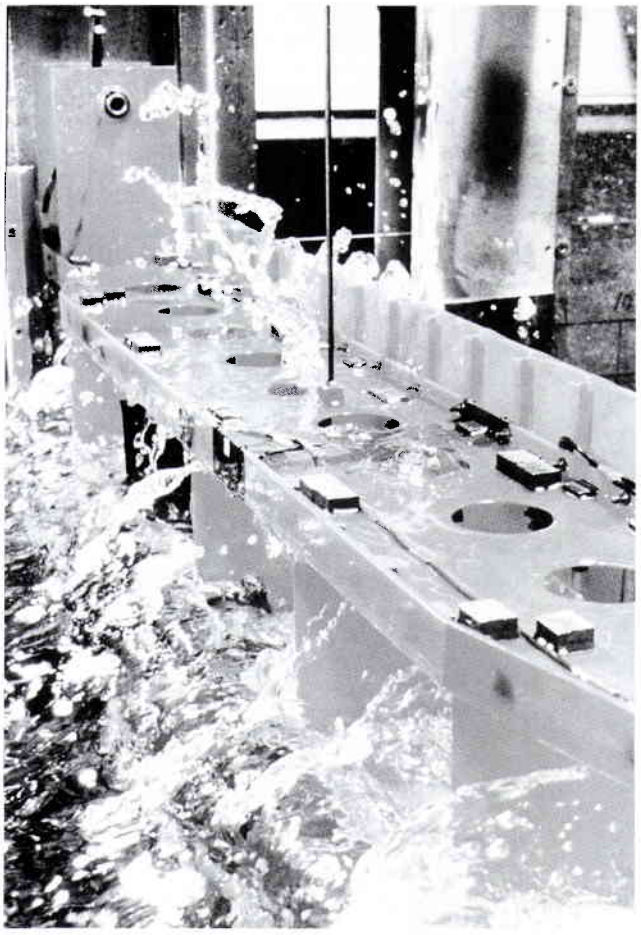


Figuur 25 Berekende drukverdeling golfklap bovenste compartiment hoge schuif

4.2.2 Onderzoek in het elastisch gelijkvormige model

In het elastisch gelijkvormige model zijn bij dezelfde hydraulische condities als in het stijve model responsiemetingen uitgevoerd. Deze metingen dienden ter controle van de totale golfklapbelasting (golfklapimpuls) op de schuif, die uit drukmetingen in het stijve model was afgeleid en deels rekenkundig was bepaald. De responsiemetingen betroffen de oplegkrachten in de schuifsponningen in horizontale en verticale richting. Ook zijn buigende momenten in de hoofdliggers gemeten waaruit de vervorming, en dus het bewegingsgedrag, van de schuif bij golfklappen kon worden afgeleid (figuur 26).

Het onderzoek in het elastisch gelijkvormige model omvatte o.a. volledige simulaties van sluitingen van de kering met oplopende zeewaterstand en hoger wordende golven. Deze proeven bevestigden de conclusie uit het onderzoek in het stijve model dat de situatie met de bovenste plaatligger van de schuif op het niveau van de gemiddelde zeewaterspiegel maatgevend is voor golfklappen. Golfklappen op een lage, tweeregelige schuif bleken beduidend kleiner te zijn dan die op de hoge drieregelige schuif. In de maatgevende situatie zijn proeven met stationaire golf- en stro-



Figuur 26 Golfkap in bovenste compartinent drieregelige plaatligger-schuif

mingsomstandigheden gedaan. Van de gemeten reactiekrachten zijn overschrijdingsverdelingen gemaakt. Deze overschrijdingsverdelingen zijn gebruikt om een selectie te maken van oplegreacties voor een vergelijking met de golfklapimpuls uit het stijve model.

Op basis van drukmetingen in het stijve model is een golfklapimpuls vastgesteld die is geschematiseerd als een driehoekvormige, in de tijd verlopende kracht. Deze golfklapimpuls is als belasting ingevoerd in een geschematiseerd twee-massa-veer rekenmodel van de schuif, waarin ook de hydrodynamische massa is meegenomen. De met dit model berekende responsies zijn vervolgens vergeleken met de gemeten reactiekrachten in het elastisch gelijkvormige model. Aanvankelijk bleken er grote verschillen te zijn. De methode van afschatten van de golfklapimpuls uit de gemeten drukken is daarom bijgesteld. De bijstelling hield in:

- Een overgang naar een meer verfijnde schematisering van de golfklapimpuls, resulterend in een samenstel van meerdere, driehoekvormige in de tijd verlopende krachtdiagrammen.
- Invoering van tijdsverschillen in de optredende golfklapdruk in lengterichting en in doorsnede van de schuif, en middeling van de golfklapdrukken op de verschillende oppervlakken van de schuif.
- Bij de hoge schuif: in rekening brengen van het uitstralingseffect van de golfklap naar het onderste compartiment.

De aldus bijgestelde golfklapimpuls, gebaseerd op drukken met een overschrijdingskans van 0,1% op 1000 watergolven bij de ingestelde proefcondities, bedroeg:

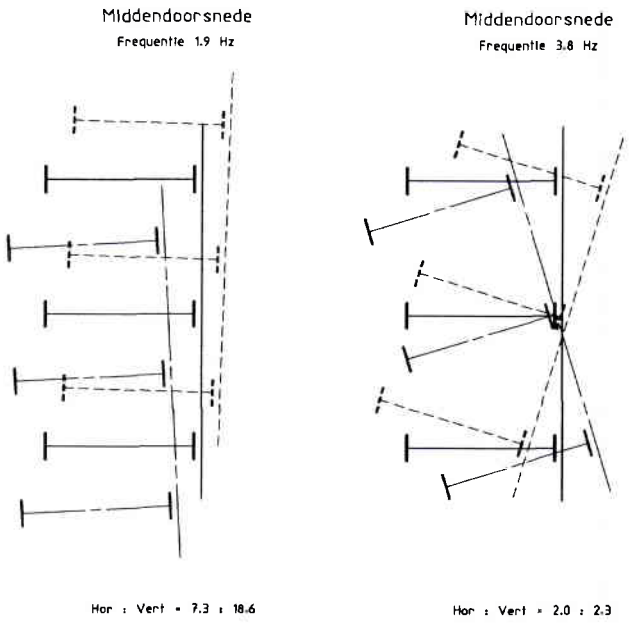
horizontaal P_h = 3500 kNs
verticaal P_v = 1500 kNs
golfklapduur ca. 400 ms

Na nieuwe berekeningen met het massa-veer rekenmodel en vergelijking van de berekende responsie met het elastisch gelijkvormige model, en na controle van de responsie met behulp van het eindige elementen model van de schuif, kon de conclusie worden getrokken dat de gehanteerde methode voor het berekenen van de golfklapimpuls uit drukmetingen in het stijve model acceptabel was. Deze methode is daarna ook gehanteerd voor het bepalen van de maatgevende golfklapbelasting op een schuif waarbij –in een poging om de golfklapbelasting te reduceren– het gatenpatroon in de plaatliggers is gevariëerd.

De grootste golfklapdrukken zijn in het stijve model gemeten aan de onderzijde van de bovenste plaatligger nabij de schaalbeplating en op de schaalbeplating zelf. De druk op de onderzijde van de ligger bleek bij de ingestelde omstandigheden waarden aan te kunnen nemen van:

1,5% overschrijdingswaarde 400 kN/m^2
0,1% overschrijdingswaarde 600 kN/m^2
(overschrijdingspercentages gebaseeerd op 1000 watergolven)

De analyse van de resultaten uit het elastisch gelijkvormige model was ook gericht op het bewegingsgedrag van de schuiven bij golfklappen. In figuur 27 wordt de trillingsbeweging van de middendoorsnede van het hoge schuifmodel getoond die ontstaat bij een zware golfklap in het bovenste compartiment. Uit de figuur blijkt dat de schuif in de basisfrequentie van 1,9 Hz een translatiebeweging uitvoert en in de eerste harmonische frequentie van 3,8 Hz een rotatiebeweging, de laatste overigens met aanzienlijk geringere amplitude. In de figuur zijn de verhoudingsgetallen van horizontale en verticale verplaatsing gegeven.



Figuur 27 Trillingen hoge schuif (middendoorsnede) na golfklap bovenste compartiment

De responsie die in het elastisch gelijkvormige model optreedt is voor golfklappen is nagerekend met het eindige elementen model van de schuif. Met de hydrodynamische watermassa is rekening gehouden. Deze simulatie leverde een kwalitatieve controle van de dynamische eigenschappen van het eindige-elementen rekenmodel.

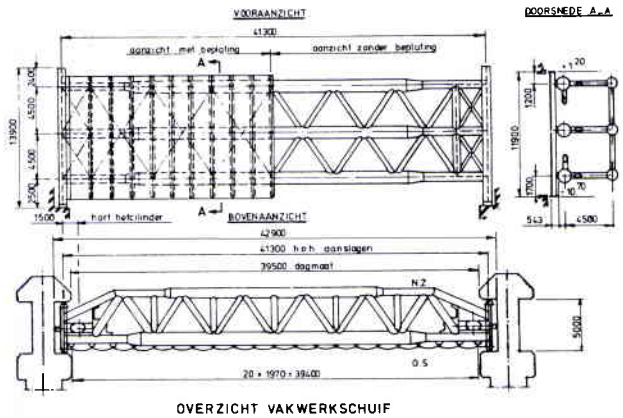
4.2.3 Alternatieve plaatliggervormen

Uit het onderzoek in het stijve model kwam naar voren dat de golfklapdruk op de onderzijde van de bovenste plaatligger op kon lopen tot 400 kN/m^2 (1,5% overschrijdingswaarde bij 1000 golven). Deze belasting werd onacceptabel hoog geoordeeld. Onderzocht is daarom of een reductie van de golfklapbelasting kon worden verkregen door toepassing van een ander gatenpatroon in de lijfplaten van de liggers, waarbij overigens eenzelfde perforatiegraad werd gehandhaafd. Met name is onderzocht of toepassing van veel kleine gaten nabij de flenzen (het gebied waar zich steeds de grootste golfklapdrukken voordeden) reducerend zou kunnen werken. De gedachte hierachter is dat golfklapdrukken minder hoog oplopen wanneer er voldoende perforaties zijn waardoor de druk weglekt.

De aangebrachte perforaties bleken flinke reducties in de golfklapdruk te kunnen opleveren. De reducties traden vooral op in het geperforeerde gebied van de lijfplaten, maar ook was de golfklapdruk op de schaalbeplating lager. Lokaal bleek de golfklapdruk evenwel nog steeds op te kunnen lopen tot 300 kN/m^2 (1,5% overschrijdingswaarde bij 1000 golven). Met deze golfklapdruk werden de onderdelen van de plaatliggerschuif dermate zwaar dat een vakwerkliggerschuif een beter alternatief was.

4.3 Golfklappen op de vakwerkliggerschuiven

Het eerste ontwerp van de vakwerkliggerschuif is gemaakt op basis van de golf- en vervalbelastingen van de plaatliggerschuif. In vergelijking met de plaatliggerschuif ontstond een tamelijk open constructie (figuur 28).



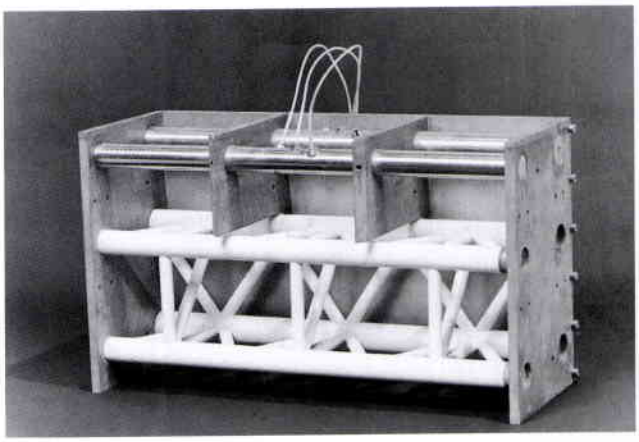
Figuur 28 Eerste ontwerp vakwerkliggerschuif

Ingeschat werd dat de verticale stromings- en golfbelastingen op de vakwerkliggerschuif niet hoger zouden zijn dan op de plaatliggerschuif, maar voor ontwerpdoeleinden werd een nauwkeuriger bepaling van deze belastingen noodzakelijk geacht. Besloten werd om een verificatieonderzoek te doen naar de quasi-statische golfbelastingen. Dit onderzoek is uitgevoerd in een schaalmodel (schaal 1:40) van een sectie van de schuif. Zowel een hoge als een lage schuif zijn beproefd onder regelmatige en onregelmatige golven.

In hetzelfde model is ook nagegaan of zich golfklappen zouden voordoen op de vakwerkliggers. Daartoe is het model van de hoge schuif (figuur 29) enigszins omgebouwd. De hoofdstaven van de bovenste vakwerkligger zijn voorzien van drukopnemers en zijn stijf bevestigd (figuur 30), zodat golfklapdrukken gemeten konden worden. Tevens zijn in het ophangsysteem de totaalbelastingen op de sectie gemeten. Het golfklaponderzoek kon worden beperkt tot de hoge schuif en tot de situatie met de bovenste ligger op zeeniveau (zeewaterstand N.A.P.+3,00 m) en een kleine doorstroomopening. Dit was de situatie die bij al de plaatliggerschuif maatgevend was gebleken.



Figuur 29 Sectiemodel vakwerkliggerschuif



Figuur 30 Voorzieningen voor meting golfklapdrukken hoofdstaven bovenste vakwerkligger

Zoals verwacht bleken zich op de buizen van het vakwerk golfklappen voor te doen. De aan de Noordzeezijde gelegen staven werden daarbij aanzienlijk minder zwaar belast dan de staven nabij de schaalbeplating. Door de ronde vorm van de buizen kan geen

lucht worden ingesloten bij golfklappen. In het gangbare slamming model wordt dan verondersteld dat de golfklapdrukken evenredig zijn aan het kwadraat van de naderingssnelheid van het waterfront. Van de in het model gemeten golfklapdrukken kon worden vastgesteld dat deze zich redelijk met het slamming model lieten voorspellen wanneer de lokale watersnelheid, afgeleid uit meting van de waterspiegelbeweging, in beschouwing werd genomen. Op de staaf nabij de schaalbeplating zijn drukken gemeten tot maximaal 240 kN/m^2.

Golfklapbelastingen traden redelijk gelijkmatig verdeeld over de lengte van de schuif op. Dit kon worden afgeleid uit een vergelijking van de gemeten reactiekrachten in het ophangsysteem van de schuif met rekenkundig samengestelde golfklapbelastingen. In de vergelijking was een tussenstap nodig via het massa-veermodel, omdat het effect van stijfheid van model en ophanging, en de invloed van de massatraagheid op de gemeten reactiekracht moest worden geëlimineerd.

Op basis van de metingen en berekeningen is de golfklapimpuls op de vakwerkliggerschuif in verticale richting afgeleid. De impuls is berekend voor de kortste en langste golfklapduur die in het model is geconstateerd. Dit levert de volgende begrenzingen (bij een overschrijdingskans van 0,1% op 1000 watergolven):

P_v = 190 kNs bij een golfklapduur groter dan 350 ms
P_v = 120 kNs bij een golfklapduur van 100 ms

Vergeleken met de plaatliggerschuif is de golfklapimpuls van de vakwerkschuif meer dan een factor 10 kleiner.

In het ontwerp is uitgegaan van een golfklapbelasting met een overschrijdingskans van 1,5% op 1000 watergolven. Tezamen met de kans van optreden van het bij de proeven ingestelde golfspectrum en de duur van de periode waarin de vakwerkligger tijdens neerlaten van de schuif wordt blootgesteld aan golfklappen levert dit een overschrijdingskans van de golfklapbelasting van 2,5.10^{-4}/jaar. De verticale golfklapimpuls bij deze overschrijdingswaarde bedraagt:

P_v = 95 kNs bij een golfklapduur groter dan 350 ms
P_v = 60 kNs bij een golfklapduur van 100 ms

In de ontwerpberekeningen is met de impuls/golfklapduur combinatie gerekend die de meest ongunstige responsie (spanningen) tot gevolg had.

Ten gevolge van golfklappen tegen de onderzijde van de vakwerkliggers wordt via drukvoortplanting in het water ook de schaalbeplating dynamisch belast. Deze belasting is met behulp van een aangepast golfdiffractieprogramma berekend. De grootste berekende druk op de schaalbeplating bedroeg 30% van de druk die op de nabijgelegen staaf van het vakwerk werd gemeten. De totale impuls P_h op de schuif in horizontale zin was hiermee een factor 2,1 groter dan de verticale impuls P_v. Vergeleken met de plaatliggerschuif betekende dit een aanzienlijk reductie van de golfklapbelasting op de schaalbeplating.

De buizen van het vakwerk sluiten aan op de zogenaamde eindkokers. Buiten deze eindkokers steken horizontale plaatdelen uit waarop zich golfklappen kunnen voordoen. De eindkokers zijn inwendig voorzien van horizontale liggers, die bij verticale waterbewegingen in de kokers door het water kunnen worden geraakt. De onderste ligger kan direct door golven worden getroffen. Initieel is een afschatting van de golfklapbelastingen gemaakt op basis van berekeningen. Hierbij zijn aannamen gedaan met betrekking tot luchtinsluitingen en de invloed hiervan op de grootte van de golfklapbelastingen. Het resultaat van de berekeningen werd evenwel niet voldoende betrouwbaar geacht, reden waarom de golfklapbelastingen door middel van een schaalmodelonderzoek nader zijn vastgesteld. Dit onderzoek is in een stijf model (schaal 1:40) in twee fases uitgevoerd. Een oriënterende fase waarin visuele waarnemingen zijn gedaan, high-speed filmopnamen zijn gemaakt en de optredende fysische verschijnselen zijn bestudeerd. En een meetfase waarin de golfklapbelastingen zijn gemeten en geïnterpreteerd.

In het onderzoek is een hoge schuif beproefd, waarbij achtereenvolgens de onderste en de middelste ligger in de eindkokers op het niveau van de stilwaterlijn is geplaatst. Het bleek dat bij golfklappen tegen de onderzijde van de horizontale liggers in de regel lucht werd ingesloten. Het effect hiervan op de golfklapdruk is gekwantificeerd met behulp van een niet-lineair compressiemodel. De gemeten golfklapdrukken met een overschrijdingskans van 1,5% op 1000 watergolven bedragen:

Middenligger inwendig	: 45 - 70	kN/m2
Middenligger uitkraging	: 240	kN/m2
Onderligger gemiddeld	: 60	kN/m2
Onderligger lokaal	: 150 - 200	kN/m2

Deze golfklapdrukken zijn een factor 2 à 3 lager dan de drukken die initieel waren afgeschat.

5. Belasting op de schuiven

De stroom-, verval- en golfbelastingen op de schuiven zijn grotendeels een functie van de vormgeving en afmetingen van de schuiven. Daarnaast speelt de wijze waarop de kering wordt beheerd (sluitings- en openingsstrategieën) een rol. De volgende tweedeling is aan het begin van het ontwerpproces gemaakt:

- De kerende situatie is maatgevend voor de belasting op de schuiven.
- De situatie waarbij de schuiven bewegen is maatgevend voor de belasting op de bewegingswerken.

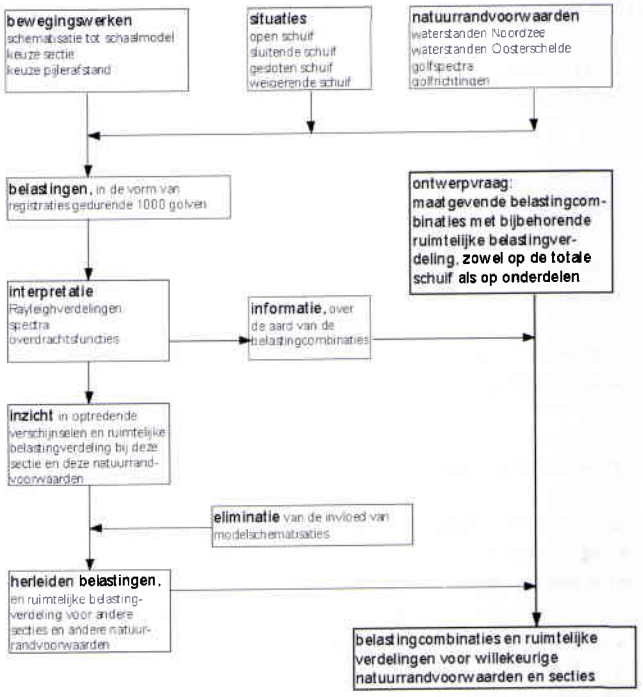
De belasting op de schuiven in kerende situatie bestaat uit de verval- en golfbelasting. De grootte van deze belastingen kon, uitgaande van bekende hydraulische randvoorwaarden, en gebruik makend van de lineaire golftheorie vooraf worden afgeschat. Een eerste schuifontwerp was daardoor mogelijk, maar controle en nadere vaststelling van de belastingen, met name in verticale zin, en bepaling van de belastingen voor andere situaties dan de kerende situatie waren nodig, ook in relatie tot de kans van optreden van de belastingen. Eveneens was een nadere kwantificering van de belastingen nodig voor onderdelen van de schuiven zoals de bewegingswerken. Een groot deel van het belastingonderzoek heeft plaatsgevonden in schaalmodellen, veelal ook in samenhang met het trillings- en golfklaponderzoek. Een vrijwel compleet beeld van de belastingen is hierdoor verkregen voor de plaatliggerschuiven. Toen duidelijk werd dat de vakwerkliggerschuif een beter alternatief was, is het onderzoek naar de belastingen tot dit type schuif uitgebreid.

In dit hoofdstuk wordt nader ingegaan op de belastingen die op de schuiven werkzaam zijn en op de onderzoeken die zijn uitgevoerd. De belasting op de bewegingswerken wordt in het volgende hoofdstuk besproken.

5.1 Onderzoeksopzet

In figuur 31 is de opzet van het golfbelastingsonderzoek in schaalmodellen weergegeven. Allereerst zijn er de schuiven, deze zijn in de beginfase van het onderzoek vrij schematisch in het schaalmodel weergegeven, samen met delen van pijlers, bovenbalken en dorpelbalken. Naarmate het onderzoek vorderde en het schuifontwerp gedetailleerder werd, zijn de schuiven meer in detail in het schaalmodel gereproduceerd. In de beginfase is voornamelijk gemeten aan een diepe sectie van de kering (stroomgeul Roompot), omdat hier de hoogste golven en de zwaarste belastingen werden verwacht. Later is ook onderzoek gedaan voor een ondiepe sectie.

In de beginfase zijn vooral situaties met neergelaten schuiven onderzocht om een nauwkeurig beeld te verkrijgen van de maatgevende horizontale verval- en golfbelastingen. De natuurrand-



Figuur 31 Schema golfbelastingonderzoek

voorwaarden (golven, golfrichtingen, waterstanden) zijn op basis van een probabilistische beschouwing geselecteerd en in het model ingesteld. In de schaalmodellen zijn belastingen gemeten in proeven waarbij een serie van 1000 watergolven werd ingesteld. Alle resultaten zijn in de vorm van overschrijdingsverdelingen gekoppeld aan dit aantal van 1000 golven. Tevens zijn algemene energiedichtheidsspectra en overdrachtsfuncties (versterkingsfactor en fasehoek) bepaald. De metingen en observaties leidden tot inzicht in de optredende verschijnselen en de ruimtelijke belastingverdeling voor de onderzochte secties. Door dit inzicht kon ook de belasting voor andere secties en bij andere natuurrandvoorwaarden worden afgeleid, en kon de vertaalslag naar ontwerpbelastingen met een overschrijdingskans van $2{,}5.10^{-4}$/jaar worden gemaakt.

Bij het golfbelastingonderzoek in schaalmodellen zijn relevante waterstanden ingesteld, zodat de invloed van stroming op de golfbelasting kon worden meegenomen. Overigens was van de stromings- en vervalbelasting afzonderlijk al een compleet beeld verkregen door middel van het trillingsonderzoek.

5.2 Golf- en stromingsbelastingen

5.2.1 Schuiven met plaatliggers

Na een eerste verkennend schaalmodelonderzoek gericht op de variant "pijlers op putten met dubbele schuiven" is een systematisch onderzoek begonnen voor de oplossing met enkele schuiven. Bij dit onderzoek in schaalmodellen zijn loodrecht inkomende golven toegepast en was de kering gesloten. Golven waren zowel regelmatig als onregelmatig (spectrum) en golfperiode en golfhoogte zijn gevarieerd. Schuif, bovenbalk en dorpelbalk waren nog sterk schematisch van vorm in deze modellen. Er is zowel een diepe (Roompot 15) als een ondiepe sectie (Hammen 17) onderzocht. Doel van dit onderzoek was:

- Toetsen van de aanname van lineariteit tussen golfhoogte van de inkomende golf en golfbelasting. Deze toets is noodzakelijk omdat de toe te passen overdrachtsfuncties lineariteit veronderstellen.
- Controle van het rekenmodel QS-golf voor de berekening van horizontale golfbelastingen op de kering, dit model is gebaseerd op de lineaire golftheorie.
- Bepalen van de reflectiecoëfficiënt van de gesloten kering voor gebruik in het rekenmodel QS-golf.

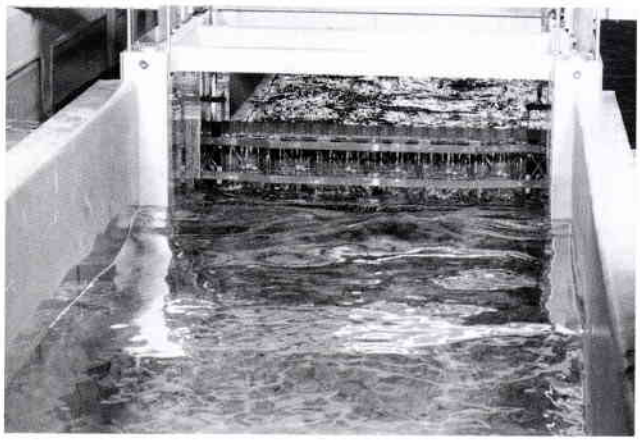
Het onderzoek bevestigde de veronderstelling van lineariteit tussen golfhoogte en horizontale belasting. De gemeten belasting bleek redelijk goed overeen te komen met de door het programma QS-golf berekende belasting, zodat de toepassing van de lineaire golftheorie gerechtvaardigd was.

Het was vervolgens noodzakelijk om een golfbelastingsonderzoek uit te voeren dat het mogelijk zou maken om voor alle secties, en voor nader te kiezen hydraulische randvoorwaarden, een golfbelasting en een ruimtelijke verdeling van de belasting te bepalen. Dit onderzoek is in eerste instantie uitgevoerd voor een diepe sectie in stijve modellen voorzien van kracht- en drukmeters (modelschaal 1:60). In deze onderzoeken is de schuif (plaatliggertype) gedetailleerd weergegeven, waarbij gedurende een deel van het onderzoek (conform het toen vigerende ontwerp) ook een damwandbeplating aan zeezijde op de schuiven aanwezig was. Het onderzoeksprogramma omvatte gesloten, sluitende en weigerende schuifsituaties. De golfinvalshoek werd ingesteld op 0°, 30°en 45° en golfspectra zijn geselecteerd in relatie tot de in te stellen zeewaterstand (0° betreft golven loodrecht op de kering). De relaties tussen zeewaterstand, golfhoogte en golfperiode zijn voor het ééntoppige spectrum geformuleerd als in 4.2.1. Het verval over de kering is ingesteld in relatie tot de te onderzoeken bedrijfssituatie (gesloten, sluitend of openend). De voornaamste conclusies uit dit onderzoek zijn:

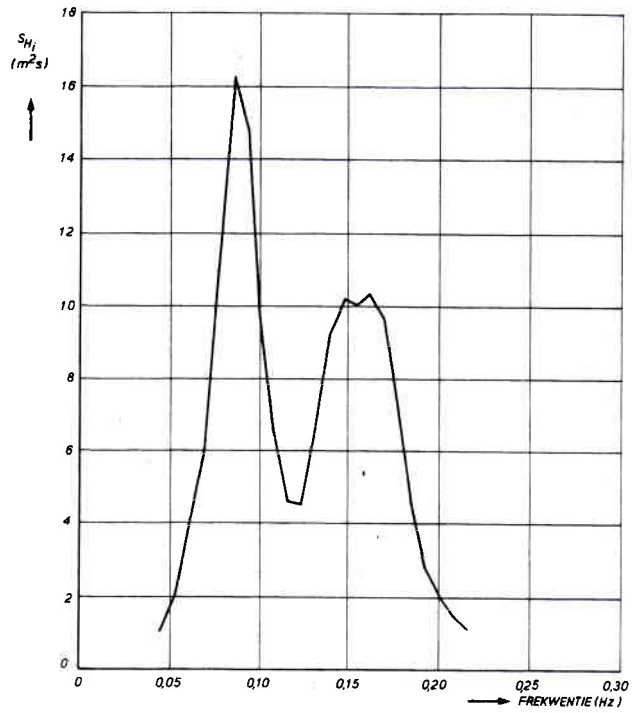
- Het verband tussen de golfbelasting op een volledige sectie (pijler, bovenbalk, schuif en dorpelbalk) en de golfrichting laat zich in een eenvoudige relatie beschrijven, maar voor de langsbelasting op de schuiven is een nader onderzoek nodig vanwege de bijzondere vorm van de eindkokers van de schuiven en van de schuifsponningen in de pijlers.
- De damwandbeplating op de schuiven aan zeezijde heeft weinig tot geen invloed op de grootte van de quasi-statische golfbelastingen op de schuiven.
- Het faseverschil tussen de verticale en de horizontale component van de golfbelasting op de schuiven (plaatliggertype zonder damwand aan zeezijde) bedraagt ca 90°.

De golfbelasting loodrecht op de schuiven kon maximaal worden aangenomen bij loodrecht inkomende golven, reden waarom het vervolgonderzoek in het elastisch gelijkvormige model van de kering alleen bij loodrecht inkomende golven is uitgevoerd. In dit elastisch gelijkvormige model (schaal 1:40) zijn de golfbelastingen op een hoge en een lage schuif van het plaatligger-type definitief vastgesteld. Ten behoeve van het golfbelastingonderzoek zijn de liggers van de schuiven voorzien van rekstrookjes zodat buigende momenten in de liggers konden worden gemeten. Voorts zijn oplegreacties in horizontale en verticale zin gemeten.

Het proevenprogramma omvatte situaties met open kering, sluitende kering, gesloten kering en openende kering. Tevens zijn situaties onderzocht met schuiven weigerend in hoogste positie en in middenposities. Al deze proeven zijn uitgevoerd bij stationaire, niet in de tijd veranderende omstandigheden. In aanvulling hierop zijn sluitings- en openingsproeven verricht voor de hydraulische condities en de schuifstand, overeenkomstig scenario's met stormvloed en het daaraan gekoppelde golfspectrum. Bij de openingsproeven was de stroming richting Noordzee ingesteld. In figuur 32 is een sluitingssituatie weergegeven.



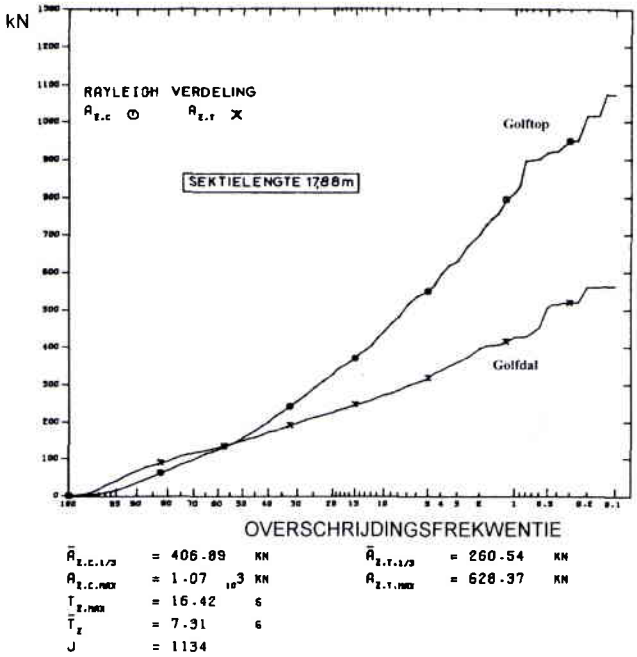
Figuur 32 Sluitingssituatie hoge schuif



Figuur 33 Tweetoppig golfspectrum

De bij de proeven gemeten reactiekrachten zijn verwerkt tot overschrijdingsverdelingen. Tussen het golfspectrum en de gemeten krachten zijn overdrachtsfuncties bepaald. Het in de goot gemeten golfspectrum is daartoe gecorrigeerd voor reflecties op modelconstructie en golfschot. Het effect van stromingsrefractie kon rekenkundig worden verdisconteerd, zodat voor de bepaling van de overdrachtsfuncties kon worden uitgegaan van een inkomend golfspectrum dat vergelijkbaar was met het als natuurrandvoorwaarde gedefinieerde golfspectrum. Dit spectrum was een zogenaamd twee-toppig spectrum met een laagfrequente top karakteristiek voor een deiningsveld en een hoogfrequente top, die het lokale windgolfveld representeerde. Ter illustratie is in figuur 33 het in de goot gemeten spectrum bij een proef met gesloten kering, lage schuif en een extreme zeewaterstand weergegeven.

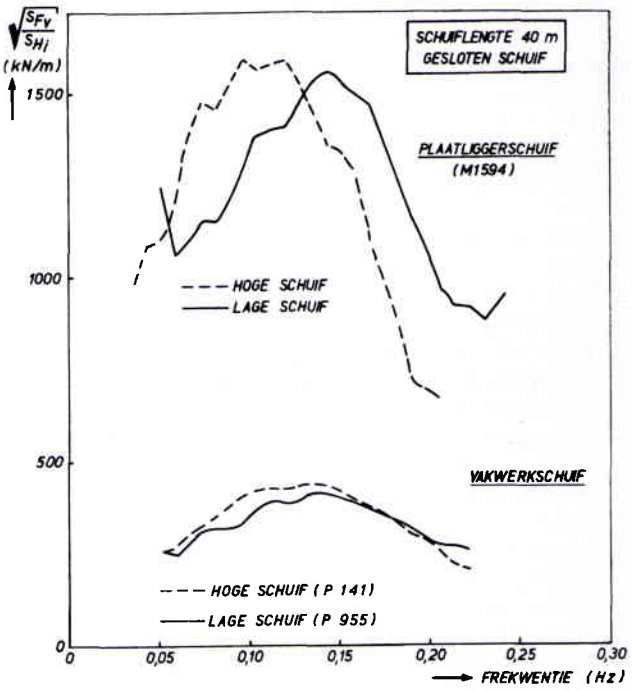
Voor dezelfde proefsituatie wordt in figuur 34 de overschrijdingsfrequentie getoond van de verticale oplegkrachten van een schuif. Duidelijk blijkt dat 0-top en 0-dal geen gelijke overschrijdingsverdeling hebben, reden waarom van beide aparte verdelingen bepaald zijn. Bij de overschrijdingsfrequentie van de horizontale oplegkrachten lopen 0-top en 0-dal meer in fase.



Figuur 34 Overschrijdingsfrequentie verticale oplegkrachten

De 0-top en 0-dal waarden zijn gedefinieerd ten opzichte van de tijdgemiddelde waarde. Deze gemiddelde waarde stelt de stromingsbelasting voor. Een controle hierop is uitgevoerd door de stromingsbelasting afzonderlijk (zonder golven) te meten. Overdrachtsfuncties zijn bepaald voor oplegreacties van de schuiven en voor buigende momenten in de hoofdliggers. In figuur 35 zijn voor bovenomschreven situatie de overdrachtsfuncties van de verticale oplegkracht weergegeven.

Om overdrachtsfuncties te kunnen toepassen op andere, willekeurige golfspectra is lineariteit vereist tussen golfhoogte en kracht. Het onderzoek gaf aan dat lineariteit bestond in de relatie golfhoogte en horizontale golfbelasting in de situatie met neergelaten schuiven. Het bleek dat bij verticale golfbelastingen en ook bij horizontale belastingen in situaties met gedeeltelijk geopende kering niet altijd van lineariteit kon worden uitgegaan. Dit is ondervangen



Figuur 35 Overdrachtsfunctie verticale oplegkracht

door een ruim aantal verschillende situaties door te meten en door proeven te doen met golfspectra die goed aansloten bij het golfrandvoorwaardengebied dat in de semi-probabilistische analyse is gebruikt.

De belastingspectra ten behoeve van het ontwerp zijn berekend met:

$$F(f) = |H(f)|^2 \cdot E(f)$$

waarin:
F(f) = belastingspectrum
E(f) = geselecteerd golfspectrum uit probabilistische analyse van natuurrandvoorwaarden
H(f) = gemeten overdrachtsfunctie (frequentie-afhankelijke versterkingsfactor)

Met de gegeven kans van het golfspectrum (gekoppeld aan de zeewaterstand) en de kans van de situatie ligt ook de kans van het belastingspectrum vast. Voor het bepalen van de belasting met overschrijdingskans van $2{,}5.10^{-4}$/jaar is de verdeling van belastingamplitudes binnen het spectrum vereist. In de probabilistische analyse is aangenomen dat bij het belastingspectrum een Rayleigh-verdeling van belastingamplitudes hoort, zodat de kans van overschrijden van belastingniveaus kan worden vastgesteld en daarmee de totale overschrijdingskans. Omdat het onderzoek aangaf dat de gemeten belastingamplituden niet altijd voldoende nauwkeurig konden worden beschreven met een Rayleighverdeling en er bovendien verschillen waren tussen de verdelingen van 0-top waarden en 0-dal waarden, zijn correctiefactoren ingevoerd.

De in model gemeten overdrachtsfuncties zijn per situatie, inclusief het effect van stroming. Dit effect is afhankelijk van de grootte van de stroomsnelheid, en dus van de grootte van het verval, en daarmee ook een functie van de binnenwaterstand. Met de gegeven kans van de binnenwaterstand is een twee-dimensionale kans-

dichtheidsfunctie van de vervalbelasting en golfbelasting afgeleid. Op deze afleiding zal hier niet verder worden ingegaan. Voor een uitgebreide beschouwing over de kans van belastingen in relatie met de natuurrandvoorwaarden wordt verwezen naar boek 1, deelnota 3.

Voor de dimensionering van de schuiven zijn niet alleen de horizontale en verticale belastingen afzonderlijk van belang, maar dient ook de faserelatie in de beschouwing te worden betrokken. Verticale golfbelastingen zijn voor een deel gerelateerd aan drukverschillen over de liggers van de schuif als gevolg van verticale waterbewegingen. Stroming door de openingen in de liggers speelt hierin ook een rol. Daarnaast is een opwaartse kracht (Archimedes) werkzaam. De verticale belastingen zijn daarmee uit fase met de horizontale golfbelasting, die extremen heeft bij de hoogste en laagste waterspiegelstand. De faserelatie tussen horizontale en verticale belasting is door middel van kruiscorrelatie bepaald (dit leverde het fasespectrum op), maar omdat deze faserelatie een uitmiddeling was over grote en kleine belastingamplituden en in feite alleen de grote belastingamplituden van belang waren voor het ontwerp zijn de faserelaties van de hoogste belastingcombinaties afzonderlijk nagegaan. Uit deze analyse volgde dat de verticale golfbelasting afhankelijk van schuifhoogte, schuifstand, waterstanden en verval tussen 50° en 130° voorliep op de horizontale belasting. Bij de meer extreme belastingen lag het faseverschil tussen 70° en 90°. De gevonden faseverschillen zijn in de ontwerpbelastingen verdisconteerd.

5.2.2 Schuiven met vakwerkliggers

Het lopende golfklaponderzoek gaf aan dat de golfklapbelastingen op de plaatliggers van de schuiven en op de schaalbeplating erg hoog waren. Dit leidde ertoe dat het alternatieve schuifontwerp, de schuif met vakwerkliggers bestaande uit buisprofielen, nader is onderzocht. Ingeschat werd dat de horizontale belastingen vrijwel gelijk zouden zijn aan die van de plaatliggerschuif. Ook werd ingeschat dat de verticale stromings- en golfbelastingen op de vakwerkliggerschuif niet hoger zouden zijn dan die op de plaatliggerschuif, al werd voor ontwerpdoeleinden een meer nauwkeurige bepaling van deze belastingen noodzakelijk geacht. Zie voor een nadere uitleg van de keuze voor de vakwerkschuif deelnota 3.

In de offshore techniek wordt voor de berekening van golfbelastingen op buisconstructies veelal de Morisonformule gehanteerd. Deze formule luidt:

$$F(t) = C_m \rho V \frac{du}{dT} + C_d \frac{1}{2} \rho D u |u|$$

met:

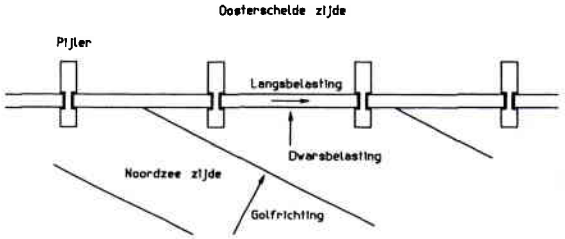
F	= kracht per eenheid van lengte van de buis
C_m	= massatraagheidscoëfficiënt
C_d	= weerstandscoëfficiënt
ρ	= soortelijke massa water
u	= horizontale orbitaalsnelheid in de as van de buis (berekend alsof de buis er niet is)
V	= volume van de buis per eenheid van lengte
D	= diameter van de buis

Niet duidelijk was of toepassing van deze formule verantwoord zou zijn gezien de bijzondere combinatie van golven en stroming, de geometrie van de kering met daarin opgenomen de schuiven en de oriëntatie van de vakwerkstaven ten opzichte van het zeeoppervlak. Besloten is daarom om een verificatieonderzoek te doen naar de geldigheid van de Morisonformule voor de quasi-statische golfbelastingen. Dit onderzoek is uitgevoerd in een schaalmodel (schaal 1:40) van een sectie van de schuif (figuur 29). Zowel een hoge als een lage schuif zijn beproefd en er zijn regelmatige en onregelmatige golven (loodrecht inkomend) ingesteld. Een groot deel van de proeven is uitgevoerd voor de situatie met neergelaten schuiven (meting golfbelastingen en toetsing van de Morison benadering), maar ook zijn proeven met gedeeltelijk neergelaten schuiven verricht, waarbij de gecombineerde stroom- en golfbelasting is gemeten.

De conclusie uit dit onderzoek is dat de C_d- en C_m-coëfficiënten in de Morisonformule, zoals uit de metingen afgeleid, van situatie tot situatie varieerden zodat er geen sprake was van algemeen toepasbare coëfficiënten. Het was daarom niet verantwoord om de verticale golfbelastingen op het vakwerk volledig te bepalen op basis van de Morisonformule. Het onderzoek in het schaalmodel leverde echter voldoende gegevens op (in de vorm van overschrijdingsverdelingen van de totale verticale belasting op de schuif) om voor relevante gebruikssituaties de stroom- en golfbelasting af te kunnen schatten. Horizontale belastingen zijn in dit model niet gemeten, zodat het niet mogelijk is de faserelatie tussen horizontale en verticale belasting op directe wijze te bepalen. Indirect kon de faserelatie wel worden afgeleid door de waterspiegelbeweging vóór de schuif als referentie te kiezen (deze is in fase met de horizontale belasting). De analyse gaf aan dat de faseverschillen in dezelfde ordegrootte lagen als eerder bepaald voor de plaatliggerschuif.

5.3 Langsbelastingen

De stroming door de kering is zodanig dat geen grote langsbelasting op de schuiven aanwezig is. Aanzienlijke langsbelastingen ontstaan wel ten gevolge van scheef inlopende golven (figuur 36). Golven die scheef op een schuif inlopen geven een wisselende belasting op voornamelijk de verticale delen van het vakwerk. Daarbij worden over de lengte van de schuif gezien niet alle delen gelijktijdig maximaal belast. Een tweede langsbelastingcomponent wordt gevormd door de kracht die op de eindkokers werkt. Deze kracht ontstaat doordat de waterspiegel in de schuifsponningen in de pijlers niet momentaan de golfbeweging voor de eindkokers volgt. Er ontstaat daardoor een verval over de eindkokers dat de oorzaak is van een langskracht op de schuif. Afgeschat is dat deze langskracht dominerend is in de totale langsbelasting. De berekeningen van de langsbelastingen zijn gemaakt voor de vakwerkliggerschuif.



Figuur 36 Langsbelasting door scheef inlopende golven

Uitgaande van conservatief gekozen golfrandvoorwaarden is de kracht ten gevolge van het verval over de eindkokers bepaald. Deze kracht diende vervolgens als uitgangspunt in een vervolganalyse gericht op het bewegen van de schuiven in lengterichting. Bewegen van de schuiven is mogelijk doordat de schuiven scharnierend aan de hydraulische cilinders zijn opgehangen en met enige speling zijn gemonteerd tussen de zijgeleidingen op de pijlers. De langsbeweging van een schuif wordt gestopt wanneer

de schuif met de zijaanslag tegen de zijgeleiding komt. De botskracht die zich daarbij ontwikkelt mag vanwege de sterkte van de pijler een bepaalde waarde niet overschrijden.

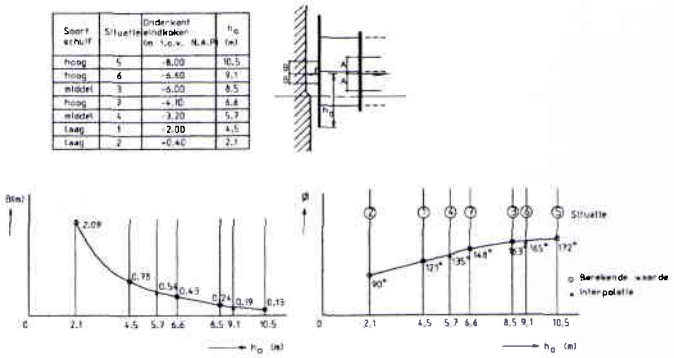
Voor het berekenen van de waterspiegelbeweging in de schuifsponningen is een bewegingsvergelijking opgesteld die een sterke gelijkenis vertoont met de vergelijking van een gedempt, enkelvoudig massa-veersysteem. Berekeningen zijn gemaakt voor drie verschillende schuifhoogtes en voor verschillende schuifposities. Alle berekeningen betroffen situaties met een sluitende schuif, waarbij er van uitgegaan is dat het water niet over de eindharren zou kunnen slaan. Bij lagere schuifposities gebeurt dit wel en bestaat in theorie de mogelijkheid dat het verval over de eindkokers bij de volgende golftop groter is dan zonder golfoverslag. Gezien andere conservatismen in de berekening is hier evenwel niet van uitgegaan. Andere (conservatieve) uitgangspunten waren:

- Het verval over de kering is klein zodat geen afzuiging van golven door stroming onder de schuiven plaats vindt. De zeewaterstand is N.A.P.+2,5 m.
- De golfperiode en hoek van inval van de golven worden zodanig gekozen dat de waterspiegelbeweging ter plaatse van de beide eindkokers ongeveer in tegenfase is; dit geeft vervalkrachten over de eindkokers die in dezelfde richting werken en een maximale langsbelasting opleveren.
- De golven zijn regelmatig met vaste periode en vaste amplitude, en de waterspiegelbewegingen in de schuifsponningen ter linker en ter rechter zijde van de schuif zijn identiek bij dezelfde golf, afgezien van het faseverschil. Dit laatste veronderstelt dat de schuif in een middenpositie staat tussen de pijlers en dat de schuifsponningen gelijkvormig zijn.

De bewegingsvergelijking voor het water in de schuifsponning bestaat uit een traagheidsterm (water in de schuifsponning wordt versneld en vertraagd), een dempingsterm (gerelateerd aan hydraulische verliezen bij verticale stroming in de schuifsponning), een veerkrachtterm (gerelateerd aan de eigengewichtskracht van het water in de sponning bij verandering ten opzichte van de stilwaterspiegel) en een aandrijvende kracht ten gevolge van de golfdruk op het niveau van de opening naar de schuifsponning.

De stromingsverliezen beperken de amplitude van de waterspiegelbeweging in de sponning en beïnvloeden de faserelatie met de golfbeweging buiten de sponning. Het is noodzakelijk om een juiste aanname van de verliescoëfficiënt te maken. In het schaalmodel waarin het optreden van golfklappen op de eindkokers is onderzocht zijn daartoe enkele aparte metingen van de waterspiegelbeweging in de sponning gedaan bij regelmatige golven. Deze metingen zijn gebruikt om de verliescoëfficiënt af te schatten en om het rekenmodel te kalibreren.

Het merendeel van de berekeningen is uitgevoerd voor een golfperiode van 5 s. De hoek tussen golffront en schuif is 27°. Bij deze hoek en periode is de golfbeweging ter plaatse van beide eindkokers in tegenfase, hetgeen vervalkrachten over de eindkokers oplevert die in dezelfde richting werken. Bij twee situaties is de golfperiode gevarieerd om de gevoeligheid van het systeem voor periode-variaties te testen. Hieruit kwam naar voren dat de amplitude van de waterspiegelbeweging in de schuifsponning het grootst is wanneer de golfperiode ongeveer gelijk is aan de eigenperiode van het water in de schuifsponning. In figuur 37 is voor verschillende situaties met een golfperiode van 5 s en een golfamplitude A=1,6 m (inclusief reflectie) de amplitude B van de waterspiegelbeweging in de schuifsponning uitgezet alsmede de fasehoek f met de golfbeweging, h_0 de afstand van de onderkant van de eindhar tot de stilwaterspiegel.

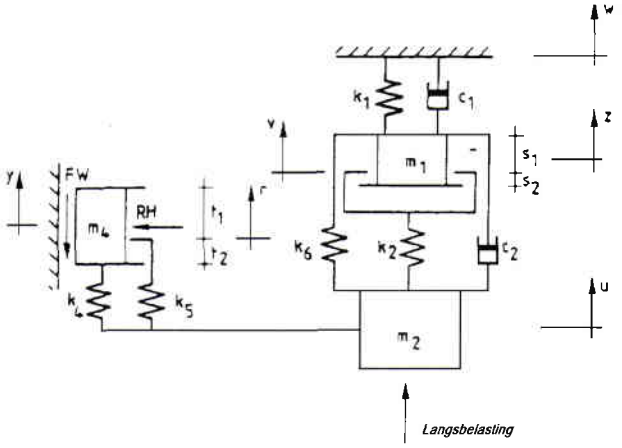


Figuur 37 Waterspiegelbeweging in schuifsponning

Wanneer de waterspiegelbeweging in de schuifsponning wordt afgetrokken van de golfbeweging vóór de eindkoker wordt het tijdsafhankelijke verval over de eindkoker verkregen. De langsbelasting op de schuif is bepaald als het product van vervaldruk en oppervlak van de twee eindkokers, met de aanname dat de krachten op de afzonderlijke eindkokers in fase zijn. De overschrijdingskans van deze langsbelasting is afgeleid uit de kans van voorkomen van het spectrum waar de deterministisch gekozen golf deel van uitmaakt, de kans van voorkomen van de gekozen golfrichting en de tijdsduur van de schuif in een vastgesteld deel van het totale sluittraject.

5.4 Krachten door langsbelasting

De schuiven zijn met enige speling opgehangen tussen de pijlers. De speling is nodig om klemlopen van de schuiven ten gevolge van zettingen van de pijlers te voorkomen en een zekere ongelijkloop in de aandrijving van de schuiven toe te laten. De schuiven hangen scharnierend aan hydraulische cilinders, die als pendelstaven zijn te beschouwen. Binnen de spelingsruimte met de pijlers kunnen de schuiven onder invloed van de langsbelasting een pendelbeweging maken. De vrije beweging wordt onderdrukt of afgeremd doordat er wrijvingskrachten ontstaan tussen de schuifaanslagen en de geleidingen. Deze wrijvingskrachten zijn een functie van de dwarsbelasting op de schuif, de voorspanning in de aanslagen en de wrijvingscoëfficiënt in de glijdvlakken. Wanneer evenwel de langsbelasting groot genoeg is kan de schuif geheel doorglijden en met de zijaanslag (als eerste aanname een massief rubberblok) tegen de zijgeleiding op de pijler stoten. De botskrachten die hierbij ontstaan zijn rekenkundig bepaald. In deze analyses is de veerkarakteristiek van de zijaanslag gevarieerd, en zijn de optredende versnellingen in de schuif bestudeerd in verband met massatraagheidskrachten op de hefcilinders. Bij de berekeningen is gebruik gemaakt van een geschematiseerd massa-veermodel (figuur 38). Voorts zijn de faserelatie tussen dwarsbelasting (bestaande uit verval- en golfbelasting) en langsbelasting (ten gevolge van scheef inlopende golven) geanalyseerd.
In de schematisatie is de schuif teruggebracht tot een massief blok met massa m_2 (waarin inbegrepen de hydrodynamische massa), dat een horizontale translatiebeweging kan uitvoeren. Dit blok glijdt met verende elementen (de schuifaanslagen) over een glijvlak. De schuifaanslagen hebben een massa m_4 en een veerstijfheid k_4. De schuifaanslagen kunnen een zekere afschuifvervorming ondergaan en worden vervolgens, om overbelasting van het rubber te voorkomen, geblokkeerd door een aanslag (bewegingsmogelijkheid t_1 en t_2). De aanslag heeft een stijfheid k_5. De pijler wordt in het schema gerepresenteerd door massa m_1 (inclusief hydrodynamische massa), veerstijfheid k_1 en demping c_1. Deze laatste is als



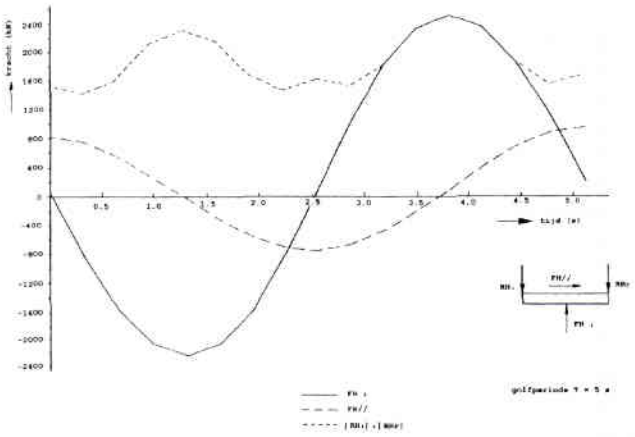
Figuur 38 Massa-veermodel voor langsbewegingen schuif

kritische (hoge) demping ingevoerd. De spelingsmogelijkheid tussen de beide pijlers is s_1 en s_2 en de stijfheid van de zijaanslag wordt gerepresenteerd met de veer k_2. Bij het bewegen van de schuif in de schuifsponningen wordt water verdrongen, dit resulteert in een hydrodynamische kracht, die in het schema wordt gerepresenteerd door een veer k_6 en een demper c_2. De langsbelasting werkt op de massa m_2 en de dwarsbelasting geeft een oplegreactie RH in de schuifaanslagen. De wrijvingskracht in het glijdvlak wordt voorgesteld door de kracht FW. De wrijvingscoëfficiënt is een functie van de snelheid van bewegen over het glijdvlak. Bij stilstand is de wrijvingscoëfficiënt hoger dan bij beweging. In het rekenmodel is een functie gehanteerd die is gebaseerd op proeven met het gebruikte materiaal van aanslagen en geleidingen.

Initieel zijn verkennende berekeningen gemaakt. Nagegaan is wat de invloed is van verschillende grootheden op de beweging van de schuif en de daarbij optredende botskrachten. Zo is de wrijvingscoëfficiënt-functie gevarieerd, en is de invloed van de hydrodynamische coëfficiënten en de stijfheid van de zijaanslag nagegaan. Ook is de voorspanning in de schuifaanslagen gevarieerd. Door deze voorspanning is er altijd een kracht in het glijdvlak van de aanslagen aanwezig, waardoor ook steeds een wrijvingskracht kan worden opgebouwd.

Bij de berekeningen is uitgegaan van de ongunstige aanname dat de schuif tegen één pijler aanligt waardoor er dus een maximale speling aanwezig is bij het bewegen naar de andere pijler. De grootte van de speling bleek een belangrijke parameter te zijn: hoe groter de speling, hoe groter de botskracht. De voorspanning in de aanslagen bleek, wanneer de langsbelasting groot genoeg was, nog maar nauwelijks afremmend te werken. Vergroting van de waarde van de hydrodynamische coëfficiënten bleek reducerend te werken op de botskrachten, maar er is onderkend dat er grote onzekerheid bestond over de werkelijke waarde van deze coëfficiënten. De stijfheid van de zijaanslag heeft veel invloed op de botskrachten, een lagere stijfheid van de zijaanslagen heeft lagere botskrachten tot gevolg.

Voor de zeven verschillende situaties van schuif- en waterstanden zoals aangegeven in figuur 37, is vervolgens een serie afsluitende berekeningen gemaakt. Zie voor de berekeningsresultaten deelnota 3, hoofdstuk 5. In de berekeningen is de tegenwerkende massatraagheid, die de schuif als pendelsysteem ondervindt bij uitwijken uit de middenstand, meegenomen. De langsbelasting is afgeleid uit de optredende vervallen over de eindkokers bij scheef inlopende golven. Om de vervallen over de eindkokers in dezelfde richting te laten werken (ongunstig uitgangspunt) zijn golven met een periode van 5 s aangenomen in combinatie met een aangolfhoek van 27°. Ter illustratie zijn in figuur 39 de dwarsbelasting (golfdeel) en de langsbelasting voor situatie 5 van figuur 37 gegeven. Aangegeven is ook de oplegreactie in de aanslagen, die als absolute waarde in de berekeningen is ingevoerd. Met voorspanning in de aanslagen is geen rekening gehouden, omdat de belasting zo groot kan zijn dat de voorspankracht niet meer aanwezig is. De dwarsbelasting is in de berekeningen vermeerderd met een stationaire component vanuit het verval over de kering.



Figuur 39 Belastingcombinatie (golfdeel) voor langsbewegingsberekeningen

Uit voorlopige berekeningen kwam naar voren dat de langskrachten konden resulteren in botskrachten die een factor 1,5 tot 4,5 hoger waren dan de amplitude van de langsbelasting. Met name hoge schuiven in hoge schuifposities bleken daarbij ongunstig te zijn. De langsversnellingen die bij de botsingen optraden liepen op tot 3 m/s^2. De berekende botskrachten bleken in een aantal situaties niet toelaatbaar te zijn voor de pijlers. De botskrachten zijn bij de afsluitende berekeningen gereduceerd door toepassing van een ander type zijaanslag, de zogenaamde shock-cell, met een relatief grote vervormingscapaciteit (zie ook deelnota 4). Vanuit de veerkarakteristiek van de zijaanslag en de toelaatbare botskracht op de pijler is de toelaatbare speling bepaald voor de situatie nadat zettingen (vergroten van de speling) zijn opgetreden. Dit heeft ertoe geleid dat van een aantal schuiven de zijaanslagen met voorspanning (d.i. speling<0) tussen de pijlers zijn gemonteerd.

6. Belasting op de bewegingswerken

De schuiven zijn ter plaatse van de eindkokers opgehangen aan hydraulische cilinders. De cilinders dienen om de schuiven op en neer te bewegen en om de verticale belastingen op te nemen. Omdat de cilinders net buiten de schuifsponningen vallen kunnen de zuigerstangen bij een (gedeeltelijk) neergelaten schuif direct door golven en stroming worden belast. De stroom- en golfbelastingen zijn in een schaalmodel gemeten.

In dit hoofdstuk komt ook het onderzoek aan de orde dat was gericht op de belastingen die in verticale zin op de bewegingswerken optreden; de stick-slip verschijnselen bij sluiten en openen van de schuiven, en de hiermee samengaande dynamische effecten in de bewegingswerken. Deze studie is door het Waterloopkundig Laboratorium en de Technische Universiteit Eindhoven uitgevoerd. Daarbij zijn simulaties uitgevoerd met behulp van vereenvoudigde mathematische modellen.

6.1 Golf- en stromingsbelasting op de zuigerstangen

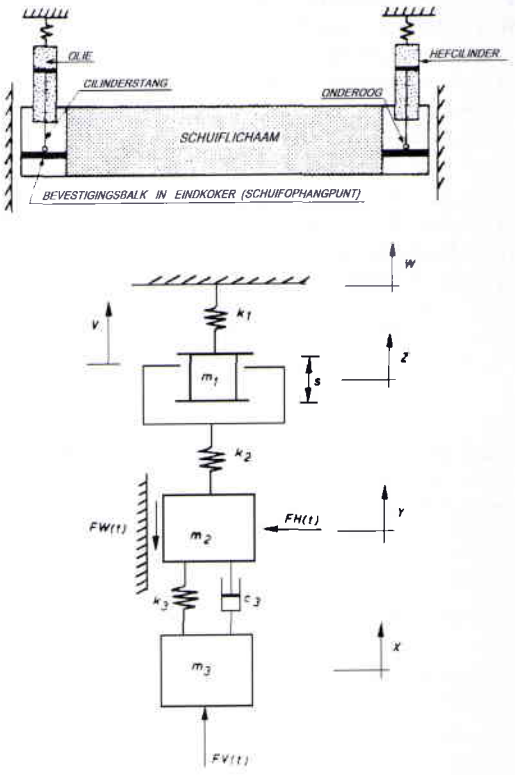
De golf- en stromingsbelasting op de zuigerstangen van de cilinders is in schaalmodellen onderzocht. Dit was noodzakelijk omdat vanwege de geometrie in de onmiddellijke omgeving van de zuigerstang (schuifsponning, bovenbalk, schuif) geen gebruik gemaakt kon worden van rekenmodellen zoals die bestaan voor cirkelvormige doorsneden in vrij stromend water.

De golf- en stromingskrachten op een zuigerstang worden in belangrijke mate bepaald door de breedte van het zog. Deze breedte is afhankelijk van de punten op de zuigerstang waar de stroming loslaat en is daarmee een functie van viscositeit en turbulentie-intensiteit. In een schaalmodel kunnen juist hierin schaaleffecten optreden, waardoor de modelmetingen tot overschatting van de belastingen kunnen leiden. Om inzicht te krijgen in deze schaaleffecten zijn proeven verricht in twee modellen, een model op schaal 1:60, en een model op schaal 1:30. De modelproeven zijn uitgevoerd met een diameter van de zuigerstang van 625 mm, uit de meetwaarden zijn de krachten voor kleinere zuigerstangdiameters afgeleid (de uiteindelijke zuigerstangdiameters varieeren van 390 tot 520 mm). De modellen omvatten de volledige omgevingsgeometrie van de zuigerstangen, drie secties (model op schaal 1:60) of twee secties (1:30) van de kering en een deel van de voorlandgeometrie. De krachten op de cilinders zijn gemeten in de situatie met volledig neergelaten schuiven, waarbij het deel van de zuigerstangen dat in het water steekt het grootst is. Het waterstandsverschil over de kering geeft bij gesloten schuif geen aanleiding tot stromingskrachten, afgezien van geringe krachten door lekstroming. Golven die over de kering slaan, of bij lage waterstand over de schuif lopen, kunnen wel stromingskrachten veroorzaken. Deze krachten zijn in het model gemeten.

In het onderzoek zijn geen belangrijke schaaleffecten geconstateerd. De 0,1% waarde van de belasting (gebaseerd op proeven met 1000 golven) werd vastgesteld op 65 à 90 kN bij een zeewaterstand van N.A.P.+5,0 m en een significante inkomende golfhoogte H_{si} = 3,5 m. Gecontroleerd is of stroming aanleiding zou kunnen geven tot ernstige trillingen in de zuigerstangen. Daartoe zijn de eigenfrequenties van de zuigerstangen, ingedompeld in water, berekend en vergeleken met excitatiefrequenties als gevolg van wervelvorming in het zog. Gevonden is dat de maximaal optredende stroomsnelheden rond de zuigerstang een factor 2 lager zijn dan de snelheid waarbij zich zware trillingen kunnen voordoen. Er is hiermee voldoende veiligheid ter voorkoming van trillingen aanwezig.

6.2 Verticale belastingen hefcilinders

Voor de dimensionering van de bewegingswerken was het van belang om inzicht te krijgen in de krachten die in de verschillende gebruikssituaties op de hydraulische cilinders werken. Onderzocht is hoe de stroom- en golfbelastingen op de schuiven



Figuur 40 drie-massa-veersysteem voor verticale bewegingen schuif

op de bewegingswerken worden overgedragen en wat het effect van het bewegen van de schuiven is op de krachtswerking in de cilinders. Dit onderzoek is gedaan met behulp van geschematiseerde massa-veermodellen. Er is in het onderzoek gebruik gemaakt van één-, twee- en drie-massa-veersystemen (figuur 40).

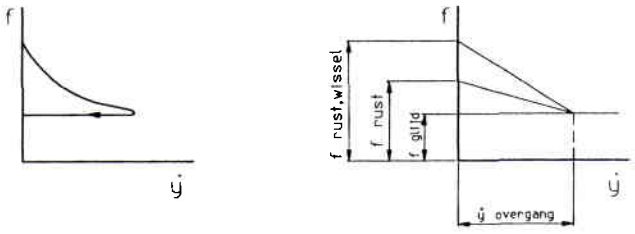
In het schema van figuur 40 is k_1 de veerstijfheid van beide hefcilinders, m_1 een representatieve massa van de hefcilinders en s een spelingsmogelijkheid in het ophangsysteem. De overige veren en massa's betreffen de eindkokers en de schuif zelf. In de massa's is de hydrodynamische massa inbegrepen. De demping c_3 betreft de demping van de schuif in water. De verticale en horizontale stroom- en golfbelastingen FV en FH werken op de schuif, de wrijvingskracht FW werkt in de glijvlakken van de schuif. In de simulaties is de verplaatsing w van de bovenkant van de zuigerstang in de cilinders als functie van de tijd opgelegd. De snelheid van bewegen van de schuif is 3 mm/s.

6.2.1 Krachten hefcilinders bij bewegen schuif

Bij sluiten en openen glijden de schuiven met de aanslagen over de geleidingen en ondervinden daarbij weerstand. De wrijvingskrachten zijn afhankelijk van de voorspanning en de wrijvingscoefficiënt in de schuifgeleidingen en de horizontale belasting op de schuif. De totale kracht die door de hefcilinders moet worden ontwikkeld is gelijk aan de som van de verticale belastingen, het eigen gewicht en de wrijvingskracht. De wrijvingskracht is daarbij altijd tegen de bewegingsrichting in gericht.

De wrijvingscoëfficiënt van de materialen die voor de aanslagen en geleidingen zijn toegepast, is d.m.v. proeven bepaald (zie deelnota 4). Uit dit onderzoek kwam naar voren dat de wrijvingscoëfficiënt bij stilstand het hoogst is. Komt de schuif in beweging dan neemt de wrijvingscoëfficiënt snel af tot een lagere waarde. Het blijkt ook dat de wrijvingscoëfficiënt bij stilstand hoger is bij wisseling van bewegingsrichting dan bij een herhaalde beweging in dezelfde richting. In figuur 41 is de snelheidsafhankelijke wrijvingscoëfficiënt μ weergegeven. Tevens is aangegeven op welke wijze de coëfficiënt is geschematiseerd in computersimulaties. De waarde van de wrijvingscoëfficiënt is in de verschillende simulaties gevarieerd. In de definitieve berekeningen is, voortbouwend op de resultaten van voorgaande berekeningen, gekozen voor:

μ_{rust} = 0,4 (wisseling richting)
μ_{rust} = 0,3 (herhaald bewegen in dezelfde richting)
$\mu_{glijden}$ = 0,2 (snelheid groter dan 0,005 m/s)



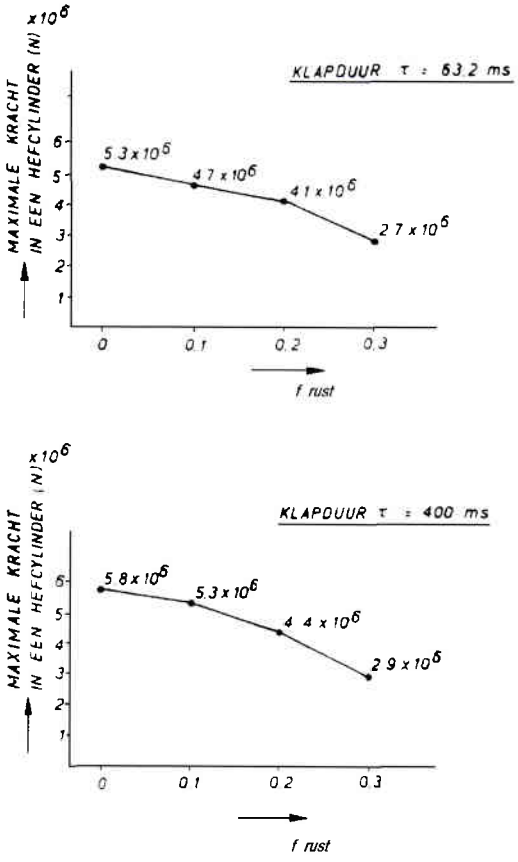
Figuur 41 Wrijvingscoëfficiënten gemeten en geschematiseerd

Bij bewegen van de schuifaanslagen over de glijplaten zijn er momenten van rust en van doorschieten (stick-slip). Dit hangt samen met het verschil tussen de statische (stilstand) en dynamische (beweging) wrijvingscoëfficiënt. De slipfrequentie is hoger naarmate de bewegingssnelheid groter is, de stijfheid van de aanslagen groter is en de horizontale belasting lager is. Simulaties toonden aan dat de stick-slipfrequentie vele malen hoger is dan de eigenfrequenties van de schuiven (buig- en torsiebewegingen). In de simulaties leidde het plotseling doorschieten van de schuif over de geleidingen tot verticale buigtrillingen in de schuif, die echter snel uitdempten. Geconcludeerd is dat het stick-slip verschijnsel niet regelmatig en krachtig genoeg is om de schuif te doen opslingeren.

De simulaties leverden ook een beeld op over de overdracht van de belastingen naar de hefcilinders bij bewegen van de schuif, inclusief het effect van een eventuele voorspanning in de aanslagen van de schuif. Het blijkt dat het dynamische deel van de verticale stroom- en golfbelastingen zonder belangrijke versterking of verzwakking wordt doorgegeven aan de cilinders, maar veelal was deze belasting ondergeschikt aan de belasting t.g.v. de wrijvingskracht in de aanslagen.

6.2.2 Krachten hefcilinders door golfklappen

Om een indruk te krijgen van de overdracht van golfklapbelastingen naar de hefcilinders, is voor de plaatliggerschuif een aantal simulaties met het boven beschreven rekenmodel uitgevoerd. In het model (figuur 40) was overigens geen spelingsmogelijkheid aangebracht en de massa's m_1 en m_2 zijn samen genomen evenals de veren k_1 en k_2. Geanalyseerd zijn een wrijvingsloze situatie en situaties met wrijving in de schuifaanslagen. Als invoer zijn golfklappen geprogrammeerd die in het elastisch gelijkvormige model in de vorm van horizontale en verticale oplegreacties zijn gemeten. Vooraf waren enige berekeningen nodig om de gemeten oplegreacties terug te vertalen naar een golfklapimpuls. Uitgegaan is van een golfklap met een overschrijdingskans van 1,5% op 1000 golven. Deze golfklap treedt op in de as van de bovenste ligger van een hoge schuif. De duur van de golfklap is in de simulaties gesteld



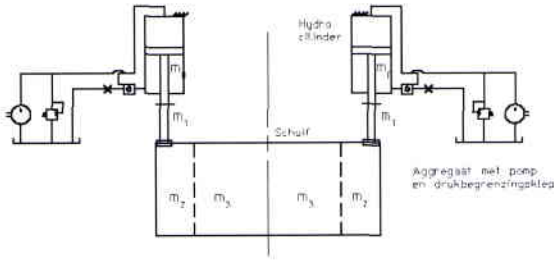
Figuur 42 Kracht in hefcilinders ten gevolge van een golfklap

op 63 ms en 400 ms. Deze waarden zijn gebaseerd op een golfklapduur van 10 ms in het schaalmodel. Vertaling volgens het stromingsdrukmodel en het luchtcompressiemodel levert de boven- en onderwaarde op. In de simulaties is voorts verondersteld dat de statische wrijvingscoëfficiënt kon variëren tussen 0 (geen wrijving) en 0,3. Het resultaat van de berekeningen is te zien in figuur 42.

De twee grafieken geven een schatting van de optredende krachten in de hefcilinders bij de plaatliggerschuiven. Inbegrepen is het effect van het quasi-statische deel van de golfbelasting. Bij de vakwerkliggerschuif zijn de golfklapbelastingen aanzienlijk kleiner en konden de belastingen voor de hefcilinders naar rato worden gereduceerd.

6.3 Dynamische verschijnselen aandrijfsysteem

Door middel van simulaties zijn de dynamische verschijnselen in de hefcilinders en het hydraulisch systeem bestudeerd. Daartoe is het mechanisch systeem van de schuif en het hydraulisch systeem van de hefcilinders gemodelleerd in een simulatiemodel. Het mechanisch systeem omvatte de schuif en de bewegende massa's van de cilinder (zuigerstang en zuiger). Het hydraulisch systeem omvatte het aggregaat met hydropomp en drukbegrenzingsklep, de leidingen naar de cilinder en de olie in de cilinder (figuur 43).



Figuur 43 Schema aandrijfsysteem

Simulaties zijn uitgevoerd voor een 11,9 m hoge schuif bij de condities begin-sluiten, midden-sluiten en einde-sluiten. De positie van de schuif bepaalt het volume aan olie in de cilinder boven en onder de zuiger. Deze volumes kunnen worden voorgesteld door twee elastische veren. De 'olieveer' boven de zuiger in de hoogste stand van de schuif is veel stijver dan de 'olieveer' onder de zuiger. Omdat de veren parallel staan neemt de stijfste, bovenste olieveer nagenoeg alle dynamische krachten op en zal de druk boven de zuiger het sterkst variëren. Het tegenovergestelde vindt plaats wanneer de schuif zich in de laagste stand bevindt. Ten gevolge van de stick-slip verschijnselen kunnen kleine drukveranderingen in het hydraulisch systeem optreden.

De stijfheid van de olieveren is afhankelijk van de bedrijfstemperatuur en de aanwezigheid (eventueel) van lucht in de olie. In de simulaties is de stijfheid van de olie (de effectieve compressiemodulus) dan ook gevarieerd. Ook de leidingweerstand en de wrijving tussen cilinder en zuiger is gevarieerd en is de invloed van een niet-ideale drukbegrenzingsklep nagegaan.

Met deze simulaties is inzicht opgebouwd in het functioneren van het hydraulisch systeem. De belangrijkste constatering is dat geen ontoelaatbaar hoge drukpieken of trillingen in het hydraulisch systeem zullen optreden. Tevens zijn er geen aanwijzingen gevonden dat er een vacuüm in de olie zou kunnen ontstaan. Nagegaan is ook of de nominale daalsnelheid van de schuif (gemiddeld in de tijd) zou kunnen worden beïnvloed door de wrijving bij bewegen van de schuif over de glijoplegging of door niet adequaat functioneren van componenten in het hydraulisch systeem, zoals de hydropomp en de drukbegrenzingsklep, dit bleek niet het geval te zijn. De simulaties gaven geen aanleiding om modificaties aan te brengen in de constructie van de hefcilinders en de afmetingen van de leidingen.

7. Vergelijking vakwerkliggerschuif met plaatliggerschuif

Na de afronding van het golfklaponderzoek voor de vakwerkliggerschuiven is een vergelijking gemaakt met de plaatliggerschuif. De plaatliggerschuif is onderwerp geweest van uitgebreide onderzoekingen zowel wat betreft de dynamische belastingen als de quasi-statische belastingen. Hierdoor is een compleet beeld verkregen van de belastingen en van het responsiegedrag van deze schuiven bij alle relevante operationele situaties (open kering, sluiten, keren, openen, weigeren van schuiven). Voor de vakwerkliggerschuif is door middel van aanvullend onderzoek ook voldoende inzicht verkregen in de hydraulische belastingen en in mogelijke dynamische effecten. In de vergelijking speelden de volgende factoren een rol:

1. Grootte van de verval-, stromings-, en golfbelastingen
2. Grootte van de golfklapbelastingen
3. Trillingsgevoeligheid
4. Relaties met andere onderdelen van de kering
5. Constructie-technische overwegingen
6. Kosten

Hier worden de eerste vier factoren, gerelateerd aan het hydraulische onderzoek, besproken. Voor de andere twee factoren wordt verwezen naar deelnota 3.

7.1 Verval-, stromings- en golfbelastingen

In de situatie met neergelaten schuiven zijn de horizontale vervalbelastingen voor beide typen schuiven gelijk. Dit geldt ook voor de horizontale golfbelasting. Weliswaar is de vakwerkliggerschuif opener waardoor de locale golfbeweging anders is, maar de constructiebreedte van de schuif is klein ten opzichte van de lengte van de maatgevende golf waardoor verschillen in horizontale belasting klein zijn. De verticale golfbelastingen zijn bij de vakwerkliggerschuif aanzienlijk kleiner, omdat de golven op een kleiner constructie-oppervlak, de vakwerkstaven, werken. Bovendien hebben de vakwerkstaven een gunstig profiel met een lage stromingsweerstand. De reductie in verticale belasting ten opzichte van de plaatliggerschuif bedraagt een factor 3 à 4. Het fase-verschil tussen horizontale en verticale golfbelasting ligt bij beide typen schuiven in hetzelfde gebied.

Bij gedeeltelijk neergelaten schuiven zijn de horizontale verval-, stromings en golfbelastingen bij beide typen schuiven ongeveer gelijk maar de verticale stromings- en golfbelasting is ook nu kleiner bij de vakwerkliggerschuif. In het ontwerp van de bewegingswerken maakt dit overigens niet zo veel uit, omdat de wrijvingskrachten in de glijopleggingen, die een functie zijn van de horizontale belastingen, in hoge mate de dimensionering bepalen.

7.2 Golfklapbelastingen

De golfklapbelastingen op de vakwerkliggerschuif zijn in overeenkomstige omstandigheden aanzienlijk kleiner dan op de plaatliggerschuif. Met de open constructie van de vakwerkliggers wordt een reductie met een factor 10 in golfklapimpuls bereikt. Dit is zowel een gevolg van lagere golfklapdrukken op de vakwerkstaven en schaalbeplating, als van een kleiner aangeslagen oppervlak.

7.3 Trillingen

Qua trillingen voldoen beide schuiftypen aan de eisen. De eigenfrequenties van de vakwerkliggerschuif zijn bij verticale bewegingen hoger dan bij de plaatliggerschuif vanwege een geringere hydrodynamische massa. Ook bij horizontale bewegingen zijn de eigenfrequenties wat hoger. Gezien vanuit het oogpunt van stromingsgeïnduceerde trillingen is dit gunstiger.

7.4 Relatie andere onderdelen kering

De keuze voor een vakwerkliggerschuif of een plaatliggerschuif heeft geen belangrijke consequenties voor andere onderdelen van de kering. Bij gedeeltelijk neergelaten (weigerende) schuif kan de stroming aan de benedenstroomse zijde van de schuif bij een vakwerkligger wat meer naar beneden gericht zijn, omdat er een verticale stroming door de schuif mogelijk is. De toplaag van de bodembescherming kan daardoor zwaarder worden belast. De zwaarste conditie voor de toplaag is echter de situatie met een schuif weigerend in hoogste positie. In deze situatie is het niet, of nauwelijks, van belang of de schuifconstructie open of gesloten is.

7.5 Conclusie hydraulische vergelijking

Alles overziend kan worden gesteld dat een vakwerkliggerschuif aanzienlijk gunstiger is voor wat betreft golfklapbelastingen, gunstiger is voor wat betreft de verticale quasi-statische belastingen en neutraal voor wat betreft andere hydraulische aspecten. De keuze voor een vakwerkliggerschuif is vanuit waterbouwkundig oogpunt gerechtvaardigd.

8. Documentatie

De rapporten in deze lijst zijn alle opgesteld door het Waterloopkundig Laboratorium

M1320-IV Stormvloedkering Oosterschelde. Onderzoek naar de golfklapgevoeligheid van de pijleroplossing met dubbele kering. Voorlopig verslag modelonderzoek, 1976.

M1335-I Stormvloedkering Oosterschelde. Golfklappen op de schuif in de Oosterscheldecaisson. Verslag modelonderzoek, 1977.

M1335-II Stormvloedkering Oosterschelde. Golfklappen: een zuigermodel met samendrukbaar water. Verslag modelonderzoek, 1979.

M1335-III Stormvloedkering Oosterschelde. Golfklappen: een literatuuroverzicht en schaaleffecten in modelonderzoek. Verslag bureaustudie, 1979.

M1381-I Golfklappen op stalen roosterschuiven in de stormvloedkering van de Oosterschelde. Nota modelonderzoek, 1976.

M1381-II Stormvloedkering Oosterschelde. Golfklappen tegen betonnen roosterschuiven. Verslag modelonderzoek, 1978.

M1396-III Stormvloedkering Oosterschelde. Belasting in gesloten toestand; oriënterend onderzoek golfklappen scheve golfaanval. Verslag modelonderzoek, 1982.

M1424 Stormvloedkering Oosterschelde. Krachten en trillingen bij de hefschuiven in de pijlerdam. Verslag modelonderzoek, 1978.

M1469 Stormvloedkering Oosterschelde. Diepe en ondiepe sectie, golfbelasting in gesloten toestand. Verslag modelonderzoek, 1978.

M1494 Stormvloedkering Oosterschelde. Vooronderzoek m.b.v. een stijf sectiemodel naar stroom- en golfbelasting op dorpelbalken, bovenbalken en plaatliggerschuiven. Vooronderzoek trillingsgedrag van de plaatliggerschuiven met behulp van een massa-veermodel. Verslag modelonderzoek 1981.

M1504 Stormvloedkering Oosterschelde. Oriënterend onderzoek naar golfklappen op de plaatliggerschuiven, sectie R15, loodrechte golfaanval en aanstroming. Verslag modelonderzoek, 1982.

M1507 Stormvloedkering Oosterschelde. R15 belasting bij gesloten en weigerende schuif. Verslag modelonderzoek, 1980.

M1509 Stormvloedkering Oosterschelde. R15 quasi-statische golfbelastingen op de plaatliggerschuif. Verslag modelonderzoek, 1982.

M1516 Stormvloedkering Oosterschelde. R15 belasting bij gesloten, sluitende en weigerende schuif. Verslag modelonderzoek, 1980.

M1543 Stormvloedkering Oosterschelde. Belasting bij gesloten en weigerende schuif, sectie R15, h.o.h. afstand pijlers 45 m, scheve golfaanval. Verslag modelonderzoek, 1981.

M1561 Stormvloedkering Oosterschelde. Onderzoek trillingsgedrag plaatliggerschuiven/balken m.b.v. elastisch gelijkvormig model. Verslag modelonderzoek, 1981.

M1582 Stormvloedkering Oosterschelde. Onderzoek naar toegevoegde watermassa's plaatliggerschuiven met behulp van een electrisch analogon. Verslag bureaustudie, 1982.

M1594 Stormvloedkering Oosterschelde. Golfbelastingonderzoek plaatliggerschuiven en bovenbalk m.b.v. elastisch gelijkvormig model. Verslag modelonderzoek, 1982.

M1614 Stormvloedkering Oosterschelde. Golfbelastingen op de hefcilinder. Verslag modelonderzoek, 198?.

M1648-II Stormvloedkering Oosterschelde. Onderzoek m.b.v. elastisch gelijkvormig model naar responsiegedrag plaatliggerschuiven bij golfklapbelastingen. Berekening van optredende krachten in de bewegingswerken van de schuiven. Verslag modelonderzoek en bureaustudie, 1981.

M1648-III Stormvloedkering Oosterschelde. Berekening optredende krachten aanslagen vakwerkliggerschuiven, waterspiegelbewegingen eindkokers en sponningruimten, botskrachten bij bewegen schuiven in lengterichting. Verslag bureaustudie, 1984.

M1664 Stormvloedkering Oosterschelde. Golfklappen op de hefschuiven; optimalisering plaatliggerschuif. Verslag modelonderzoek, 1980.

M1723/ M1687 Stormvloedkering Oosterschelde. Verticale golfbelaslastingen op de vakwerkschuiven, loodrechte golfaanval. Verslag modelonderzoek, 1982.

M1835 Stormvloedkering Oosterschelde. Golfklappen op de eindkokers. Verslag modelonderzoek, 1982.

R1280 Stormvloedkering Oosterschelde. Bewegingsgedrag schuiven onder invloed van het beweegsysteem en de wrijving bij de glijdopleggingen. Verslag bureaustudie, 1979.

R1280-I Stormvloedkering Oosterschelde. Invloed richtingsgevoeligheid wrijvingskracht op het bewegingsgedrag van de schuiven. Verslag bureaustudie, 1980.

R1280-II Stormvloedkering Oosterschelde. Dynamische verschijnselen bij verticaal bewegen en belasten van de vakwerkschuiven. Verslag bureaustudie, 1982.

R1547 Stormvloedkering Oosterschelde. Trillingsaspecten vakwerkschuif uitgaande van het aanstoten van de cilindrische vakwerkstaven. Verslag bureaustudie, 1982.

Q298/H326 Conditiebewaking stormvloedkering Oosterschelde. Meetsysteem op schuiven S13 en R21 en bovenbalk R20. Verslag ontwerp en realisatie meetsysteem, 1988.

Q605/H626 Conditiebewaking stormvloedkering Oosterschelde. Meting tijdens hoogwatersluiting 14-02-1989. Verslag buitenmetingen, 1990.

9. Literatuur

R.J. de Jong, T.H.G. Jongeling, D. Kooman, H. van der Weijde, Vibration of Gates and Beams; in: Hydraulic Aspects of Coastal Structures, Vol. 2, Delft University Press. pp. 25-46, 1980.

P.A. Kolkman, Maximale golfklapdrukken volgens het stromingsmodel, het schokgolfmodel en het waterpistonmodel; Notities periode 1969 - 1990, WL, 1992.

D. Kooman, R.M. Korthof, H. Ligteringen, J.C. Stans
Wave Impact Forces, Consequences for Gate Design; in: Hydraulic Aspecs of Coastal Structures, Vol. 2, Delft University Press. pp. 47-66, 1980.

TNO-Iweco, Berekening van de toegevoegde watermassa voor de schuiven van de stormvloedkering in de Oosterschelde; rapport 5061060-80-1, 1980.

Technische Hogeschool Eindhoven, Laboratorium voor aandrijftechniek, Het gedrag van de hydraulische componenten van de keerschuiven toegepast in de stormvloedkering Oosterschelde; 1982.

Deelnota 3: Schuiven

Inhoud

1. Algemeen pagina **62**

2. Randvoorwaarden ontwerp **65**
2.1 Hydraulische randvoorwaarden
2.2 Golf- en vervalbelasting
2.3 IJsbelasting
2.4 Constructieve randvoorwaarden

3. Constructief ontwerp schuiven **72**
3.1 Plaatliggerschuif
3.2 Vakwerkschuif
3.3 Schuifconstructie
3.4 Materiaal en gewicht schuiven

4. Berekening schuiven **78**
4.1 Berekeningsopzet
4.2 Belasting- en materiaalfactoren
4.3 Belastingen
4.3.1 Golfklappen
4.3.2 Eigengewicht en opdrijving
4.3.3 Stroming
4.3.4 Voorspanning schuifgeleiding
4.3.5 Torsie
4.3.6 Langsbelasting
4.4 Dynamisch gedrag schuiven

5. Resultaten berekening schuiven **47**
5.1 Statische berekening onderdelen
5.1.1 Beplating
5.1.2 Schaalbuizen en stompen
5.1.3 Vakwerkliggers
5.1.4 Eindkokers
5.2 Vermoeiing
5.2.1 Onderzoek spanningsconcentratiefactoren
5.2.2 Vermoeiingsberekening

6. Materiaalproblematiek warmgewalste buizen **99**
6.1 Grofkorrelig materiaal buizen
6.2 Onderzoek materiaaleigenschappen
6.3 Reparatiemethodieken
6.3.1 Spanningsarm gloeien
6.3.2 Peening
6.3.3 Slijpen
6.3.4 Conclusies onderzoek reparatiemethodieken
6.4 Herstelstrategie
6.4.1 Herberekening initieel defect
6.4.2 Uitvoering herstelstrategie
6.5 Inspectietechnieken

7. Uitvoering en onderhoud **108**
7.1 Fabricage
7.2 Conservering
7.3 Montage
7.4 Onderhoud

8. Documentatie **116**

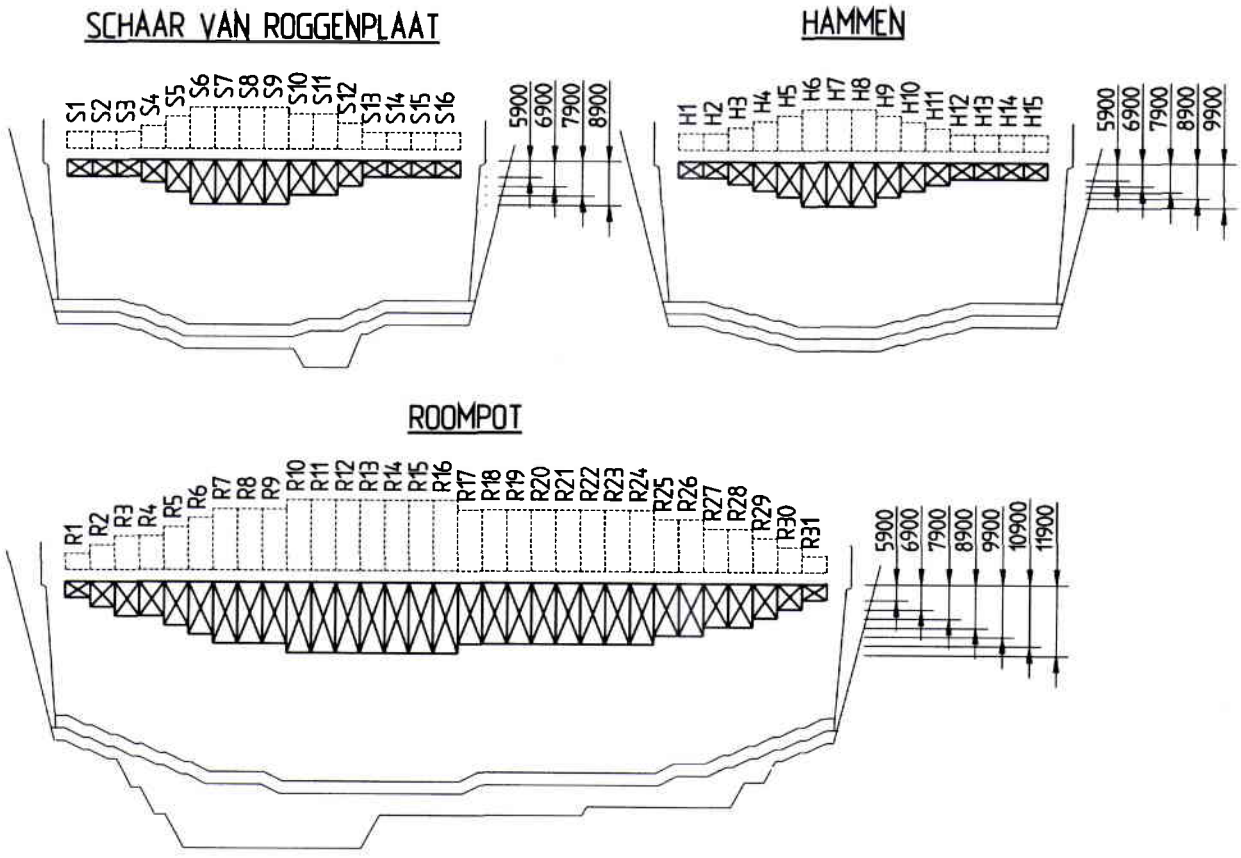
1. Algemeen

De afsluitmiddelen van de stormvloedkering in de Oosterschelde bestaan uit een vast deel (pijlers, dorpelbalken, bovenbalken) en een beweegbaar deel; de schuiven. De schuiven bevinden zich aan de Noordzeezijde van de kering en bestaan uit een waterkerende schaalbeplating, vakwerkliggers en eindkokers. De schaalbeplating ligt t.o.v. de vakwerkliggers en eindkokers aan de Oosterscheldezijde van de schuifconstructie. Via de vakwerkliggers worden de golf- en vervalbelastingen op de schaalbeplating overgebracht naar de eindkokers, die deze belasting afdragen aan de pijlers.

De ontwikkeling van de schuifconstructie van de stormvloedkering in de Oosterschelde is een proces geweest dat zich heeft voltrokken in een periode van jaren. Vele tientallen onderzoeken en berekeningen hebben geleid tot de definitieve uitvoering van de constructie. Zonder aan dit gehele proces voorbij te willen gaan zijn er twee principiële keuzes aan te wijzen die doorslaggevend zijn geweest in de ontwikkeling tot het huidige ontwerp.

De eerste principiële keuze in de totstandkoming van het huidige ontwerp is om hefschuiven toe te passen als afsluitmiddel. De tweede principiële keuze is de beslissing om na uitgebreid onderzoek af te stappen van plaatliggerschuiven en over te gaan naar vakwerkliggerschuiven.

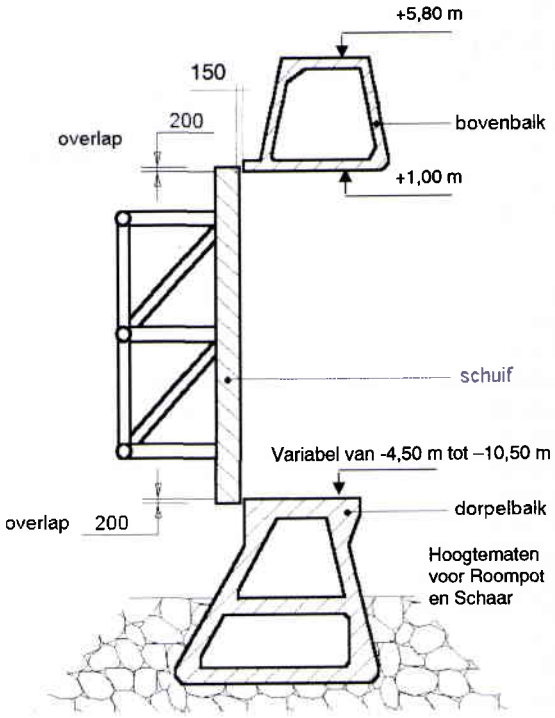
In de Blauwe Nota [1.1], die het constructieve uitgangspunt voor de te bouwen kering vormde, heeft men, na een groot aantal varianten te hebben beschouwd, het onderzoek geconcentreerd op een drietal ontwerpen van 'afsluitmiddelen', te weten roosterschuiven, hefschuiven en tolkleppen (deelnota 1, hoofdstuk 2). Uit analyse van de studieresultaten en een kostenvergelijking kwamen hefschuiven tussen pijlers als meest aantrekkelijke constructie naar voren. Als extra voordelen van de hefschuiven werden genoemd 'de vrijheid ze zowel in caissons als tussen pijlers toe te kunnen passen' en 'de ongevoeligheid van het constructietype indien de belastingen groter zouden zijn dan aangenomen'. Met hefschuiven zijn bovendien grotere pijlerafstanden mogelijk dan bij oplossingen met roosterschuiven of tolkleppen.



Figuur 1.1 Overzicht schuiven

Het advies de kering uit te voeren met hefschuiven heeft een directe invloed op de bewegingswerken, de drempelconstructie, de opbouw van de pijlers en de maximale pijlerafstand. Hefschuiven vereisen namelijk bewegingswerken met een lange slag, een afzonderlijke dorpelbalk en pijlers met sponningen.

Reeds in de Blauwe Nota wordt aangegeven dat het dubbel uitvoeren van de schuiven niet noodzakelijk is; de stormvloedkering kan van een enkel stel schuiven worden voorzien zonder dat de beoogde veiligheid in het gedrang komt. Als optie wordt nog aangegeven de sponningen dubbel uit te voeren zodat in een later stadium altijd nog dubbele schuiven aangebracht kunnen worden. Hoewel er in de Blauwe Nota geen schuifconstructie wordt aangegeven, is er in de (kostprijs)berekeningen uitgegaan van het voorlopig ontwerp voor een plaatliggerschuif.
De hoogte van een schuif is afhankelijk van de positie in een sluitgat. De schuiven van de stormvloedkering in de Oosterschelde variëren in kerende hoogte van 5,9 m tot 11,9 m met een stapgrootte in de schuifhoogte van 1,0 m. De keuze van de stapgrootte volgt uit een afweging tussen optimalisatie van het doorstroomprofiel, dat de bodemlijn van de stroomgeulen volgt, en een standaardisatie van de schuifconstructies. Omdat in geopende stand de onderzijde van alle schuiven op N.A.P.+1,20 m ligt (in de Hammen op N.A.P.+1,00 m) geeft de bovenzijde van de geopende schuiven het omgekeerde beeld van het bodemprofiel van de sluitgaten te zien (figuur 1.1). In totaal zijn er 62 doorstroomopeningen; 15 in de Hammen, 16 in de Schaar van Roggenplaat en 31 in de Roompot.

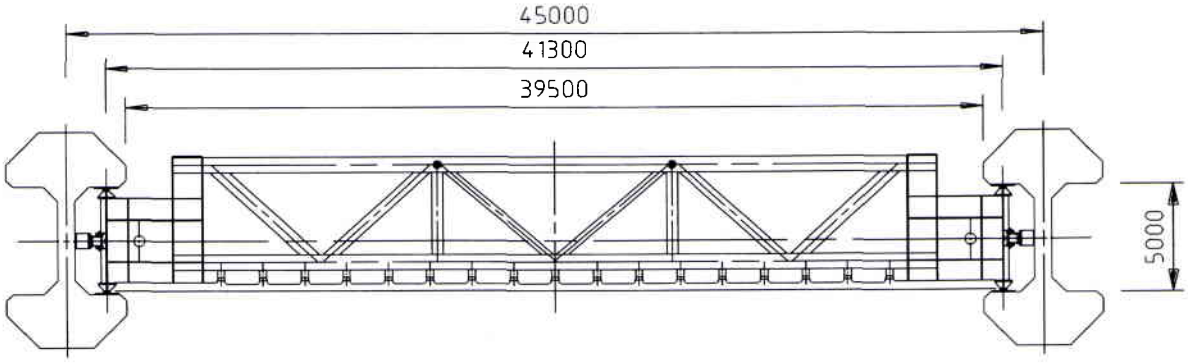


Figuur 1.2 Overlap en spleet schuif met dorpelbalk en bovenbalk

Uitgangspunt in het ontwerp van de Oosterscheldekering is een zodanig doorstroomprofiel dat, als de schuiven geheven zijn, er bij Yerseke een gemiddeld getijverschil van 2,70 m optreedt (Boek 1, deelnota 3, hoofdstuk 3.1) . Worden er echter hoge waterstanden verwacht, dan worden de schuiven neergelaten. In gesloten stand keren de schuiven vanaf de bovenzijde van de dorpelbalken (variabel van N.A.P. -10,50 m tot -4,50 m) tot N.A.P.+1,20 m. Tot N.A.P.+5,80 m vervullen de bovenbalken de waterkerende functie. Voor de Hammen zijn, in vergelijking met de Roompot en Schaar, alle hoogtematen 0,20 m verlaagd. In de Hammen keren de schuiven tot N.A.P.+1,00 m en de bovenbalken tot N.A.P.+5,60 m. De reden voor dit verschil is de grotere aanlegdiepte van het funderingsbed in de Hammen.

De overlap in hoogterichting van de schuiven met de dorpel- en bovenbalk bedraagt 0,20 m (figuur 1.2). De overlap is nodig om hoogteverschillen tussen de pijlers en maatafwijkingen van de dorpel- en bovenbalk op te vangen. Vergroting van de overlap is niet wenselijk vanwege trillingseffecten in de spleet tussen schuif en dorpel- en bovenbalk. Verkleining van de overlap vermindert het kerend effect van de schuif. Met het debiet dat bij een stormvloed door de thans aanwezige spleten stroomt, en dat door golfoverslag in de Oosterschelde terecht komt, is in de beheerstrategieën rekening gehouden. Doordat een schuif theoretisch zowel de dorpel- als de bovenbalk met 0,20 m moet 'overlappen' is de schuifhoogte 0,40 m groter dan de verticale maat van de doorstroomopening gemeten tussen bovenkant dorpelbalk en onderkant bovenbalk. Een schuif met een hoogte van 11,9 m dicht derhalve een doorstroomopening van 11,5 m af.

De hart-op-hart afstand van de pijlers bedraagt 45 m en de dagmaat van de doorstroomopening is 39,5 m. De theoretische overspanning van de schuiven is 41,3 m (figuur 1.3). Omdat de pijlers onafhankelijk van elkaar zijn gefundeerd is bij het ontwerp van de schuiven en de schuifgeleidingen rekening gehouden met de plaatsingstoleranties van de pijler. Daarnaast treden ten gevolge van de belasting op de kering, en het eventueel uitspoelen van zandlaagjes tussen de funderingsmatten en de pijlervoet, zettingsverschillen op tussen de pijlers. Door deze verplaatsingen kan de dagmaat van een doorstroomopening groter of kleiner worden. De schuiven zijn



Figuur 1.3 Schuifconstructie en doorstroomopening

per doorstroomopening op een lengte gefabriceerd die is afgeleid van de ingemeten h.o.h.-afstand van de pijlers rekening houdend met eventuele verplaatsingen door ongelijkmatige zettingen.
De schuiven zijn uitgevoerd met tweezijdige aanslagen die over glijplaten in de sponningen van de pijlers bewegen. Om 'klapperen' van de schuif in de sponningen te voorkomen zijn de aanslagen voorgespannen met rubberopleggingen. In zijdelingse richting zijn de schuiven eveneens van glijdopleggingen voorzien, zie voor een volledige beschrijving van de schuif- en zijgeleiding deelnota 4.

De schuiven worden met behulp van twee hydraulische cilinders op en neer bewogen. De cilinders zijn bevestigd aan de schuifuiteinden en worden onafhankelijk aangedreven. De beweging van de schuif wordt gecontroleerd door een gelijkloopinstallatie. De bewegingswerken hebben een viervoudige taak:
- Schuif sluiten
- Schuif op de onderaanslag gedrukt houden
- Schuif openen
- Schuif in geheven stand houden

Voor een beschrijving van de werktuigbouwkundige installaties wordt verwezen naar deelnota 5. De aansturing en bediening van de bewegingswerken vindt plaats middels de elektrische installatie, zie hiervoor deelnota 6. Voor inspectie van de schuiven is een speciaal inspectievoertuig ontwikkeld, zie hiervoor deelnota 7.

Achtereenvolgens worden in hoofdstuk 2 de randvoorwaarden en 'onafhankelijke' belastingen (belastingen die weinig afhankelijk zijn van de vormgeving van de schuif) behandeld. Hoofdstuk 3 beschrijft de ontwikkeling en constructie van het schuifontwerp. In hoofdstuk 4 worden de uitgangspunten van de berekening beschreven, waarna in hoofdstuk 5 de berekeningsresultaten volgen. Hoofdstuk 6 behandelt de opgetreden materiaalproblematiek inclusief de aanpassingen op de uitgangspunten van de berekening en de wijzigingen van de berekeningsresultaten die hiervan weer het gevolg waren. Fabricage, montage en onderhoud worden beknopt behandeld in hoofdstuk 7. De deelnota besluit met een overzicht van de gebruikte documentatie in hoofdstuk 8.

2. Randvoorwaarden ontwerp

Voor het ontwerp en de berekening van de schuiven zijn er een aantal belastingen die niet, of nauwelijks, afhankelijk zijn van de constructieve vormgeving van de stalen schuifconstructie. Dit zijn de horizontaal werkende golf- en vervalbelasting volgend uit de maatgevende waterstanden (de zgn. hydraulische randvoorwaarden) en de ijsbelasting (die vnl. theoretisch bepaald is).

2.1 Hydraulische randvoorwaarden

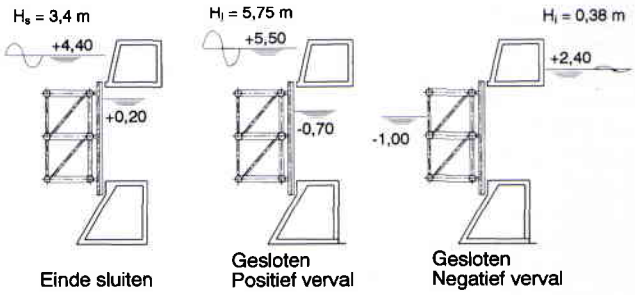
Tot sluiting van de schuiven wordt overgegaan als de gemiddelde waterstand op de Noordzee het grenspeil overschrijdt. Afhankelijk van de te volgen beheersstrategie voor het Oosterscheldebekken kan het grenspeil variëren van N.A.P.+2,75 m tot N.A.P.+3,25 m. Indien de schuiven niet door de operators gesloten worden zullen ze, bij een verdergaande stijging van de waterstand op de Noordzee, automatisch door het Noodsluitsysteem (NSS) gesloten worden bij het bereiken van het alarmpeil. De uiterste waarde van het alarmpeil bedraagt N.A.P.+3,50 m. Bij waterstanden boven het alarmpeil is het niet verantwoord meer te starten met het sluiten van de schuiven. Zie voor meer informatie over het beheer van de kering, de verschillende sluitingsstrategieën en de relatie tussen grenspeil en alarmpeil Boek 1, deelnota 5, hoofdstuk 1.

De schuifconstructie dient te voldoen aan bepaalde hydraulische en constructieve randvoorwaarden. De hydraulische randvoorwaarden hebben betrekking op de belastingen ten gevolge van verval en golven tijdens het sluiten en openen en bij een gesloten kering. Naast de horizontaal en verticaal gerichte krachten die het gevolg zijn van deze belastingen moet ook rekening gehouden worden met verticale belastingen ten gevolge van golfklappen en stroming. Deze belastingen zijn het grootst tijdens het sluiten van de schuiven.

De maatgevende hydraulische randvoorwaarden zijn gegeven in figuur 2.1. Het betreft de situaties:
- "Einde sluiten"
- "Gesloten positief verval"
- "Gesloten negatief verval"

Bovenstaande situatie "Gesloten positief verval" leidt tot de extreme totaalbelasting in horizontale richting. De extreme totaalbelasting in verticale richting voor een gesloten kering treedt op in de situatie "Maximale verticaalbelasting".

De overschrijdingskans, van de belastingen die bij deze randvoorwaarden behoren, bedraagt $2{,}5 \times 10^{-4}$ per jaar. De bij deze situaties horende waterstanden en golfhoogtes zijn:
"Einde sluiten"
Bij sluiten, na overschrijding van het grenspeil, bij einde sluiting:
- Waterstand Noordzeezijde N.A.P.+4,4 m
- Waterstand Oosterscheldezijde N.A.P.+0,2 m
- Significante golfhoogte H_s = 3,4 m
- Golfperiode T_p = 5,6 s



Figuur 2.1 Maatgevende waterstanden

"Gesloten positief verval"
Gesloten kering maatgevende storm- en hoogwatercondities (horizontaalbelasting):
- Waterstand Noordzeezijde N.A.P.+5,5 m
- Waterstand Oosterscheldezijde N.A.P.-0,7 m
- Inkomende golfhoogte H_i = 5,75 m
- Golfperiode T_p = 9,5 s

Niet maatgevend voor de sterkte van de vakwerkliggers van de schuiven, maar wel voor de schaalbeplating, en ook van belang in de berekening van de aanslagen, is de situatie dat de waterstand op de Oosterschelde hoger is dan op de Noordzee. Dit is de situatie:
"Gesloten negatief verval"
Negatief verval maatgevende storm- en hoogwatercondities:
- Waterstand Noordzeezijde N.A.P. -1,0 m
- Waterstand Oosterscheldezijde N.A.P.+2,4 m
- Inkomende golfhoogte H_i = 0,38 m
- Golfperiode T_p = 5,0 s

De invloed van de verticale waterbeweging ten gevolge van golven op de vakwerkliggers is het grootst bij een waterstand op de Noordzee van N.A.P.+3,5 m. Bij deze waterstand ontstaan grotere verticaal gerichte totaalbelastingen dan in het geval van een waterstand op de Noordzee van N.A.P.+5,5 m. De condities in deze extreme situatie zijn:
"Maximale verticaalbelasting"
Gesloten kering maatgevende storm- en hoogwatercondities (verticaalbelasting):
- Waterstand Noordzeezijde N.A.P.+3,5 m
- Waterstand Oosterscheldezijde N.A.P.-0,7 m
- Significante golfhoogte H_i = 6,2 m
- Golfperiode T_p = 6,1 s

De horizontale en verticale belastingen op de schuiven zijn door middel van waterloopkundig onderzoek bepaald. De resultaten zijn door de Deltadienst vastgelegd in zgn. belastingnota's [doc.2.1]. Voor de schuiven bevatten deze nota's de extreme horizontale en

verticale totaalbelastingen, overdrachtsfuncties, overschrijdingsfrequenties, belastingen door golfklappen en langsbelastingen. Deze belastingen zijn bepaald voor de relevante situaties "Gesloten schuif", "Openen", "Sluiten", "Weigerende schuif". Verder is onderzoek uitgevoerd naar trillingsverschijnselen in de schuiven, dorpelbalken en bovenbalken en naar de onderlinge beïnvloeding van deze delen, zie hiervoor deelnota 2.

2.2 Golf- en vervalbelasting

Voor het ontwerp van de schuiven zijn de golf- en vervalbelastingen, zoals afgeleid door het Waterloopkundig Laboratorium, als uitgangspunt te beschouwen [2.2]. Voor alle situaties geldt dat de golf- en vervalbelastingen bepaald zijn als extreme belastingen met een jaarlijkse kans van voorkomen gedurende de levensduur van $2{,}5 \times 10^{-4}$ (herhalingsinterval extreme belasting 4000 jaar). De golf- en vervalbelastingen op de schuiven zijn bepaald bij vier situaties:

1. Begin sluiten
2. Vakwerkliggers binnen 0,5 m van de stilwaterlijn
3. Einde sluiten/begin openen
4. Gesloten kering

De grootte van de belastingen op de schuiven is voor drie van de vier situaties afhankelijk van de gevolgde sluitstrategie. Voor de situaties "Begin sluiten", "Einde sluiten/begin openen" en "Gesloten kering" bestaat het grootste deel van de belasting op de schuiven uit horizontale vervalbelasting, waarbij geldt dat de grootte van de vervalbelasting bepaald wordt door de sluitstrategie. Alleen de belastingen op de vakwerkliggers bij passage van de stilwaterlijn worden niet gedicteerd door de sluitstrategie. Dit omdat deze belastingen voornamelijk uit verticale gerichte golfklapbelastingen bestaan. Golfklappen zijn afhankelijk van de geometrie van de constructie, de golfhoogte en golfperiode en de openingspositie van de schuif. Navolgend wordt van elk van de vier situaties het maatgevende belastinggeval gegeven, deze maatgevende belastinggevallen hoeven geen onderdeel te zijn van eenzelfde sluit- en openingscyclus!

Ad1. Begin sluiten
Maatgevend voor de schuiven tijdens de situatie "Begin sluiten" zijn de golfklappen op de liggers en de horizontale onderdelen van de eindkoker. De golfklappen die optreden zijn evenwel kleiner dan in het geval als de vakwerkliggers de stilwaterlijn passeren (geval 2). Onderzoek naar de situatie "Begin sluiten" is vooral van belang om het grenspeil (de waterstand waarop de schuiven gesloten worden) en het alarmpeil (de waterstand waarop de schuiven automatisch gesloten worden) te bepalen. Tevens is bij "Begin sluiten" de belasting op een weigerende schuif bepaald. Een weigerende schuif wordt verondersteld tijdens een stormvloed in de geopende positie te blijven staan. Als ongunstigste situatie voor "Begin sluiten" geldt een waterstand van N.A.P.+2,75 m op de Noordzee en N.A.P.+1,0 m op de Oosterschelde [2.3].

Ad2. Vakwerkliggers binnen 0,5 m van de stilwaterlijn
Tussen "Begin sluiten" en "Einde sluiten" passeren de vakwerkliggers de stilwaterlijn. De belasting door golven vertaalt zich bij passage van de stilwaterlijn in voornamelijk verticaal gerichte golfklapbelastingen. Deze belastingen zijn afhankelijk van de golfhoogte en golfperiode. Maatgevend is de situatie bij een waterstand op de Noordzee van N.A.P.+3,50 m, dan bevinden de bovenste liggers van een bijna gesloten schuif zich ter hoogte van de stilwaterlijn van deze waterstand. Bij de maximale Noordzeewaterstand van N.A.P.+5,50 m bevinden de bovenste vakwerkliggers van (bijna) gesloten schuiven zich 2 m onder de stilwaterlijn en zijn de optredende golfklapbelastingen minder groot. De 'gewone' horizontaal gerichte golf- en vervalbelasting, die voor hele schuiven is afgeleid, is slechts weinig gerelateerd aan de golfklapbelasting, die lokaal en verticaal én horizontaal werkt. De opgestelde overschrijdingsfrequenties van de verticaal werkende golfbelasting en de golfklappen, gebaseerd op modelonderzoek aan plaatliggerschuiven, zijn opnieuw bepaald voor de vakwerkschuiven. Omdat de verticaal werkende golfklapbelasting van groot belang is voor de dimensionering van de vakwerkliggers en horizontale plaatvelden in de eindkokers wordt de golfklapbelasting nader behandeld in hoofdstuk 4.3.

Ad3. Einde sluiten/begin openen
"Einde sluiten" is het maatgevende belastinggeval voor een bewegende schuif. Bij "Einde sluiten" is de waterstand op de Noordzee gestegen tot N.A.P.+4,40 m en op de Oosterschelde gedaald tot N.A.P.+0,20 m. De significante golfhoogte bedraagt 3,4 m en de golfperiode is 5,6 s (figuur 2.1). Bij het openen van een schuif ná een stormsluiting is de maximale belasting minder dan bij Einde sluiten, dit omdat de golfhoogte geringer is en de golfperiode korter. "Begin openen" is berekend met een negatief verval, d.w.z. dat de waterstand op de Oosterschelde hoger is dan op de Noordzee.

Ad4. Gesloten kering
In gesloten toestand zijn de belastingen op de schuiven gesplitst in extreme horizontale belastingen, met bijbehorende verticale belastingen, en in extreme verticale belastingen, met bijhorende horizontale belastingen. Bij elke vervalsituatie treedt een spectrum van golfbelastingen op, waarbij de combinatie van golfbelasting en vervalbelasting weer een nieuwe maatgevende situatie kan opleveren. De extreme horizontale en extreme verticale belasting komen echter nooit gelijktijdig voor. De extreme horizontale belastingen treden op bij een Noordzeewaterstand van N.A.P.+5,50 m en een Oosterscheldewaterstand van N.A.P.-0,70 m (figuur 2.1). De extreme verticale belastingen treden op bij een Noordzeewaterstand van N.A.P.+3,50 m en een Oosterscheldewaterstand van N.A.P.-0,70 m.

De golf- en vervalbelastingen op de schuiven zijn berekend met het programma "PROBER" en worden gegeven d.m.v. een extreme totaalbelasting voor een gehele schuif. De waarden van deze belastingen zijn weergegeven middels overschrijdingsfrequenties en in tabelvorm. Met het op de lineaire golftheorie gebaseerde programma "QS-golf" zijn voor de horizontale belasting de drukfiguren voor de verval-, golf- en totaalbelasting bepaald. De benodigde overdrachtsfuncties en de overschrijdingsfrequenties zijn vastgesteld middels modelproeven. Zie voor een uitgebreide beschrijving van het hydraulisch onderzoek deelnota 2.

Per schuif zijn de maatgevende belastingen afgeleid uit de resultaten van de berekeningen en de proeven bij het Waterloopkundig Laboratorium voor de maatgevende belastingsituaties (tabellen 2.1 t/m 2.4). Berekend zijn de extreme, horizontale golfbelasting (gemiddelde waarde van golftop en golfdal) werkend in de richting van de Oosterschelde, en de extreme, horizontale vervalbelasting, eveneens werkend in de richting van de Oosterschelde. Het verschil in aangrijpingspunt van de resultante van de horizontale golftop- en golfdalbelasting is gering zodat de gemiddelde waarde van de extreme, horizontale golfbelasting in de tabellen wordt gehanteerd. De extreme, horizontale belastingen zijn gecombineerd met de bijbehorende verticale golfbelastingen. De verschillen tussen de Roompot enerzijds en de Hammen en Schaar anderzijds zijn zodanig groot dat dit hiervoor aparte waarden zijn afgeleid (tabel 2.1 en 2.2).

Schuif-hoogte	schuifnummer	extreme horizontale belasting			bijbehorende verticale belasting		golf-hoogte	golf-periode
		totaal	golf	verval	o-top	o-dal	H_i	T_p
m		kN	kN	kN	kN	kN	m	s
5,9	R 1,31	23.129	8.635	14.494	1.933	1.016	5,60	9,50
6,9	R 2,30	26.984	9.907	17.077	1.933	1.016	5,60	9,50
7,9	R3, 4, 29	31.005	11.343	19.662	1.978	1.039	5,73	9,50
8,9	R5, 27, 28	34.513	12.267	22.246	2.044	1.119	5,66	9,50
9,9	R6, 25, 26	38.728	13.898	24.830	2.052	1.123	5,68	9,50
10,9	R7 t/m 9, 17 t/m 24	42.725	15.311	27.414	2.066	1.131	5,72	9,50
11,9	R10 t/m 16	46.435	16.437	29.998	2.077	1.137	5,75	9,50

Tabel 2.1 Extreme horizontale belasting met bijbehorende verticale belasting Roompot

Schuif-hoogte	schuifnummer	extreme horizontale belasting			bijbehorende verticale belasting		golf-hoogte	golf-periode
		totaal	golf	verval	o-top	o-dal	H_i	T_p
m		kN	kN	kN	kN	kN	m	s
5,9	S1,2, 3, 13 t/m 16 H1, 2, 12 t/m 15	20.826	6.332	14.494	1.415	744	4,10	9,50
6,9	S4, 12 H3, 11	24.373	7.296	17.077	1.415	744	4,10	9,50
7,9	S5, 10, 11 H4, 10	28.062	8.400	19.662	1.467	771	4,25	9,50
8,9	S6 t/m 9 H5, 9	31.419	9.173	22.246	1.517	831	4,20	9,50
9,9	H6 t/m 8	34.818	9.988	24.830	1.517	831	4,20	9,50

Tabel 2.2 Extreme horizontale belasting met bijbehorende verticale belasting Hammen en Schaar

Schuif-hoogte	extreme verticale belasting		bijbehorende horizontale belasting			golf-hoogte	golf-periode
	o-top	o-dal	totaal	golf	verval	H_i	T_p
m	kN	kN	kN	kN	kN	m	s
5,9	2.543	1.950	17.011	7.435	9.576	6,18	6,10
6,9	2.543	1.950	19.616	8.290	11.326	6,18	6,10
7,9	2.543	1.950	22.127	9.050	13.077	6,18	6,10
8,9	2.394	1.901	25.577	10.750	14.827	5,63	7,20
9,9	2.394	1.901	28.128	11.550	16.578	5,63	7,20
10,9	2.394	1.901	30.618	12.290	18.328	5,63	7,20
11,9	2.394	1.901	33.053	12.974	20.079	5,63	7,20

Tabel 2.3 Extreme verticale belasting met bijbehorende horizontale belasting Roompot

Schuif-hoogte	extreme verticale belasting		bijbehorende horizontale belasting			golf-hoogte	golf-periode
	o-top	o-dal	totaal	golf	verval	H_i	T_p
m	kN	kN	kN	kN	kN	m	s
5,9	2.543	1.950	17.011	7.435	9.576	6,18	6,10
6,9	2.543	1.950	19.616	8.290	11.326	6,18	6,10
7,9	2.543	1.950	22.127	9.050	13.077	6,18	6,10
8,9	2.394	1.901	25.577	10.750	14.827	5,63	7,20
9,9	2.394	1.901	28.128	11.550	16.578	5,63	7,20

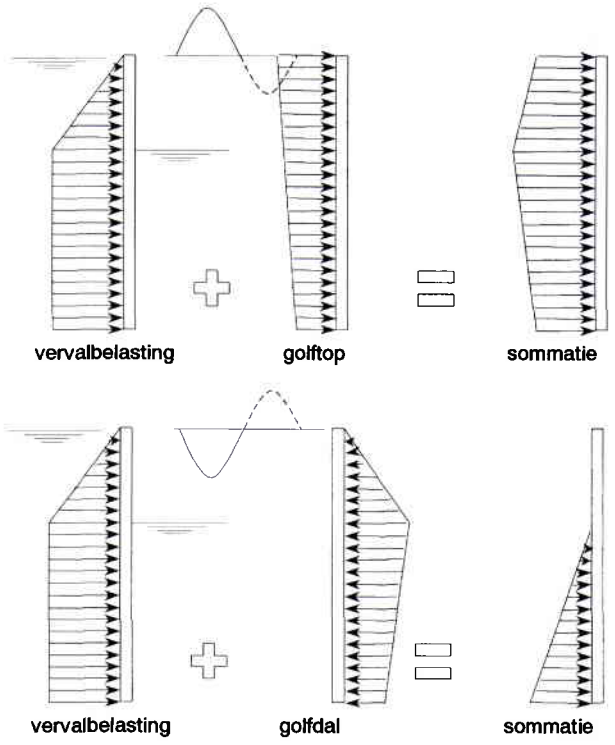
Tabel 2.4 Extreme verticale belasting met bijbehorende horizontale belasting Hammen en Schaar

De verticale belastingen op de schuiven zijn een gevolg van golfbewegingen. Omdat er grote verschillen optreden tussen omhooggerichte (golftop) en omlaaggerichte (golfdal) golfbewegingen zijn beide apart beschouwd in de bepaling van de maximale krachten [doc.2.4]. Voor het bepalen van de verticale belastingen is gebruik gemaakt van geschematiseerde overdrachtsfuncties. Omdat de maxima van de extreme horizontale belasting en de extreme verticale belasting nooit gelijktijdig optreden is de extreme, verticale belasting apart beschouwd (met de bijbehorende horizontale belasting (tabel 2.3 en 2.4)).

De rekenwaarde van de extreme belastingen (ten behoeve van de berekening van de statische sterkte) is bepaald door de waarden uit de tabellen 2.1 t/m 2.4 te vermenigvuldigen met een factor 1,25 (zie ook hoofdstuk 4.2). Uit de in de tabellen gegeven totaalwaarden van de extreme golf- en vervalbelastingen kunnen de vermoeiingsbelastingen afgeleid worden door te vermenigvuldigen met een reductiefactor. Door verschillen tussen de spectra met een kans van voorkomen van $2{,}5\times10^{-4}$ (de extreme belastingen) en de spectra met een kans van voorkomen van 5×10^{-3} (de karakteristieke of vermoeiingsbelastingen) varieert de reductiefactor voor de vermoeiingsbelastingen voor de verschillende schuiven van 0,799 tot 0,899. Dit is in de vermoeiingsberekeningen vereenvoudigd tot een reductiefactor van 0,83 voor alle schuiven. Er wordt bij deze reductie van extreme belastingen naar vermoeiingsbelastingen van uitgegaan dat het aangrijpingspunt van de belasting niet wijzigt (zie hoofdstuk 5.2).

De belastingen uit de tabellen zijn voor de berekeningen van de statische sterkte herleid tot gelijkmatig verdeelde, quasi-statische belastingen op de schuiven. De invloed van de golfbelasting kan de vervalbelasting verzwaren of verminderen (figuur 2.2). Door uit te gaan van een vaste combinatie van golf- en vervalbelastingen wordt van de probabilistische belastingafleiding overgegaan naar een verder deterministische berekening.

In de tabellen zijn niet de belastingen verwerkt die het gevolg zijn van het eigen gewicht, de krachten van het bewegingswerk, de opdrijvende kracht van de buisprofielen, golfklappen op de vakwerkliggers en eindkokers en de stromingsbelasting. Deze krachten zijn, anders dan de golf- en vervalbelasting, afhankelijk van de constructieve vormgeving en worden daarom apart behandeld in de hoofdstuk 4.3. Voor de berekening van de vermoeiingsschade in de gelaste verbindingen van de schuiven zijn voor de karakteristieke belastingen spectra van golfbelastingen bij gegeven vervallen vastgesteld. Zie hiervoor verder hoofdstuk 5.2.



Figuur 2.2 Deterministische belasting voor berekening schuiven

De maatgevende situatie voor de extreme belasting door negatief verval (waterstand Oosterschelde hoger dan waterstand Noordzee) treedt op bij de gesloten kering. Negatief verval is van belang voor de berekening van de schuifaanslagen en de schaalbeplating, voor de overige onderdelen van de schuif is negatief verval nooit maatgevend. Dit is ook de reden dat van de golf- en vervalbelastingen door negatief verval geen overschrijdingsfrequenties en belastingtabellen zijn opgesteld.

Een vervalbelasting van lokale invloed, die het gevolg is van de golfbelasting, betreft de beplating van de eindkokers. Op de beplating van de eindkokers kan vervalbelasting optreden door het faseverschil tussen de binnen- en buitenwaterstand. Alleen door de open onder- en bovenzijde kan het water in de eindkoker de waterstand buiten de eindkoker volgen. Gebeurt dit met vertraging dan treden er op de beplating van de eindkoker vervalbelastingen op. Zie hiervoor hoofdstuk 4.3.6.

De invloed van golfbelasting op de schuiven van een geopende kering is verwaarloosbaar. De onderzijde van de schuiven bevindt zich in geopende toestand op een hoogte van N.A.P.+2,40 m, de onderste vakwerkligger op N.A.P.+4,1 m. Deze hoogteligging is ruim boven het alarmpeil van N.A.P.+3,25 m, en er zullen in geopende toestand geen golfklappen optreden tegen de (onderste) vakwerkligger. Ingeval van een weigerende schuif, de schuif blijft geopend bij een stormvloed, treden wel golfklappen op tegen de vakwerkligger maar deze zijn vergelijkbaar, in grootte en aantal, met de golfklappen die op zouden treden als de schuif normaal gesloten zou worden.

2.3 IJsbelasting

Vorst en ijsafzetting zijn belastingen die niet maatgevend zijn voor de berekening van de schuiven. Omwille van volledigheid zijn ze wel opgenomen in de ontwerpnota. Voor de inschatting van de gevolgen van vorst voor de stormvloedkering is voornamelijk uitgegaan van de ervaringen met, en het onderzoek aan, de schuiven in de Haringvlietdam. De Haringvlietdam verschilt echter principieel van de stormvloedkering in de Oosterschelde als er gekeken wordt naar de positie van de schuiven. Bij de Haringvlietdam zijn de schuiven in principe altijd gesloten, bij de Oosterscheldekering zijn ze in principe altijd open. Het altijd in contact zijn met water en ijs leidt bij de schuiven in de Haringvlietdam tot een veel grotere ijsbelasting dan bij de schuiven van de Oosterscheldekering.

De Oosterscheldekering is gelegen aan de Noordzee die vanuit het zuiden het hele jaar door gevoed wordt door de Warme Golfstroom. De gemiddelde watertemperatuur langs de Nederlandse kust ligt ook in de winter boven het vriespunt. Gedurende perioden van strenge vorst kan de watertemperatuur dalen tot onder het vriespunt (voor zeewater bedraagt het vriespunt -1,5°C). In de Oosterschelde zal door de geringere waterdiepte en de geringere stroming eerder ijsvorming optreden dan op de Noordzee. Hierbij ontstaat het ijs in de Oosterschelde voornamelijk in het oostelijke, ondiepere deel waarna het als drijfijs door het getij en een eventuele oostenwind naar zee wordt gevoerd [2.5]. In de tweede helft van de twintigste eeuw is slechts in de winter van 1962-1963 ijsvorming in de monding van de Oosterschelde geregistreerd. In de overige winters is er soms sprake geweest van de aanwezigheid van drijfijs en een ijsbrij, maar is de watertemperatuur ter plaatse van de Oosterscheldekering niet onder het vriespunt gekomen. De kans op volledig dichtvriezen van de Oosterscheldemonding bedraagt 5×10^{-3} per jaar [2.6].

De vormgeving van de Oosterscheldekering is zodanig dat de onderzijde van de bovenbalk lager ligt dan de onderzijde van de geopende schuiven. De bovenbalk beschermt zo de geopende schuiven tegen drijfijs dat met eb naar zee stroomt. Door het getijdenverschil is de kans klein dat er ijsdammen voor de kering ontstaan.

Opgemerkt moet worden dat de condities waaronder strenge vorst en stormvloed optreden niet gelijk zijn. Bij het optreden van strenge vorst wordt altijd noordoostenwind geregistreerd. De windsnelheid overschrijdt hierbij niet de waarde van 10 m/s. Bij stormvloed is er daarentegen altijd sprake van wind en wateropstuwing uit het (noord)westen.

Voor de schuiven van de Oosterscheldekering is ijsvorming alleen een belastinggeval tijdens de transformatiefunctie (het openen en sluiten). Indien een schuif toch gesloten is tijdens een vorstperiode bedraagt de belasting door drijfijs altijd minder dan de maximale golf- en vervalbelasting. De ijsbelasting op een gesloten schuif is bepaald uit de kinetische energie van het drijfijs en de ijsdruksterkte. Bij een ijspakket met een jaarlijkse kans van voorkomen van 1×10^{-4} bedraagt de ijsbelasting op een schuif, werkend over een lengte van 35 m, maximaal 8000 kN [2.7].

De beperking van de transformatiefunctie kan door een drietal mechanismen van ijsvorming optreden;

1. Vastvriezen/dichtvriezen aanslagen
2. Vastvriezen/dichtvriezen spleet schuif-bovenbalk
3. IJsafzetting kabels gelijkloopinstallatie

Ad1.
Het dichtvriezen van de aanslagen van geopende schuiven treedt pas op als de temperatuur van het zeewater onder het vriespunt zakt. Zolang dat niet het geval is zullen de aanslagen in de waterzone verschoond blijven van ijsvorming. Indien toch ijsvorming optreedt aan/tussen de aanslagen door de lage watertemperatuur dan bedraagt de afschuifsterkte van het ijs ten hoogste 1000 kN (de vier zijaanslagen vriezen vast over een lengte van 1,65 m). Er is hierbij gerekend met een afschuifsterkte van ijs van 0,7 N/mm^2. Het kleinste bewegingswerk van een schuif kan een kracht van meer dan 4000 kN ontwikkelen zodat aangenomen mag worden dat elke schuif bewogen kan worden als de aanslagen vastgevroren zijn.

Ad2.
De theoretische spleetbreedte tussen een schuif en bovenbalk bedraagt 150 mm. Dichtvriezen kan doordat bij hoogwater de spleet gedurende enige uren onder water staat, of door het aanvriezen van spatwater. Dichtvriezen door zeewater zal alleen optreden als de watertemperatuur beneden het vriespunt ligt. Is dit niet het geval dan zal zelfs ijs dat gevormd is uit spatwater door het zeewater weer verwijderd worden. Op grond van een model voor de schuiven in de Haringvlietdam kan berekend worden dat de spleet tijdens strenge vorst in 9 à 10 dagen dichtgevroren kan zijn. De spleet is echter door de goede bereikbaarheid van de bovenbalk of de verkeerskoker te ontdooien met warm water of stoom.

Ad3.
IJsafzetting op de zuigerstangen en de gelijkloopkabels kan optreden bij een gesloten schuif waar het spatwater van golven komend van de Oosterschelde door de spleet tussen schuif en bovenbalk omhoog sproeit. De ijsafzettingen kunnen een dikte bereiken van maximaal 0,10 m [2.8]. De ijsafzetting op de zuigerstang kan zonder problemen afgeschoven worden door de rand van de pakking van de conserveringskamer. De schuifbeweging kan echter stoppen doordat de gelijkloopkabels, met ijsafzetting, blokkeren in de geleidingen. Vanwege de geringe hechtkracht van het aangevroren spatwater kan de ijsafzetting handmatig van de kabels afgeslagen worden.

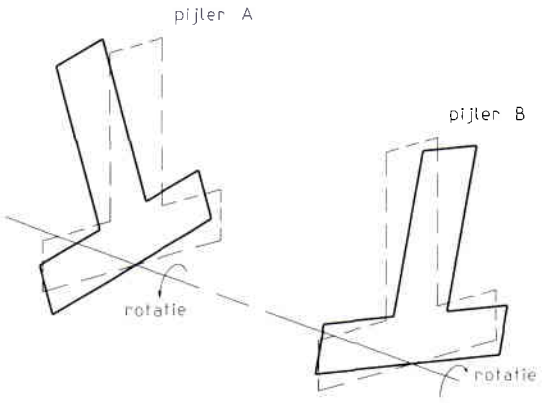
Van voornoemde ijsvormingmechanismen heeft falen door ijsafzetting op de kabels van de gelijkinstallatie de grootste kans van voorkomen. Mogelijk falen van de kering kan in strenge winters door ijsvorming optreden maar dan zijn de weersomstandigheden van dien aard dat een stormsluiting van de Oosterscheldekering niet te verwachten is. Daarnaast is belemmerende ijsvorming handmatig te verwijderen. Er zijn derhalve geen speciale voorzieningen in de kering opgenomen om ijsvorming tegen te gaan.

2.4 Constructieve randvoorwaarden

Onder de constructieve randvoorwaarden worden de eisen verstaan waaraan de vormgeving c.q. uitvoering van de schuifconstructie dient te voldoen. De belangrijkste constructieve randvoorwaarden zijn:

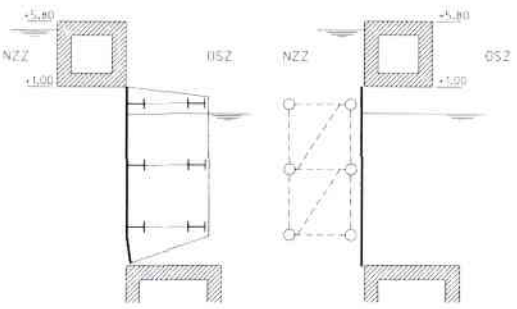
1. De schuif als geheel moet een torsieslappe constructie zijn.
2. De waterkerende beplating moet aan de Oosterscheldezijde van de schuiven worden geplaatst in één vlak met de dorpelbalk en de bovenbalk.
3. De schuiven moeten worden uitgevoerd als hefschuiven met glijopleggingen.
4. De exacte schuiflengte kan pas bepaald worden nadat de pijlers zijn geplaatst.

Ad1.
Torsieslapheid van de schuif is nodig om rotatieverschillen tussen twee pijlers zonder al te grote spanningen te kunnen opnemen. Rotatieverschillen ontstaan door zettingen en uitspoelen van zand onder de pijlers (figuur 2.3). Torsieslapheid van de schuif betekent dat de constructie 'open' moet zijn en niet kokervormig. Opgelegde vervormingen mogen niet tot grote dwangkrachten leiden. Ter beperking van de torsiestijfheid is er naar gestreefd om de afstand van het verticale vakwerk en de beplating zo klein mogelijk te houden.



Figuur 2.3 Torsie schuif door rotatie pijlers

Ad2.
De plaats van de waterkerende beplating hangt nauw samen met de plaats van de dorpelbalken en de bovenbalken ten opzichte van de schuiven. De waterkerende beplating moet zodanig op de dorpel- en bovenbalken aansluiten dat een betrekkelijk dichte constructie ontstaat. Om de verticale belastingen van golfklappen op de horizontale vakwerkliggers te voorkomen zou een beplating aan de Noordzeezijde van de schuiven de voorkeur verdienen (figuur 2.4).



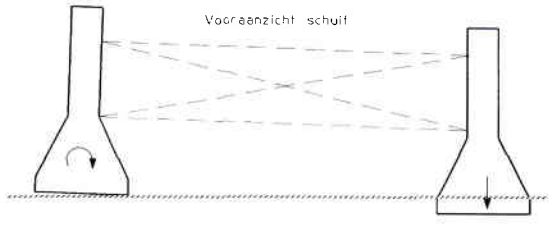
Figuur 2.4 Plaats waterkerende beplating

Een goede hydraulische vormgeving vereist dat de dorpelbalken dan onder de schuiven worden geplaatst. Dit houdt in dat montage van de schuiven pas plaats kan vinden nadat de dorpelbalken zijn geplaatst. Binnen het voor de bouw van de kering gestelde tijdschema was dat echter niet mogelijk, mede omdat de stroomsnelheden in de sluitgaten tijdens de bouwfase te groot zouden worden. Het plaatsen van de bovenbalk aan de zeezijde van de schuif gaf grote hydraulische bezwaren, waarvan de belangrijkste was de zeer grote golfklappen tegen de onderkant van de bovenbalk. Deze klappen konden een grootte bereiken van 200-300 kN/m^2, en zouden in staat zijn de bovenbalk van zijn opleggingen te lichten.

Op grond van het bovenstaande is daarom gekozen voor een ligging van zowel de waterkerende beplating, als van de bovenbalk en de dorpelbalk aan de Oosterscheldezijde van de schuif (figuur 2.4). De schuiven kunnen bij deze configuratie geplaatst worden voordat de dorpel- en bovenbalken zijn aangebracht.

Ad3.
Voor de krachten op het bewegingswerk is het van belang dat de geleiding tijdens het openen en sluiten met een lage wrijvingscoëfficiënt plaatsvindt, zodat de krachten die nodig zijn om de schuiven onder verval- en golfbelasting te bewegen laag blijven. Daarnaast moeten in de gesloten toestand grote horizontale belastingen van de schuiven overgedragen worden op de pijlers.

In principe kan de geleiding van de schuifbeweging zowel verzorgd worden door loopwielen als door schuifgeleidingen en aanslagen. Vanwege de grote, lokaal optredende, belastingen bij toepassing van loopwielen, en vanwege het aanzienlijke ruimtebeslag van een constructie met loopwielen is al vroeg in de ontwerpfase gekozen voor schuifgeleidingen en aanslagen (deelnota 4, hoofdstuk 1). Beide taken, geleiding en krachtsoverdracht, worden verricht door de aanslagen en schuifgeleidingen. De aanslagen zijn over de gehele hoogte, en aan beide zijden, van de eindkokers aangebracht. Hoewel ze dus een onderdeel van de schuifconstructie vormen worden ze om praktische redenen apart behandeld in deelnota 4. Daarnaast dienen de geleidingen de onbekende verplaatsingen en hoekverdraaiingen van de pijlers door zettingen, én de hoekverdraaiingen door doorbuiging van de schuif, op te vangen (figuur 2.5). Door de glijplaten een overbreedte te geven ten opzichte van de aanslagen kunnen horizontale verplaatsingen opgenomen worden.



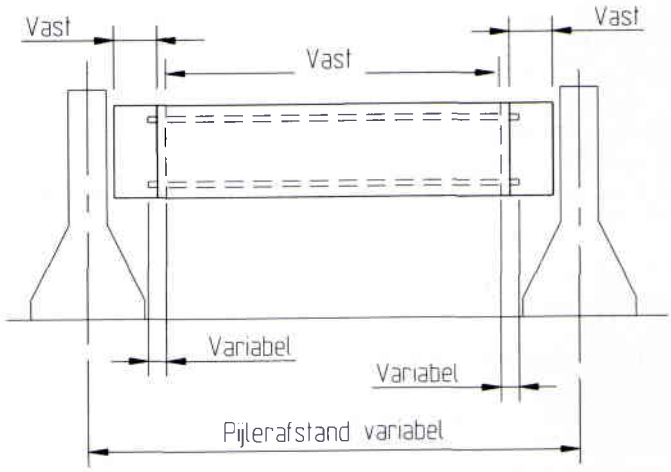
Figuur 2.5 Zettingen pijlers

Bij een gering verval over de schuiven kan de som van de verval- en golfbelasting het ene moment in de richting van de Oosterschelde en het volgende moment in de richting van de Noordzee werken. Onder invloed van deze wisselende belasting zouden de schuiven horizontaal kunnen bewegen tussen de schuifgeleidingen in de sponning. Omdat dit onaanvaardbaar hoge stootbelastingen op de schuifgeleidingen kan opleveren, zijn de schuiven tussen de schuifgeleidingen voorgespannen. De voorspanning is

tot stand gebracht door een deel van de rubber opleggingen met een slappe veerkarakteristiek uit te voeren, zie deelnota 4.

Ad4.
Uitgangspunt voor de lengte van de schuif is de h.o.h.-maat van de pijlers. Omdat elke pijler onafhankelijk van de andere pijlers is geplaatst varieert de tussenafstand en varieert dus ook de lengte van de schuiven. Vanwege het krappe tijdschema was het noodzakelijk reeds met de bouw van de schuiven te beginnen, zonder dat de exacte tussenafstanden van de pijlers bekend waren. Daarom is besloten de schuiven samen te stellen tot drie hoofdcomponenten die pas in een laat stadium samengevoegd zijn. In de verbinding tussen de hoofdcomponenten is ruimte aanwezig om afwijkingen van de theoretische schuiflengte op te vangen. De hoofdcomponenten die zijn gefabriceerd bestaan per schuif uit twee eindkokers en de vakwerkliggers met schaalbeplating.

De schuifgeleidingen zijn op een vaste maat uit het hart van een pijler aangebracht (vaste maat wel afhankelijk van de breedte van de schuifgeleiding). De eindhar is in het hart van de schuifgeleiding gepositioneerd. Met de plaats van de eindhar ligt de positie van de eindkokers vast en is tegelijk de lengte van de vakwerkliggers de sluitmaat. Aan beide zijden van de vakwerkliggers is een overlengte én een 'onderlengte' van 0,275 m aanwezig. De mogelijke variatie in schuiflengte bedraagt hierdoor 1,10 m (figuur 2.6).



Figuur 2.6 Samenstelling schuif in lengterichting

De vrijheid van het onafhankelijk produceren van eindkokers en vakwerkliggers met schaalbeplating, en de mogelijkheid deze pas in een laat stadium samen te stellen tot een volledige schuif, met daarbij een ruime variatie in de lengte, is een belangrijk uitgangspunt geweest voor het constructieve ontwerp van de schuiven.

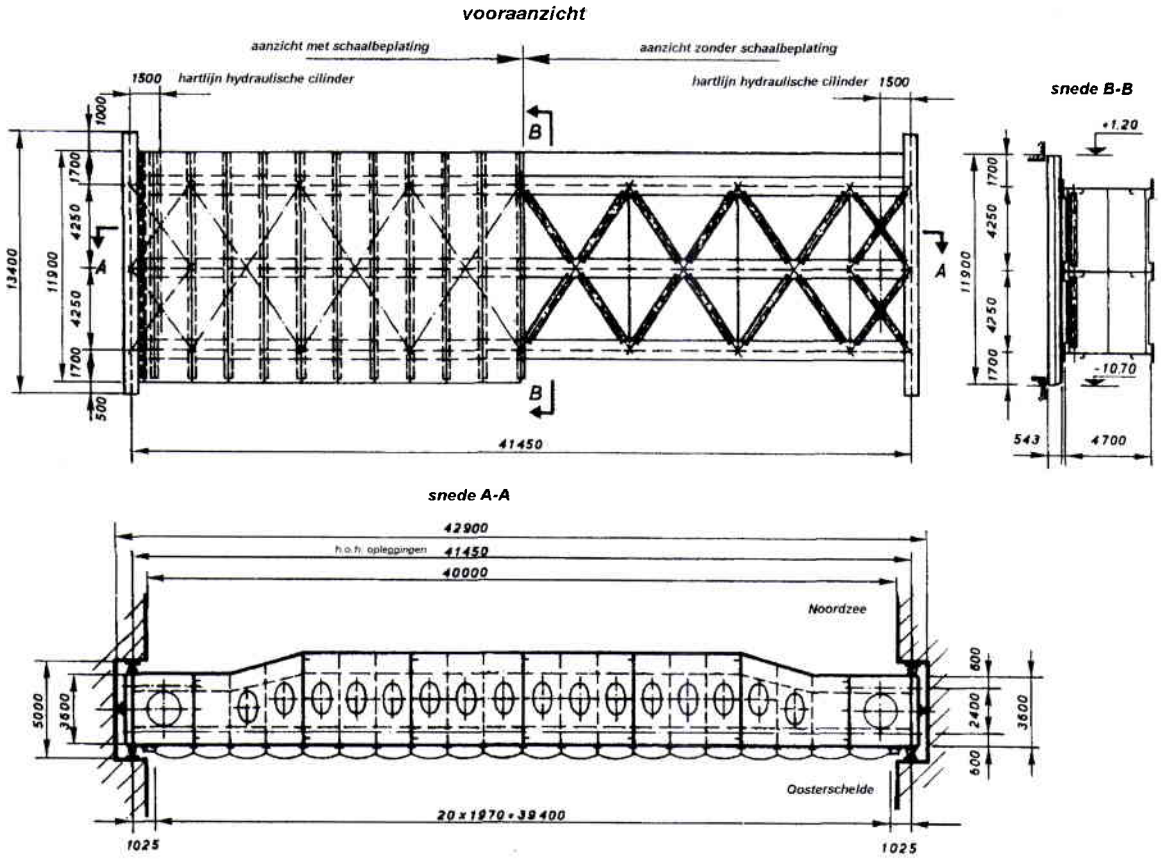
3. Constructief ontwerp schuiven

3.1 Plaatliggerschuif

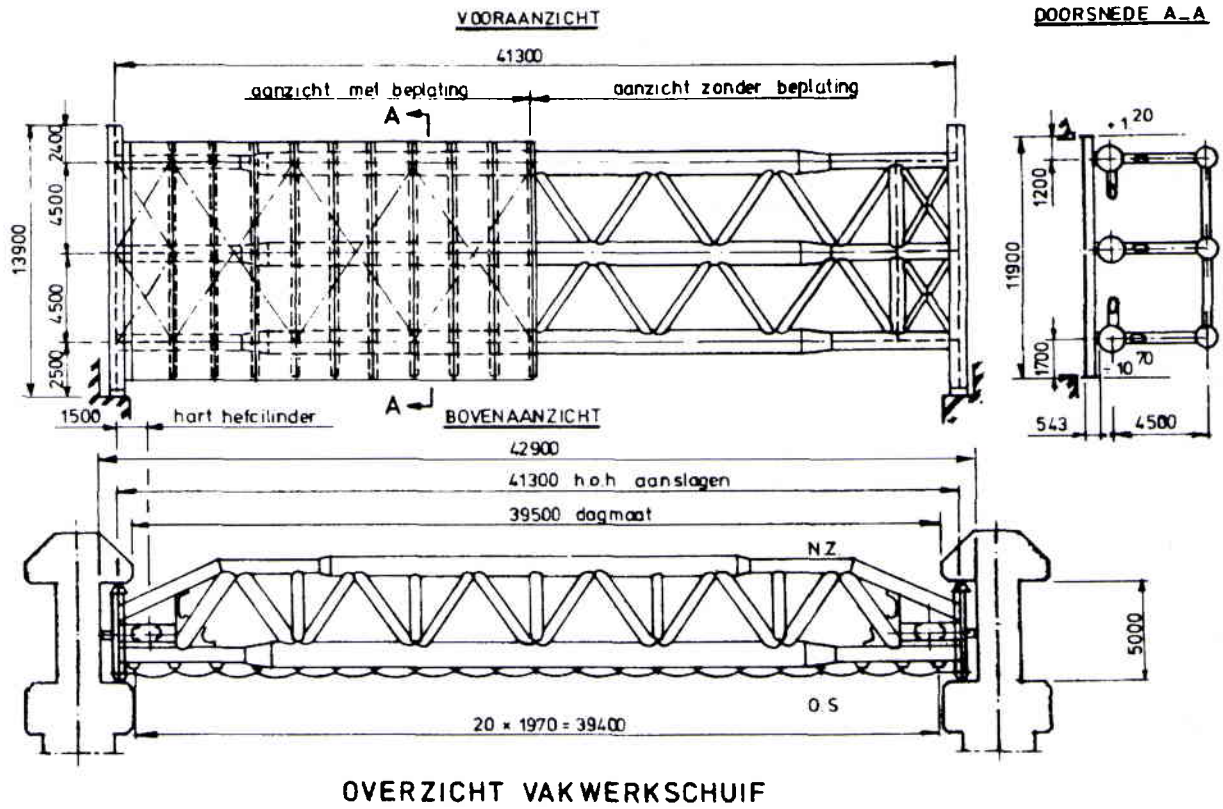
Het ontwerp van de stalen plaatliggerschuif is uitgewerkt in de periode 1976-1980. Het ontwerpen en berekenen gebeurde parallel aan het vele onderzoek dat er door het Waterloopkundig Laboratorium aan de kering is verricht. Uiteindelijk zijn alle onderdelen van de constructie gedimensioneerd, ondanks het feit dat er soms nog geen definitieve belastingen vastgesteld konden worden [doc.3.1]. Parallel is op kleinere schaal in deze periode een ontwerp uitgewerkt van een vakwerkliggerschuif. Dit ontwerp diende enerzijds als vergelijkingsmateriaal en referentie, anderzijds als alternatief [3.2].

Het ontwerp van de plaatliggerschuif kende de volgende onderdelen (figuur 3.1):
- Waterkerende schaalbeplating.
- Plaatliggers als draagsysteem in horizontale richting, afhankelijk van de schuifhoogte zijn er twee of drie plaatliggers aanwezig.
- Vakwerk als draagsysteem in verticale richting met de plaatliggers als flenzen, het vakwerk is gepositioneerd vóór de beplating.
- Eindharren met schuif- en zijaanslagen voor de afdracht van golf- en vervalbelastingen, tevens bevestigingspunt van de hefcilinders.

De hoogte van de golfklapdrukken, en het grote oppervlak van de lijven van de plaatliggers en de schaalbeplating waarop de golfklappen werkzaam zijn, bleef een onzekere factor in de berekening. Het modelonderzoek aan de plaatliggerschuif bij het Waterloopkundig Laboratorium leidde tot belastingen ten gevolge van golfklappen die zeer veel groter waren dan waarmee tot dan toe gerekend was (deelnota 2, hoofdstuk 4). Vooral vanwege de afgesloten ruimten onder de horizontale plaatliggers bedroegen de golfklapbelastingen maximaal 600 kN/m^2 (de 0,1% overschrijdingswaarde van 1000 gemeten golfklappen). Deze piekbelasting kon nauwelijks gereduceerd worden door het aanbrengen van openingen in de plaatliggers omdat het lijf van de plaatliggers dan teveel zou verzwakken.



Figuur 3.1 Ontwerp plaatliggerschuif



OVERZICHT VAKWERKSCHUIF

Figuur 3.2 Eerste ontwerp vakwerkliggerschuif

Omdat de golfklappen op de plaatliggerschuif met eenvoudige modificaties niet verminderd konden worden, en er vanwege de grote tijdsdruk geen mogelijkheden meer waren alternatieve vormen van plaatliggers te onderzoeken, is er een vergelijking gemaakt met een vakwerkschuif. Deze kent grotendeels dezelfde uitvoering als de plaatliggerschuif met als enige verschil dat de plaatliggers vervangen zijn door vakwerken samengesteld uit buisprofielen (figuur 3.2). De golfklapbelastingen op de ronde buizen bedragen maximaal 240 kN/m^2 (de 0,1% overschrijdingswaarde van 1000 gemeten golfklappen).

Vanwege de golfklapproblematiek wordt besloten af te stappen van de plaatliggerschuif en verder te gaan met de vakwerkschuif. In de nota "vergelijking plaatliggerschuif met vakwerkschuif" uit februari 1980 wordt geadviseerd de vakwerkschuif als hoofdspoor te kiezen in de ontwerpprocedure [3.3]. Hoewel de kosten van de vakwerkschuif hoger werden geraamd dan de kosten van de plaatliggerschuif was de verwachting dat de kosten van beide ontwerpen uiteindelijk gelijk uit zouden komen. Dit omdat de plaatliggerschuif duidelijk nog niet voldeed toen deze vergeleken werd met de vakwerkschuif, terwijl de vakwerkschuif nog niet geoptimaliseerd was.

3.2 Vakwerkschuif

De voornaamste overeenkomsten tussen de plaatliggerschuif en de vakwerkschuif zijn de toepassing van schaalbeplating (ook meewerkend als verticaal draagsysteem) en de krachtsoverdracht van de schuif naar de pijler via aanslagen op de eindhar. Het bleek noodzakelijk het eerste ontwerp van de vakwerkliggerschuif (figuur 3.2) op een aantal punten te wijzigen. Belangrijkste wijziging was het aantal velden van de vakwerkliggers van zes terug te brengen tot drie. Hierdoor werd het aantal knooppunten, die duur en vermoeiingsgevoelig zijn, sterk gereduceerd [3.4]. De horizontale vakwerkliggers krijgen ook een constante constructiehoogte, waardoor de aansluiting op de eindkokers aan de Noordzeezijde buiten de eindkokers komt te liggen (figuur 3.3). In de vakwerken wordt voor alle profielen een gelijke buisdiameter gekozen. Afhankelijk van de optredende krachten wijzigt de wanddikte.

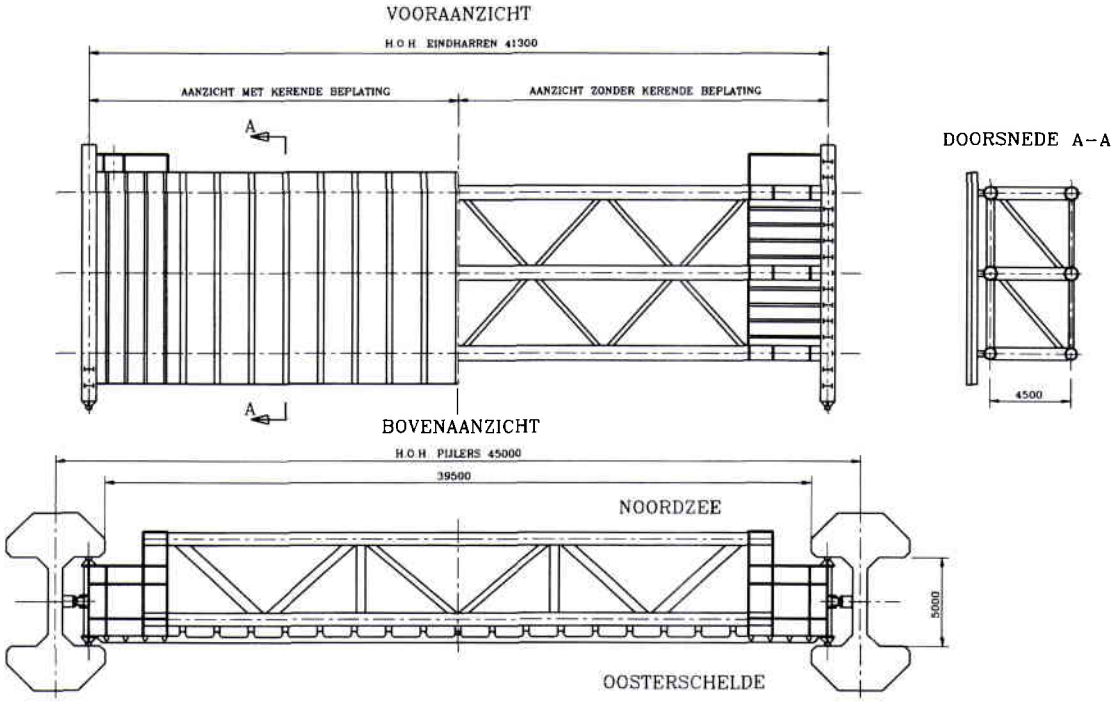
Ten opzichte van de plaatliggerschuif verschilt de vakwerkschuif verder nog op de volgende onderdelen:

- Vaste maat overstek schaalbeplating aan de onderzijde 1700 mm.
- Vaste maat overstek schaalbeplating aan de bovenzijde gewijzigd tot 1200 mm.
- T-vormige verstijvers schaalbeplating vervangen door buizen.
- Eindkokers i.p.v. eindharren .

Door de handhaving van de schaalbeplating en de globale vormgeving bleek het mogelijk de in het hydraulisch onderzoek bepaalde extreme, horizontale belastingen te handhaven. Tevens bleek het trillingsgedrag van de vakwerkschuif in horizontale richting sterk overeen te komen met dat van de plaatliggerschuif. Dit betekende dat de horizontale vakwerken op dezelfde belastingen gedimensioneerd kunnen worden als de plaatliggers zonder dat er opnieuw modelonderzoek verricht hoefde te worden voor deze aspecten. Afwijkend zijn de extreme verticale belastingen en de lokale belastingen, hiervoor is wel aanvullend hydraulisch onderzoek verricht (deelnota 2).

Door de verandering van plaatligger- naar vakwerkliggerschuif wijzigt een aantal aspecten van de schuiven als volgt:

- Lagere golfklapbelastingen; zowel de optredende drukken als de optredende krachten zijn 3 à 4 maal zo klein.



Figuur 3.3 Definitief ontwerp vakwerkliggerschuif

- Stijvere constructie; hierdoor nemen de eigenfrequenties toe (gunstig), maar worden ook de spanningen door dwangkrachten bij zettingen van de pijlers groter.
- Zwaardere constructie met meer opdrijvend vermogen; zowel voor het openen (boven water) als voor het sluiten (onder water) is een zwaarder bewegingswerk vereist.
- Vermoeiing; het toepassen van buisverbindingen vereist een goede detaillering en uitvoering van de staalconstructie ter voorkoming van vermoeiing.

3.3 Schuifconstructie

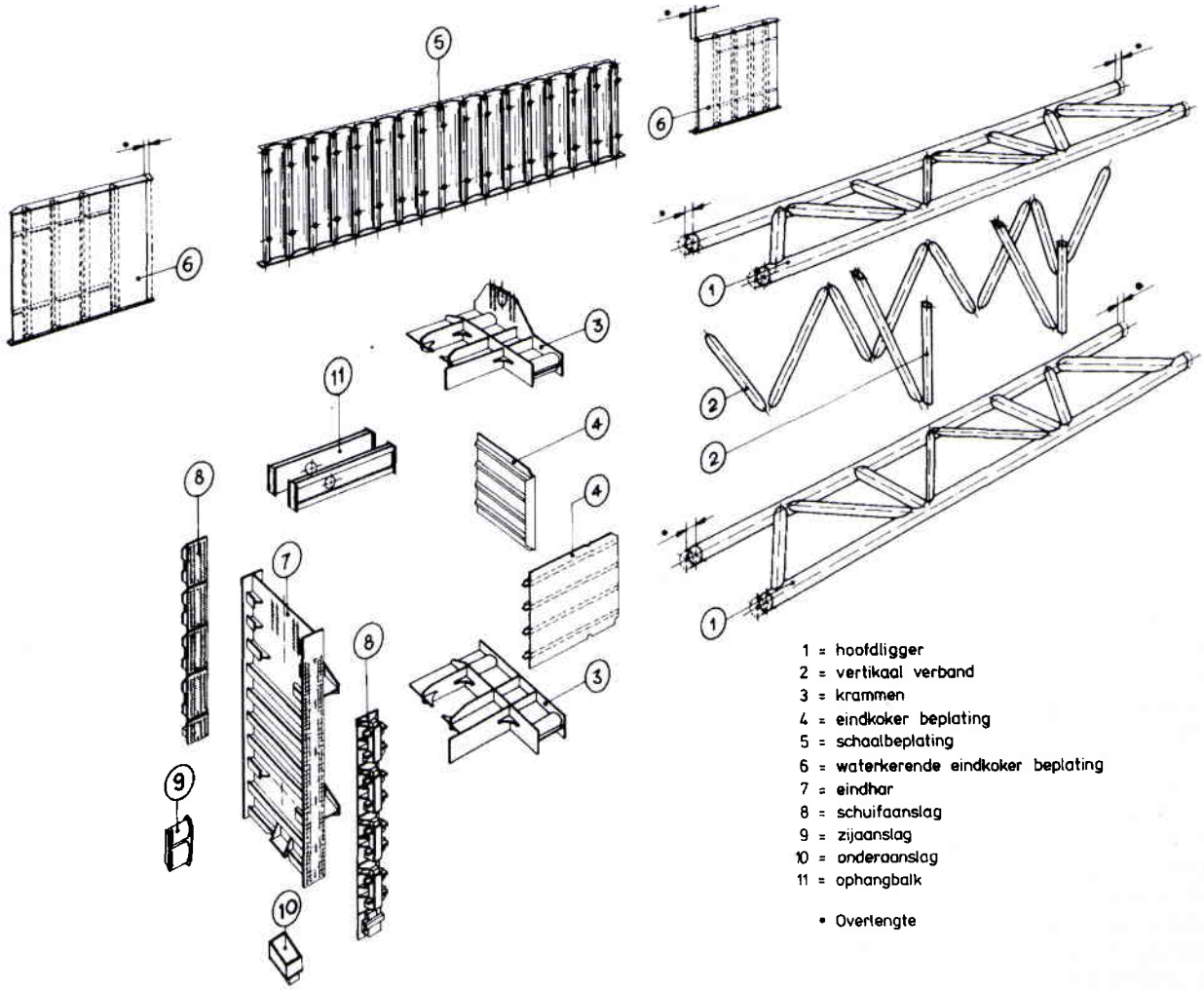
De schuiven zijn opgebouwd uit vier hoofdonderdelen: waterkerende schaalbeplating, een horizontaal draagsysteem, een verticaal draagsysteem en eindkokers (figuur 3.4).

De schaalbeplating sluit de doorstroomopening tussen de pijlers af en heeft voor de verschillende schuiven een hoogte van 5,90 m tot 11,90 m. In verticale richting is de schuifopbouw altijd volgens het stramien van 1,7 m uitkragende beplating aan de onderzijde, vakwerkliggers op een onderlinge afstand die een veelvoud is van 0,90 m en uitkragende beplating aan de bovenzijde. De hoogte van de uitkragende beplating aan de onderzijde is vastgelegd door het trillingsgedrag van de schuif en de golfbelasting bij een geheven schuif op de onderste vakwerkligger. De tussenafstand en het aantal vakwerkliggers is afhankelijk van de plaats in een sluitgat en van de golf- en vervalbelasting. De hoogte van de uitkragende beplating aan de bovenzijde is de verticale sluitmaat. Het verticale stramien van 0,90 m is afgeleid van de verstijvingen op de beplating van de eindkoker en komt ook terug in de afmetingen van de elementen van de schuifgeleidingen.

De horizontale belasting op een schuif ten gevolge van verval en golven wordt opgenomen door de waterkerende beplating, opgebouwd uit verticaal geplaatste schalen. Er is om economische redenen voor schaalbeplating gekozen, met een schaalbeplating kan een aanzienlijke overspanning bereikt worden zonder dat verstijvers op de beplating noodzakelijk zijn. Vanwege het grote verschil in belasting door positief verval (waterstand Noordzee hoger dan waterstand Oosterschelde) met de belasting door negatief verval, zijn de schalen zodanig gepositioneerd dat bij positief verval trekspanningen in de schalen optreden. Het niveau van de drukspanningen die bij negatief verval optreden is aanzienlijk lager maar heeft vanwege instabiliteiteffecten (schaaldoorslag, plooi) toch eenzelfde veiligheidsniveau als de trekspanningen.

De belasting op de schalen wordt via de verticale verstijvingen overgedragen aan het horizontale draagsysteem. De horizontale belasting bestaat voornamelijk uit verval-, golf- en golfklapbelasting. Doordat de schaalbeplating met 'stompen' aan de vakwerkliggers is bevestigd, is er voldoende ruimte voor golven om tussen de beplating en de vakwerkliggers door te bewegen, waardoor de golfklapbelasting op de constructie aanzienlijk wordt gereduceerd. Het horizontale draagsysteem bestaat uit vakwerkliggers uitgevoerd in buisprofielen. Door de open opbouw van de vakwerken kan water vrij door de constructie stromen waardoor de belasting uit golven en golfklappen laag blijft. De ronde vorm van de buisprofielen is gunstig m.b.t. stromingsbelastingen en golfklappen. De toepassing van de vakwerkliggers heeft de verticaal gerichte waterstroming en de golfklapbelasting aanzienlijk gereduceerd ten opzichte van de plaatliggers.

De verticale belastingen bestaan uit het gewicht van de schuif, opdrijving, stromings- en golfklapbelasting. Voor het opnemen van de verticale belasting zijn de horizontale vakwerkliggers aan de Oosterscheldezijde onderling gekoppeld door een verticaal verband van buizen evenwijdig aan de schaalbeplating. Aan de Noordzeezijde zijn de vakwerkliggers niet in langsrichting gekoppeld, hierdoor wordt bereikt dat de schuif een relatief torsieslappe constructie is. De torsiestijfheid van de schuif wordt voornamelijk bepaald door de afstand van de schaalbeplating tot het verticale



Figuur 3.4 Benaming onderdelen schuifconstructie

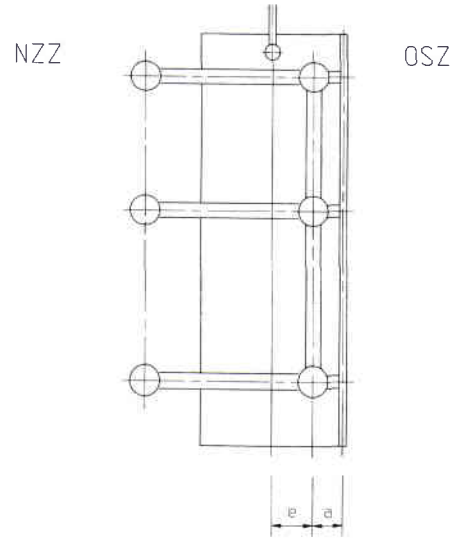
draagverband. De horizontale vakwerkliggers dragen door het ontbreken van een koppelverband in lengterichting aan de Noordzeezijde nauwelijks bij in de torsiestijfheid.

In de vervalrichting zijn de vakwerkliggers lokaal verticaal gekoppeld. Dit is nodig om verticaal gerichte krachten op de buizen aan de Noordzeezijde op te kunnen nemen. Doordat de hiervoor benodigde verticaal- en diagonaalstaven haaks op de lengteas van de schuif staan vergroten deze verbanden de torsiestijfheid van de schuif nauwelijks. De koppelstaven (verticalen en diagonalen) grijpen aan ter plaatse van de knooppunten van de vakwerkliggers. Door het samenkomen van staven in het horizontale vlak, en in twee verticale vlakken, ontstaan er ter plaatse van de randstaven van de horizontale vakwerkliggers nabij de schaalbeplating ingewikkelde ruimtelijke knooppunten.

De eindkokers vormen de overgang van de vakwerkliggers naar de eindhar. In geheven stand moeten de vakwerkliggers vrij blijven van de hamerstukken, iets wat alleen mogelijk is door de vakwerken ruim voor de pijlers te beëindigen op raamwerken (zgn. 'krammen') aan de eindhar. De krammen brengen de horizontale belastingen uit de vakwerken over naar de eindhar. Alle horizontale belastingen worden via de eindharren afgevoerd naar de pijlers. Het lijf van de eindhar wordt gevormd door de beplating van de eindkoker parallel aan het lijf van de pijler. Op de flenzen van de eindhar sluit de beplating aan de Noordzee- en Oosterscheldezijde aan. De schuifaanslagen zijn bevestigd op de flenzen van de eindhar. De eindkoker is zo stijf dat de verdraaiing van een pijler door ongelijkmatige zetting volledig als torsiebelasting overgedragen wordt aan de vakwerkliggers en schaalbeplating.

De eindkokerwand aan de Oosterscheldezijde ligt in het verlengde van de schaalbeplating en vormt mede de afsluiting van de doorstroomopening. Deze zijde van de eindkoker draagt dezelfde vervalbelasting als de schaalbeplating en neemt ook de trekkracht (bij positief verval) of drukkracht (bij negatief verval) uit de schaalbeplating op. De eindkokers zijn aan de onder- en bovenzijde open uitgevoerd om vervalbelastingen en golfklappen te beperken.

Om de verticale belastingen uit de schuif over te dragen op de eindkokers is er over de volledige hoogte van de eindkokers beplating aanwezig, de constructie van de krammen is geïntegreerd met deze beplating. De verticale belastingen worden in geopende toestand, en tijdens het bewegen, opgenomen door de hydraulische cilinders. In gesloten toestand drukken de cilinders de schuif, met de onderaanslagen, op de dorpelbalk en worden de verticale belastingen opgenomen door variatie in de voorspanning van de onderaanslagen.



Figuur 3.5 Ligging zwaartepunt en verticaal draagverband

Het onderoog van de zuigerstang van de hydraulische cilinder is bevestigd aan de eindkoker, zoveel mogelijk in het zwaartepunt van de schuif (figuur 3.5). Door de excentriciteit van de ophanging ontstaat er een moment dat door de voorgespannen schuifgeleiding wordt opgenomen. Het onderoog, en de overige constructies van het bewegingswerk, worden behandeld in deelnota 5. In lengterichting van de schuif ligt de werklijn van de cilinders op een (theoretische) maat van 3,22 m uit het hart van de pijlers. De eindhar is altijd gelegen in het hart van de glijplaten en was oorspronkelijk gepositioneerd t.o.v. het onderoog van de cilinders op een vaste maat van 1,5 m. Nadat t.g.v. onzekerheden m.b.t. zetting van de pijlers de glijplaten in de pijlersponningen verbreed waren (zie deelnota 4), is van de vaste maat van 1,5 m tussen onderoog en eindhar afgeweken. In de definitieve uitvoering varieert de afstand tussen onderoog en eindhar tussen de 1,325 m en 1,385 m.

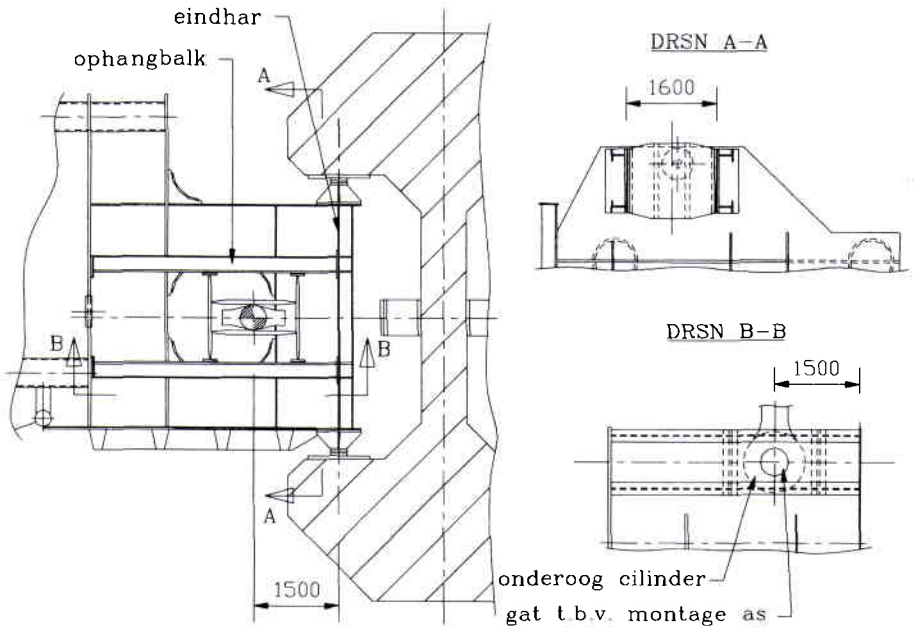
Door de plaatsing van de cilinders naast de eindhar leiden hoekverdraaiingen van de schuif door vervalbelasting tot kleine zijdelingse verplaatsingen van het onderoog van de cilinder. Om maatafwijkingen door fabricage van de eindkokers niet van invloed te laten zijn op de positionering van de hydraulische cilinder is de bevestiging van het onderoog uitgevoerd met twee paar, orthogonaal liggende ophangbalken (figuur 3.6). Het eerste paar ophangbalken overspant in vervalrichting van de schuif 1,6 m tussen het tweede paar ophangbalken. Het tweede paar ophangbalken overspant de eindkoker in lengterichting van de schuif. De ophangbalken zijn met geboute verbindingen bevestigd. Standaard is in de geboute verbindingen uitgegaan van vullingen waarvan de exacte dikte is bepaald na inmeten van de gerede eindkoker/schuifconstructie.

Naast het onderoog van de cilinder bevindt zich in de eindkokerbeplating het montage-hijsoog. Het montage-hijsoog is tijdens de fabricage in het zwaartepunt van de schuif gepositioneerd.

Bij het ontwerp van de schuiven is gepoogd, ondanks de variatie in belastingen en schuifhoogtes, toch zoveel mogelijk gelijke elementen of elementgroepen toe te passen. Het voordeel van deze aanpak is dat elke schuif uit combinaties van verschillende typen regels is samen te stellen, en dat de daarop aansluitende constructies ook direct vast liggen. In de berekening hoeven slechts de maatgevende situaties gecontroleerd te worden. In de fabricage kan er seriematig gefabriceerd worden door bij de assemblage onderdelen samen te stellen tot een volledige schuif.

3.4 Materiaal en gewicht schuiven

De schuiven zijn volledig opgebouwd uit staal, de houten klossen in de onderaanslagen en het kunststof en rubber in de schuifgeleidingen uitgezonderd (zie voor deze onderdelen deelnota 4). Toegepast zijn de volgende staalkwaliteiten conform de benaming en normvoorschriften uit de ontwerpperiode;



Figuur 3.6 Ophangbalken bevestiging onderoog cilinder

- Plaatmateriaal (o.a. schaalbeplating) d ≤ 15 mm
  Fe 510 C volgens Euronorm 25-72
- Strippen en plaatmateriaal d > 15 mm
  Fe 510 D volgens Euronorm 25-72
- Buizen zonder belasting loodrecht op de dikte (alle wanddiktes)
  St 52-3 volgens Euronorm 25-72
- Buizen met belasting loodrecht op de dikte (alle wanddiktes)
  St 52-3-Z3 volgens Euronorm 25-72 met als bijzondere eis breukinsnoering volgens SEL 74-096

Materiaal van Z-kwaliteit is toegepast wanneer er trekspanningen loodrecht op het plaatoppervlak optreden, o.a. in de randstaven ter plaatse van buisknooppunten en in de krammen en de eindkoker beplating. Al het staal heeft een vloeigrens σ_e=360 N/mm^2 en een treksterkte σ_t=510 N/mm^2. De buizen tot een diameter van 419 mm zijn naadloos vervaardigd. De buizen met een diameter groter dan 508 mm zijn gelast met een langsnaad na koud- of warmwalsen. De hoeveelheden staal uit tabel 3.1 zijn verwerkt in de schuiven. De nummering in de eerste kolom correspondeert met de nummering in figuur 3.4.

Nr	Schuiftype	5900^{I}	5900^{II}	6900^{II}	6900^{II}	7900^{II}	7900^{II}	8900^{I}	8900^{II}	9900^{I}	9900^{II}	10900	11900
1	**Regels**	896	807	976	896	1058	991	1304	1212	1395	1249	1505	1580
2	**Langsverband**	96	97	106	107	106	106	182	182	191	191	201	212
2	**Dwarsverband**	13	13	15	15	15	15	23	23	25	25	27	29
3	**Krammen**	412	368	424	412	478	448	584	542	606	578	642	676
4,6	**Kokerbeplating**	276	258	334	334	358	358	425	425	486	486	542	599
5	**Schaalbeplating**	350	351	402	402	454	454	512	512	564	564	615	668
7	**Harren**	348	348	378	378	412	412	454	454	490	490	520	558
8	**Schuifaanslagen**	226	226	226	226	275	275	275	275	325	325	325	375
9,10	**Zij/onderaanslag**	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
11	**Ophangbalk**	66	66	66	66	64	64	66	66	66	66	66	66
	Totaal	2710	2570	2960	2870	3250	3150	3860	3720	4180	3990	4470	4790

Tabel 3.1 Overzicht gewichten in kN (nummering corresponderend met figuur 3.4)

4. Berekening schuiven

4.1 Berekeningsopzet

De berekeningen zijn zodanig opgezet dat alle onderdelen van de schuiven aan de ruimtelijke krachtswerking zijn onderworpen. Er is gebruikt gemaakt staaf- en plaatmodellen en berekeningen zijn zowel 2D als 3D uitgevoerd (tabel 4.1).

Programma	Constructie(deel)	Type berekening
VLASKO	randverstijvers beplating stompen vakwerkliggers	statisch 2D
SUSAN/1	schuiven schaalbeplating eindkokers knieschotten eindkokers	statisch 3D
ICES-STRUDL	schuiven schuiven eindkokers knieschotten eindkokers	statisch (torsie)3D dynamisch 3D dynamisch 3D statisch 3D
NASTRAN	schaalbeplating	stabiliteit
ABAQUS	schaalbeplating knieschotten eindkokers	stabiliteit stabiliteit

Tabel 4.1 Overzicht gebruikte rekenprogrammatuur

Voor alle typen schuiven zijn berekeningen met 3D-computermodellen gemaakt met het programma SUSAN/1. Geometrisch zijn de modellen van de verschillende schuiven en de vakwerkliggers hetzelfde, alleen de profilering van de vakwerken en eindkokers verschilt. Vanwege de symmetrie in lengterichting zijn halve schuiven gemodelleerd. Torsie en welving van de middendoorsnede zijn hierbij uitgesloten. Met het uitgebreidere pakket ICES-STRUDL zijn volledige schuifmodellen gemaakt ter controle van torsiespanningen door verdraaiende pijlers. Deze 3D-modellen zijn ook gebruikt om trillings- en responsieberekeningen te maken.

De 3D-schuifmodellen bevatten zowel staven (vakwerkliggers) als vlakke platen (eindkokers, schaalbeplating). In de modellering van de schuiven zijn de staven van de vakwerken momentvast en centrisch aangesloten. Alleen daar waar de excentriciteit van een aansluiting buiten de randvoorwaarden valt die aan de buisverbindingen gesteld worden, zijn excentriciteiten gemodelleerd. Van de gekromde schaalbeplating is de richtingafhankelijke stijfheid in aparte modellen bepaald. In de vlakke platen van de schuifmodellen zijn de eigenschappen in de stijfheidmatrix van de 3D-schuifmodellen aangepast zodanig dat ze eenzelfde respons vertonen als de gekromde schaalbeplating.

Ten behoeve van de schaalbeplating en de eindkokers (o.a. piekspanningen in de knieschotten) was het noodzakelijk diverse detailmodellen te maken met specifieke programma's als NASTRAN en ABAQUS. Daarbij zijn de belastingen en randvoorwaarden bepaald door de voorgeschreven verplaatsingen en/of snedekrachten uit de modellen van de totale constructie. De detailmodellen van de schaalbeplating en de knieschotten zijn ook gebruikt voor het toetsen van niet-lineaire verschijnselen (o.a. het 'doorslaan' van de schaalbeplating bij negatief verval).

De uitvoer van de computermodellen is handmatig uitgewerkt tot resultaten die een toetsing aan drie criteria mogelijk maakten:
1. Vervormingen
2. Spanningen
3. Levensduur

Ad1.
De controle van de vervormingen betreft voornamelijk de horizontale en verticale doorbuigingen van de schuif, en de lokale vervormingen van de plaatvelden. De dynamische effecten door eigentrillingen zijn ook in beschouwing genomen.

Ad2.
De gesommeerde rekenspanningen mogen nergens in de constructie de vloeigrens van het toegepaste materiaal overschrijden. Ook de toetsing van de stabiliteit van plaatvelden en gedrukte staven valt binnen de spanningscontrole.

Ad3.
De levensduur van de schuiven is gelijk gesteld aan de levensduur van de kering, zijnde 200 jaar. Omdat de schuiven, anders dan de pijlers, vervangbare onderdelen van de kering zijn is een levensduur van 200 jaar niet een harde eis, maar een streefwaarde. Een mogelijke levensduur korter dan 200 jaar is als uitgangspunt voor de schuiven geaccepteerd. In de berekening van de levensduur van de schuiven is vermoeiing van de gelaste verbindingen het maatgevende criterium.

Een belangrijk aspect bij vermoeiing is dat altijd de minimale levensduur getoetst wordt, omdat de te gebruiken vermoeiingscurven uitgaan van een ondergrens van de vermoeiingssterkte. Dit betekent dat de gemiddelde levensduur m.b.t. vermoeiing (aanzienlijk) hoger ligt dan de minimale levensduur.
Een tweede belangrijk aspect in de beschouwing van de levensduur van de schuiven is de mogelijkheid van reparatie van vermoeiingsschade. Een las met een vermoeiingsscheur is (rekenkundig) bezweken als de scheur door de dikte van de las of het aangrenzende plaatmateriaal gegroeid is. De gelaste verbinding als geheel behoeft dan nog niet bezweken te zijn. Door reparatie van een (beginnende) scheur wordt de vermoeiingssterkte van een gelaste verbinding weer op het aanvangsniveau van een ongescheurde verbinding gebracht.

In een laat stadium van het ontwerp zijn, n.a.v. de materiaalproblematiek van de warmgewalste buizen, berekeningen gemaakt voor het belastinggeval brosse breuk. Zie voor een uitgebreide beschrijving van deze problematiek en de gevolgen daarvan voor het ontwerp hoofdstuk 6. De controle op brosse breuk omvat deels aanpassingen en deels een uitbreiding van de controles op spanning en levensduur.

4.2 Belasting- en materiaalfactoren

Bij het berekenen van de Oosterscheldekering is er naar gestreefd voor alle onderdelen eenzelfde berekeningsmethodiek te hanteren. Zie voor de ontwerpfilosofie van de kering Boek 1, deelnota 2, hoofdstuk 6.3. Verschillen tussen materialen, rekenmodellen, aannames, etc. zijn ondergebracht in partiële coëfficiënten van de belasting- en materiaalfactor. Voor de berekening van de sterkte van stalen en betonnen constructiedelen is gewerkt met de grenstoestand bezwijken. Voor de schuiven is de eis geformuleerd:

$$\gamma_s \cdot Q_{kar} \leq \frac{R_k}{\gamma_m}$$

Met hierin:

γ_s = belastingfactor die de mate van overschrijding van de karakteristieke belasting in rekening brengt

Q_{kar} = karakteristieke belasting, afgeleid van de extreme belasting Q_{extr}

Q_{extr} = extreme belasting, probabilistisch afgeleid voor een herhalingsinterval van 4000 jaar

R_k = karakteristieke sterkte van de constructie

γ_s = materiaalfactor

Voor de staalconstructies zijn de volgende deelcoëfficiënten gebruikt:

γ_{s1} = de overbelasting van de karakteristieke belasting [1,20]

γ_{s2} = combinatiecoëfficiënt voor het gelijktijdig optreden van karakteristieke belastingen [1,10]

γ_{s3} = coëfficiënt voor schematiseringen in de berekening, excentriciteiten en maatafwijkingen [1,05]

$\gamma_s = \gamma_{s1} \cdot \gamma_{s2} \cdot \gamma_{s3} = 1{,}20 \cdot 1{,}10 \cdot 1{,}05 = 1{,}39$

γ_{m1} = coëfficiënt waarmee de verminderde sterkte van het materiaal, ook door het productieproces, in rekening wordt gebracht [1,10]

γ_{m2} = coëfficiënt waarmee onzekerheden in de berekening en onnauwkeurigheden in de uitvoering worden ondervangen; omdat met deze oorzaken al in de factor γ_{s3} rekening is gehouden is hier $\gamma_{m2} = 1{,}0$

$\gamma_m = \gamma_{m1} \cdot \gamma_{m2} = 1{,}10 \cdot 1{,}0 = 1{,}10$

Voor de berekening van de staalconstructie is de formule $\gamma_s \cdot Q_{kar} \leq R_k/\gamma_m$ herschreven tot $\gamma_s \cdot \gamma_m \cdot Q_{kar} \leq R_k$. Na invullen van de belasting- en materiaalfactor resteert er een algemene veiligheidsfactor γ_{kar} ($= \gamma_s \cdot \gamma_m$) van 1,5 waarmee de karakteristieke belastingen vermenigvuldigd zijn [4.1].

De extreme belastingen op de schuiven zijn probabilistisch bepaald voor een herhalingsinterval van 4000 jaar (overschrijdingskans $2{,}5 \times 10^{-4}$). Deze extreme belastingen zijn uit de metingen van de golf- en vervalbelastingen afgeleid. Omdat de overbelasting van de karakteristieke belasting t.o.v. de extreme belasting 1,20 bedraagt (factor γ_{s1}) kan uit de extreme belastingen de karakteristieke belasting teruggerekend worden:

$Q_{extr} = 1{,}20 \cdot Q_{kar} \Leftrightarrow 0{,}833 \cdot Q_{extr} = Q_{kar}$

Met de berekende algemene veiligheidsfactor γ_{kar} kan nu vastgesteld worden dat de veiligheidsfactor ten opzichte van de extreme belasting 1,25 (factor γ_{extr}) bedraagt;

$1{,}5 \cdot Q_{kar} = 1{,}25 \cdot Q_{extr}$

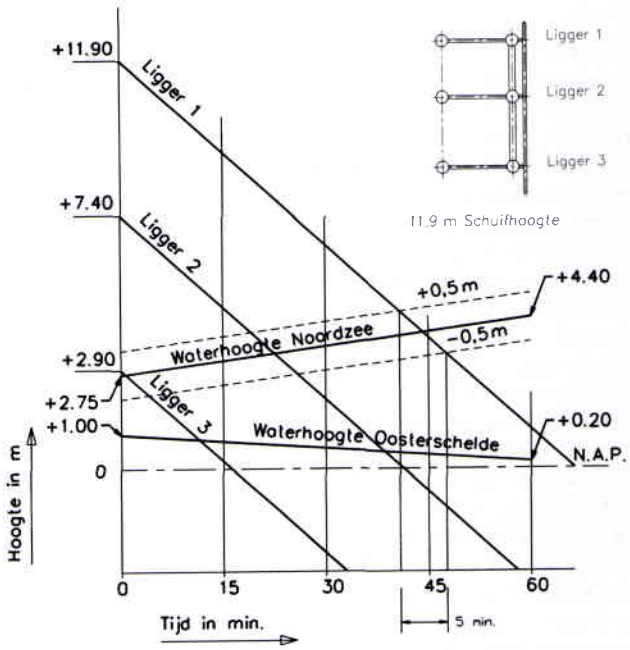
De vermoeiingsberekeningen ter bepaling van de levensduur zijn uitgevoerd met de karakteristieke belastingen zonder enige extra vermenigvuldigingsfactor, Q_{kar} komt dus overeen met $Q_{vermoeiing}$ en $\gamma_{vermoeiing} = 1{,}0$.

4.3 Belastingen

De in hoofdstuk 2 gegeven belastingen (golf- en vervalbelasting, ijsbelasting), zijn randvoorwaarden die tamelijk onafhankelijk van de vormgeving van het ontwerp op de schuifconstructie werken. De golf- en vervalbelasting is door hydraulisch onderzoek aan schaalmodellen vastgesteld, de ijsbelasting is uit literatuuronderzoek en de ervaring met de Haringvlietschuiven afgeleid. Deze vormgevingsonafhankelijkheid blijkt o.a. uit het feit dat bij de overstap van de plaatliggerschuif naar de vakwerkliggerschuif dezelfde horizontale golf- en vervalbelastingen aangehouden konden worden. De belastinggevallen die in dit hoofdstuk behandeld worden betreffen belastingen die in een veel directere wisselwerking met de vormgeving van het schuifontwerp staan.

4.3.1 Golfklappen

Golfklappen ontstaan als een verticale golfbeweging door een constructie(deel) gestopt wordt. Horizontale onderdelen van de schuiven, zoals de vakwerkliggers en krammen, die zich in de nabijheid van de waterspiegel bevinden kunnen zo belast worden door golfklappen. In een zone van -0,5 m tot +0,5 m rond de stilwaterlijn is de belasting door golfklappen het grootst. Zware golfklappen zullen vooral optreden tijdens het sluiten of openen van de schuif onder stormomstandigheden. Alle vakwerkliggers zullen bij het passeren van de waterspiegel gedurende enige tijd blootstaan aan golfklapbelasting (figuur 4.1). Golfklappen geven een verticale belasting op een horizontaal vlak, maar hebben ook een uitstraling



Figuur 4.1 Passage stilwaterlijn liggers schuif

naar verticale vlakken. Dit betekent dat niet alleen de vakwerkliggers en krammen belast worden door golfklappen, maar ook de schaalbeplating nabij de vakwerkliggers en de wanden van de eindkoker.

De golfklappen op de vakwerkschuif, en de responsie van de vakwerkschuif, zijn door het Waterloopkundig Laboratorium gemeten in een model. Ingesteld zijn de eigenfrequenties 2,3 en 6,0 Hz, zijnde de onder- en bovengrens van de verticale eigenfrequenties van de schuiven [4.2]. Stijvere constructies (hogere eigenfrequenties) resulteren in grotere golfklapbelastingen en hogere responsies. Uit series van 1000 golven zijn frequentieverdelingen van de optredende golfklappen en de responsie van de constructie bepaald. Het was niet mogelijk een eenduidige relatie tussen golfklappen en de golfparameters H_i (golfhoogte) en T_p (golfperiode) te leggen, waardoor het ook niet mogelijk was extreme waarden van golfklappen met een kans van voorkomen van $2{,}5 \times 10^{-4}$ af te leiden. In plaats daarvan zijn de zwaarste 15 golfklappen (1,5%) uit de series van 1000 golven geanalyseerd, waarna uit de belastingen door deze 15 golfklappen de maatgevende golfklap (0,1%) is geëxtrapoleerd. In tabel 4.2 zijn de waarden van de golfklapbelastingen op de totale schuifconstructie (40 m lengte) en de verticale responsies gegeven.

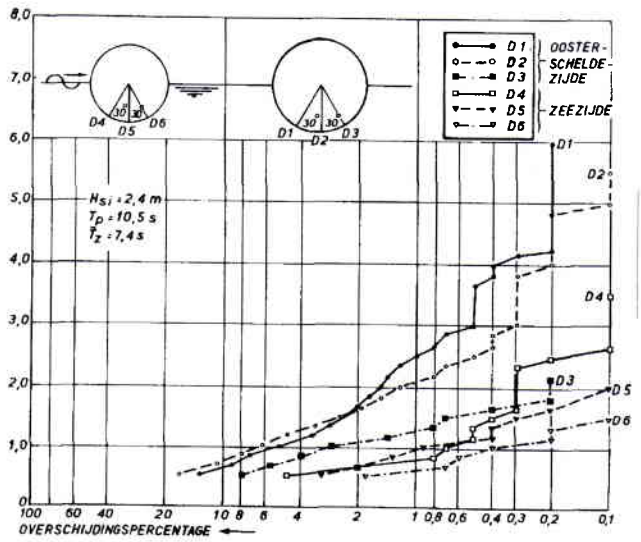
	Belasting	**[kN, 40 m1]**
	f_e=6,0 Hz	f_e=2,3 Hz
verticaal		
1,5%	800-1800	550-1200
0,1%	1300-4200	1100-2400
horizontaal		
1,5%	1700-3800	1100-2500
0,1%	2800-8800	2300-5000
responsie verticaal		
1,5%	1100	800
0,1%	2000	1600

Tabel 4.2 Golfklappen vakwerkligger

De verticale belastingen en de responsies zijn afhankelijk van de verticale eigenfrequentie, maar niet van het aantal vakwerkliggers in een schuif. Verschillen in de golfklapbelastingen en responsies van 2-regelige of 3-regelige schuiven zijn terug te voeren op verschillen in verticale eigenfrequenties. De verticale golfklapbelastingen zijn bepaald in modelproeven met starre modellen waarna rekenkundig de vertaling naar de responsies gemaakt is. De verticale responsies op golfklappen zijn als ontwerpbelasting voor de gehele schuiven aangehouden. De belasting uit golfklappen is niet gelijkmatig verdeeld over de lengte van de schuif. De maximale waarde van de gemeten verticale belastingen per eenheid van schuiflengte is 70 kN/m, deze maximale waarde is ten hoogste over een derde van schuiflengte aanwezig. Opgemerkt moet nog worden dat door het toepassen van vakwerkliggers met ronde buizen de grootte van de golfklapbelastingen tienmaal kleiner is dan ingeval van plaatliggers.

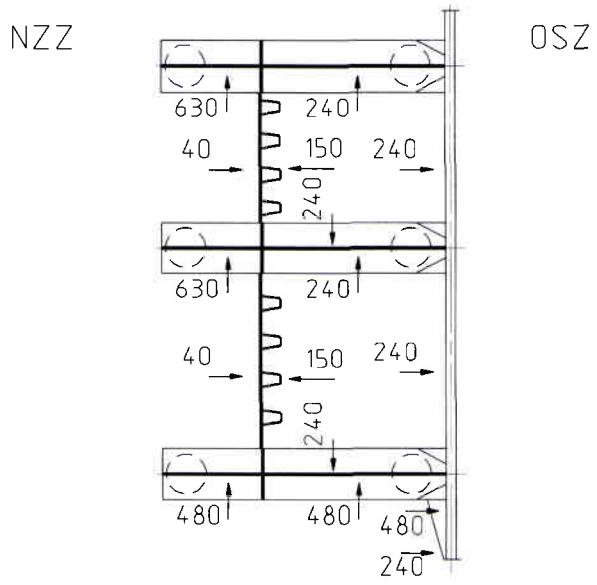
De horizontale belasting door golfklappen is aanzienlijk kleiner dan de extreme horizontale belasting door verval en golven (zie tabellen 2.1 en 2.2). De horizontale responsies van de schuiven op golfklappen zijn daarom als ontwerpbelasting op de volledige schuiven verder niet meegenomen.

Op de vakwerkstaven afzonderlijk kunnen lokaal golfklapdrukken van 240 kN/m^2 optreden. Deze grote drukken treden op in een sector van 30° van de buis en over een beperkte lengte. In figuur 4.2 is een indicatie gegeven van de grootte van de golfklapdrukken. De golfklapdrukken zijn gemeten in een schaalmodel (schaal 1:40), de waarden op de verticale as van figuur 4.2 hebben betrekking op het schaalmodel, omzetting naar de buisprofielen op ware grootte wordt bereikt door met 40 te vermenigvuldigen. De golfklapdrukken zijn voor buisprofielen met diameters van 1000 mm en 1200 mm, zoals deze voorkwamen in het eerste vakwerkliggerontwerp. Na aanpassing van het vakwerkliggerontwerp is de proevenserie niet meer herhaald. In het definitieve ontwerp variëren de buisdiameters van 500 mm tot 800 mm en zijn de optredende golfklapdrukken evenredig kleiner. Belangrijk gegeven voor het ontwerp van de vakwerkliggers is dat de golfklapdrukken op de buis aan de Noordzeezijde (meetpunten D4, D5, D6) lager zijn dan op de buis aan de Oosterscheldezijde nabij de schaalbeplating (meetpunten D1, D2, D3). De randstaven van het vakwerk aan de Noordzeezijde worden bij positief verval op druk belast en kunnen uitknikken. Golfklapbelasting op deze randstaven vermindert de capaciteit. Door de ligging ver van de beplating kan voor deze randstaven met een lagere golfklapbelasting gerekend worden.



Figuur 4.2 Golfklapdrukken op buisprofielen

Ter plaatse van de eindkokers was het niet mogelijk de 'gunstige' buisvorm toe te passen. De eindkokers moeten de horizontale belastingen uit de horizontale vakwerkliggers overdragen naar de achterhar. Daartoe zijn in de eindkokers horizontale raamwerken aangebracht ter plaatse van de vakwerkliggers, dit zijn de zgn. 'krammen' (zie ook hoofdstuk 5.1.4). Op de horizontale lijven van de krammen treden hoge golfklapdrukken op. Binnen de eindkoker treden de hoogste golfklapdrukken op tegen de krammen van de onderste vakwerkligger (figuur 4.3). De krammen van de middenligger en de bovenste ligger binnen de eindkoker worden met aanzienlijk lagere golfklapdrukken belast. Dit is het gevolg van de afschermende werking van de onderste kram en de verkleinde doorstroomopening ter plaatse, die het binnenstromen van grote watermassa's verhindert. Op de buiten de sponning gelegen krammen is het beeld omgekeerd. De grootste golfklapdrukken treden op tegen de middenkram en de bovenste kram. Reden hiervoor zijn de grotere golfhoogtes die later in de tijd tijdens een stormsluiting optreden. De onderste kram is dan de stilwaterlijn al gepasseerd (zie ook figuur 4.1).



Figuur 4.3 Rekenbelasting golfklapdrukken eindkokers (kN/m²)

Met modelonderzoek zijn de overschrijdingsfrequentielijnen voor golfklapdrukken op de krammen bepaald. De golfklapdrukken zijn gebaseerd op metingen van series van 1000 golven. De meetwaarden zijn van karakteristieke belastingen (herhalingsinterval 1x per 200 jaar) vertaald naar rekenwaarden (veiligheidsfactor 1,5). De verticale golfklapbelastingen resulteren ook in grote horizontale belastingen op de beplating van de eindkoker, zie figuur 4.3. Voor het ontwerp van de beplating aan de Noordzeezijde van de eindkokers zijn de golfklapdrukken maatgevend.

De golfklapbelastingen, zowel die op de vakwerkliggers als die op de eindkokers, zijn in de berekeningen aangenomen als statische belastingen, zij het met inbegrip van een dynamische vergrotingsfactor. M.b.t. vermoeiing zijn de golfklappen buiten beschouwing gelaten. Het aantal golfklappen is t.o.v. het aantal golven beperkt omdat niet elke golf resulteert in een golfklap. De trillingen die door golfklappen optreden in plaatvelden en staven zijn te lokaal, en van een te laag spanningsniveau, om als wisselende belastingen in de vermoeiingsberekeningen te worden meegenomen.

4.3.2. Eigengewicht en opdrijving

Het eigengewicht van de schuiven omvat het totale gewicht van de schuifconstructie inclusief voorzieningen en conservering. Het staalgewicht van de schuiven staat in tabel 3.1. In de berekening is het door de computer gegenereerde gewicht opgeschaald tot het gewicht uit de materiaaluittrek. De opdrijving van de constructie is vanwege het gebruik van buisprofielen aanzienlijk. Per berekeningssituatie, waarin de mate van onderdompeling van de schuifconstructie mede afhankelijk is van de waterstand, is de opdrijving handmatig bepaald en als lijnlast op de randstaven van de vakwerkliggers aangebracht. De reductie in gewicht van een gesloten schuif tijdens stormvloedcondities bedraagt ongeveer 40%, zie voor de getallen per schuif deelnota 4, hoofdstuk 7 "Onderaanslagen", tabel 4.

4.3.3. Stroming

Tijdens sluiten wordt er door het onder de schuif doorstromende water een neerwaartse stroombelasting uitgeoefend [4.3]. Deze belasting is maximaal bij "Einde sluiten" en bedraagt 10 kN/m. De grootte van de neerwaartse stroombelasting wordt bepaald door de stroomsnelheid van het water, die weer afhankelijk is van het verval. Bij "Begin openen" oefent het stromende water eveneens een neerwaartse belasting uit. Hoewel de vervalbelasting bij "Begin openen" kleiner is dan bij "Einde sluiten" wordt hier ook met 10 kN/m gerekend. De stroombelasting grijpt aan ter plaatse van de onderrand van de schaalbeplating.

In gesloten toestand is de doorstroomopening in verticale richting afgesloten door de schuifgeleidingen. In lengterichting is er tussen de schuif en de bovenbalk en dorpelbalk een spleet aanwezig. Door de spleet tussen de schuif en onderbalk blijft, ook in de gesloten toestand, een lekstroom werken. Deze lekstroming door de spleet kan bij negatief verval neerwaarts gericht zijn. Gerekend is voor alle schuiven met een verticaal werkende belasting door stroming aan de onderzijde van de schuif van 10 kN/m. De spleet tussen schuif en bovenbalk werkt als een overstort, het over de schuif stromende water oefent geen verticale gerichte belasting op de schuif uit.

4.3.4. Voorspanning schuifgeleiding

Ter plaatse van de eindharren zijn de schuiven voorgespannen tussen de geleidingen (zie deelnota 4). De voorspanning in de schuifgeleiding leidt tijdens openen en sluiten tot een verhoging van de kracht die door het bewegingswerk geleverd moet worden.

De voorspanning van de schuifgeleidingen heeft geen invloed op de eigenfrequenties. De sterkteberekeningen zijn gemaakt met golf- en vervalbelastingen waarin de eigenfrequenties via overdrachtfuncties in de responsie van de schuif verdisconteerd zijn (zie deelnota 2). Voor de vermoeiingsberekeningen zijn alleen de golfbelastingen van belang (golfamplitude en golfperiode) en die zijn onafhankelijk van de voorspanning in de schuifgeleidingen.

In gesloten situatie wordt de schuif door het bewegingswerk voorgespannen op de onderaanslagen om bij omhoog gerichte golfbelastingen ongecontroleerd bewegen te voorkomen. Deze verticale voorspanning heeft geen invloed op het (dynamisch) gedrag van de schuiven.

4.3.5. Torsie

Ten gevolge van zettingen en onvlakheden van de fundering kunnen pijlers t.o.v. elkaar geroteerd komen te staan. Hierdoor zal een schuif een gedwongen rotatie ondergaan om de lengteas omdat de eindkokers met de schuifgeleidingen de stand van de pijlers aannemen. De maximaal te verwachten torsie van een schuif bedraagt 0,01 rad. Deze torsiebelasting is als een gedwongen rotatie opgelegd aan alle schuiven.

4.3.6. Langsbelasting

De langsbelasting op de schuiven ontstaat door een verschil in waterstand in de schuifsponningen van de pijlers waartussen de schuif beweegt. Dit waterstandsverschil is een gevolg van scheef inlopende golven. Op basis van metingen in een schaalmodel zijn de waterstandsverschillen bepaald en overdrachtsfuncties naar de schuif opgesteld, zie deelnota 2.

Voor het goed functioneren van de schuiven is het noodzakelijk dat er speling aanwezig is tussen de zijaanslagen op de schuif en de zijgeleiding op de pijlers. Binnen de spelingsruimte kan een schuif onder invloed van een langsbelasting in lengterichting bewegen. Wanneer deze beweging door een pijler wordt gestopt veroorzaakt

dit een stootbelasting op de pijler en de schuif en ontstaan er vertragingskrachten op het bewegingswerk. De grootte van de stootbelastingen tegen de pijlers is afhankelijk van de waterstandsverschillen in de sponningen, de speling, de wrijving, de voorspanning in de schuifgeleidingen en de veerkarakteristiek van de zijaanslagen. Met deze factoren als functies van de belasting is een 4-massa-veermodel opgesteld dat langsbelastingen, verplaatsingen en versnellingen berekend. Zie voor de opbouw van dit model en de berekening van de stootbelastingen deelnota 4, hoofdstuk 6 "Zijaanslagen".

De berekende botskrachten zijn gegeven in figuur 32 van deelnota 4. Het betreft hier extreme belastingen met een overschrijdingskans van $2{,}5 \times 10^{-4}$. De grootste langsbelastingen treden op tijdens openen of sluiten bij schuifstanden waarbij de zijaanslag zich op N.A.P.+0,0 m bevindt. Voor de schuif zijn de optredende botsbelastingen niet maatgevend reden waarom de afleiding van de langsbelasting en de vertaling naar botskrachten opgenomen is in deelnota 4 in het hoofdstuk 6 "Zijaanslagen".

4.4 Dynamisch gedrag schuiven

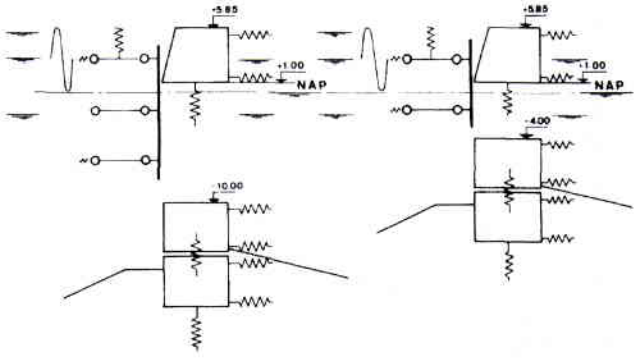
In voorgaande paragrafen zijn de belastingen op de schuiven beschreven. Deze belastingen zijn in het algemeen in de berekening als statische belastingen op de schuiven aangebracht. Bij de uitwerking van de schuifconstructie in hoofdstuk 5 is deze dan ook statisch, of quasi-statisch, geanalyseerd. Deze vereenvoudiging van de werkelijkheid is toelaatbaar als de responsie van de constructie duidelijk afwijkt van de periode van de belasting. Omdat alle eigenfrequenties van de schuiven hoger liggen dan de frequenties van de golven (zie de periode T_p van de golfbelastingen in hoofdstuk 2.1) was het geoorloofd de golfbelastingen als statische belasting op de rekenmodellen aan te brengen.

Ingeval er wel interactie tussen de belasting op de schuiven en de responsie van de constructie optreedt is de statische vertaling van belastingen niet zonder meer toegestaan. Het dynamisch gedrag kan dan ondervangen worden door het toepassen van een dynamische vergrotingsfactor.

Door golfbelasting en stroming kunnen de schuiven, of delen daarvan, in trilling komen. Indien de trilling onvoldoende gedempt is, en de belasting lang genoeg blijft werken, kan de trillingsbeweging zodanig toenemen dat bezwijken van de constructie optreedt. Daarnaast spelen de eigenfrequenties van de schuif een belangrijke rol bij de responsie op golfklappen. De grootte van golfklappen op een constructie wordt mede door de responsie bepaald. Het is om deze redenen dat er ook in het modelonderzoek door het Waterloopkundig Laboratorium veel aandacht is geschonken aan de bepaling van de eigenfrequenties en bijbehorende trillingsvormen. Zie voor een beschrijving van de modelproeven deelnota 2. Uit dit onderzoek kwam naar voren dat een golfklapbelasting die in de richting van de eigentrilling werkt, met een tijdsduur die een halve cyclustijd van de eigenfrequentie bedraagt, bij benadering de maximale responsie te zien zal geven. Tijdens het ontwerp zijn de eigenfrequenties van de schuiven berekend om vervolgens met een in de tijd variërende belasting de golfklapeffecten te kunnen inschatten. Met de responsie van de constructie op golfklappen in verticale en horizontale richting zijn de dynamische vergrotingsfactoren afgeleid. De controleberekeningen voor de golfklappen zijn vervolgens quasi-statisch uitgevoerd.

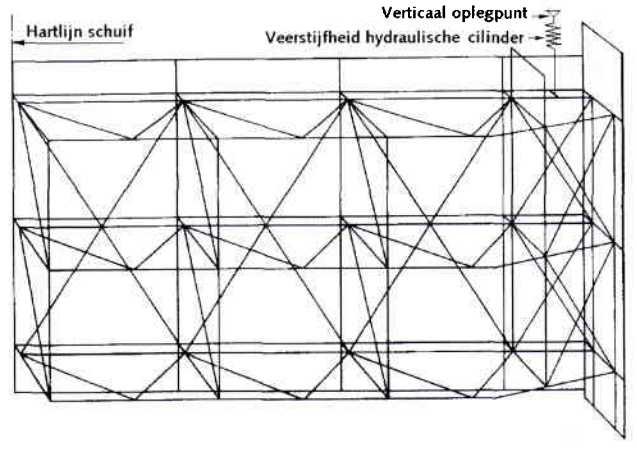
De eigenfrequenties van het onderzochte elastisch-gelijkvormige model zijn zowel gemeten als berekend. Het was noodzakelijk de gemeten waarden goed te reproduceren in de berekeningsmodellen, omdat niet van alle schuiven elastisch-gelijkvormige modellen zijn gemaakt. Met het gevalideerde rekenmodel zijn vervolgens de niet-hydraulisch beproefde schuiftypen gecontroleerd. Uit de onderzoeken en berekeningen is gebleken dat de schuiven niet door stromingsbelasting in trilling worden gebracht.

De mogelijk optredende trillingen door stroming zijn bepaald met een schaalmodel met een toenemende graad van complexiteit. Begonnen is met een eenvoudig massa-veer-model waarin de onderdelen (schuif, bovenbalk en onderbalk) stijf zijn. Vervolgens is dit model uitgebreid tot een elastisch-gelijkvormig model. In het elastisch-gelijkvormig model zijn de schuif en de boven- en onderbalk op de juiste wijze qua stijfheid en massa gemodelleerd (figuur 4.4).



Figuur 4.4 Massa-veersysteem schuifmodel

Naast het hydraulisch onderzoek zijn er ook afzonderlijke rekenmodellen van de schuiven gemaakt voor het bepalen van de eigenfrequenties. De schuiven zijn berekend met het programma ICES-STRUDL, dat begin jaren '80 beschikbaar was bij IBM. In dit programma zijn schijfelementen gebruikt voor de plaatvormige delen en staafelementen voor de buisconstructies. De schaalbeplating van de kering is met anisotrope, vlakke plaatelementen gemodelleerd (zie ook paragraaf 5.1.1). Dit om het afwijkende stijfheidgedrag van de platen in lengterichting goed weer te kunnen geven. Van elke schuif is een half-model gemaakt (figuur 4.5) ter controle van de sterkte. Er is aangenomen dat antimetrische trillingsvormen niet bepalend zijn en dat de middendoorsnede vlak zal blijven. Ter verificatie van deze aannamen is van een aantal schuiven ook een volledig model gemaakt.



Figuur 4.5 Ruimtelijk model schuif

Teneinde de gemeten eigenfrequenties van de schaalmodellen ook rekenkundig te reproduceren moest in de computerberekening van de eigenfrequenties ook de invloed van het water rond de constructie meegenomen worden. Het trillingsgedrag van een constructie in water is namelijk anders dan in lucht. 'Natte' eigenfrequenties kunnen sterk afwijken van 'droge' eigenfrequenties.

Voor de statische berekening van de maximale golf- en vervalbelasting is het toegestaan de tegen de schuif werkende watermassa als een uitwendige belasting te beschouwen, die onafhankelijk van de respons van de constructie werkzaam is. Voor een dynamische berekening geldt deze onafhankelijkheid niet, de belastingen uit de watermassa rond de constructie hangen mede af van de beweging van de constructie. Een verticale trillingsbeweging van de schuif zal slechts geringe krachten opwekken, vnl. werkzaam op de buizen van de vakwerkliggers. Een horizontale trillingsbeweging in de vervalrichting daarentegen veroorzaakt grote waterbewegingen en daardoor grote krachten werkend tegen deze beweging in.

Omdat de watermassa rond de schuif richtingafhankelijk van invloed is op de trillingsvormen was het niet mogelijk één meewerkende watermassa aan de schuifconstructie toe te voegen. Deze ene massa zou dan in alle trillingsvormen dezelfde invloed uitoefenen. De oplossing is gevonden in het bepalen van de meewerkende watermassa als functie van de verplaatsingen en de versnellingen. Dit is gedaan met een computerprogramma waarin een koppeling is aangebracht tussen de onbekende drukken van het water en de onbekende versnellingen van de staalconstructie. Door het voormalige instituut voor scheepsbouw TNO-IWECO is de meewerkende watermassa van een schuif bepaald per strekkende meter (figuur 14, deelnota 2) in een semi 2D-model. De vereenvoudiging van de schuifconstructie en rondom aanwezige watermassa tot een aantal identieke segmenten in lengterichting van de kering is geoorloofd, omdat de constructie en het waterprofiel weinig veranderen in lengterichting [4.4].

De meewerkende watermassa, afgeleid uit het computermodel omgeven door water, is vastgelegd in een massamatrix, die de werking van de massa's beschrijft afhankelijk van de vrijheidsgraden van de knopen van de staalconstructie. Door IBM was een programma geschreven dat de meewerkende watermassa van de randstaven van de vakwerkliggers en de kerende wand kon expanderen langs de gehele schuif en deze massa's kon toevoegen aan de knopen van het schuifmodel in ICES-STRUDL. Met de aldus uitgebreide 3D-modellen zijn de 'natte' eigenfrequenties van de schuiven berekend [4.5].

In beginsel is gekozen voor het driedimensionaal berekenen van de eigenfrequenties van de zwaarste drieregelige schuif (R16 met H=11900 mm) en de laagste tweeregelige schuif met de hoogste stijfheid (R1 met H=5900 mm). Vervolgens zijn de berekeningen op een vereenvoudigde wijze voortgezet voor een lage schuif met de geringste stijfheid (S13 met H=5900). Op deze wijze zijn de grenzen bepaald waartussen de eigenfrequenties van alle schuiven zich bevinden. De demping van de eigentrillingen is in het ontwerp aangenomen op 2% voor de laagste eigenfrequenties (tot 10 Hz) en op 5% voor de hogere frequenties.

Bij analyse bleek dat in het relevante frequentiebereik tweedimensionale rekenmodellen voldoende betrouwbare uitkomsten gaven, zodat voor enkele schuiven uitsluitend daarmee gerekend is. In tabel 4.3 zijn de berekende eigenfrequenties van schuif R16 weergegeven. De 'natte' uitbuigvormen van de drie eerste eigenfrequenties worden weergegeven door figuur 19 van deelnota 2.

Eigenfrequenties R16, H=11,9 m		
'Droog'		
2D	3D	trillingsvorm
4,60 6,73 7,10 11,98	4,05 6,57 7,43 14,53 24,92	V H T V* L
'Nat'		
2D	3D	trillingsvorm
2,43 3,09 4,02 10,07	2,34 3,22 5,15 8,98 11,93	H V T L V*
V = Verticaal, schuif en cylinder in fase H = Horizontaal T = Rotatie om lengteas V* = Vert., schuif en cylinder in tegenfase L = Lokale trilling		

Tabel 4.3 Berekende eigenfrequenties schuif R16

Een belangrijk 'ontwerp'aspect van de Oosterscheldekering is de conditiebewakingsprogramma ter controle en verificatie van de uitgangspunten en berekeningsresultaten (zie boek 1, deelnota 5, hoofdstuk 5). In het kader van dit programma zijn de eigenfrequenties, zoals die bij het ontwerp zijn gebruikt, gecontroleerd aan de hand van meetresultaten voor zowel de droge als de natte situatie. Uit de analyses blijkt een redelijke overeenstemming te bestaan tussen de ontwerp-uitgangspunten en metingen, voor zowel de trillingsvormen als de bijbehorende frequenties. De gevonden dempingen zijn iets groter dan in het ontwerp aangenomen, dit is in principe gunstig maar het effect is gering. Daarnaast is een niet voorziene eigenbeweging gevonden; een translatie loodrecht op de keringsas, waarbij de hele schuif van "voor naar achter" heen en weer beweegt. De bijbehorende eigenfrequentie is ongeveer 1,8 Hz. De demping op deze beweging is vrij groot (13%). Deze eigenbeweging kan worden verklaard uit de inklemming van de schuiven door de voorspanning van de schuifgeleidingen. Het optreden van deze extra eigenbeweging heeft voor de constructie geen consequenties [4.6].

5. Resultaten berekening schuiven

5.1 Statische berekening onderdelen

De stalen onderdelen van de schuiven zijn op sterkte getoetst met de rekenregels opgenomen in de NEN 3851 (Technische Grondslagen voor de berekening van Bouwconstructies - Staal). Het toepassingsgebied van deze norm is niet zodanig groot dat alle onderdelen van de schuiven er volledig mee getoetst konden worden. Met aanvullend rekenkundig onderzoek en modelonderzoek zijn de leemtes in het toepassingsgebied ondervangen.

5.1.1 Beplating

Het grootste deel van de waterkerende beplating van de schuiven (30,8 m lengte) is uitgevoerd als cilindrische schalen, alleen ter plaatse van de overgang van de schaalbeplating naar de eindkokers, en in de eindkokers zelf, zijn vlakke platen toegepast.

De schaalbeplating varieert voor de verschillende schuiftypen in hoogte van 5,9 m tot 11,9 m. De plaatdikte van de schalen is 10 mm en de straal 1,7 m. De bolle zijde van de schaalbeplating bevindt zich aan de Oosterscheldezijde. De schaalbeplating overspant 1,9 m met een pijl van 0,27 m. De schalen zijn over de volledige hoogte aan de randen ondersteund door verticaal staande buizen (de zgn. 'schaalbuizen', zie 5.1.2). De voordelen van schaalbeplating ten opzichte van vlakke beplating zijn:

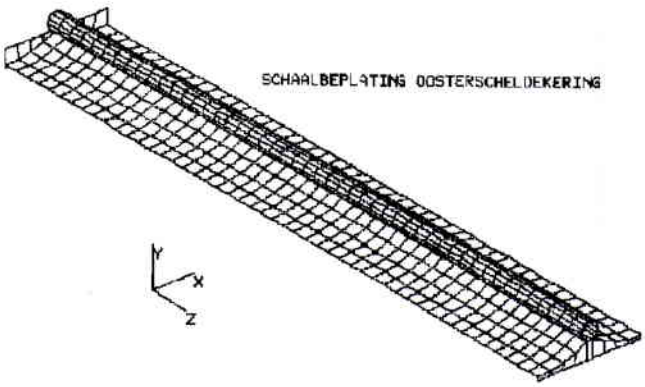
- Geen verstijvers voor de krachtsafdracht nodig.
- De aanwezigheid van grote openingen tussen de schaalbeplating en het hoofddraagsysteem. De schalen bieden "ruimte" voor verticaal (weg)stromend water wat leidt tot kleinere golfklapdrukken.

Aan de boven- en onderzijde van de schuif is de schaalbeplating voorzien van een flens (dikte 20 mm, breedte 340 mm). De flens aan de bovenzijde van de schaalbeplating volgt aan de Noordzeezijde het verloop van de schaalvorm. Door deze vorm hindert de bovenflens de opwaartse waterstroming langs de schaalbeplating niet, dit ter voorkoming van opwaartse golfbelastingen en golfklapdrukken. De flens aan de onderzijde heeft een constante breedte. Bij het sluiten van de schuif kunnen, als gevolg van golfklappen, op deze flens aan de onderzijde verticale gerichte waterdrukken van 440 kN/m2 optreden.

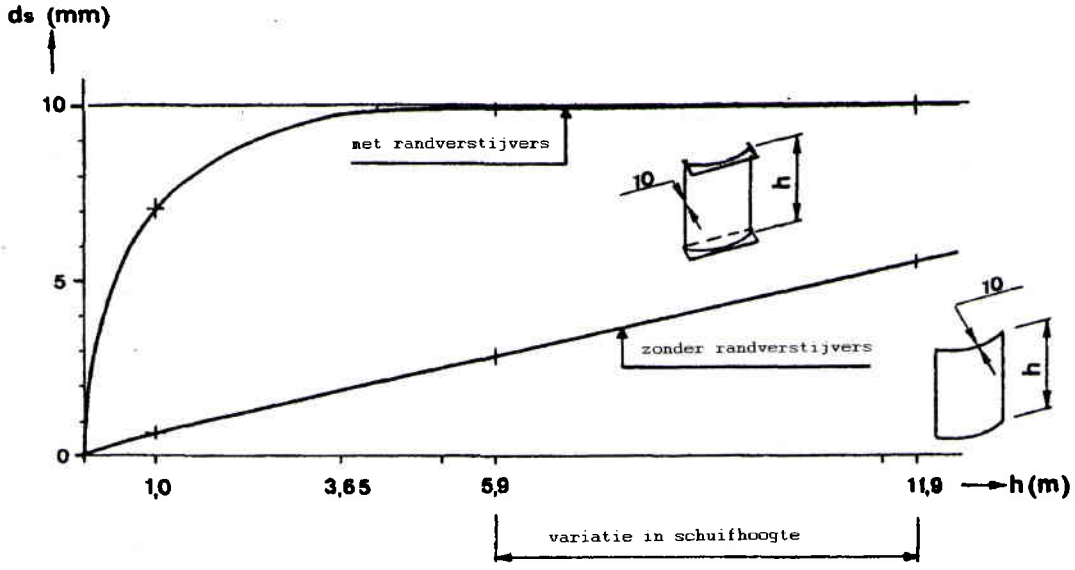
De schaalbeplating wordt bij een positief verval (waterstand Noordzee hoger dan Oosterschelde) belast door de maximale golf- en vervalbelasting. Door de schaalvorm treden er in de schaalbeplating nagenoeg alleen trekspanningen op. Bij een negatief verval treden er drukspanningen op in de schaalbeplating. De belastingen bij positief verval zijn maximaal 114 kN/m^2, en bij negatief verval 42 kN/m2.

De schaalbeplating, inclusief onder- en bovenflens, is berekend in 2D en 3D-modellen (VLASKO en SUSAN/[1]). De maximaal optredende trekspanning in de schalen t.g.v. de rekenbelastingen bij positief verval bedraagt 140 N/mm^2. Bij het maximale, negatief verval zijn de in de schalen optredende drukspanningen aanzienlijk lager (-52 N/mm^2), maar zou er een doorslagprobleem kunnen ontstaan. Daarom zijn er doorslagberekeningen van de schalen uitgevoerd met de twee meer geavanceerde rekenpakketten NASTRAN en ABAQUS. Met NASTRAN is een model gemaakt van een buis met twee gehalveerde schalen (figuur 5.1). Naast een doorslagberekening is dit model ook gebruikt om de meewerkende breedte van de schaalbeplating aan de buis te bepalen. De doorslagberekeningen zijn uitgevoerd voor perfecte schalen en voor schalen met een imperfectie van +10 mm en -10 mm [5.1]. De belastingen bestaan uit de waterdruk en opgedrongen vervormingen die herleid zijn uit een volledig model van de schuif. Berekend is de negatieve vervalbelasting waarbij de schaal instabiel zou worden. De berekende waarde van 100 kN/m^2 voor de negatieve vervalbelasting waarbij doorslaan optreedt, biedt een ruime marge t.o.v. de maximaal optredende negatieve vervalbelasting van 42 kN/m^2. In de 3D-berekeningen van de schuiven zijn de schalen gemodelleerd met vlakke plaatelementen met verschillende diktes per richting, teneinde het stijfheidgedrag van de schalen correct weer te geven. In de hoogterichting worden de schalen in hun vlak belast en zijn ze net zo stijf als een vlakke plaat. De schalen hebben daarnaast vanwege hun grote hoogte een aanzienlijke afschuifstijfheid en dragen dus mee in verticale richting. Tevens vormen de schalen met de schaalbuizen, de 'stompen' (zie 5.1.2) en het verticaal langsverband een ruimtelijke constructie die belast wordt op torsie. In lengterichting van de kering zijn de schalen door hun schaalvorm echter aanzienlijk slapper dan een vlakke plaat die in zijn vlak wordt belast.

Middels een 3D-computermodel zijn de stijfheden bepaald van een schaalelement in de lengterichting en de hoogterichting van de kering en voor afschuiving in het vlak van het schaalelement. Deze berekeningen zijn gemaakt voor schalen zonder de randverstijvingen en met de randverstijvingen. Daarna is per richting bepaald wat de vervangende dikte van een vlakke plaat is om een stijfheid



Figuur 5.1 NASTRAN-model schaalbeplating



Figuur 5.2 Vervangende plaatdikte schaalbeplating op afschuiving

te hebben die gelijk is aan de stijfheid van de schaalelementen. In verticale richting blijft de plaatdikte van het schaalelement 10 mm, in horizontale richting daarentegen reduceert de vervangende dikte tot 0,01 mm. De vervangende dikte voor afschuiving wordt sterk beïnvloed door de aanwezigheid van de randverstijvingen (figuur 5.2). Met de randverstijvingen is de vervangende dikte voor afschuiving van de laagste schuiven 9,45 mm, zonder randverstijvingen zou deze aanzienlijk lager zijn.

Vanwege de noodzaak de al grotendeels gefabriceerde schuiven, na plaatsing van de pijlers, nog passend te kunnen maken, is de vlakke beplating van de eindkokers doorgezet tot aan de eerste schaalbuis. De overspanning van dit plaatveld van eindkoker tot schaalbuis heeft een nominale lengte van 0,915 m. Op basis van een variatie in de lengte van ±0,275 m, overeenkomend met de spelingsruimte in de lengte van de vakwerken, is een plaatdikte gekozen van 25 mm. De plaatvelden zijn gecontroleerd op de maximale overspanning (grote inklemmingsmomenten door grote overspanning) en de minimale overspanning (grote inklemmingsmomenten door opgelegde vervorming). Bij de minimale overspanning worden de plaatvelden hoofdzakelijk belast door een opgelegde vervorming die ontstaat uit het verschil in doorbuiging van de vakwerkliggers en schaalbuizen t.o.v. de doorbuiging van de eindkoker. Door de grote plaatdikte gedraagt het plaatveld zich bij een kleine overspanning relatief stijf en ontstaan er grote inklemmingsmomenten ter plaatse van de aansluitingen op de eindkoker en de schaalbuis [5.1].

De eindkokers zijn voorzien van een vlakke beplating met verstijvingen. De beplating aan de Oosterscheldezijde van de eindkoker, in het verlengde van de schaalbeplating, is waterkerend. De beplating van de drie overige zijden is niet waterkerend omdat de kokers van onder en van boven open zijn. Zie verder de beschrijving in paragraaf 5.1.4.

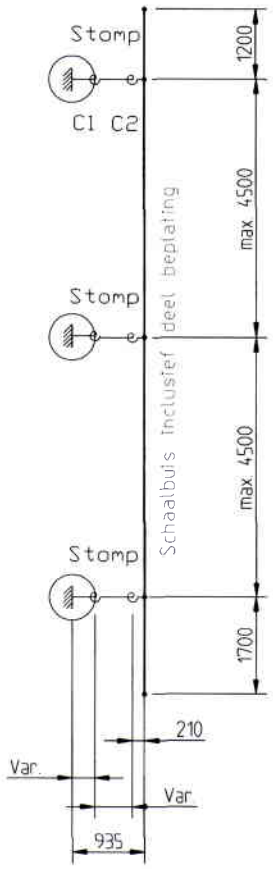
5.1.2 Schaalbuizen en stompen

De schaalbeplating is gelast aan verticaal staande buizen, de zgn. 'schaalbuizen'. Om een seriematige productie mogelijk te maken is voor alle schuifhoogtes gekozen voor eenzelfde buis ∅323,9x22,2 mm. De schaalbuizen dragen de belasting uit de schaalbeplating over aan de vakwerkliggers. Om redenen van fabricage, conservering en krachtwerking (reducerend effect golfklappen) staan de schaalbuizen op 'stompen' van 300 tot 450 mm lengte. Het lengteverschil ontstaat door de verschillende diameters van de randstaven van de vakwerkliggers waar de stompen op aansluiten. De h.o.h. afstand van de randstaven tot de schaalbuizen is in alle schuiven 865 mm. De stompen zijn in alle schuiven gemaakt van buis ∅219x12,5 mm.

De stompen worden bij een positief verval door de schaalbuizen belast op buiging en trek. Tevens functioneren de stompen als een van de vlakken van de 'koker' die ontstaat tussen de schaalbeplating en het langsverband. Een torsiebelasting op de schuif veroorzaakt hierdoor aanzienlijke, extra buigende momenten in de stompen. Hierdoor ontstaat een complex spanningsbeeld in de stompen, om deze reden zijn alle verschillende aansluitingen van de stompen aan de vakwerkliggers en de schaalbuizen geanalyseerd. Omdat de schaalbeplating als een schijf werkt zal ze in verticale richting ook meewerken met het verticale draagsysteem. De stompen dragen dan ook krachten uit het verticaal verband over aan de schaalbuizen.

Voor de momentwerking in de schaalbuizen gedraagt de schaalbeplating zich als een flens. De meewerkende breedte van de beplating bedraagt 0,5 m aan weerszijde van een schaalbuis. De schaalbuizen overspannen ten hoogste een afstand van 4,5 m tussen twee vakwerkliggers. Berekening van de hoofddraagwerking van de stompen en de schaalbuizen heeft in een twee-dimensionaal VLASKO-model plaatsgevonden (figuur 5.3). De golf- en vervalbelasting grijpt hierbij aan op de schaalbeplating terwijl de randstaven van de vakwerkliggers vaste steunpunten vormen. Door de meewerkende breedte van de beplating is de h.o.h. afstand van de randstaaf tot het zwaartepunt van het samengestelde profiel van een schaalbuis en beplating 935 mm.

In de grote 3D-modellen van de schuiven zijn de stompen en schaalbuizen ook meegenomen. Omdat in deze modellen de golf- en vervalbelastingen echter aangrijpen op de vakwerkliggers kon hiermee de buiging in de schaalbuizen niet berekend worden. De 3D-modellen zijn voor de stompen en schaalbuizen gebruikt voor de bepaling van de secundaire krachten ten gevolge van de werking van het hoofddraagsysteem (krachten in lengterichting en torsie).



Figuur 5.3 Model schaalbuis en stompen

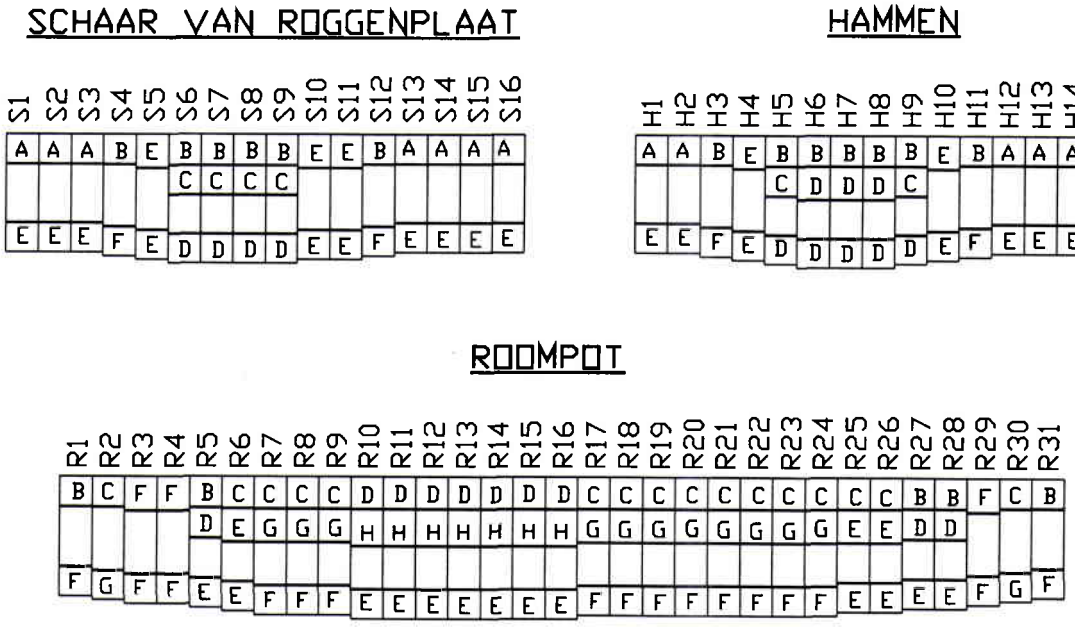
De verbinding van de stomp aan de schaalbuis en de vakwerkligger is niet oneindig stijf, maar heeft een bepaalde veerstijfheid. De veerstijfheden van de buisverbindingen zijn bepaald met formules uit DNV-rekenregels, voornaamste parameters hierin zijn de verhoudingen β=r/R en γ=R/T (met r=straal stomp, R=straal vakwerkstaaf of schaalbuis, T=wanddikte vakwerkstaaf of schaalbuis).

De belasting op het model bestaat uit een verdeelde belasting in de vervalrichting op de schaalbuis (golf- en vervalbelasting) en een puntlast in neerwaartse richting op de schaalbuis (gewicht schaalbuizen en beplating). Vervorming van het hoofddraagsysteem, door torsie en doorbuiging, is geschematiseerd door de opleggingen t.p.v. de vakwerkliggers gedwongen verplaatsingen en rotaties te geven, overeenkomend met de waarden gevonden in de statische 3D-berekening van een volledige schuif in SUSAN/1 [5.2]. Omdat met het 2D-model slechts de momenten in het verticale vlak gevonden worden, zijn voor de bepaling van de momenten in het horizontale vlak (werking hoofddraagsysteem) de resultaten van de 3D-berekeningen gebruikt (alleen de momenten).

Omdat de lengte van de stompen afhankelijk is van de diameter van de toegepaste randstaven in de vakwerkliggers, en omdat de hoogte van de schaalbuizen varieert, is het krachtenspel in de stompen en schaalbuizen voor elk schuiftype afzonderlijk bepaald. De onderzochte belastingen zijn het maximale verval, de vermoeiingsbelasting en torsie. Per schuiftype en per stomp zijn in de aansluitingen op de schaalbuis en de vakwerkstaven de maximale buigende momenten en normaalkrachten bepaald. Hiermee zijn de nominale spanningen berekend die optreden in de kroon- en zadelpunten van de buisverbindingen. De controle van de spanningen is uitgevoerd voor de extreme belastingen en voor de vermoeiingsbelasting. De spanningen volgend uit de vermoeiingsbelasting zijn met uit de literatuur (vnl. Wordsworth) bekende spanningsconcentratiefactoren (SCF) vermenigvuldigd en samengesteld tot resulterende spanningen [5.3]. Zie voor de opzet en uitwerking van de berekening van de vermoeiingsbelasting hoofdstuk 6. De in dat hoofdstuk beschreven berekeningsopzet heeft betrekking op de vakwerkliggers, maar is op gelijke wijze uitgevoerd voor de stompen.

5.1.3 Vakwerkliggers

De vakwerkliggers overspannen de doorstroomopening tussen de pijlers. Afhankelijk van de positie in één van de sluitgaten en de optredende belasting is een schuif voorzien van twee of drie vakwerkliggers (figuur 5.4 en tabel 5.1)



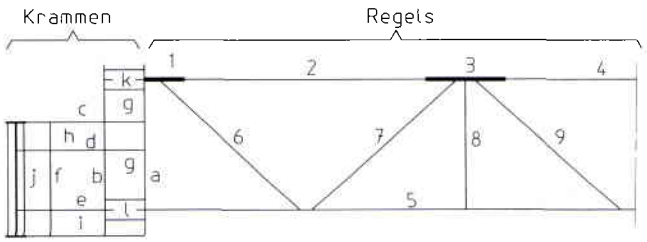
Figuur 5.4 Overzicht profilering vakwerkliggers in de sluitgaten

Locatie schuif	R_1 R_{31}	H_1 H_2 H_{12} H_{13} H_{14} H_{15} S_1 S_2 S_3 S_{13} S_{14} S_{15} S_{16}	R_2 R_{30}	H_3 H_{11} S_4 S_{12}	R_3 R_4 R_{29}	H_4 H_{10} S_5 S_{10} S_{11}	R_5 R_{27} R_{28}	H_5 H_9 S_6 S_7 S_8 S_9	R_6 R_{25} R_{26}	H_6 H_7 H_8	R_7 R_8 R_9 R_{17} R_{18} R_{19} R_{20} R_{21} R_{22} R_{23} R_{24}	R_{10} R_{11} R_{12} R_{13} R_{14} R_{15} R_{16}
Schuifhoogte	**5900 -I**	**5900 -II**	**6900 -I**	**6900 -II**	**7900 -I**	**7900 -II**	**8900 -I**	**8900 -II**	**9900 -I**	**9900 -II**	**10900**	**11900**
Bovenregel	B	A	C	B	F	E	B	B	C	B	C	D
Middenregel	-	-	-	-	-	-	D	C	E	D	G	H
Onderregel	F	E	G	F	F	E	E	D	E	D	F	E

Tabel 5.1 Overzicht vakwerkliggers per schuif

Er zijn acht typen vakwerkliggers, waarbij per type vakwerkligger de volledige samenstelling van de buisprofielen vastligt (figuur 5.5 en tabel 5.2). Met de acht typen vakwerkliggers zijn twaalf verschillende schuifuitvoeringen samengesteld. Vanwege de grotere belastingen zijn de schuiven in de Roompot uitgevoerd met zwaardere vakwerkliggers dan schuiven van gelijke hoogte in de Hammen en de Schaar.

De keuze van de verschillende typen vakwerkliggers is gebaseerd op een relatief eenvoudige toedeling van de maximale golf- en vervalbelastingen aan de vakwerkliggers in alle schuiven. Voor de toedeling van de maximale golf- en vervalbelasting aan de vakwerkliggers in een schuif is alleen het aantal vakwerkliggers en de onderlinge afstand van belang, aan de profilering (en dus de stijfheidverdeling) is in eerste instantie voorbijgegaan. Bij de schuiven met twee vakwerkliggers is de toedeling eenvoudig vast te stellen aan de hand van de positie van de resultante van de belastingen. Voor de schuiven met drie vakwerkliggers zijn 2D-modellen gebruikt. Van de maximale belasting door golf- en vervalbelasting op alle vakwerkliggers is een frequentieverdeling gemaakt. Deze frequentieverdeling is opgedeeld in 8 intervallen. De aantallen per type vakwerkligger zijn aangegeven in de tweede rij van tabel 5.2. Het totaal aantal vakwerkliggers bedraagt 157.



Figuur 5.5 Overzicht onderdelen schuif

De schuiven met de maatgevende vakwerkliggers zijn volledig doorgerekend. In tabel 5.3 is vermeld in welke schuif de maatgevende vakwerkliggers aanwezig zijn. Onderscheid is gemaakt tussen de extreme belasting (1/4000 jaar) en vermoeiing (karakteristieke belastingen, 1/200 jaar). Voor de berekening van krachten en spanningen in de vakwerkliggers moeten de waarden nog met de van toepassing zijnde veiligheidsfactoren vermenigvuldigd worden ($\gamma_{extreem}$=1,25, $\gamma_{vermoeiing}$=1,0). Het grote verschil tussen de extreme belastingen en de vermoeiingsbelastingen is gelegen in het feit dat in de extreme belastingen golf- én vervalbelasting aanwezig zijn, terwijl de vermoeiingsbelastingen alleen uit golfbelasting bestaan (zie ter vergelijking tabellen 2.1 en 2.2).

	VAKWERKLIGGERS (aantal)							
ONDER-DEEL	**A (13x)**	**B (18x)**	**C (22x)**	**D (22x)**	**E (39x)**	**F (23x)**	**G (13x)**	**H (7x)**
1	ø508x40^z	ø609^{6}x40^z	ø660^{4}x40^z	ø711^{2}x40^z	ø711^{2}x45^z	ø762x45^z	ø812^{8}x45^z	ø812^{8}x50^z
2	ø508x30	ø609^{6}x30	ø660^{4}x30	ø711^{2}x30	ø711^{2}x35	ø762x35	ø812^{8}x35	ø812^{8}x40
3	ø508x30^z	ø609^{6}x30^z	ø660^{4}x30^z	ø711^{2}x35^z	ø711^{2}x35^z	ø762x35^z	ø812^{8}x35^z	ø812^{8}x40^z
4	ø508x30	ø609^{6}x30	ø660^{4}x30	ø711^{2}x30	ø711^{2}x35	ø762x35	ø812^{8}x35	ø812^{8}x40
5	ø508x35^z	ø609^{6}x35^z	ø660^{4}x35^z	ø711^{2}x40^z	ø711x40^z	ø762x40^z	ø812^{8}x40^z	ø812^{8}x45^z
6	ø419x16	ø457^{2}x16	ø508x16	ø609^{6}x16	ø660^{4}x16	ø660^{4}x16	ø711^{2}x20	ø711^{2}x25
7	ø406^{4}x12^5	ø419x12^5	ø457^{2}x12^6	ø508x12^5	ø508x12^5	ø558^{8}x12^5	ø609^{6}x12^5	ø609^{6}x12^5
8	ø355^{6}x12^5	ø355^{6}x12^5	ø419x12^5	ø508x12^5	ø508x12^5	ø508x12^5	ø558^{8}x12^5	ø558^{8}x12^5
9	ø267x12^5	ø267x12^5	ø355^{6}x12^5	ø355^{6}x12^5	ø355^{6}x12^5	ø355^{6}x12^5	ø355^{6}x12^5	ø355^{6}x12^5

Tabel 5.2 Profilering vakwerkliggers

BELASTING	$q_{extreem}$ 1/4000 jaar		$q_{vermoeiing}$ 1/200 jaar		VERHOUDING BELASTINGEN
LIGGERTYPE	kN/m	SCHUIF	kN/m	SCHUIF	extreem/vermoeiing
A	203	H15	62	H15	3,27
B	264	H 8	84	R28	3,14
C	296	R26	100	R26	2,96
D	351	R16	117	R16	3,00
E	389	R26	122	R26	3,19
F	436	R29	148	R29	2,95
G	461	R 7	149	R 2	3,09
H	526	R16	160	R16	3,29

Tabel 5.3 Maatgevende gelijkmatig verdeelde belastingen vakwerkliggers

Met de 3D-computermodellen zijn de staafkrachten (momenten, normaalkrachten, dwarskrachten) bepaald voor de schuiven met de maatgevende vakwerkliggers. Omdat de verschillen met de 2D-computermodellen gering waren, zijn de krachten in een aantal typen vakwerkliggers alleen met 2D-computermodellen bepaald. De golfklapbelastingen op de vakwerkliggers zijn veel kleiner dan de krachten die voortvloeien uit de maximale golf- en vervalbelasting en zijn niet meegenomen in de hoofdberekening van de vakwerkliggers. Daarnaast treden de maximale golfklapbelastingen niet gelijktijdig op met de maatgevende situatie voor de vakwerkliggers.

In de 3D-computermodellen is veel gewerkt met eenheidslasten op de vakwerkliggers. De verschillende belastinggevallen die berekend zijn, zijn samengesteld uit de eenheidslasten per vakwerkligger met bijbehorende vermenigvuldigingsfactor. Door per vakwerkligger te rekenen met een eigen vermenigvuldigingsfactor kon elke mogelijke verdeling van de belastingen over de vakwerkliggers bereikt worden. Dit maakte het mogelijk om op eenvoudige wijze een groot aantal verschillende golf- en vervalsituaties, waarbij de verdeling van de totaalbelasting over de vakwerkliggers steeds wijzigt, te berekenen.

Controle voor de statische sterkte is uitgevoerd met de extreme belasting en de bijbehorende veiligheidsfactor γ_{extr}=1,25. Per staaf zijn de nominale rekenspanningen σ_{nom} bepaald met:
$\sigma_{nom} = N/A + M/W$
N = normaalkracht, A = oppervlak profiel, M = buigend moment, W = weerstandsmoment profiel
De nominale spanningen overschrijden nergens in de constructie de waarde van de vloeigrens van het staal. In geval van gedrukte staven is een aanvullende controle op knik uitgevoerd. De knikcoëfficiënt ω (een vergrotingsfactor van de drukspanning in voorgaande formule) varieert tussen 1,90 voor de slankste diagonalen tot 1,20 voor de grootste randstaven.

De sterkte van de buisverbindingen, de knooppunten, is gecontroleerd met behulp van de rekenregels van het International Institute of Welding (I.I.W.). Voor de controle op vermoeiing zijn de nominale spanningen vermenigvuldigd met spanningsconcentratiefactoren (SCF) volgens Wordsworth. Als gevolg van de materiaalproblematiek van de warmgewalste buizen is de verbindingssterkte en de bepaling van spanningsconcentratiefactoren opnieuw onderzocht. Zie voor de berekening van de verbindingen en de vermoeiing hoofdstuk 5.2, en voor de materiaalproblematiek hoofdstuk 6.

De toets op sterkte en de toets op vermoeiing van de verbindingen gaan beide uit van dezelfde berekening. Van elke verbinding zijn namelijk de krachten bepaald ten gevolge van de extreme golftopbelasting (herhalingsinterval 4000 jaar). Door uit te gaan van de extreme golftopbelasting is na vermenigvuldiging met de daarbij horende veiligheidsfactor en een verhoudingsfactor die het verval in rekening brengt, direct een toets op de sterkte mogelijk. Tegelijk zijn de uit de krachten en momenten door de golftopbelasting de spanningsintervallen te herleiden die, met behulp van omrekenfactoren en SCF, de vermoeiingssterkte bepalen.

Doordat de golf- en vervalbelasting via de stompen naar de randstaven van de vakwerkliggers aan de Oosterscheldezijde worden overgebracht, worden deze randstaven zwaarder belast (lokale buiging) dan de randstaven aan de Noordzeezijde. Vanwege uniformiteit in de vormgeving van de knooppunten en aansluitingen zijn beide randstaven van een vakwerkligger met gelijke diameter uitgevoerd en zijn alleen de wanddiktes geoptimaliseerd. Voor de sterkte van de knooppunten zijn aan de Noordzeezijde ter plaatse van de aansluitingen van de wandstaven, zgn. 'cans' opgenomen. De cans hebben een grotere wanddikte dan de randstaven en zijn van Z-kwaliteit. De randstaven aan de Oosterscheldezijde zijn over de volledige lengte van gelijke wanddikte en van Z-kwaliteit vanwege de aansluitingen van de stompen (zie voor de profilering tabel 5.2). De wandstaven in de vakwerkliggers (diagonalen en horizontalen) zijn gedimensioneerd op de optredende belastingen en hebben daardoor verschillende diameters. Naar de eindkokers toe worden de diameters van deze staven groter. Het zwaarst belaste knooppunt bevindt zich bij de aansluiting van de Noordzeezijde-randstaaf aan de eindkoker (nummer 1 in figuur 5.5). De diagonaal die in deze aansluiting aanwezig is kan om redenen van fabricage (geen overlappende lassen) en onzekerheden in de pijlerplaatsing (overlengte noodzakelijk) niet in de schemalijn van de kram eindigen. Hierdoor ontstaat een excentrische aansluiting die lokaal grote buigende momenten in de randstaaf tot gevolg heeft.

De onzekerheden in de pijlerplaatsing en de grootte van het sluitgat zijn als ontwerpuitgangspunt in de lengte van de vakwerkliggers meegenomen. Alle vakwerkliggers zijn met een overlengte geproduceerd van 0,275 m. De overlengte was tweezijdig aanwe-

zig in de randstaven. Omdat t.o.v. de theoretische lengte een 'onderlengte' van eveneens 0,275 m ook mogelijk was, bedroeg de totale beschikbare marge in de schuiflengte 2 x 2 x 0,275 = 1,10 m. Voorafgaand aan het samenvoegen van vakwerkliggers en eindkokers is de stand en de positie van de pijlers ingemeten. Daarna zijn de vakwerkliggers op maat gemaakt en aan de eindkokers gelast (zie ook hoofdstuk 7).

5.1.4 Eindkokers

Tussen de vakwerkliggers en de eindhar bevindt zich aan de beide uiteinden van een schuif een doosvormige constructie, de zgn. 'eindkoker'. De eindkoker is aan de onder- en bovenzijde open. Aan beide zijden van de eindhar zijn over de hele hoogte de schuifaanslagen aangebracht. Het glijmateriaal van de aanslag heeft in combinatie met het materiaal van de schuifgeleiding op de pijler een lage wrijvingscoëfficiënt, zodat de krachten, die nodig zijn om de schuiven onder verval- en golfbelasting te bewegen, laag blijven. De maximale vervalbelasting leidt tot oplegdrukken van 3000 kN/m in de schuifaanslagen. Omdat de aanslagen continu ondersteund worden door de schuifgeleiding op de pijler, terwijl de vakwerkliggers heel lokaal hun horizontale belastingen afgeven, dient de eindhar voor de lastspreiding te zorgen.

Op het niveau van elke vakwerkligger is de eindkokerconstructie verstijfd d.m.v. samengestelde profielen, zgn. 'krammen'. De krammen zijn de voortzetting van de vakwerkliggers in de eindkoker en dienen voor de overdracht van de horizontale belasting naar de eindhar. De eindhar spreidt de krachten uit de krammen over de schuifgeleidingen. Tevens bevinden zich aan de eindhar de zijaanslag en de onderaanslag. Aan de Noordzeezijde zijn de krammen uitgebouwd om het verschil in constructiehoogte van de vakwerkliggers en de eindhar te overbruggen.

Bij een klein verval over de kering kan de som van de verval- en golfbelasting het ene moment in de richting van de Oosterschelde en het volgende moment in de richting van de Noordzee werken. Onder invloed van deze wisselende belasting zouden de schuiven horizontaal kunnen bewegen tussen de schuifgeleidingen in de sponning. Daar dit onaanvaardbaar hoge stootbelastingen op de schuifgeleidingen zou kunnen opleveren, zijn de schuiven tussen de schuifgeleidingen voorgespannen. De voorspanning bedraagt gemiddeld 200 kN/m. Zie voor een meer uitgebreide beschrijving van de zijaanslagen deelnota 4.

Aan de bovenzijde van de eindkoker bevinden zich de ophangbalken met het cardanisch, bevestigde onderoog van de zuigerstang (figuur 3.6). Het onderoog van de zuigerstang is in vervalrichting in de hartlijn van de hamerstukken op de pijler geplaatst, het hart van de zuigerstang valt hierdoor niet samen met het zwaartepunt van de schuif. De ophangbalken zijn met geboute verbindingen bevestigd tussen de eindhar en de doorgetrokken beplating van wand 3 van de eindkoker (figuur 5.6). Tussen de ophangbalken bevindt zich in wand 3 het montage-hijsoog. Het montage-hijsoog is in vervalrichting wel in het zwaartepunt van de schuif gepositioneerd.

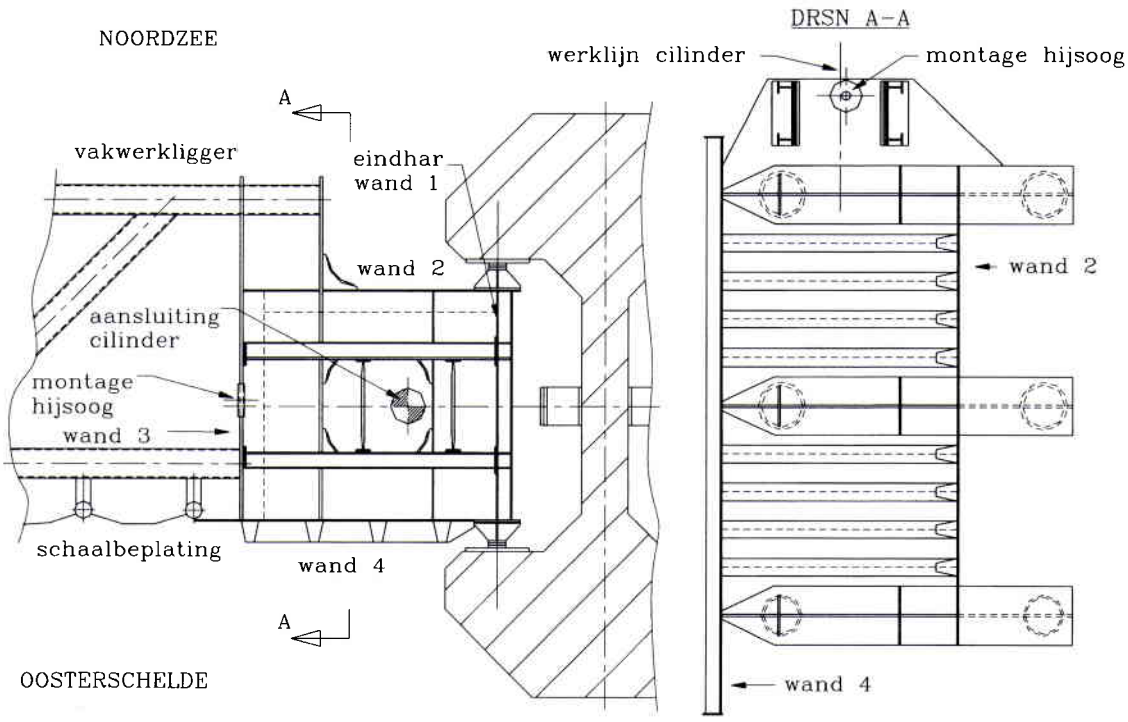
In het ontwerp van de eindkoker heeft de berekening van de krammen een belangrijke plaats ingenomen. De profilering van de krammen is afgestemd op de profilering van de aansluitende vakwerkliggers. In de bepaling van de kramprofilering is dezelfde systematiek gevolgd als bij de vakwerkliggers. De afmetingen van de toegepaste lijven en flenzen van de krammen is gegeven in tabel 5.4, de aanduiding van de onderdelen staat in figuur 5.5. De knieschotten, die in de hoeken van de krammen zijn geplaatst, staan niet aangegeven in de tabel.

De beplating van de eindkoker aan de Oosterscheldezijde (wand 4) ligt in het verlengde van de schaalbeplating en is een onderdeel van de afdichting van de doorstroomopening (figuur 5.6). Deze beplating keert de volledige vervalbelasting en is daarom in verticale richting aan de buitenzijde van de eindkoker verstijfd met gezette trogprofielen (hoog 330 mm, wanddikte 12 mm). De overige zijden van de eindkoker (wanden 1,2,3) hoeven slechts golfbelastingen en kleine vervalbelastingen door een mogelijk faseverschil tussen de waterstand binnen en buiten de eindkoker te keren. Deze plaatvelden zijn verstijfd door ze aan de binnenzijde te voorzien van horizontale I-vormige verstijvers (wanden 1 en 3) of troggen (wand 2, trog 300 mm hoog, wanddikte 8 mm). De I-vormige verstijvers bestaan uit een lijf met een flens die in de hoeken is afgeschuind.

	KRAMMEN (aantal)							
ONDER-DEEL	**A (26x)**	**B (36x)**	**C (44x)**	**D (44x)**	**E (78x)**	**F (46x)**	**G (26x)**	**H (14x)**
a-b	750x28^{z}	750x28^{z}	800x28^{z}	850x38^{z}	850x40^{z}	900x40^{z}	950x38^{z}	1000x40^{z}
c-d	400x30	600x30	600x30	750x30	800x40	800x40	900x40	1000x40
e	400x30	400x30	400x30	500x30	500x30	500x30	500x30	700x35
f	600x25	600x25	600x25	600x25	600x25	600x25	600x25	600x25
g	35	35	35	35	35	40	40	40
h	25	30	30	30	30	35	35	35
i	20	20	20	22, 30*, 20**	22, 30*, 20**	30*, 20**	22, 30*	20
j	30	30	30	30	30	30	30	30
k-l	ø508x40	ø609^{6}x40	ø660^{4}x40	ø711^{2}x40	ø711^{2}x45	ø762x45	ø812^{8}x45	ø812^{8}x50

Voor de krammen behorend bij de regels D, E, F en G is de lijfplaatdikte (onderdeel i) afhankelijk van de ligging van de regel;
**=bovenregel, *=onderregel

Tabel 5.4 Profilering krammen



Figuur 5.6 Eindkoker

De flenzen zijn in de hoeken afgeschuind om dwangkrachten te voorkomen. De verstijvers op de wanden 1,2,3 staan op een onderlinge afstand van 0,90 m. Daarnaast worden alle wanden belast door de 'uitstraling' van golfklappen tegen de krammen. Voor plaatvelden in de wanden 1,2 en 3 is dit zelfs de maatgevende belasting.

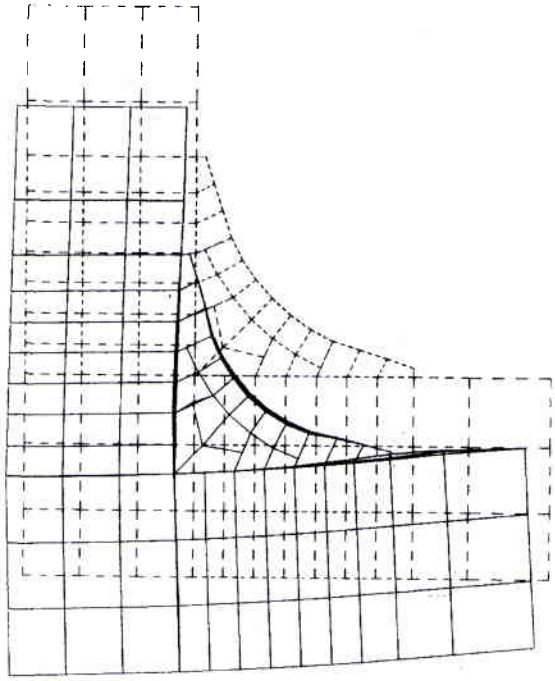
De krammen zijn voor het overall gedrag berekend in de volledige schuifmodellen en voor de lokale effecten in kleinere modellen. Met de volledige schuifmodellen, waarin de krammen zonder knieschotten zijn gemodelleerd, is een globaal inzicht verkregen in de spanningen en een goed inzicht in de vervormingen van de krammen. Een meer gedetailleerde berekening van de krammen is gemaakt met aparte computermodellen. Deze modellen bestonden uit de krammen, inclusief knieschotten, ter plaatse van één vakwerkligger met een half veld beplating van de eindkoker aan de onder- en bovenzijde van de krammen. De invoer bestond niet uit krachten, maar uit opgelegde verplaatsingen ter plaatse van de aansluiting vakwerkligger-kram.

In de computermodellen van de krammen is ook het lokale effect van belasting door een golfklap onderzocht. Bij het bewegen van een schuif zullen bij de passage van de stilwaterlijn de lijfplaten van de krammen belast worden door golfklappen. Voor een deel van de eindkoker en kram is met een 'spijkerbelasting', een hoge golfklapdruk werkend gedurende een zeer korte tijd, een dynamische vergrotingsfactor van 1,2 bepaald. In de verdere uitwerking van de berekening van de krammen zijn de statische belastingen t.g.v. golfklappen vermenigvuldigd met deze vergrotingsfactor [5.4]. De grootste golfklapbelasting treedt op bij het buiten de eindkoker uitstekende deel van de kram ter plaatse van de middelste en bovenste vakwerkligger (van een drieregelige schuif), zie hiervoor figuur 4.4. Dat deze golfklapbelastingen hoger zijn dan op de onderste kram komt omdat de middelste en bovenste kram later in de sluitingscyclus, dus bij hogere golven, de stilwaterlijn passeren. In de eindkoker zorgen de kleine doorstroomopeningen t.p.v. de krammen voor demping van de waterbeweging en daardoor lagere golfklapdrukken.

Uit berekening met de computermodellen van een gehele schuif volgden hoge piekspanningen in de haakse aansluitingen van de krammen. De vloeiend verlopende knieschotten verminderen deze piekspanningen en zorgen zo voor een vloeiender krachtsoverdracht. In eerste opzet was gedacht de knieschotten alleen als een dikke plaat uit te voeren, waarbij de dikte afhankelijk zou zijn van de optredende belastingen. Uit berekeningen bleek dat voor de zwaarst belaste knieschotten platen van 60 mm dikte niet voldeden op stabiliteit. Een neveneffect van deze zware knieschotten was dat de spanningen in de aansluitende platen in de krammen de vloeigrens overschreden. Als alternatief zijn de knieschotten 'licht' uitgevoerd met een lijfplaat van 25 mm dikte en een flens van 150 x 25 mm. De spanningen in de knieschotten liggen in deze uitvoering op een hoog niveau, terwijl de globale spanningen in de krammen lager worden en de spanningen in de aansluitende delen van de krammen weinig beïnvloed worden door deze vormgeving van de knieschotten. Bij overbelasting van de knieschotten, tijdens extreme belasting, zal er geen schade aan de krammen optreden. Eventuele schade van de las van de 'lichte' knieschotten aan de krammen is geaccepteerd als ontwerpuitgangspunt [5.6]. De vermoeiingssterkte van de lassen van de knieschotten aan de krammen is lager dan de vermoeiingssterkte van de krammen. Ingeval van vermoeiingsschade zijn deze lassen relatief goed bereikbaar voor reparatie en niet kritisch m.b.t. de veiligheid van de constructie.

Het vervormingbeeld en de hoge spanningen van de knieschotten in de lineair-elastische berekening zijn aanleiding geweest aanvullende geometrisch niet-lineaire en fysisch niet-lineaire berekeningen uit te voeren. Dit teneinde de stabiliteit van de knieschotten rekenkundig te controleren en de invloed van herverdeling van spanningen na overbelasting vast te stellen. Hiertoe is een aansluiting van twee krammen met een knieschot berekend in ABA-

QUS (figuur 5.7). Het model is belast met voorgeschreven verplaatsingen volgend uit de berekening van een volledige schuif. De stabiliteit van de knieschotten bleek verzekerd, de restspanningen na overschrijden van de vloeigrens bleken gering te zijn en daarbij weinig invloed op de globale krachtsverdeling in de krammen te hebben.



Figuur 5.7 Vervorming knieschot kram

5.2 Vermoeiing

Als de kering wordt gesloten, en als ze gesloten is, zal door golven op de schuiven een wisselende belasting optreden. Deze wisselende belasting kan voor alle onderdelen van de schuiven vertaald worden in spanningsintervallen. Bij het herhaald optreden van spanningsintervallen uit de golfbelasting worden (onderdelen van) de schuiven op vermoeiing belast. Vermoeiing is het principe dat na herhaald belasten bezwijken optreedt bij een spanning lager dan de vloeigrens van het materiaal. Een gevolg van vermoeiing is dat na een aantal lastwisselingen scheurtjes in verbindingen ontstaan die, na verloop van tijd, kunnen uitgroeien tot volledige vermoeiingsscheuren, die weer kunnen leiden tot bezwijken van de verbinding op statische sterkte.

Door de vormgeving van de gelaste knooppunten en aansluitingen treden hierin spanningsconcentraties op die de invloed van de wisselende belastingen vergroten. Vermoeiing van de knooppunten van de buisverbindingen is het bezwijkmechanisme dat de levensduur van de schuiven bepaalt. Uitgangspunt in de (vermoeiings)berekeningen is dat de kering een levensduur heeft van 200 jaar. Voor de schuiven, als vervangbare onderdelen, geldt deze levensduur ook, maar minder strikt. De minimaal benodigde, rekentechnische levensduur van de lasverbindingen is gesteld op 50 jaar. Omdat alle lasverbindingen van de schuifconstructie repareerbaar zijn wordt geaccepteerd dat binnen de gewenste levensduur van de kering van 200 jaar scheurtjes in de zwaarst belaste lassen ontstaan. Na reparatie van een scheur is de vermoeiingssterkte weer gelijk aan die van een ongescheurde verbinding.

Op basis van ervaringen uit de offshore is, voordat de materiaalproblematiek van de warmgewalste buizen een rol ging spelen, de toelaatbare diepte van scheuren bepaald op de halve plaatdikte van de aansluitende delen in een verbinding. Uit de literatuur en uit proeven blijkt dat bij dikwandige, zware buisverbindingen de periode voor het volledig door de buiswand groeien van een zichtbare scheur anderhalf keer zo groot is als de periode waarin de eerste zichtbare scheuren ontstaan. Tevens is uit laboratoriumonderzoek van buisknooppunten, zoals toegepast in de offshore, gebleken dat de eerste zichtbare scheurtjes ontstaan na circa 25% van het aantal lastwisselingen die een volledig bezwijken van het proefstuk betekenen. Voor de zwaarst belaste knooppunten van de schuiven is er bij de bepaling van de vereiste vermoeiingssterkte van uitgegaan, dat dit moment niet eerder dan na ca. 30 jaar na ingebruikname mag plaatsvinden. Daarnaast is bekend dat scheuren in buisverbindingen altijd van buiten naar binnen groeien. Dit betekent dat na waarneming van het begin van een scheur nog een aantal zware stormen mag optreden voordat de verbinding bezwijkt. Dit betekent ook dat een schuif met scheuren die niet tijdens een inspectie zijn waargenomen nog een aantal zware stormen kan weerstaan. Omdat golven alleen op de schuiven werken tijdens stormsluitingen is er in eerste instantie de eis geformuleerd om na stormsluitingen de lasverbindingen visueel te inspecteren. Na het bekend worden van de materiaalproblemen van de vakwerkliggers is de inspectie-eis aangescherpt tot een verplichte inspectie van de zwaarst belaste verbindingen teneinde scheuren in een vroeg stadium te ontdekken, zie ook hoofdstuk 6.5 "Inspectietechnieken".

De berekening van de vermoeiingsbelasting op een onderdeel van de schuifconstructie is gebaseerd op aantal, grootte en verdeling van de golven die optreden bij een bepaald verval gedurende een stormsluiting. De stormsluitingen omvatten het gehele spectrum van sluiten, een gesloten kering en openen. Rekening houdend met de duur van een stormsluiting en de golfperiode zijn spectra van de golfbelastingen per schuif bepaald. Voor de schuiven in de Roompot gelden hogere belastingen dan voor de schuiven in de Hammen en de Schaar.

De vermoeiingsbelasting is afgeleid voor elke voorkomende combinatie van golf- en vervalbelasting. De golf- en vervalbelasting zijn als karakteristieke waarden (= vermoeiingsbelasting) herleid uit de probabilistisch afgeleide extreme golf- en vervalbelastingen (zie ook hoofdstuk 4.2). Per combinatie van vervalbelasting en golfbelasting is het aantal wisselingen van een golftopbelasting bepaald. Voor de schuif Roompot 16 (R16) zijn de combinaties van golf- en vervalbelastingen uitgezet in tabel 5.5. De golf- en vervalbelastingen zijn omgewerkt naar belastingen per m^1 schuiflengte.

Door per golfbelasting het aantal wisselingen bij de verschillende vervalbelastingen te tellen kan het totaal aantal wisselingen in 200 jaar bepaald worden. Voor een levensduur van 50 jaar mag dit aantal recht evenredig verminderd worden. De getallen in tabel 5.5 geven het aantal golven aan voor combinaties van golf- en vervalbelasting gedurende 200 jaar.

Hoewel de vervalbelasting niet meegenomen wordt in de berekening van de vermoeiingsschade geeft ze wel de ligging van de stilwaterlijn aan de Noordzeezijde aan. Daarmee ligt ook de hoogte waarop de golfbelastingen op de schuif aangrijpen vast en de belastingsverdeling over de regels van de schuif. De vermoeiingsschade van de vervalbelasting is te verwaarlozen omdat het aantal wisselingen door verval gering is. De spanningen die door vervalbelasting optreden zijn in de vermoeiingsberekening niet relevant omdat in deze berekening alleen het spanningsinterval, en

↑ golftopbelastingen kN/m¹ schuif

380									1							
360									1	1						
340							1	1	1	1	1					
320					1	2	2	4	2	3	2					
300				1	2	6	7	11	5	7	3	1	1			
280			1	6	8	20	21	30	13	15	7	2	1			
260		1	4	22	28	60	66	78	29	33	14	3	2	1		
240	1	4	14	79	90	175	197	192	64	68	25	6	4	1		
220	4	12	43	251	271	473	556	448	132	131	45	9	7	2		
200	11	34	118	715	741	1187	1454	989	257	239	74	14	10	3		
180	28	87	291	1806	1824	2726	3463	2039	472	407	114	21	14	4	1	
160	63	195	639	4025	3991	5659	7409	3880	808	647	165	29	19	5	1	
140	123	382	1233	7861	7701	10497	14069	6722	1280	954	221	36	24	6	1	1
120	210	651	2080	13366	12985	17189	23457	10450	1847	1290	273	43	28	6	1	1
100*	309	955	3028	19576	18909	24504	33891	14330	2387	1576	307	46	29	6	1	1
80	384	1186	3740	24269	23351	29803	41625	16947	8698	1701	309	45	28	6	1	1
60	390	1203	3780	24598	23604	29816	41924	16629	2564	1561	267	38	24	5	1	
40	295	912	2859	18638	17857	22410	31645	12348	1865	1109	183	26	16	3	1	
20	111	342	1070	6982	6634	8362	11832	4581	685	403	65	9	6	1		
	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	

→ vervalbelasting kN/m¹ schuif

Tabel 5.5 Combinaties golf- en vervalbelastingen gedurende 200 jaar voor schuif R16

niet het spanningsniveau, van belang is [5.6]. De grootte van de vervalbelasting is na het optreden van de materiaalproblematiek wél relevant geworden omdat voor het grofkorrelige materiaal de toets op bros bezwijken mede bepaald wordt door het aanwezige spanningsniveau.

De type-indeling van de vakwerkliggers is gebaseerd op de extreme golf- en vervalbelasting (zie hoofdstuk 5.1.3). Met de maatgevende vakwerkliggers voor vermoeiing, inclusief bijbehorende vermoeiingsbelasting, staan de maatgevende typen gegeven in tabel 5.3. Voor de meeste typen geldt dat de maatgevende vakwerkligger per schuif in de extreme situatie van de maximale golf- en vervalbelasting ook het zwaarst belast wordt op vermoeiing. Uitzondering zijn de regeltypen B en G waar de invloed van het golfspectrum in de verschillende doorstroomopeningen zodanig is dat de maatgevende belastingen voor statische sterkte en voor vermoeiing niet in dezelfde schuif optreden. In hoofdstuk 5.2.2. wordt de bepaling van de maatgevende vakwerkliggers m.b.t. vermoeiing en de vermoeiingsberekening behandeld.

De opzet van de vermoeiingsberekening is in grote lijnen gelijk aan de berekening van de vakwerkliggers op sterkte onder de extreme golf- en vervalbelastingen (hoofdstuk 5.1.3). Daarin zijn met de gelijkmatig verdeelde belastingen op de vakwerkliggers de nominale spanningswisselingen bepaald in de knooppunten van de rand- en wandstaven. Deze nominale spanningswisseling is samengesteld uit de normaalkracht (N) en het moment (M) volgens:

$\sigma_{nom}=N/A+M/W$

De piekspanningswisseling in de knooppunten, noodzakelijk voor de vermoeiingsberekening, wordt berekend door de spanningswisselingen t.g.v. de normaalkracht en het moment te vermenigvuldigen met de bijbehorende spanningsconcentratiefactoren (SCF_i) volgens:

$\sigma_{piek}=SCF_N \cdot N/A + SCF_M \cdot M/W$

Vanwege de verschillen tussen de golfspectra van de extreme belastingen en de vermoeiingsbelastingen was het noodzakelijk te werken met diverse omrekenfactoren. Extra in de vermoeiingsberekening t.o.v. de sterkteberekening is de toevoeging van de spanningsconcentratiefactoren. Zie voor het onderzoek naar de spanningsconcentratiefactoren en de uitwerking van de berekening navolgende hoofdstukken. De vermoeiingsberekeningen zijn per type vakwerkligger uitgevoerd voor alle buisaansluitingen in de rand- en wandstaven, alsmede voor de aansluiting van de stompen en de krammen in de eindkokers.

5.2.1 Onderzoek spanningsconcentratiefactoren

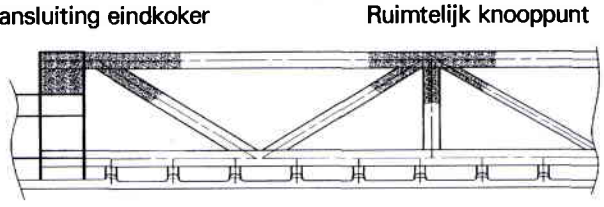
Cruciaal voor de bepaling van de vermoeiingsschade is dat de eenvoudig te bepalen nominale spanningen omgerekend worden naar (piek)spanningen ter plaatse van de lassen. Een spanningsconcentratiefactor (SCF) brengt de spanningsverhogende invloed van de geometrie van de aansluiting en de las in rekening. De invloed van de SCF op de levensduur van een verbinding is aanzienlijk. Verdubbeling van de SCF kan de levensduur met een fac

tor tien verkorten [5.7]. Vanwege deze grote invloed van de SCF op de levensduur is een nauwkeurige bepaling ervan wenselijk. Voor de berekening op statische sterkte onder de extreme belasting is de invloed van de SCF niet van belang omdat door lokaal vloeien piekspanningen vereffend worden zonder dat de bezwijksterkte van de verbinding als geheel daardoor beïnvloed wordt.

Voor de knooppunten in de vakwerkliggers die in één vlak belast worden is, indien mogelijk, gebruik gemaakt van de formules van Wordsworth (Lloyds Register of Shipping, [5.8]). Omdat een deel van de buisverbindingen buiten het geldigheidsgebied van deze formules viel was het noodzakelijk de geldigheid voor een ruimer gebied aan te tonen. Een ander aspect is dat ten tijde van de ontwerpfase van de Oosterscheldekering (internationaal) onderzoek aan buisverbindingen voornamelijk uitgevoerd was voor buisverbindingen in één vlak belast. Omdat in de stormvloedkering veel knopen voorkomen waarin staven uit meerdere vlakken aansluiten was ook hier de noodzaak van aanvullend onderzoek aanwezig. Het onderzoek naar de buisverbindingen is vervolgens langs twee wegen uitgevoerd:

- Experimenteel onderzoek met Acrylaatmodellen
- Eindige-elementenberekeningen met het rekenpakket DIANA

Het experimenteel onderzoek met Acrylaatmodellen is uitgevoerd om de geldigheid van de formules van Wordsworth te verifiëren, om het geldigheidsgebied van Wordsworth te vergroten zodanig dat alle buisverbindingen in de vakwerkliggers daarbinnen zouden vallen en om de invloed van aansluitingen in verschillende vlakken te bepalen. Daarom is er bij TNO-IBBC voor twee knooppunten modelonderzoek uitgevoerd. Het betreft de aansluiting van een randligger aan de eindkoker en een knooppunt met aansluitende diagonaalstaven in het horizontale én het verticale vlak. Beide knopen zijn onderdeel van de randligger aan de Noordzeezijde (figuur 5.8). Voor de geometrie is uitgegaan van de profilering als toegepast in vakwerkligger type H.



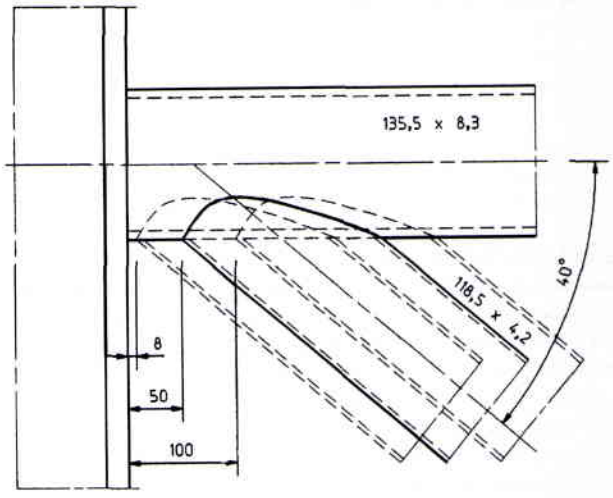
Figuur 5.8 Omvang Acrylaatmodellen knooppunten

Het eerste onderzoek is uitgevoerd door het knooppunt van de aansluiting van de randligger aan de eindkoker volledig (diameter en wanddikte) op schaal 1:6 van Acrylaat na te maken [5.10]. De schaalverhouding voor een correcte weergave van de buigspanningen bedraagt 1:36. Voor een correcte weergave van normaalspanningen zou een schaalfactor 1:6 moeten gelden. Omdat buigspanningen in de aansluitingen van de knooppunten de piekspanningen domineren is de schaalfactor voor buigende momenten aangehouden. Rekening houdend met de verhouding van de elasticiteitsmoduli van Acrylaat en staal (3250 N/mm^2 vs $2{,}1 \times 10^5$ N/mm^2) resulteert dit in een schaalfactor voor de belastingen van $4{,}2 \times 10^{-4}$ (= 1/36 x 3250 / ($2{,}1 \times 10^5$)).

De belastingen op de modellen bestaan uit (teruggeschaalde) krachten zoals berekend in een 3D-computermodel van de schuif. Om inwendige spanningen door de bewerking van het Acrylaat te minimaliseren zijn voor het samenlijmen de kunststof buizen spanningsvrij gegloeid. Vervolgens is op de modellen scheurlak aangebracht ter bepaling van de trek- en drukzones. Omdat met scheurlak alleen rek (trek) en geen stuik (druk) gemeten kan worden, zijn voor de bepaling van de drukzones de belastingen omgedraaid. De rekstrookjes zijn geplaatst in de trek- en drukzones waar de grootste rekken optreden.

Door in de Acrylaatmodellen de rekstrookjes parallel aan elkaar voor de gelijmde 'lasteen' te leggen kan de rek in de lasteen uit het verloop van de rekken geëxtrapoleerd worden. De rek wordt uitgedrukt als veelvoud van de nominale rek, zijnde de rek in het buismateriaal zonder de verstorende invloed van de verbinding. Uit de geëxtrapoleerde rekken zijn rekconcentratiefactoren (strain concentration factor=SNCF) afgeleid die zijn omgerekend tot spanningsconcentratiefactoren (SCF). Doordat een SCF niet afhankelijk is van de grootte van een knooppunt, maar alleen van de geometrie (diameter en wanddikte), is een SCF ook in knooppunten met afwijkende afmetingen te gebruiken. Het blijkt dat met enige aanpassingen bekende formules uit de literatuur ook voor de knooppunten van de stormvloedkering zijn te gebruiken [5.10].

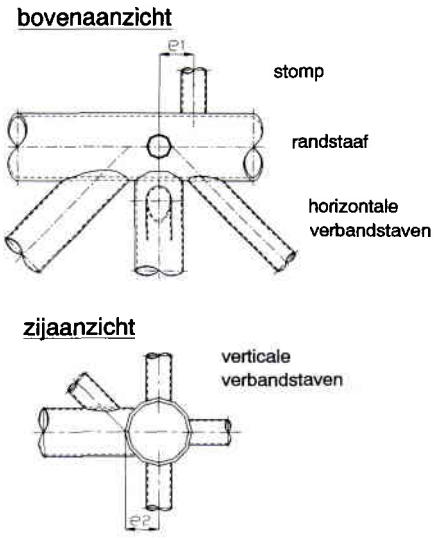
De eindkokeraansluiting van een randstaaf, inclusief diagonaalstaaf, is in drie varianten onderzocht in een Acrylaatmodel (figuur 5.9). Het bereik tussen de twee extreme posities (8 mm spleet en 100 mm spleet) komt overeen met de uiterste grenzen van de bouwtolerantie in de overgang van vakwerkligger naar eindkoker. De bouwtolerantie bedraagt vanuit de theoretische middenpositie 275 mm naar weerszijden, wat door de schaal (1:6) overeen komt met het modelbereik van 92 mm (2 x 275 / 6).



Figuur 5.9 Acrylaatmodel aansluiting vakwerk bij eindkoker

De grootste rekken treden op ter plaatse van de aansluiting van de randstaaf op de kram van de eindkoker bij het model met de tussenafstand van 100 mm. Dit vanwege de grote excentriciteit van de aansluitende diagonaalstaaf ten opzichte van de kram.

Het tweede onderzoek betreft een knooppunt in de randstaaf aan de Noordzeezijde waarbij de invloed van staven in verschillende aansluitvlakken is bekeken (figuur 5.10). Het model is eerst alleen met diagonaalstaven in het horizontale vlak van de vakwerkligger beproefd. Daarna is een excentrisch geplaatste stomp toegevoegd, die na meting van de rekken weer verwijderd is (want aan de randstaaf aan de Noordzeezijde bevinden zich in de kering geen stompen). Als laatste is het Acrylaatmodel volledig gemaakt door de verbandstaven die in het verticale vlak aansluiten toe te voegen.

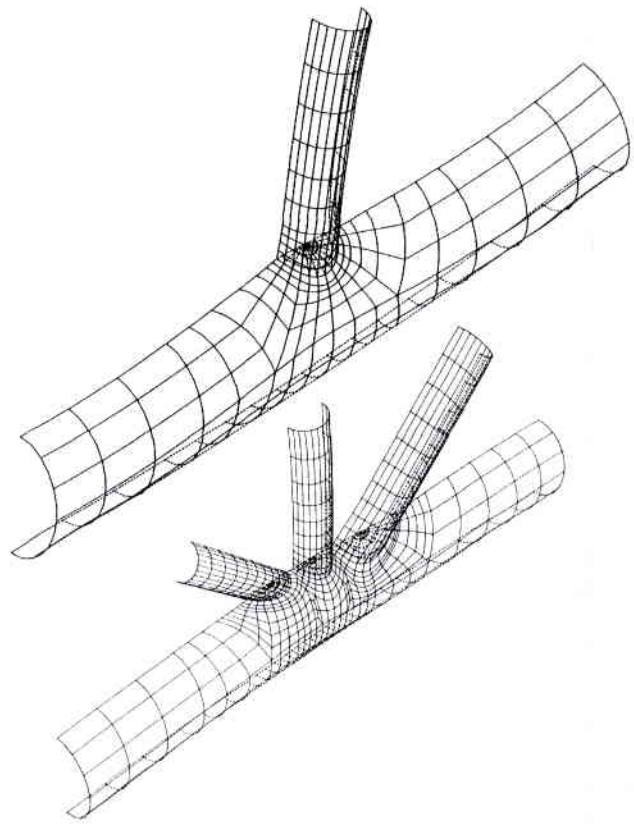


Figuur 5.10 Acrylaatmodel ruimtelijk knooppunt

De invloed van de verschillende staven is onderzocht voor afzonderlijk optredende normaalkrachten en momenten, en voor gecombineerde krachten zoals die berekend zijn met de 3D-modellen van de schuiven. De verstorende invloed van de stomp op de spanningen uit andere staven in het knooppunt blijkt zeer beperkt te zijn. De SNCF in de aansluiting van de wandstaaf op de randstaaf wordt in de ongunstigste locatie 1,1x groter bij aanwezigheid van een stomp, t.o.v. de situatie dat de stomp afwezig is. Ook de verstorende invloed van de verticale verbandstaven op de SNCF van de verbinding in het horizontale vlak blijkt gering te zijn. Hierdoor was het mogelijk het geldigheidsgebied van de formules van Wordsworth ook toe te passen voor ruimtelijke knooppunten en van toepassing te verklaren voor alle K- en KT-knooppunten in de vakwerkliggers.

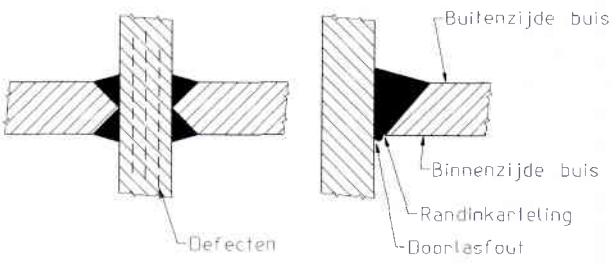
Na de onderzoeken aan de Acrylaatmodellen zijn door TNO-IBBC berekeningen van twee knooppunten uitgevoerd met het eindige-elementenpakket DIANA. Berekend zijn de spanningsconcentratiefactoren van een T-verbinding en een KT-verbinding in het horizontale vlak van de vakwerkligger. Als geometrie is gekozen voor de profilering van vakwerkligger type B. De modellen zijn vanwege softwarematige beperkingen in lengterichting gehalveerd. Omwille van de noodzakelijke symmetrie in de randvoorwaarden konden alleen staven en belastingen in het symmetrievlak aanwezig zijn (figuur 5.11).

De berekeningen betreffen spanningsberekeningen in een T-verbinding en een KT-verbinding. Als eerste is de T-verbinding berekend [5.11]. Van deze verbinding zijn de SCF bepaald in het zadelpunt en het kroonpunt (zie figuur 6.11) voor vier basisbelastinggevallen (trek randstaaf, buiging randstaaf, trek verticaal, buiging verticaal). De SCF geven de verhouding weer van de spanning in de lasteen t.o.v. de nominale spanning in het element dat door een kracht belast wordt. Omdat de berekende SCF goed overeenkwamen met aan de literatuur ontleende waarden van Wordsworth is vervolgens een KT-verbinding gemodelleerd. Berekend zijn de SCF voor acht basisbelastinggevallen en een voor een belastinggeval overeenkomend met een belastingsituatie van het betreffende knooppunt zoals berekend in een volledig schuifmodel [5.12]. De berekening van de SCF in de buisaansluitingen middels de eindige-elementenberekeningen is gereedgekomen nadat de toetsing van de vakwerkligger op sterkte en vermoeiing al afgerond was. De overeenstemming van de KT-verbinding met de resultaten van de Acrylaatmodellen was minder groot, mede omdat de geometrieën van de onderzochte knooppunten niet in alle verhoudingen overeenkomen. De eindige-elementen modellen gaven in het algemeen lagere waarden voor de SCF dan de Acrylaatmodellen [5.13].



Figuur 5.11 Eindige-elementenmodel knooppuntberekening

Naast de modelmatige en berekeningstechnische benadering van de SCF in de knooppunten is er ook onderzoek verricht naar de invloed van lassen en materiaaldefecten op de (vermoeiings)sterkte van verbindingen. Door het metaalinstituut van TNO is bij aanvang van de fabricage een tweeledig onderzoek uitgevoerd naar de invloed van kleine defecten in een doorgaande plaat en de invloed van doorlassing van eenzijdig gelegde lassen [5.14]. Zowel de materiaaleigen defecten (dubbelingen) in de doorgaande plaat als de randinkartelingen en/of (doorlas)fouten van een las kunnen als een beginscheur gekarakteriseerd worden (figuur 5.12). Lasdetails zoals weergegeven in figuur 5.12 komen voor als aansluiting van de randliggers aan de eindkokers, t.p.v. de krammen en in de knopen van de vakwerkliggers.



Figuur 5.12 Scheurinitiatie vanuit de las

Het onderzoek naar de materiaaleigen defecten kwam voort uit de constatering tijdens de fabricage, dat in een aantal platen van Z-kwaliteit kleine defecten voorkwamen. De grootte van de defecten voldeed aan de strenge bestelspecificaties, maar het aantal defecten per oppervlakte-eenheid was groot. Het onderzoek naar de randinkartelingen en doorlasfouten had als achtergrond inzicht te verkrijgen in de ernst van scheurvormige indicaties in de grondlaag van de las. De grondlaag van deze las is bij kokervormige elementen niet goed inspecteerbaar, waardoor mogelijk na lasonderzoek bij kleine scheurvormige indicaties ten onrechte besloten zou worden tot reparatie.

In de beide onderzoeken is bekeken in hoeverre defecten, of vanuit defecten groeiende vermoeiingsscheuren, aanleiding kunnen zijn tot brosse breuk. De berekeningen zijn gemaakt aan de hand van de breukmechanische methode zoals gegeven in de PD 6493 [doc.5.15]. Berekend zijn de afmetingen van aanvangsscheuren, bij spanningen gebaseerd op een randstaaf-eindkokeraansluiting, waarbij brosse breuk optreedt. Van een proefstuk van een gelaste verbinding zijn een aantal CTOD-waarden bepaald om de berekeningen uit te kunnen voeren.

Uit deze berekeningen blijkt dat door de ductiliteit (taaiheid) van het materiaal de kritische scheurgrootte, waarbij instabiel doorscheuren van een las optreedt, en de verbinding dus bros breekt, ongeveer een halve buiswanddikte bedraagt. Meer in detail kon er geen verband gelegd worden tussen de afmetingen van begindefecten en de sterkte van de onderzochte lasverbinding bij brosse breuk. De conclusie van het onderzoek luidde dat er geen rekening hoefde te worden gehouden met de kans op brosse breuk ten gevolge van defecten en/of vermoeiing [5.16].

Belangrijker echter dan de resultaten van deze onderzoeken is de breukmechanische aanpak van de vermoeiingsproblematiek. Door de opgedane ervaring en kennis van de breukmechanica konden de materiaalproblemen van de warmgewalste buizen (zie hoofdstuk 6) snel en adequaat opgelost worden.

5.2.2 Vermoeiingsberekening

De basis voor de vermoeiingsberekening is de bepaling van de schade in de gelaste verbindingen middels de sommatieregel van Miner. De schade aan een verbinding bestaat uit de sommatie van het quotiënt van de optredende spanningswisselingen (n_i) en het aantal spanningswisselingen tot breuk (N_i) per spanningsinterval i;
Schade=$\Sigma\ n_i/N_i$.
De optredende spanningswisselingen ni zijn bepaald voor een periode van 200 jaar. De levensduur van een verbinding in jaren kan berekend worden door 200 jaar te delen door de schade.

Voor de berekening van alle verbindingen is dezelfde methodiek gebruikt. Dit is aanvaardbaar aangezien de hoofdonderdelen van de schuiven een gelijksoortige opbouw en detaillering hebben. Als voorbeeld wordt de vermoeiingsberekening beschreven zoals deze voor de vakwerkliggers uitgevoerd is. De krammen, stompen en eindkokers zijn op vergelijkbare wijze getoetst op vermoeiing. De beschrijving van de toetsing op vermoeiing van de knopen van de vakwerkliggers heeft als voordeel dat de verschillen met de toetsing van brosse breuk, noodzakelijk geworden na de ontdekking van de materiaalproblematiek, duidelijk zichtbaar worden.

Voor de uitwerking van de vermoeiingsberekeningen gelden twee belangrijke uitgangspunten:
1. Alle optredende spanningsintervallen zijn werkzaam op dezelfde tak van de toegepaste vermoeiingscurve.
2. De golftopbelastingen vormen de basis van de berekeningen van de vakwerkligger.

Ad 1.
Doordat alle spanningsintervallen op dezelfde tak van de vermoeiingscurve werkzaam zijn, is het relatief eenvoudig om spanningsintervallen om te rekenen in referentie-intervallen, equivalente intervallen of maximale intervallen. Van het omrekenen van spanningsintervallen is in diverse berekeningsstappen gebruik gemaakt.

Ad 2.
De spanningen in de knooppunten van de vakwerkliggers zijn berekend voor de eenmalig optredende, extreme golftopbelasting. Deze berekening bevat de nominale spanningen door momenten en normaalkrachten, alsmede de piekspanningen die ontstaan na vermenigvuldiging met spanningsconcentratiefactoren. Alle andere spanningen (extreem of karakteristiek) en spanningsintervallen zijn middels factoren herleid uit de berekening van de maximale golftopbelasting.

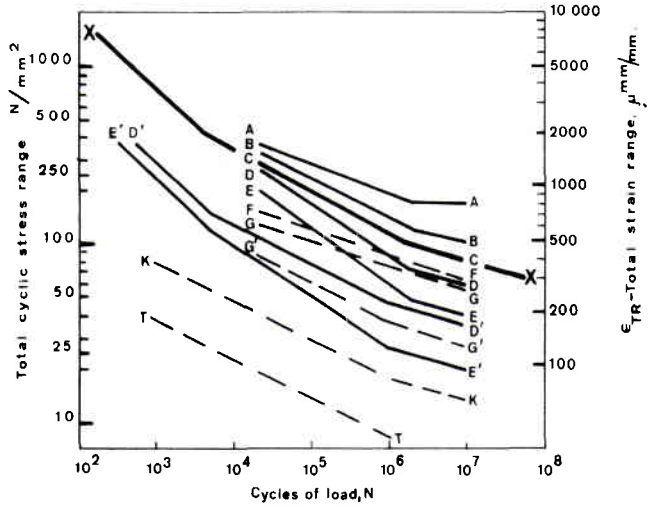
De opzet en de uitwerking van de vermoeiingsberekening is onder te verdelen in een aantal stappen:
Stap 1. Bepaling maatgevende vakwerkliggers voor vermoeiing
Stap 2. Berekening maatgevende liggers op de eenmalige optredende, extreme golftopbelasting
Stap 3. Bepaling eenmalig optredende spanningsinterval
Stap 4. Bepaling equivalent spanningsinterval en bijbehorend aantal wisselingen
Stap 5. Toetsing details op vermoeiing, bepaling levensduur

Stap 1. Bepaling maatgevende vakwerkliggers
Omdat de spectra van de extreme belasting en de karakteristieke belasting per schuifhoogte en per sluitgat verschillen, en omdat de verschillende typen vakwerkliggers over alle schuiven in de kering verspreid zijn, is het noodzakelijk vast te stellen in welke schuiven zich de voor vermoeiing maatgevende vakwerkliggers zich bevinden. Dit om te voorkomen dat alle schuiven berekend moeten worden.

Van alle schuiven ligt het belastingspectrum, bestaande uit de combinaties van golf- en vervalbelasting, vast (zie als voorbeeld tabel 5.5). Omdat voor de vermoeiingsberekening alleen het aantal wisselingen door de golven van belang is, zijn in de tweede kolom van tabel 5.6 de gesommeerde aantallen per golfbelasting (B_i) opgenomen. De verschillen in aantal per golfbelasting, die optreden tussen de waarden in tabel 5.5 (horizontaal gesommeerd) en tabel 5.6, ontstaan doordat het aantal golven statistisch afgeleid is uit de verdelingsfuncties, terwijl ze in de tabellen als gehele getallen staan weergegeven.

Vervolgens is het aantal optredende golven per golfbelasting (B_i) omgerekend naar het aantal optredende golven van een gekozen referentie belasting van 100 kN/m (belasting per m^1 schuiflengte). De omrekening is gebaseerd op het gegeven dat het product van het aantal golven (n_i) en de grootte van de golfbelasting evenredig is met de vermoeiingsschade die ze in de lassen veroorzaakt. De invloed van de grootte van de golfbelasting wordt hierbij bepaald door de factor "m", de helling van de vermoeiingscurve. De vermoeiingsschade door de optredende golven per golfbelasting wordt gelijk gesteld aan de schade door de referentie belasting. Uit deze gelijkstelling kan het gecorrigeerde aantal golven van de referentie belasting bepaald worden:
$n_{gecorrigeerd} = n_i \times (B_i / B_{100})^m$

Voor de schuiven is als vermoeiingscurve de X-X lijn gekozen zoals aangegeven door de "American Welding Society" (figuur 5.13). Deze curve is geldig voor knooppunten in vakwerkconstructies vergelijkbaar met de Oosterscheldekering.



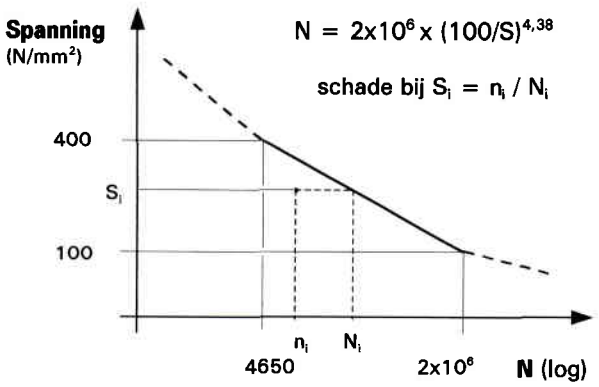
Figuur 5.13 Vermoeiingscurves AWS

Doordat de maximale spanningsintervallen in de knooppunten van de stormvloedkering in de Oosterschelde onder de 440 N/mm² liggen (behoudens enkele uitzonderingen), voldoet voor de berekening de tak van $5x10^4$ tot $2x10^6$ wisselingen (figuur 5.14). In de omzetting van de golfbelastingen naar de referentie belasting is voorbij gegaan aan de knik die er in de toegepaste vermoeiingscurve aanwezig is (de factor "m" is constant gehouden voor elke golfbelasting). Het verwaarlozen van de invloed van een flauwer lopende tak in het gebied met lage spanningsintervallen is een veilige benadering. Bij de toegepaste vermoeiingscurve geldt voor de factor m=4,38. De vergelijking van de gebruikte tak van de X-X lijn is te schrijven als:

$N = 2x10^6 \times (100/S)^{4,38}$

N = aantal wisselingen tot breuk van spanningsinterval S

S = spanningsinterval dat n-maal voorkomt



Figuur 5.14 S-N curve voor de schuiven

In de derde kolom van tabel 5.6 is het totale aantal gecorrigeerde golven weergegeven geldend voor schuif Roompot 16. Per golfbelasting is het aantal golven omgezet naar een gecorrigeerd aantal golven behorend bij de referentie belasting van 100 kN/m. De bijdrage aan de vermoeiingsschade van elke golfbelasting wordt direct zichtbaar in het gecorrigeerde aantal golven van de referentie belasting, terwijl uit de sommatie het totale aantal golven van de referentie belasting bekend is. Duidelijk is dat de grootste bijdrage aan de vermoeiingsschade voor de schuif R16 geleverd wordt door de golfbelastingen in het gebied van 100 kN/m tot 200 kN/m.

Golfbelasting in kN/m (B_i)	Aantal golven per 200 jaar (n_i)	Gecorrigeerd aantal golven per 200 jaar ($n_{gecorrigeerd}$)
20	41132	36
40	110165	1991
60	146403	15627
80	146093	54975
100 *	**119856**	**119856**
120	83877	186405
140	51113	223138
160	27534	215732
180	13296	174508
200	5846	121723
220	2383	75325
240	919	42525
260	343	22536
280	126	11453
300	46	5657
320	16	2610
340	6	1277
360	2	547
380	1	347
sommatie	749157	1276259

100*= referentie belasting

$n_{som} = \Sigma\, n_i$ $\qquad n_{gecorrigeerd} = n_i \times (B_i / B_{100})^{4,38}$

Tabel 5.6 Aantal gecorrigeerde golfbelastingen R16

Op overeenkomstige wijze als hiervoor beschreven zijn de golfspectra van de andere schuiven omgewerkt tot een gecorrigeerd aantal golven behorend bij een referentiebelasting van 100 kN/m. Van alle schuiven is zo de zwaarte van het aanwezige vermoeiingsspectrum uit te drukken in één getal. De referentiebelasting is echter werkzaam op de gehele schuif en moet nog toegedeeld worden aan de vakwerkliggers.

Bij de toedeling van de referentiebelasting van 100 kN/m op de schuif naar de vakwerkliggers is gebruik gemaakt van de afleiding die reeds toegepast was bij de bepaling van de belasting op de vakwerkliggers in geval van de extreme golf- en vervalbelasting (zie 5.1.3). Deze toedeling gaat voorbij aan de invloed van de stijfheidverschillen tussen vakwerkliggers. Na toedeling is de vermoeiingsbelasting van alle vakwerkliggers uit te drukken in het product van het gecorrigeerde aantal golven en het deel van de referentiebelasting dat op desbetreffende vakwerkligger werkzaam is. De

schuiven met de maatgevende vakwerkliggers m.b.t. vermoeiing zijn in de vijfde kolom van tabel 5.3 gegeven. Opgemerkt wordt dat de getalwaarde van de vermoeiingsbelasting die in de vierde kolom van tabel 5.3 gegeven staat geen relatie heeft met de referentiebelasting van 100 kN/m, zie voor de betekenis van de getalwaarde stap 4.

Stap 2. Berekening maatgevende liggers op extreme golftopbelasting
De tweede stap van de vermoeiingsberekening omvat de berekening van de schuiven met de maatgevende vakwerkliggers m.b.t. vermoeiing en de omzetting van golfbelastingen in piekspanningen.

De schuiven zijn berekend in 3D-modellen met als belasting de eenmalig optredende, extreme golftopbelasting. Door de berekening met 3D-modellen is de invloed van de stijfheidverschillen tussen vakwerkliggers in een schuif op de toedeling van de totale belasting over de vakwerkliggers meegenomen. Voor schuif Roompot 16 bedraagt deze golftopbelasting 380 kN/m (belasting op volledige schuif), de verschillen in de verdeling van deze belasting over de vakwerkliggers vergeleken met de toedeling van de referentiebelasting uit stap 1 waren klein en hebben niet geleid tot de selectie van andere maatgevende vakwerkliggers.

Uit de berekening van de schuif volgen krachten en momenten in de staven. De nominale spanningen ter plaatse van de knooppunten zijn samengesteld uit de spanningen door de normaalkracht en het moment. De piekspanningen in de knooppunten, noodzakelijk voor de vermoeiingsberekening, zijn berekend door de nominale spanningen te vermenigvuldigen met de afzonderlijke spanningsconcentratiefactoren (SCF) van de normaalkracht en het moment.

Omdat de relatie tussen spanning en belasting lineair is zijn er in de vermoeiingsberekening verder geen berekeningen meer met computermodellen uitgevoerd. Door de vakwerkliggers één keer te berekenen en de (piek)spanningen in de knooppunten vast te stellen, is de koppeling gelegd tussen belasting en spanning.

Stap 3. Bepaling eenmalig optredende spanningsinterval
Derde stap in de berekening van de vermoeiing is de bepaling van de grootte van het eenmalig optredende, maximale spanningsinterval. De in het spectrum gegeven golfbelastingen zijn extreme golftopwaarden (herhalingsinterval 4000 jaar), de maximale spanningswisseling voor de vermoeiingsberekening bestaat uit het interval van de karakteristieke golftop- en golfdalwaarden (herhalingsinterval 200 jaar).

De omzetting van extreme belastingen naar karakteristieke belastingen (= vermoeiing) heeft plaatsgevonden met een reductiefactor van 0,83 voor alle schuiven. Deze factor is een gemiddelde waarde, geldig voor alle schuiven (zie ook hoofdstuk 2.2). Omdat golftopbelastingen ($B_{golftop}$) niet dezelfde resultante hebben als golfdalbelastingen ($B_{golfdal}$) bestaat het belastinginterval niet uit twee maal de golftopwaarde. Voor de omzetting van een golftopbelasting tot een top-dal interval geldt een vermenigvuldigingsfactor van (1+ $B_{golfdal}$ / $B_{golftop}$). Per schuif varieert deze factor van 2,15 tot 2,25. Aan het feit dat de ligging van de resultante van een golftop niet gelijk is aan de ligging van de resultante van een golfdal is in de berekeningen voorbij gegaan. De afwijking in de krachtsverdeling over de vakwerkliggers door een golftopbelasting of door een golfdalbelasting is gering.

Het eenmalige, maximale spanningsinterval uit het extreme spectrum is met de twee voornoemde factoren (0,83 en 2,15 à 2,25) te berekenen uit de piekspanningen die in stap 2 bepaald zijn.

Stap 4. Bepaling equivalent spanningsinterval en bijbehorend aantal wisselingen
Uit het spectrum van de golftopbelastingen kan op eenvoudige wijze een equivalente golfbelasting (B_{eq}) bepaald worden die eenzelfde schade geeft als het gesommeerde spectrum. Uitgangspunt in de bepaling van deze equivalente golfbelasting is het aantal optredende golven (n_{som}) gedurende 200 jaar (zie tweede kolom tabel 5.6). De equivalente golfbelasting is een fictieve golfbelasting die n_{som} keer voorkomt. In formulevorm:
$B_{eq}^m = (\Sigma\, n_i \times B_i^m) / n_{som}$
Hierin is "m" weer de helling van de vermoeiingscurve.

Het in stap 3 berekende maximale spanningsinterval kan omgerekend worden tot een spanningsinterval horend bij de equivalente golftopbelasting door te vermenigvuldigen met de reductiefactor B_{eq} / $B_{golftop}$. Het is dit gereduceerde equivalente spanningsinterval dat n_{som} keer voorkomt en waarmee de vermoeiingsschade berekend is. De equivalente golfbelasting is voor de maatgevende vakwerkliggers per type in de vierde kolom van tabel 5.3 gegeven.

Stap 5. Toetsing details op vermoeiing, bepaling levensduur
De laatste stap in de berekening is de toetsing aan de gekozen vermoeiingscurve. Omdat het aantal optredende golven gedurende 200 jaar bekend is (n_{som}), is de toetsing uitgevoerd als de bepaling van de levensduur bij het berekende equivalente spanningsinterval. De levensduur is te bepalen door 200 jaar te delen door de schade (n_{som} / N).

In de vakwerkliggers zijn een groot aantal gelijkvormige lasdetails aanwezig die ook nog eens onderworpen worden aan dezelfde golfspectra, maar dan met lagere spanningsintervallen dan de maatgevende lasdetails. Omdat de berekeningswijze voor deze details hetzelfde is als voor de maatgevende details, is deze laatste stap van de berekening vereenvoudigd. Na bepaling van het maximale spanningsinterval van een detail in een vakwerkligger zijn met spanningsintervallen van 50 N/mm^2 de levensduren berekend. Per schuif staat het aantal optredende golven n_{som} vast en kan dus de levensduur van de lagere spanningsintervallen eenvoudig berekend worden. De levensduren per schuif per spanningsinterval zijn weergegeven in tabelvorm (tabel 5.7). Per detail in de vakwerkliggers is de toets vereenvoudigd tot een vaststelling van de hoogte van het maximale spanningsinterval en het aflezen van de levensduur uit de tabel. Opgemerkt wordt nog dat de waarden in de tabel levensduren zijn, die zijn gebaseerd op gemiddeld één stormvloedsluiting per jaar.

Spannings-	**Schuif met maatgevend liggertype**					
interval Δσ	R2	R16	R26	R28	R29	H15
[N/mm²]	G	D, H	C, E	B	F	A
300	798	798	904	898	854	778
350	379	379	429	428	408	375
400	204	204	233	229	219	207
450	121	121	137	136	130	122
500	76	76	86	85	82	77
550	50	50	56	56	53	51
600	34	34	38	38	36	35

Tabel 5.7 Overzicht levensduur in jaren per spanningsinterval

In de oorspronkelijke vermoeiingsberekeningen, voorafgaand aan de materiaalproblematiek, was de minimale berekende levensduur in een lasdetail van de knooppunten 76 jaar. In slechts enkele lasdetails van knopen in de schuiven van de Roompot treden spanningsintervallen op in het gebied van 450 tot 500 N/mm^2. In het merendeel van de knopen liggen de maximale spanningsintervallen tussen de 300 en 400 N/mm^2. Voor deze details geldt dat de minimale levensduur al meer is dan 200 jaar. Binnen de gestelde minimale levensduur van 50 jaar van de verbindingen is de grootste schade die voor de maatgevende lasdetails kan ontstaan 0,66. Omdat een vermoeiingsscheur bij 'goed' materiaal tot een halve plaatdikte (schade 0,50) mag groeien voordat bezwijken onder de extreme golf- en vervalbelasting optreedt, was de voorspelling dat mogelijk 35 à 40 jaar na oplevering van de kering aan de zwaarst belaste verbindingen de eerste reparaties verricht zouden moeten worden.

De schadebepaling door vermoeiing is naar aanleiding van de materiaalproblematiek van de warmgewalste buizen in de schuiven enigszins gewijzigd. Aan de vermoeiingsberekening is de controle op het bezwijkmechanisme van brosse breuk toegevoegd. De toevoeging van dit bezwijkmechanisme, dat ingeleid kan worden door vermoeiingscheurtjes, kan al optreden bij kleine scheurtjes. Bezwijken op brosse breuk kan dus eerder optreden dan bij het bezwijkmechanisme vermoeiing. Een consequentie hiervan is de noodzaak van een goede voorspelling van de vermoeiingsschade. Daartoe is een bepaling van de golfbelastingen uitgevoerd in het kader van de "Conditiebewaking" van de kering. De Conditiebewaking behelst een monitoring van de belastingen en de responsie van de constructie (zie ook Boek 1, Deelnota 5, Hoofdstuk 5"Conditiebewaking gemaakt werk"). Uit de resultaten van de monitoring in de eerste jaren blijkt dat de optredende golfbelastingen lager uitvallen dan vooraf berekend. De ontwerpbelastingen (jaarlijks één stormvloedsluiting met een probabilistisch bepaald aantal golven) geven een te ongunstig beeld van de werkelijkheid. De schade door vermoeiing mag hierdoor verondersteld worden lager te zijn dan berekend, de levensduur van de verbindingen zal groter zijn dan 76 jaar.

Het extra bezwijkmechanisme van brosse breuk is de reden geweest de vermoeiingsproblematiek van de verbindingen in de schuiven opnieuw te onderzoeken. In plaats van een schadebepaling met de schaderegel van Miner, die vooral geschikt is om een levensduur vast te stellen na een groot aantal wisselingen, is voor brosse breuk het begintraject van scheurgroei bepalend. Het begin van scheurgroei is bepaald met behulp van een breukmechanische benadering, zie hiervoor het volgende hoofdstuk.

6. Materiaalproblematiek warmgewalste buizen

Tijdens het samenbouwen van de schuiven, een tijdstip waarop het merendeel van de berekeningen was afgerond, bleek een deel van de warmgewalste buizen een grofkorrelige materiaalstructuur te hebben. Dit grofkorrelige materiaal liet een duidelijke afname van de mechanische eigenschappen zien ten opzichte van het uitgangsmateriaal. Kenmerkend voor het grofkorrelige materiaal is een bros breukgedrag, dit in tegenstelling tot het uitgangsmateriaal. De afname van de mechanische eigenschappen was dermate ernstig dat onmiddellijk reparaties, aanpassingen, inventarisaties en onderzoeken zijn opgestart. Nadat de omvang van het probleem en de oplossingsrichting in kaart gebracht waren, zijn de fabricagewerkzaamheden volgens de planning afgerond.

Voor het ontwerpwerk evenwel leidde de aanwezigheid van 'slecht' materiaal in de vakwerkliggers ertoe dat het bezwijkmechanisme "brosse breuk" toegevoegd moest worden in de berekeningen. Dit extra belastinggeval noodzaakte de ontwerpers tot een herziening van een deel van de berekeningen waardoor het ontwerpproces in feite tot na de oplevering van de kering door zou lopen. Het is om deze reden dat de materiaalproblematiek van de warmgewalste buizen ook opgenomen is in de ontwerpnota.

6.1 Grofkorrelig materiaal buizen

Bij het samenbouwen van de schuiven bleek een aantal lassen niet ultrasoon te testen doordat het materiaal teveel demping vertoonde. Door de hoge demping waren kleine, niet-acceptabele fouten in een las niet meer waar te nemen en kon niet beoordeeld worden of de lassen voldeden [6.1]. In een nader onderzoek zijn de treksterkte, kerfslagwaarde en materiaalstructuur bepaald van het materiaal met de hoge ultrasone demping. Geconstateerd is een grofkorrelige materiaalstructuur met een treksterkte en een kerfslagwaarde lager dan die van het uitgangsmateriaal (tabel 6.1). De CTOD-waarde (zie hoofdstuk 6.2) van het desbetreffende materiaal is laag. De vakwerkliggers zijn samengesteld uit warmgewalste buizen (2500 ton) en koudgewalste buizen (5800 ton). In totaal is bij 15% van het buismateriaal een afwijkende materiaalstructuur geconstateerd [6.2]. De afwijkende materiaalstructuur is alleen waargenomen bij een deel van de warmgewalste buizen. De afwijkende materiaalstructuur van de warmgewalste buizen kon aanwezig zijn over de volledige lengte van een buis, maar kon ook voorkomen over een beperkte lengte en via een mengstructuur overgaan in fijnkorrelig materiaal.

De gewijzigde materiaalstructuur is ontstaan tijdens het proces van warmwalsen. Door kristalgroei is een grofkorrelig materiaal ontstaan met een verlaagde vloeigrens en een brosse structuur (lagere kerfslagwaarde dan uitgangsmateriaal, lage CTOD-waarde). Voor op vermoeiing belaste constructies beperkt een bros materiaal de levensduur sterk. Onder invloed van wisselende belasting kunnen vanuit initiële defecten kleine vermoeiingsscheuren ontstaan die, bij relatief hoge spanningsniveaus, tot brosse breuk kunnen leiden. Berekening ten behoeve van brosse breuk door defecten in het materiaal toonden aan dat met de materiaalparameters van het grofkorrelige materiaal de kritische scheurdiepte veel minder werd dan de eerder berekende halve plaatdikte [6.3]. Met betrekking tot de statische sterkte was er, afgezien van de lagere vloeigrens waaraan getoetst is, geen wijziging van de berekeningswijze nodig.

De berekeningen van de schuiven waren gemaakt voor statische sterkte en vermoeiing, beide gebaseerd op de gespecificeerde vloeigrens en een taai scheurgedrag. Brosse breuk van een grofkorrelig materiaal was buiten beschouwing gelaten. Dit omdat er van uitgegaan mocht worden dat materialen die voldoen aan de specificaties van rekgrens en kerfslagwaarde uit de normbladen ongevoelig zijn voor brosse breuk. Deze redenering geldt inderdaad voor het plaatmateriaal en eveneens voor de koudgewalste buizen én een deel van de warmgewalste buizen. Keuring van het moedermateriaal op CTOD-waarden is niet uitgevoerd omdat plaatmateriaal, dat volgens de normen is geproduceerd, en voldoet aan de eisen van vloeigrens en kerfslagwaarde geacht wordt ook te voldoen aan de CTOD-waarden. Bij de beproevingen van het warmgewalste materiaal werd deze veronderstelling bevestigd door het feit dat fijnkorrelig materiaal met een vloeigrens boven de 340 N/mm^2 ook altijd een CTOD-waarde groter dan 0,3 mm heeft.

	Ontwerp-uitgangspunt	gemeten waarden grofkorrelig materiaal	gemeten waarden fijnkorrelig materiaal
vloeigrens	≥ 340 N/mm^2	≥ 280 N/mm^2	≥ 380 N/mm^2
rek bij breuk	≥ 22 %	≥ 22 %	niet gemeten
kerfslagwaarde [-20°C]	≥ 28 J	< 28 J	niet gemeten
korrelgrootte [$d^{-1/2}$]	-	4 - 10 mm$^{-1/2}$	8 - 11 mm$^{-1/2}$
CTOD [δ_c]	-	0,03 - 0,3 mm	0,3 - 3,0 mm

Tabel 6.1 Mechanische eigenschappen t.b.v ontwerp en gemeten waarden

De reden dat het bij een deel van de warmgewalste buizen verkeerd is gegaan moet gezocht worden in een onvoldoende beheersing van het proces van warmwalsen, én een wijziging van werkmethode tijdens de vervaardiging van de buizen. Bij aanvang van het werk was gekozen voor metallurgisch koudwalsen als productiewijze van de buizen, hierbij is de temperatuur niet hoger dan 600°C en treedt er geen verandering op in de materiaalstructuur. Op dit proces van koudwalsen was de beproevingsomvang en het aantal procedureproeven afgestemd. Toen tijdens de fabricage van de schuiven naast koudwalsen ook gebruik gemaakt werd van warmwalsen als productiewijze, is niet stilgestaan bij de daarvoor benodigde beproevingsomvang en de te volgen procedure van warmwalsen [6.4].

Na de ontdekking van de aanwezigheid van grofkorrelig materiaal in de warmgewalste buizen is de omvang van de schade vastgesteld. Het grofkorrelige materiaal was verwerkt in 18 gemonteerde schuiven, 10 geassembleerde schuiven, 18 schuiven zonder eindkokers, 30 vakwerkliggers en 28 randstaven; in totaal 3500 m^1 buislengte. Al het grofkorrelige materiaal dat nog niet verwerkt was in de vakwerkliggers is vervangen. Het grofkorrelige materiaal dat verwerkt was in vakwerken van schuiven die nog niet gemonteerd waren is waar nodig vervangen. De keuze om materiaal te vervangen is gebaseerd op de CTOD-waarde en de maximaal optredende spanning. Hierbij is pas zo laat mogelijk tot vervanging overgegaan om zo te profiteren van de resultaten van de opgestarte onderzoeken. Gaandeweg de onderzoeken bleek namelijk het afkeurcriterium minder streng te zijn dan in eerste instantie gedacht (zie hoofdstuk 6.2 en 6.4). Het onderscheid tussen fijnkorrelig en grofkorrelig materiaal is niet altijd even duidelijk omdat er ook warmgewalst buismateriaal met een overgangsstructuur voorkomt. Zelfs binnen één buissectie kan de materiaalstructuur over de lengte en omtrek variëren.

Het plaatsen van de schuiven is tijdens het onderzoek aan het warmgewalste, grofkorrelige materiaal volgens schema doorgegaan. Uiteindelijk zijn alle schuiven binnen de opleveringstermijn van de stormvloedkering geplaatst. Bij de reeds geplaatste 15 schuiven in het sluitgat Hammen en de 3 schuiven in het sluitgat Schaar was de verwachting dat vervanging of reparatie niet alleen duur zou zijn, maar ook dat de veiligheid en de tijdige oplevering in gevaar zouden komen. De gelaste verbindingen van deze schuiven zijn als laatste gerepareerd door middel van slijpen. Door het toegenomen inzicht in de materiaalproblematiek, herberekeningen en de resultaten van het uitgevoerde onderzoek bestond de reparatieomvang van de geplaatste schuiven uit het slijpen van 45 m^1 laswerk in de buisverbindingen van de knooppunten (zie hoofdstukken 6.3 en 6.4).

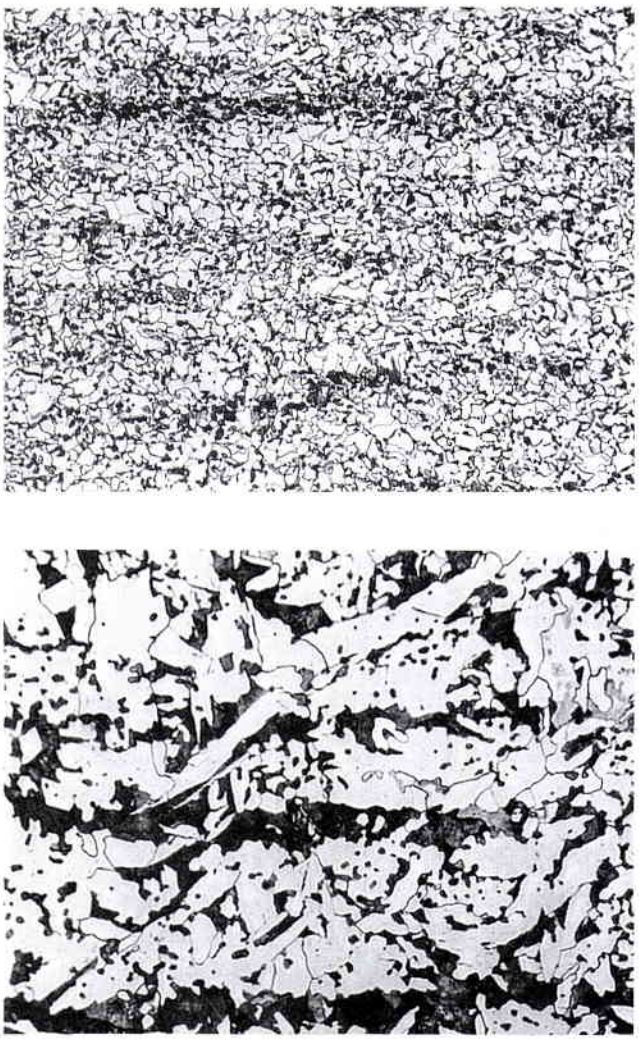
Om de oorzaken en de gevolgen van de afwijkende materiaalstructuur goed in kaart te brengen, en om de veiligheid van de reeds ingebouwde schuiven te bepalen, is in samenwerking met TNO een onderzoek opgezet dat tot doel had de sterkte van de schuiven te bepalen, alsmede de te volgen ontwerp- en onderhoudsrichtlijn vast te stellen [6.5].

6.2 Onderzoek materiaaleigenschappen

De twee meest gebruikte parameters in het onderzoek van het grofkorrelige materiaal zijn de CTOD-waarde en de korrelgrootte. CTOD is een term uit de breukmechanica en staat voor Crack Tip Opening Displacement. De CTOD-waarde wordt in een destructieve proef bepaald en is een maat voor de ductiliteit. De CTOD-waarde wordt aangegeven met de parameter δ_c. Middels de CTOD kan een relatie gelegd worden naar toelaatbare rek (ε) uitgedrukt in de breukrek (ε_y), via de dimensieloze parameter Φ en de defectafmeting a_m. De relatie tussen CTOD en Φ is:
$\Phi = \delta_c / (2\pi \cdot \varepsilon_y \cdot a_m)$

Materiaal met lage CTOD-waarden zal bij een hoge spanning (grote rek) al bij de aanwezigheid van een klein defect (scheur) de neiging hebben bros te breken. Belangrijk is dat in gelaste constructies niet alleen de optredende spanningen ten gevolge van de belastingen meegenomen moeten worden, ook de aanwezige restspanningen door het lassen zijn van belang. Deze restspanningen kunnen op het niveau van de vloeigrens liggen.

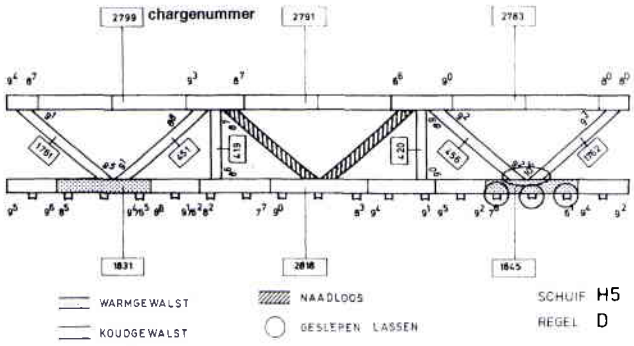
De korrelgrootte "d" van een materiaal wordt gewoonlijk uitgedrukt in een getal $d^{-1/2}$. Bij een korrelgrootte van 8 $mm^{-1/2}$ liggen de afmetingen van de korrels in de grootteorde van 0,016 mm. Voor het fijnkorrelige staal in de kering gelden korrelgrootten groter dan 8 $mm^{-1/2}$, met bijbehorende CTOD-waarden groter dan 0,3 mm. In afwijking hierop zijn er bij de warmgewalste buizen korrelgrootten van 4 $mm^{-1/2}$ tot 11 $mm^{-1/2}$ gemeten, de afmetingen van de korrels variëren bij dit materiaal van 0,008 mm (zeer fijn) tot 0,063 (grof). Bij dit materiaal zijn CTOD-waarden gemeten van 0,03 mm tot 3 mm. Het verschil in korrelgrootte en materiaalstructuur blijkt duidelijk uit opnamen met een elektronenmicroscoop (figuur 6.1).



Figuur 6.1 Structuur fijn en grof warmgewalst staal (400x vergroot)

De korrelgrootte van het materiaal heeft, net als de treksterkte, geen eenduidige relatie met de CTOD-waarde. De korrelgrootte geeft wel een indicatie voor de ductiliteit en kan relatief eenvoudig, en niet-destructief, gemeten worden. Dit in tegenstelling tot de CTOD, die niet met een eenvoudige proef bepaald kan worden. Als grenswaarde om aan te geven of een warmgewalste buis grofkorrelig of fijnkorrelig is, is in eerste instantie een korrelgrootte van 8,5 $mm^{-1/2}$ gehanteerd. Na nader onderzoek (zie hoofdstuk 6.4) is deze grenswaarde verlaagd tot 6,8 $mm^{-1/2}$. Materiaal met een korrelgrootte kleiner dan deze waarde is geclassificeerd als grofkorrelig en van dit materiaal was het noodzakelijk de CTOD-waarde te bepalen om een toetsing op brosse breuk te kunnen uitvoeren.

In eerste instantie is geprobeerd korrelgrootten te meten op basis van demping van geluid. Deze methode heeft het voordeel dat ze snel en goedkoop is, en ook eenvoudig op de reeds gemonteerde schuiven toegepast kan worden. Omdat ze echter geen betrouwbare resultaten gaf, moest gebruikt gemaakt worden van een andere methode. Het meten van de korrelgrootte heeft vervolgens niet-destructief plaatsgevonden via de replicamethode. Een replica is een afdruk gemaakt van een op locatie geëtst stukje materiaal. Van al het warmgewalste materiaal in de vakwerkliggers is door TNO de korrelgrootte bepaald, in totaal zijn zo'n 10.000 replica's gemaakt en onderzocht [6.6]. Hierbij kwam aan het licht dat in warmgewalste buisdelen zowel fijnkorrelig als grofkorrelig materiaal aanwezig kan zijn, alsmede een mengstructuur in de overgangsgebieden (figuur 6.2). Opmerkelijk is dat aan de randen van buissecties vaker grofkorrelig materiaal voorkomt dan in het midden. De in figuur 6.2 aangegeven korrelgrootten ter plaatse van de stompen gelden voor de randligger van het vakwerk.



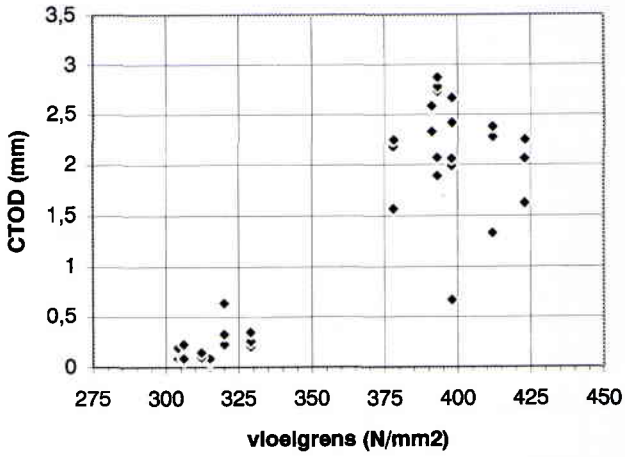
Figuur 6.2 Overzicht korrelgrootten buizen vakwerkligger

Het onderzochte materiaal geeft in grafiekvorm een gelijk beeld als de parameters CTOD en vloeigrens (figuur 6.2), en CTOD en korrelgrootte (figuur 6.3) tegen elkaar worden uitgezet. In beide figuren vallen de gemeten waarden in twee groepen uiteen. Beide groepen meetwaarden hebben geen relatie; bij een hoge vloeigrens met een lage CTOD kan zowel een kleine als een grote korrelgrootte optreden (en omgekeerd). De grote spreiding in CTOD-waarden, en de daaruit voortvloeiende overlapping bij CTOD-waarden rond de 0,6 mm in beide grafieken, maakt het onmogelijk een eenduidige relatie te bepalen tussen alleen korrelgrootte en CTOD, of alleen vloeigrens en CTOD.

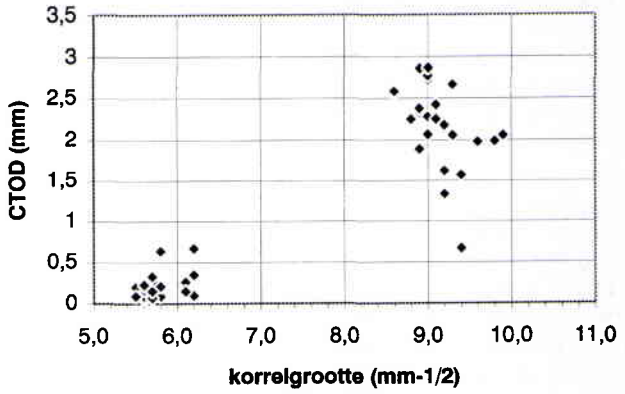
Tussen de vloeigrens ($f_{y;d}$) en de korrelgrootte ($d^{-1/2}$) geldt het empirisch afgeleide verband :

$f_{y;d}=196 + 22 \times d^{-1/2}$

Op basis van bovenstaande relatie is de vloeigrens van het grofkorrelig materiaal te bepalen aan de hand van de gemeten korrel-



Figuur 6.3 Relatie CTOD en vloeigrens



Figuur 6.4 Relatie korrelgrootte en CTOD

grootten. Met de gecorrigeerde vloeigrens van het grofkorrelige materiaal is de statische sterkte van buizen en knooppunten gecontroleerd. Voor brosse breuk is de CTOD-waarde een meer bruikbare parameter dan de vloeigrens of de korrelgrootte. Noodzakelijk was het vast te stellen welke CTOD-waarde minimaal is vereist, in relatie met een optredende scheurdiepte en een aanwezig spanningsniveau, om brosse breuk te voorkomen [6.7]. Zie voor een beschrijving van de aanpak hiervan hoofdstuk 6.4.

6.3 Reparatiemethodieken

Naast het onderzoek naar de mechanische eigenschappen van het warmgewalste, grofkorrelige materiaal zijn onderzoeken gestart naar mogelijke reparatiemethodieken. De volgende reparatiemethodieken, die de levensduur van de constructie zouden kunnen verlengen, zijn onderzocht:

- Normaliserend gloeien
- Spanningsarm gloeien (zie 6.3.1)
- Peening (zie 6.3.2)
- Slijpen (zie 6.3.3)

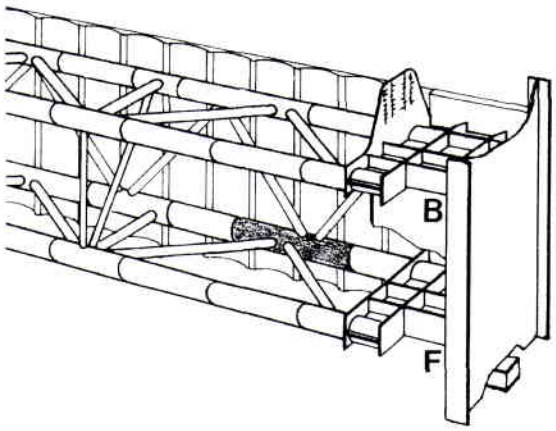
De vier methodieken zijn alle gericht op de gelaste verbindingen in de knooppunten. Hun werking is evenwel fundamenteel verschillend. Normaliserend gloeien beoogt de materiaalstructuur van het grofkorrelige materiaal zodanig te verbeteren dat daardoor weer een taaie, fijnkorrelige structuur ontstaat waarbij bros breken niet meer zal voorkomen. Normaliserend gloeien vindt plaats bij hoge

temperaturen (900°C) en kan alleen toegepast worden voor knooppunten die nog niet in de vakwerken ingebouwd zijn. Normaliserend gloeien is vanwege de beperkte toepasbaarheid niet nader uitgewerkt. Spanningsarm gloeien gebeurt bij temperaturen rond de 600°C en heeft tot doel restspanningen ten gevolge van lassen te verminderen. Peening en slijpen daarentegen hebben tot doel de las(geometrie) zo te verbeteren dat het ontstaan van scheuren vertraagd wordt.

Doordat er afgekeurd buismateriaal beschikbaar was, is veel onderzoek verricht op ware grootte. In het kort zullen de resultaten van de verschillende levensduurverlengende maatregelen behandeld worden.

6.3.1 Spanningsarm gloeien

Spanningsarm gloeien is een methode voor het verlagen van het restspanningsniveau in gelaste constructiedelen. Voor het grofkorrelige materiaal in de vakwerkliggers zou bij de gegeven, maximale wanddikte van 50 mm een warmtebehandeling van 600°C gedurende 60 minuten voldoende zijn om een relaxatie van de restspanningen tot 25% van de vloeigrens te bereiken [6.8]. Door de verlaging van de restspanningen blijft de som van de maximaal optredende spanning en de restspanningen ten gevolge van het lassen voldoende laag om brosse breuk te voorkomen.



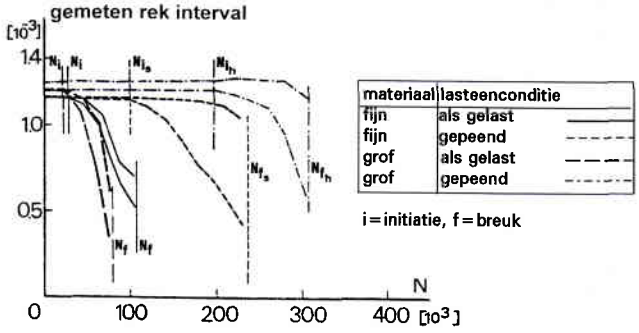
Figuur 6.5 Spanningsarm gloeien knooppunt Schaar 4

Een knooppunt van de onderregel aan de Oosterscheldezijde van schuif Schaar 4 is als proef spanningsarm gegloeid (figuur 6.5). Vanwege het feit dat het knooppunt dicht bij de beplating lag was het noodzakelijk de beplating los te maken om ongewenste opgedrongen spanningen te voorkomen [6.9]. Het spanningsarm gloeien is in drie fasen uitgevoerd waarbij ook aansluitende staven verwarmd moesten worden om de temperatuuruitzettingen van het knooppunt te kunnen volgen. Drie aansluitende diagonalen zijn tijdens de proef losgesneden toen bleek dat de vervormingen hierin sterker toenamen dan verwacht. De resultaten van de proef bleken niet eenduidig. De spanningen namen zowel af als toe! De bewerkelijke methode van spanningsarm gloeien is na de proef verworpen als zijnde niet praktisch toepasbaar voor de Oosterscheldekering.

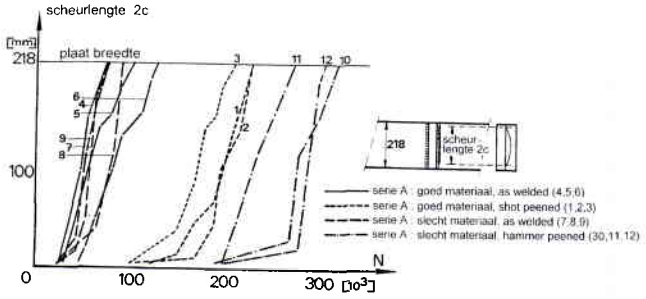
6.3.2 Peening

Peening is een oppervlaktebehandeling waarbij het materiaaloppervlak plastisch wordt vervormd, waardoor drukspanningen ontstaan. Door introductie van drukspanningen aan het oppervlak kan vertraging van de scheurinitiatie optreden. Onderzoek naar het effect van peening is op twee manieren uitgevoerd. Als eerste zijn vermoeiingsproeven gedaan op gelaste T-stukken van plaatmateriaal. De T-stukken bestonden uit grofkorrelig en fijnkorrelig materiaal, met onbehandelde lassen (aanduiding "als gelast") of met gepeende lassen, zie de toelichting in de figuren 6.6 en 6.7. Als peening-methodes zijn shotpeening en hammerpeening toegepast, [6.10]. Bij shotpeening is het materiaaloppervlak beschoten met stalen kogeltjes, terwijl bij hammerpeening het oppervlak is bewerkt met een mechanische hamer. De vermoeiingsproeven zijn uitgevoerd met een spanningsinterval van 250 N/mm^2 totdat de las over de volledige plaatbreedte van het proefstuk (218 mm) gescheurd was.

Duidelijk blijkt uit de resultaten van de vermoeiingsproeven dat peening het begin van het vermoeiingsproces uitstelt. Het moment van scheurinitiatie, meetbaar als een terugval van de rek in het materiaal en aangeduid met Ni, treedt bij peening van de lassen bij een groter aantal wisselingen op (figuur 6.6). Als er een vermoeiingsscheur is ontstaan dan verloopt het vermoeiingsproces daarna even snel als in een onbehandelde las. De helling van de lijnen van de gepeende proefstukken is gelijk aan de helling van de onbehandelde lassen (figuur 6.6 en 6.7). Peening heeft weinig invloed op het spanningsniveau waarbij bezwijken optreedt (bezwijken is aangegeven met Nf).



Figuur 6.6 Rek-interval vs wisselingen gepeende T-stukken

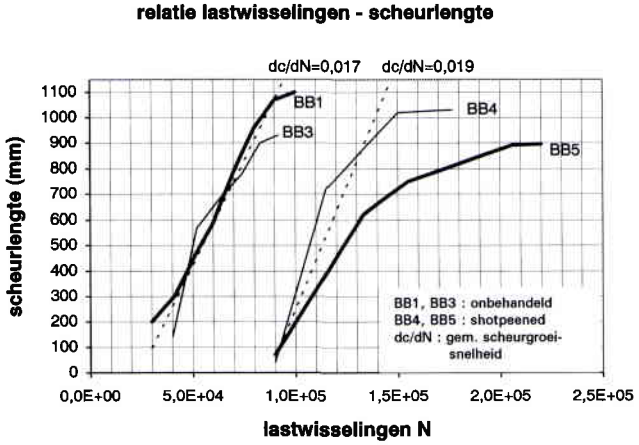


Figuur 6.7 Scheurgroei gepeende T-stukken

Na het vermoeiingsonderzoek op de gelaste T-stukken zijn als tweede onderzoek zes buisverbindingen op ware grootte gemaakt en op vermoeiing en brosse breuk beproefd. De buisverbindingen bestaan uit T-vormige knooppunten van grofkorrelig materiaal (zowel de rand- als de wandbuis). De doorgaande randstaaf heeft een diameter van 609 mm, de met een stompe las daarop bevestigde wandstaaf heeft een diameter van 323 mm. In drie gevallen is de las door middel van shotpeening verbeterd, in de overige drie gevallen zijn de lassen onbehandeld gebleven. Van de proefstukken zijn er vier volledig door vermoeiing tot bezwijken ge-

bracht. Twee proefstukken, een met een onbehandelde las en een met een gepeende las, zijn belast tot een vermoeiingsscheur van 9 mm diep was ontstaan. De lengte van een vermoeiingsscheur met deze diepte is ongeveer 400 mm. Vervolgens zijn deze gescheurde proefstukken door een statische trekbelasting tot bezwijken gebracht bij een temperatuur van 0°C. Dit bezwijken is uitgevoerd ter verificatie van het gedrag bij brosse breuk.

Het resultaat van de vermoeiingsproeven is dat in de gepeende proefstukken later scheurinitiatie optreedt, maar dat de scheurgroeisnelheid (dc/dN) van de onbehandelde proefstukken iets lager is (figuur 6.8). Door het peenen is de duur tot het ontstaan van een eerste vermoeiingsscheur van 9 mm diepte in de gelaste verbinding van het knooppunt twee maal zo lang als bij een onbehandelde las [6.11]. In beide typen proefstukken treedt gelijkmatige scheurgroei op over de omtrek, en in de diepte, tot een omtrekslengte van 900-1000 mm, daarna treedt alleen nog scheurgroei op in de diepte. De proeven zijn gestopt als de scheur door de las of de wanddikte van de buizen is gegroeid. In het gebied met de gelijkmatige scheurgroei geldt voor de onbehandelde lassen een scheurgroeisnelheid van 0,017 mm per wisseling, de scheurgroeisnelheid van de gepeende proefstukken is in dit gebied 0,019 mm per wisseling.

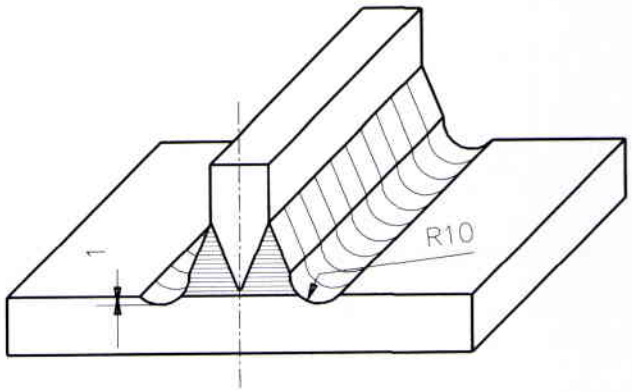


Figuur 6.8 Scheurgroei proefstukken ware grootte

Hoewel het peenen van lassen goede resultaten geeft zijn er ook nadelen aan verbonden. Een nadeel is het feit dat er door peening onder de oppervlakte van het materiaal trekspanningen ontstaan. Hierdoor bestaat het gevaar dat de scheurvorming in een las, na het doorlopen van de behandelde drukzone aan de oppervlakte, zich versneld doorzet. Een ander nadeel is dat de introductie van drukspanningen aan het oppervlak leidt tot een maskering van beginnende scheuren, wat weer de detectie van scheurvorming bemoeilijkt. Een praktisch bezwaar is dat peenen op locatie aanzienlijk moeilijker is dan in een laboratorium.
Voornaamste resultaat van de onderzoeken was dat peening wel de scheurinitiatie, maar niet de daarna optredende scheurgroei vertraagt. Bij de zware lassen in de dikwandige buisverbindingen van de Oosterscheldekering is met betrekking tot vermoeiing de initiatieperiode minder van belang dan de scheurgroeiperiode, zodat peening voor behandeling van de buisknooppunten van grofkorrelig materiaal minder geschikt is bevonden.

6.3.3 Slijpen

Onderzoek is gedaan naar de invloed van slijpen van lassen. Er zijn twee experimenten uitgevoerd; een serie vermoeiingsproeven op T-stukken samengesteld uit plaatmateriaal en een vermoeiingsproef van een T-knooppunt van de Oosterscheldekering op ware grootte. Door het slijpen worden initiële defecten in de lasteen verwijderd, waardoor de kans op scheurgroei en daardoor brosse breuk vermindert. Tevens wordt door te slijpen de lasteengeometrie verbeterd zodanig dat lagere spanningsconcentratiefactoren optreden. De T-stukken voor de vermoeiingsproeven hebben dezelfde geometrie als de T-stukken die gebruikt zijn bij het onderzoek naar de invloed van peening. De lassen zijn bij een deel van de proefstukken geslepen met een straal r=10 mm en een diepte van 1 mm (figuur 6.9).



Figuur 6.9 Geometrie T-stukken vermoeiingsproeven

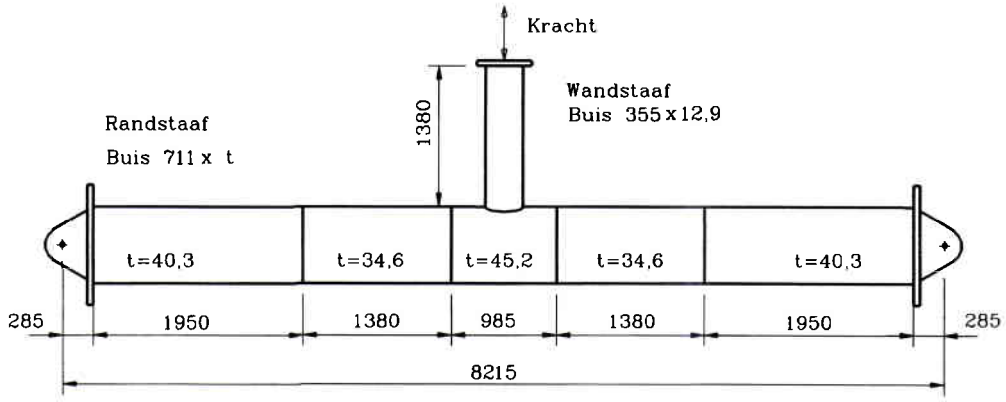
In de proevenserie is de vermoeiingssterkte bepaald van twee gelaste, onbehandelde proefstukken in lucht (serie A), vier gelaste, onbehandelde proefstukken in zeewater (serie B) en vier geslepen proefstukken in zeewater (serie C) [6.12]. De proefstukken zijn samengesteld uit grofkorrelig materiaal dat via een warmtebehandeling is verkregen. De T-stukken uit serie A zijn belast tot breuk met een spanningsinterval van 250 N/mm^2 (range van 50 tot 300 N/mm^2). De twee proeven van serie A zijn voornamelijk uitgevoerd als controle op de resultaten van de eerdere vermoeiingsproeven.

Voor de series B en C is tot N=2000x10^3 een spanningsinterval van 80 N/mm^2 aangehouden (range van 20 tot 100 N/mm^2), daarna is overgegaan op een spanningsinterval van 160 N/mm^2 (range van 40 tot 200 N/mm^2). Belangrijkste resultaat van de vermoeiingsproeven op de T-stukken is dat bij de geslepen proefstukken scheurinitiatie (N_{scheur}) pas na een aanzienlijk groter aantal wisselingen optreedt dan bij de onbehandelde proefstukken. Het verschil in wisselingen bij bezwijken ($N_{bezwijk}$) is daarentegen minder groot (tabel 6.2).

De vermoeiingsproef van een geslepen T-knooppunt van buizen van grofkorrelig materiaal op ware grootte is uitgevoerd met een random-belasting in zeewater van 0°C. Het knooppunt is samengesteld uit grofkorrelig buismateriaal afkomstig uit verschillende afgekeurde buizen van vakwerkliggers. Het knooppunt bestaat uit een randstaaf met diameter 711 mm en een wanddikte van 35 mm, en een wandstaaf met diameter 355 mm en een wanddikte van 12,9 mm (figuur 6.10). Ter plaatse van het knooppunt is de randstaaf over een lengte van 1 m verzwaard uitgevoerd met een 'can' met een wanddikte van 45 mm. De las is rondom de verbinding geslepen met een afrondingsstraal r=10 mm en een diepte van 1 mm.

serie	uitvoerings-condities proef	proef-stuk-nr.	spannings-interval [N/mm^2]	N_{scheur} x10^3	$N_{bezwijk}$ x10^3	gemiddelde per serie N_{scheur} x10^3	gemiddelde per serie $N_{bezwijk}$ x10^3
A	onbehandeld lucht	31	250	27	85	28	86
		32	250	28	88		
B	onbehandeld zeewater 0°C	33	80 - 160	1400	2120	1751	2207
		34	80 - 160	1600	2167		
		35	80 - 160	2225	2384		
		36	80 - 160	1760	2155		
C	geslepen zeewater 0°C	37	80 - 160	2150	2359	2140	2360
		38	80 - 160	2210	2451		
		39	80 - 160	2100	2291		
		40	80 -160	2100	2337		

Tabel 6.2 Resultaten beproeving onbehandelde en geslepen T-stukken



Figuur 6.10 Geometrie T-knooppunt

Het belastingspectrum dat in deze proef is gebruikt is gebaseerd op de karakteristieke golf- en vervalbelastingen op vakwerkligger B in schuif R28, zie als voorbeeld van een spectrum van golf- en vervalbelastingen tabel 5.5 [6.13]. Het eenmalig optredende, maximale spanningsinterval bedraagt 379 N/mm^2. Uitgaande van de gemaakte vermoeiingsberekeningen zou de levensduur van deze verbinding zo'n 290 jaar zijn (zie tabel 5.7).

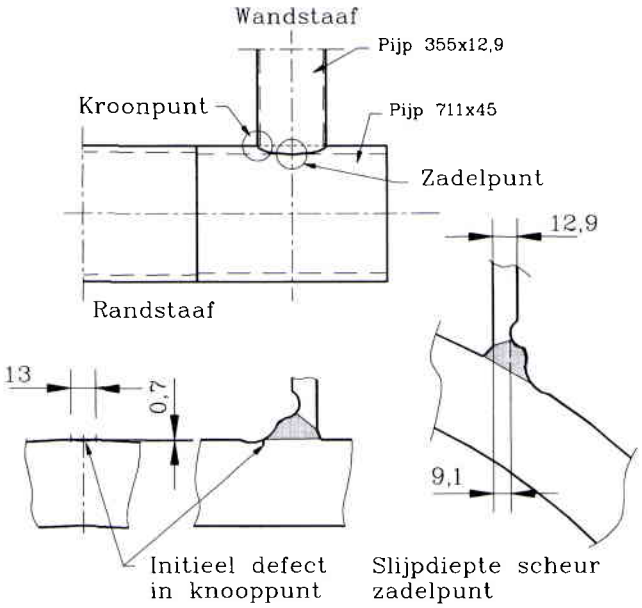
Het spanningsinterval van de vermoeiingsproef is gebaseerd op twee maal de karakteristieke golftopwaarden zoals gegeven in het spectrum, vervalbelastingen zijn buiten beschouwing gelaten. Het proefstuk is belast tot breuk waarna de levensduur berekend is. Het aantal golven dat gedurende de periode van 200 jaar optreedt bij regel B bedraagt bijna een miljoen (=1x10^6). Om het aantal wisselingen te reduceren zijn de vijf laagste klassen van golfbelastingen achterwege gelaten, deze golfbelastingen zouden resulteren in zeer lage spanningsintervallen die geen vermoeiingsschade geven. Het spanningsinterval (zonder SCF) in de verbinding bij de vijf laagste klassen van golfbelastingen is ten hoogste 14 N/mm^2. Door deze reductie bedroeg het aantal wisselingen voor de vermoeiingsproef nog 6,5x10^5.

Om praktische redenen moest dit aantal golven voor de vermoeiingsmachine nog verder gereduceerd worden tot 5x10^4 wisselingen. Verdere reductie van het golfspectrum is bereikt door alle aantallen golven te vermenigvuldigen met 5x10^4/6,5x10^5. Het gehele golfspectrum is vervolgens omgerekend naar één referentiebelasting. Deze referentiebelasting was afgestemd op de beproevingsapparatuur. De cilinders van de proefopstelling konden geen grotere kracht uitoefenen op het proefstuk dan 1000 kN. Het spanningsinterval waaraan de lasverbinding onderworpen is bedroeg 89 N/mm^2 (inclusief SCF). Dit relatief lage spanningsinterval tijdens de beproeving noodzaakte tot het vergroten van het aantal wisselingen teneinde tot dezelfde vermoeiingsschade als bij de liggers in de kering te komen. De beproevingsperiode heeft een half jaar geduurd.

Het spectrum van 5x10^4 wisselingen is ingevoerd in de vermoeiingsmachine waarna dit spectrum 60 keer herhaald is. De vermoeiingsbelasting van de proef (na 60 x 5x10^4 = 3x10^6 wisselingen met een interval van 89 N/mm^2) komt overeen met de ontwerpgolfbelasting gedurende 169 jaar. In de geslepen las zijn na 3x10^6 wisselingen geen scheuren gevonden, uitgezonderd een scheur van 1 mm diep en 100 mm breed in de wandstaaf ter plaatse van het zadelpunt. Het zadelpunt is niet de locatie waar een

scheur verwacht werd. Deze scheur is volledig uitgeslepen, de maximale diepte van de slijpgroef bedroeg 3,7 mm (figuur 6.11).

Ter plaatse van het kroonpunt is vervolgens in de randstaaf een initieel defect aangebracht, hierna is de proef voortgezet (figuur 6.11). Reeds na $3x10^5$ wisselingen is de proef gestopt vanwege het doorscheuren van de rondnaad in de overgang van de can naar een dunner buisdeel van de randstaaf. In het diep uitgeslepen deel ter plaatse van het zadelpunt is geen nieuwe scheurinitiatie waargenomen, noch trad er scheuruitbreiding op in het initiële defect [6.14].



Figuur 6.11 Defecten proefstuk vermoeiing T-knooppunt

De proef was opgezet om de vermoeiingslevensduur te bepalen van een T-knooppunt op ware grootte, iets wat door het doorscheuren van de rondnaad niet meer mogelijk was. Het doorscheuren van de rondnaad is ongezien opgetreden omdat de scheur zich bevond onder de isolatiedekens rond het proefstuk die de temperatuur op 0°C moesten houden. De opgelegde vermoeiingsbelasting komt overeen met een levensduur van 169 jaar, daarmee een ondergrens vormend voor de vermoeiingssterkte van het knooppunt. Door het ontbreken van een groot aantal wisselingen met een klein spanningsinterval is de vermoeiingsproef onder zwaardere omstandigheden uitgevoerd dan ingeval het volledige golfspectrum gehandhaafd zou zijn.

Uit het bezwijken van de rondnaad is de rekenkundige sterkte afgeleid uitgaande van de lokale geometrie (diktesprong en overgang van buiswand naar las). De scheur is aan de binnenzijde van de randstaaf ontstaan in de overgang van de buis naar de las en van daaruit door de rondnaad gegroeid. De levensduur van de rondnaad lag 30% boven de levensduur zoals vooraf berekend.

6.3.4 Conclusies onderzoek reparatiemethodieken

Met betrekking tot de verschillende reparatiemethoden zijn warmtebehandelingen ter verbetering van de korrelstructuur afgeraden op grond van de beperkte effectiviteit, hoge kosten en onzekerheid t.a.v. de uitwerking in de constructie. Ook peenen is niet aangeraden op grond van mogelijke verlaging van de CTOD-waarde aan de oppervlakte door de grote plastische vervorming, terwijl het onderliggende materiaal ongewijzigd grofkorrelig blijft. Zowel uit effectiviteit- als uit kostenoverwegingen is geconcludeerd dat slijpen van de lasteen de meest geschikte methode is om de knooppunten met grofkorrelig materiaal te verbeteren (zie verder hoofdstuk 6.4.2).

6.4 Herstelstrategie

6.4.1 Herberekening initieel defect

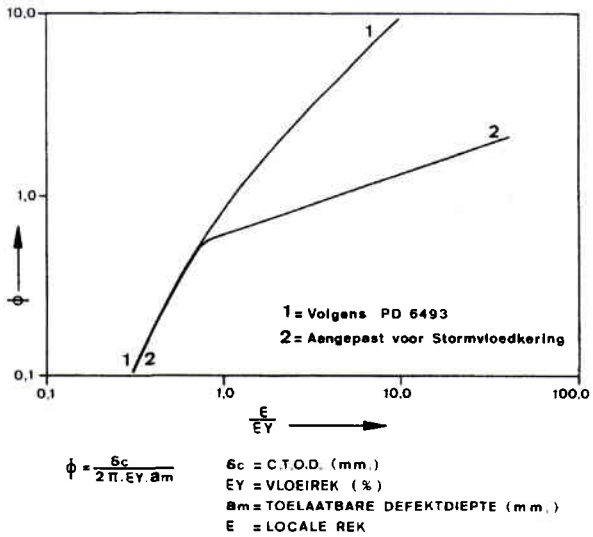
Na de verklaring over het ontstaan van het grofkorrelige buismateriaal, en de bepaling van de posities ervan in alle schuiven, was het materiaalprobleem van de schuiven in wezen veranderd in een berekeningsprobleem van de kans op bezwijken gedurende de levensduur. Vervanging van de schuiven is een oplossing die, indien kosten en tijd geen rol spelen, altijd toegepast kan worden. Vanwege de tijdsdruk, en in mindere mate de kosten, was vervanging echter geen serieus alternatief en diende een oplossing gevonden te worden voor gedeeltelijk en volledig gefabriceerde én de reeds geplaatste schuiven. Herberekening en reparatie van de schuiven, rekening houdend met de gewijzigde situatie, is de oplossing die gekozen is.

De herberekeningen van de schuiven bevatten controles voor de statische sterkte, vermoeiing en brosse breuk. Alle (nieuwe) berekeningen gaan uit van een verlaagde vloeigrens van 280 N/mm^2 ter plaatse van grofkorrelig materiaal. In de eerdere berekeningen is eerst de statische sterkte berekend en is daarna de vermoeiingsschade bepaald. Met als uitgangspunt een taai materiaal (fijnkorrelig staal) waren relatief grote scheurdiepten door vermoeiing toelaatbaar, tot een halve plaatdikte, voordat bezwijken op statische sterkte zou optreden. De schade door vermoeiing, en dus ook de diepte van optredende vermoeiingsscheuren, was via de schaderegel van Miner bepaald.

Voor de situatie met het grofkorrelig materiaal is de kritische grootte van de vermoeiingsschade t.a.v. het optreden van brosse breuk veel kleiner. Toegevoegd is een controle op bezwijken door brosse breuk. De berekening van de statische sterkte van knooppunten met een lage CTOD is opnieuw uitgevoerd gebruik makend van het gegeven dat niet alle vakwerkliggers van eenzelfde type even zwaar belast worden en de nog aanwezige speelruimte in de rekenwaarden van de belastingen. Door nieuwe inzichten in het lekdebiet van de kering, waardoor de vervalbelasting over de kering minder groot bleek dan aangenomen, bleven de nominale spanningen overal onder de 280 N/mm^2.

Voor de controle op brosse breuk is uitgegaan van de methodiek die gehanteerd wordt in PD 6493 [5.16]. De PD 6493 wordt gebruikt om toelaatbare rekken te berekenen bij aanwezigheid van scheuren, om zo de defectgrootte te bepalen waarbij bezwijken door brosse breuk kan optreden. Met name in de offshore is het gebruik van deze methodiek gangbaar. In de ontwerpcurve van de PD 6493 hangt de toelaatbare rek af van de CTOD-waarde (δ_c), de vloeirek van het materiaal (ε_y) en de defectafmetingen (α_m). De relatie tussen CTOD-waarde en de rek wordt gegeven door de dimensieloze parameter Φ. Zie voor een grafische weergave curve 1 van figuur 6.12.

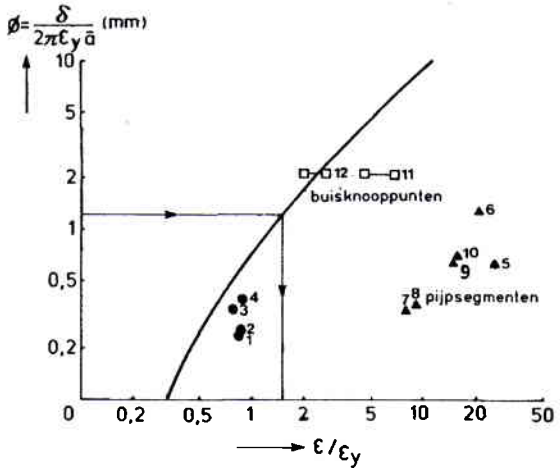
Het verloop van de ontwerpcurve is gebaseerd op proeven met vlakke platen (nummers 1 t/m 4 van figuur 6.13) en het vermoeden bestond dat de ontwerpcurve van de PD6493 conservatief was. Daarom zijn voor de Oosterscheldekering proeven gedaan bij lage



Figuur 6.12 Ontwerpcurve PD 6493

temperaturen, met pijpsegmenten en met volledige buisverbindingen. De buisverbindingen waren beschikbaar gekomen door het vervangen van de warmgewalste knooppunten van de vakwerkliggers die nog in productie waren. De bezwijkproeven bij lage temperaturen en buisverbindingen zijn uitgevoerd door TNO, de proeven met de pijpsegmenten door de Rijksuniversiteit van Gent. Bij alle proefstukken is op mechanische wijze een kerf aangebracht waarna door een oplopende en wisselende belasting bezwijken door brosse breuk optreedt.

Bij de proeven op de pijpsegmenten wordt brosse breuk voorafgegaan door een korte periode van stabiele scheurgroei. De optredende rekken bij de pijpsegmenten blijken groter te zijn dan volgens de ontwerpcurve van de PD 6493 (figuur 6.13). Brosse breuk in de pijpsegmenten hoeft op grond van de testresultaten niet verwacht te worden. De resultaten van de proeven bij lage temperaturen, en de resultaten van de buisknooppunten liggen op de ontwerpcurve. Dit betekent voor de staalconstructie van de schuiven dat inspectie voornamelijk gericht zal moeten zijn op de buisverbindingen. Resultaat van deze proeven is dat voor de controle op brosse breuk van pijpsegmenten een afwijkende ontwerpcurve toegepast kan worden (curve 2 figuur 6.12) [6.15].



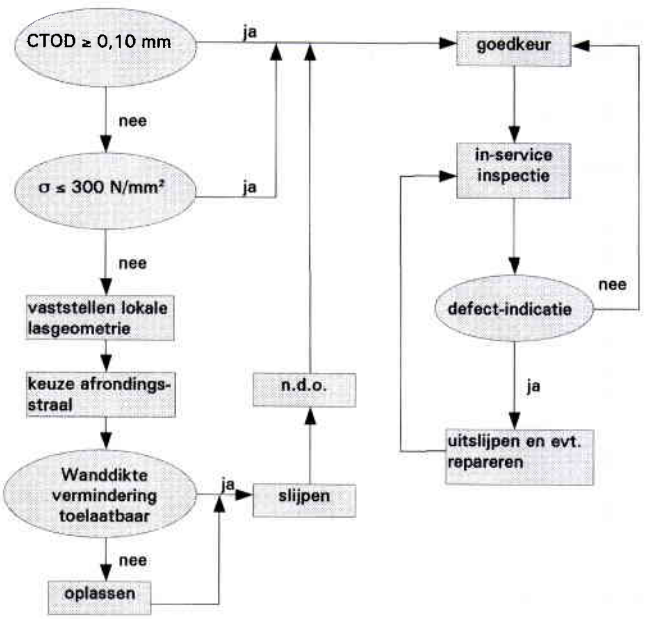
Figuur 6.13 Testresultaten proeven brosse breuk

Voor de oorspronkelijke vermoeiingsberekeningen was het uitgangspunt dat de maximale scheurdiepte, voordat tot reparatie moest worden overgegaan, een halve wanddikte bedroeg. Vanwege de kans op bros breken van het grofkorrelige materiaal diende deze eis aangescherpt te worden tot een maximaal toelaatbare scheurdiepte van 4 mm, en een maximale scheurlengte van 50 mm. Omdat een initieel defect in de verbindingen 3 mm diep en 50 mm lang kan zijn voordat een betrouwbare detectie mogelijk is, is de consequentie van de aangescherpte eis dat er binnen kortere tijdsintervallen geïnspecteerd dient te worden om te voorkomen dat een initieel defect ongemerkt uitgroeit tot de maximaal toelaatbare scheurdiepte [6.16].

6.4.2 Uitvoering herstelstrategie

Op basis van de ontwerpcurve van de PD 6493 is in eerste instantie besloten dat knooppunten met grofkorrelig materiaal met een CTOD-waarde kleiner dan 0,3 mm hersteld zouden moeten worden. Dit is de grenswaarde voor de CTOD die in de offshore gehanteerd wordt. De korrelgrootte die hiervoor als maatstaf in de niet-destructieve keuring moet worden aangehouden bedroeg 8,5 $mm^{-1/2}$. Als resultaat van de uitgevoerde berekeningen en proeven kon deze eis verlaagd worden tot een minimale CTOD-waarde van 0,1 mm en een bijbehorende korrelgrootte van 6,8 $mm^{-1/2}$.
Door de verlaging van de minimale CTOD-waarde kon de reparatieomvang aanzienlijk beperkt worden. Voor al het warmgewalste staal met een grofkorrelige structuur met korrelgrootte kleiner dan 6,8 $mm^{-1/2}$, waarbij de CTOD-waarde toch nog meer dan 0,1 mm bedraagt, geldt dat geen reparatie noodzakelijk is voor defectafmetingen tot 4x50 mm.

Bij het grofkorrelig materiaal met een CTOD-waarde kleiner dan 0,1 mm en een spanningsniveau (inclusief SCF) lager dan 300 N/mm^2 is reparatie niet noodzakelijk. Pas als bij grofkorrelig materiaal met een CTOD kleiner dan 0,1 mm de spanning in de lasteen de 300 N/mm^2 overschrijdt dient er gerepareerd te worden. Voor de vaststelling of een knooppunt van grofkorrelig materiaal gerepareerd dient te worden is een beslisdiagram opgesteld waaraan getoetst is (figuur 6.14).



Figuur 6.14 Beslisdiagram reparatie verbindingen grofkorrelig materiaal

De reparatieomvang van de nog niet gemonteerde schuiven is beperkt door van een aantal grofkorrelige knooppunten de CTOD te bepalen in plaats van direct tot het vervangen van het knooppunt over te gaan. Omdat de bepaling van de CTOD-waarde destructief plaatsvindt, was het noodzakelijk materiaal uit de knooppunten weg te nemen. Ter plaatse van de grofkorrelige knooppunten is in de neutrale lijn van de randstaaf een stukje buiswand van 225x375 mm^2 weggenomen (een zgn. 'luikje'). Door het nemen van luikjes behoefde in 11 gevallen een grofkorrelig knooppunt niet vervangen te worden omdat de CTOD-waarde voldoende hoog was.

De resultaten op grond waarvan de verlaging van de CTOD toelaatbaar werd geacht zijn voorgelegd aan een panel van internationale deskundigen. Naar aanleiding van de discussies door dit panel en aansluitende onderzoeken is er als herstelmethode gekozen voor lasteenverbetering door slijpen [6.17]. De beslissing om tot slijpen over te gaan is genomen op grond van de volgende overwegingen:

- Initiële defecten (inkarteling, slakinsluitsels) worden verwijderd. De kans op brosse breuk vanuit een dergelijk defect neemt af.
- De verbetering van de lasteengeometrie leidt tot een verlaging van de spanningsconcentratiefactor. Hierdoor neemt zowel het maximale spanningsniveau als de spanningsamplitude af.
- Het gladde, geslepen oppervlak vertraagt scheurinitiatie bij vermoeiing.
- Het gladde, geslepen oppervlak geeft een goede uitgangspositie voor inspectie waardoor betere opsporing van vermoeiingsscheuren mogelijk is.

In de 18 reeds geplaatste schuiven van de Hammen en de Schaar bevindt zich 1200 m^1 warmgewalste buis. Van dit warmgewalste materiaal is 135 m^1 als grofkorrelig geclassificeerd omdat de korrelgrootte daarvan kleiner is dan 6,8 $mm^{-1/2}$. Uit deze schuiven zijn geen luikjes genomen. Bij de vastgestelde criteria van CTOD en spanningsniveau bleek het noodzakelijk, na inspectie van alle grofkorrelige knooppunten, ongeveer 45 m^1 lasnaad te behandelen. Deze lassen zijn verdeeld over 14 knooppunten en 27 stompaansluitingen van 14 schuiven [6.18]. Als voorbeeld staan in figuur 6.4 van vakwerkligger D van schuif H5 de lassen die ter verbetering van de lasgeometrie geslepen zijn omcirkeld.
Een handgestuurde slijprobot is ontwikkeld om de lassen mechanisch en gecontroleerd te slijpen. De slijptechniek, en de bijbehorende inspectietechniek, is ontwikkeld op afgekeurde knooppunten.

Om de inspecties van de buisverbindingen adequaat te kunnen uitvoeren is een goede toegankelijkheid van de schuifconstructie vereist. Regelmatige inspecties van de zwaarst belaste knooppunten is een ontwerpuitgangspunt dat met betrekking tot vermoeiing gehanteerd is. Daarom is reeds voor het optreden van de materiaalproblematiek de keuze gemaakt een speciaal inspectievoertuig te ontwikkelen. Dit inspectievoertuig is zodanig ontworpen dat het mogelijk is vanuit één positie op de parallelweg van de verkeerskoker een hele schuif te onderzoeken. Voor een uitgebreide beschrijving van het inspectievoertuig zie deelnota 7.

6.5 Inspectietechnieken

Het besluit fouten van een grootte van 4x50 mm als grens te stellen houdt in dat betrouwbare inspectietechnieken nodig zijn om deze fouten te kunnen detecteren. Daarnaast is het vanwege de materiaalproblematiek niet voldoende alleen de zwaarst belaste knopen te controleren. Alle knopen waarin materiaal met een lage CTOD-waarde is verwerkt dienen frequent geïnspecteerd te worden.

Omdat fouten met een grootte van 4x50 mm de kritische grens zijn, dienen de inspectietechnieken fouten met een diepte van 3 mm al te kunnen detecteren. De scheurgroei tijdens een ontwerpstorm bedraagt minder dan 1 mm diepte zodat het in principe niet mogelijk is dat een defect in één ontwerpstorm uitgroeit tot de kritische grens. Daarnaast bestaat de kans dat een foutgrootte van 3 mm diepte al tijdens fabricage is ontstaan en dat deze fout tijdens het lasonderzoek bij oplevering niet ontdekt is.

Tevens dient de inspectietechniek gezien de grote hoeveelheid lasverbindingen te functioneren zonder dat de conservering van de constructie verwijderd hoeft te worden. Om inzicht te krijgen in de mogelijkheden van de verschillende voorhanden zijnde inspectietechnieken is een onderzoek uitgevoerd [6.19]. Ten behoeve van een vergelijking van inspectietechnieken zijn een aantal T-vormige proefstukken gefabriceerd. De proefstukken zijn voorzien van het conserveringssysteem van de schuiven. Door middel van vermoeiing zijn scheuren in de las aangebracht. Daarna zijn de proefstukken aan verschillende bedrijven ter inspectie aangeboden. De volgende technieken zijn bij de inspecties gebruikt:

1. Akoestische emissie
2. Ultrasoon onderzoek (zowel met een hoektaster als met een kruipgolf)
3. Magnetisch scheuronderzoek
4. Alternating current potential drop meting (A.C.P.D.), deze methode is verder ontwikkeld tot de wervelstroomtechniek
5. Electro magnetic device (E.M.D.)

Akoestische emissie is een inspectietechniek waarbij het geluid van de scheurgroei in de lasverbinding (continue) geregistreerd wordt. Alleen ten gevolge van belastingwisselingen wordt er in een scheur geluid geproduceerd, een statische belasting kan met akoestische emissie niet gemeten worden. Ten tijde van het ontwerp van de stormvloedkering stond de techniek van de akoestische emissie nog in de kinderschoenen. De overige inspectietechnieken waren, hoewel continue in ontwikkeling, al commercieel in gebruik.

De resultaten van het onderzoek met de verschillende inspectietechnieken zijn:

1. De ruis veroorzaakt door de geluidsproductie in de omgeving was dermate groot dat akoestische emissie niet bruikbaar was voor de inspectie van de schuiven
2. Het is mogelijk om scheurvormige indicaties ter plaatse van een lasverbinding met behulp van ultrasoon onderzoek te detecteren, ondanks het feit dat er een coating is aangebracht.
3. Het magnetisch scheuronderzoek geeft geen eenduidig resultaat voor het detecteren van een scheur.
4. A.C.P.D. geeft geen betrouwbaar beeld ten aanzien van locatie noch scheurdiepte.
5. E.M.D. geeft vanaf 3 à 4 mm een betrouwbare scheurindicatie.

Bij het ultrasoon onderzoek kunnen bij het gebruik van een hoektaster scheurdieptes vanaf 1,5 à 2 mm waargenomen worden. De kruipgolftaster detecteert scheuren vanaf 2 à 3 mm. De foutgrootte bij ultrasoon onderzoek ligt derhalve binnen de toelaatbare scheurdiepte van 4 mm. Op grond van bovenstaande resultaten is de ultrasone inspectiemethodiek verder uitgewerkt voor de gekromde en geslepen lassen van de buisverbindingen.
Omdat de ontwikkeling van de verschillende inspectietechnieken niet stilstaat is enige jaren na oplevering van de kering overgestapt van ultrasoon onderzoek van de lassen in de buisverbindingen van de knooppunten van de schuiven naar de wervelstroomtechniek om scheuren te detecteren. De wervelstroomtechniek is een operationele voortzetting van A.C.P.D.

7. Uitvoering en onderhoud

7.1 Fabricage

De gehele stormvloedkering, inclusief de schuiven, is gebouwd door de aannemerscombinatie OSTEM. Vanwege de omvang van de werkzaamheden was het onmogelijk de schuiven binnen de gestelde opleveringstermijn op slechts één locatie te bouwen. Het was noodzakelijk de schuifconstructie op te delen in onderdelen die onafhankelijk van elkaar gefabriceerd konden worden. Hierdoor werd een seriematige productie, met de daaraan verbonden schaalvoordelen, mogelijk.

Voor de fabricage zijn de schuiven opgedeeld in de hoofdonderdelen schaalbeplating (inclusief de vlakke beplating als overgang naar de eindkokers), vakwerkliggers en eindkokers. Deze hoofdonderdelen zijn weer samengesteld uit afzonderlijke onderdelen, zoals knooppunten, randstaven, wandstaven, plaatvelden, krammen, ophangbalken, etc. De onderdelen zijn allemaal samengesteld uit plaatstaal, strippen en buizen.

Belangrijk gegeven in de productie was het toepassen van unieke merk- en postnummers voor de onderdelen van alle schuiven. Schuiven van gelijke afmetingen en profilering verschillen zodoende toch nog in hun merk- en postnummering. Door de unieke nummering blijft het te allen tijde duidelijk waar, en welk, materiaal verwerkt is. De waarde van het systeem met de merk- en postnummers werd bewezen na de ontdekking van grofkorrelig warmgewalst materiaal in de vakwerkliggers. Gedetailleerd, en in korte tijd, kon een exact overzicht opgesteld worden waar het grofkorrelig materiaal uit elke charge verwerkt was.

Waar mogelijk is er machinaal gelast. De schuiven zijn echter een lastechnisch gecompliceerde constructie waardoor het noodzakelijk was het merendeel van de verbindingen met de hand te lassen. Alle lassen in de constructie zijn tijdens de fabricage visueel en ultrasoon onderzocht op defecten. Daarnaast is gebruik gemaakt van magnetisch onderzoek en incidenteel van radiografisch en penetrant onderzoek. Ten behoeve van het niet-destructief onderzoek (NDO) tijdens de fabricage zijn alle lassen genummerd. Aangezien iedere schuif qua opbouw identiek is, is voor een systeem gekozen waarbij iedere, op elke schuif voorkomende, las een eigen nummer heeft. Bij een drieregelige schuif worden er 252 verschillende lassen onderscheiden, bij een tweeregelige schuif vallen er nummers tussenuit. Rondnaden hebben nummers die overeenkomen met de postnummers van de aansluitende delen. Gerepareerde lassen worden apart gemerkt. Het nummeringsysteem van de lassen is na ingebruikname van de stormvloedkering overgenomen voor het inspectiesysteem.

Het samenbouwen van de hoofdonderdelen tot een volledige schuif vond plaats in twee fasen. In de eerste fase van het samenbouwen zijn de vakwerkliggers d.m.v. het verticaal draagsysteem tot de ruimtelijke constructie van het hoofddraagsysteem samengesteld, waarna de schaalbeplating is toegevoegd. Deze constructie is voor alle schuiven gefabriceerd met aan weerszijden een overlengte van 0,275 m. De overlengte is aanwezig in zowel de vakwerkliggers als in de schaalbeplating. Na inmeten van de positie van de pijlers en vaststelling van de theoretisch benodigde schuiflengte, rekening houdend met de verwachte zettingen, zijn de vakwerkliggers en schaalbeplating op de juiste lengte gemaakt.

In de tweede fase van het samenbouwen zijn aan het hoofddraagsysteem de eindkokers toegevoegd. Beide hoofdonderdelen konden tamelijk onafhankelijk van elkaar gebouwd worden. Zolang het hoofddraagsysteem en de eindkokers nog niet samengebouwd waren, konden deze hoofdonderdelen nog voor meerdere schuiven gebruikt worden. Pas na het op maat brengen en samenbouwen ontstaat een unieke schuif die slechts nog op één plaats in een sluitgat van de Oosterschelde toegepast kan worden. De volledige schuifconstructie is daarna in zijn geheel gestraald en geconserveerd.

7.2 Conservering

Eén van de problemen van het toepassen van een staalconstructie in een maritiem milieu is het voorkomen van corrosie. Een veel toegepaste oplossing bij waterbouwkundige werken is het aanbrengen van een verfsysteem in combinatie met kathodische bescherming. Omdat de schuiven in geopende stand boven water hangen, en slechts 1 à 2 keer per jaar gesloten worden, is kathodische bescherming niet zinvol. De staalconstructie wordt alleen tegen corrosie beschermd door een verfsysteem. Als alternatief voor het toepassen van conservering is er gekeken naar de mogelijkheid om het materiaal een corrosietoeslag te geven en verder geen onderhoud te plegen. Maatgevend bij de bepaling van een corrosietoeslag zijn de lassen van de buisverbindingen. Vanwege de onzekerheid omtrent de snelheid van (put)corrosie zou een dermate grote diktetoeslag op de lassen, en een daarmee samenhangende verzwaring van de aansluitende buisprofielen, noodzakelijk zijn dat de schuiven aanzienlijk zwaarder zouden worden. Dit zou weer leiden tot een verzwaring van de bewegingswerken. Daarnaast is het beeld van een roestende kering niet acceptabel, zodat dit onderhoudsalternatief verworpen is.

Bij aanvang van de bouw is gekozen, op grond van ervaring met andere waterbouwkundige constructies, voor een 3-laags coating van epoxy-koolteer met een totale dikte van minimaal 470 µm. De merknaam van het verfsysteem is Bitep, de verwachte levensduur is 10 tot 15 jaar. Vanwege de materiaalproblematiek van het warmgewalste buismateriaal zijn (voornamelijk) de schuiven in de Roompot niet volledig voorzien van de epoxy-koolteerconservering. In een laat stadium van de fabricage (1985) is nog een deel van de warmgewalste buizen van de vakwerkliggers vervangen, waardoor de beschikbare doorlooptijd voor conservering aanzienlijk werd bekort [7.1]. Voor de schuiven die pas op het laatste moment gereed gekomen zijn, is daarom overgestapt van het 3-laags

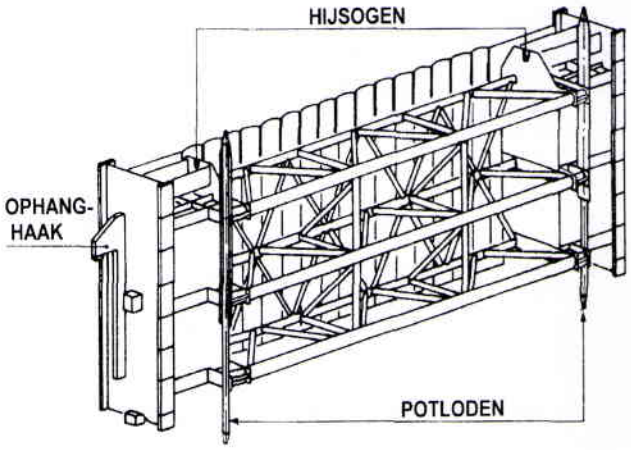
epoxy-koolteersysteem op een 2-laags high-solids epoxyverf (merknaam Acraton HS). Met de toepassing van een high-solids epoxyverf is vooruit gelopen op het verbod op koolteerhoudende conserveringsmiddelen; koolteer is giftig en kankerverwekkend. Voor het 2-laags high-solids verfsysteem is een minimale dikte van 350 µm vastgesteld.

Het te conserveren oppervlak bedraagt voor een twee-regelige schuif ca. 2.300 m^2 en voor een drie-regelige schuif ca. 3.300 m^2. Het verfoppervlak van de totale kering bedraagt ca. 179.000 m^2, hiervan is 149.000 m^2 geconserveerd met het 3-laagssysteem en 30.000 m^2 met het 2-laagssysteem [7.2].

Bij de opleveringsinspectie van de kering is craquelé van het 2-laagsverfsysteem waargenomen op de vakwerkliggers. Onderzoek wees uit dat de corrosie die ter plaatse optrad niet de oorzaak, maar het gevolg van deze craquelé was. Oorzaak van de craquelé is een volumevermindering van de conservering door emissie van een aantal componenten in het 2-laagsverfsysteem. In combinatie met hoge oppervlaktetemperaturen in de staalconstructie ontstaan door de volumevermindering trekspanningen in de conservering die de lange-duur-treksterkte van de conservering overschrijden, waardoor craquelé ontstaat [7.3]. Daar waar de conservering is 'voorgezet', vnl. ter plaatse van lasnaden en bij de knooppunten, en waar dus een dikkere laag conservering aanwezig is, treedt de grootste emissie van componenten uit het 2-laagsverfsysteem op, en daarmee ook de meeste craquelé. De beschadigde conservering is gerepareerd met een 3-laags high-solids epoxyverfsysteem van een andere samenstelling waarbij volumevermindering door emissie van componenten niet optreedt [7.4].

7.3 Montage

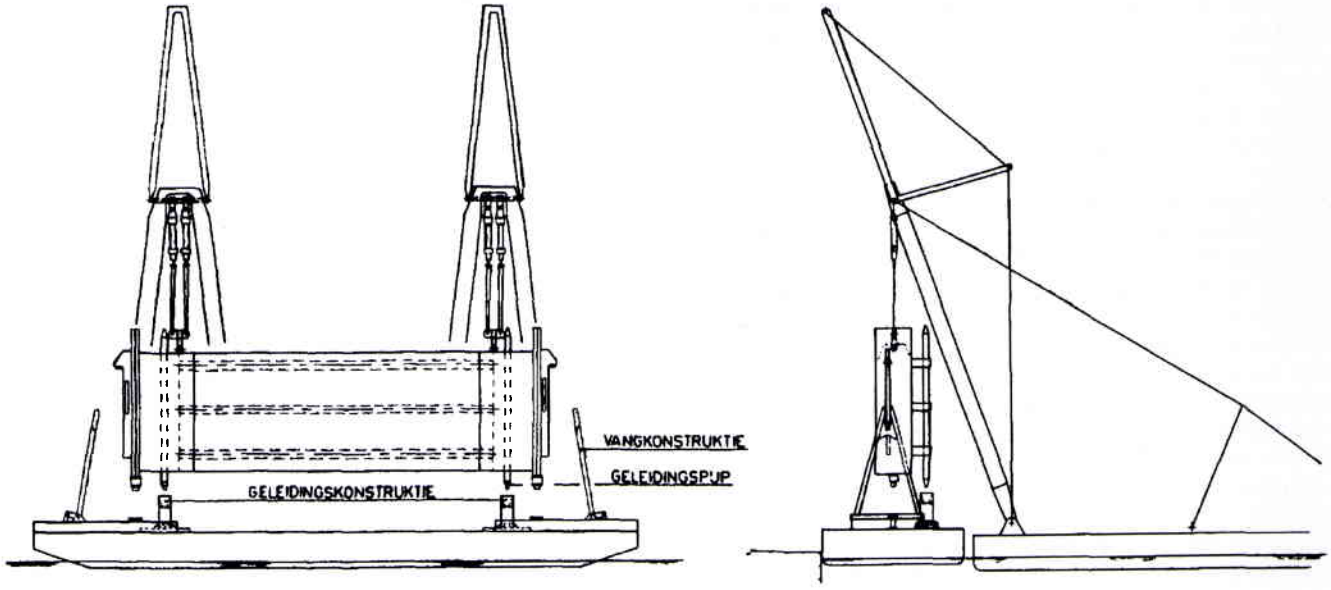
De schuiven zijn aangevoerd op speciaal ingerichte transportpontons van de samenbouwlocatie in Zwijndrecht naar de Oosterschelde. Al op de samenbouwlocatie zijn de schuiven voorzien van alle montagehulpmiddelen, zie figuur 7.1. Deze hulpmiddelen bestaan uit trappen en bordessen in de eindkoker, een paar dubbele



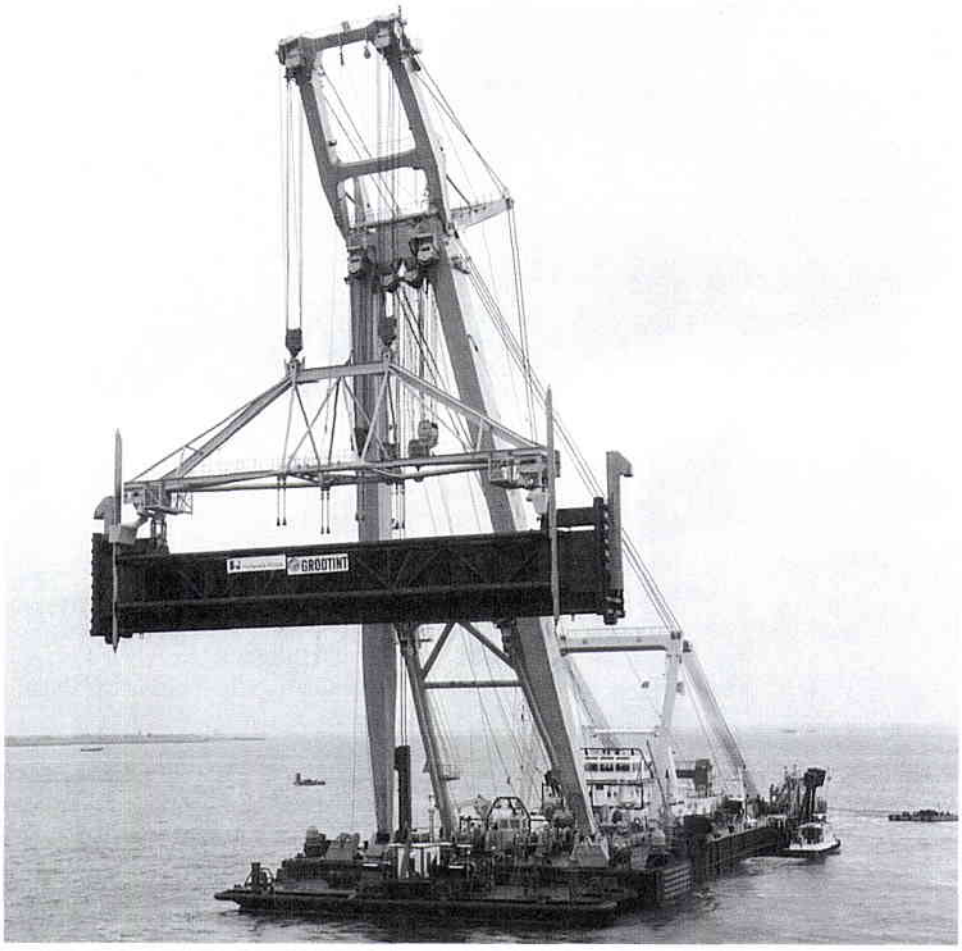
Figuur 7.1 Montagehulpmiddelen aan schuif

geleidingspijpen (de zgn. potloden) die aan de Noordzeezijde van de eindkokers daar zowel boven- als onderuitsteken, en ophanghaken die aan de sponningzijde van de eindkokers zijn bevestigd. De ophanghaken worden zowel gebruikt voor transport als voor de montage op de kering. Alle montagehulpmiddelen zijn met boutverbindingen bevestigd. Het gewicht van de montagehulpmiddelen bedraagt 40 ton voor de grootste schuiven.

Op de transportpontons zijn speciale A-frames gebouwd waarin de schuif met de ophanghaken komt te hangen. Het plaatsen van een schuif op een transportponton bij de samenbouwlocatie vond plaats met twee bokken. Tijdens het plaatsen van een schuif op een ponton wordt de schuif door de potloden, het deel dat onder de eindkoker uitsteekt, en trechtervormige vangconstructies op het ponton gecentreerd. De onderaanslagen blijven tijdens het plaatsen van een schuif op een transportponton vrij van het dek (figuur 7.2). Pas als de schuif in de A-frames geborgd is wordt met vijzels tussen het dek van de ponton en de onderaanslagen de schuif vastgezet. Per transportponton kan één schuif vervoerd worden, er waren tijdens de bouw drie transportpontons beschikbaar.



Figuur 7.2 Schuif op transportponton

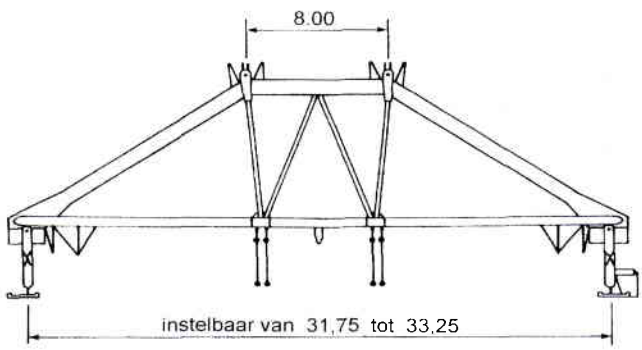


Figuur 7.3 Taklift 4 met schuif

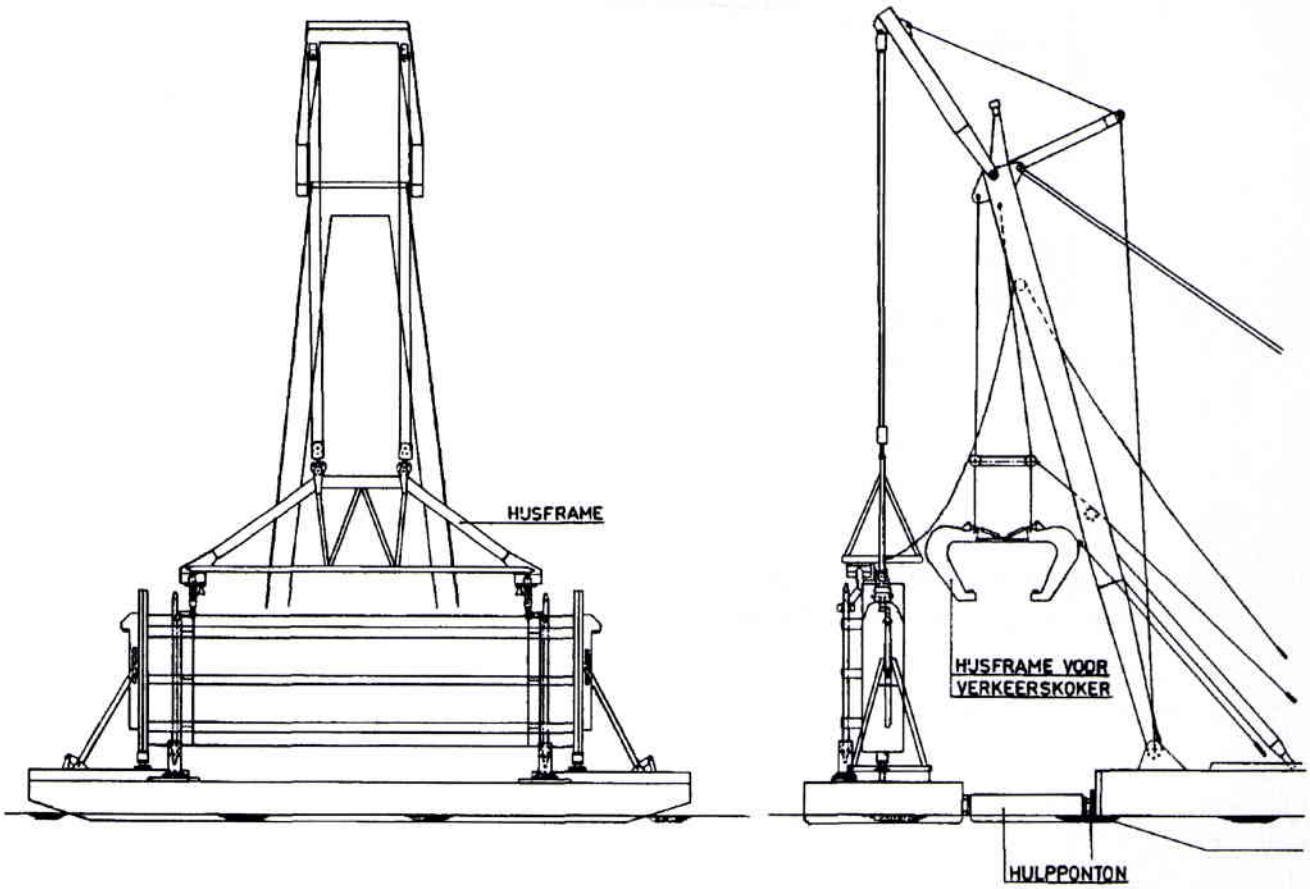
De montage van de schuiven heeft plaatsgevonden met de drijvende bok Taklift 4 (figuur 7.3). De Taklift 4 is ook gebruikt voor het plaatsen van de andere geprefabriceerde elementen van de kering (uitgezonderd de pijlers), zie voor een uitgebreide beschrijving van de Taklift 4 ontwerpnota 5 "Hulpsystemen en -werktuigen". De bouwdokken voor de betonnen elementen waren aan de Oosterscheldezijde van de kering gelegen. De betonnen verkeerskokers, dorpelbalken en bovenbalken zijn dan ook van de Oosterscheldezijde van de kering aangevoerd en geplaatst. Indien plaatsing van de schuiven plaats zou hebben gevonden via de Noordzeezijde van de kering, zou er een ontoelaatbaar tijdverlies in de planning optreden door het heen en weer varen van de Taklift 4. Dit omdat de plaatsingswerkzaamheden van de schuiven, de bewegingswerken en de betonnen elementen in de verschillende sluitgaten simultaan plaatsvond. Om te voldoen aan de eis van een tijdige oplevering was het dus noodzakelijk de schuiven te plaatsen vanaf de Oosterscheldezijde. Omdat de verkeerskokers al op de pijlers aanwezig waren moest de schuif door de drijvende bok hier overheen getild worden. Voor het hijsen van de schuiven was de Taklift 4 daarom voorzien van een extra toptakel. Het maximaal hefvermogen van de toptakel was 600 ton, de zwaarste te plaatsen schuiven wogen 520 ton, inclusief montagevoorzieningen, en het hijsframe had een gewicht van 60 ton. De sprei van de toptakel bij de maximale belasting bedroeg 31 m.

De drijvende bok was voorzien van een speciaal hijsframe dat zodanig ontworpen was dat ook de hamerstukken en de cardanbalken met de hefcilinders ermee gehesen konden worden (figuur 7.4). Omdat de schuiven in lengte verschillen, ze zijn per doorstroomopening op maat gemaakt, zijn de hijspunten van het hijsframe in lengterichting verstelbaar. Hierdoor konden de schuiven altijd verticaal gehesen worden, wat oneigenlijke belasting van de montage-hijsogen in de beplating van de eindkoker voorkomt.

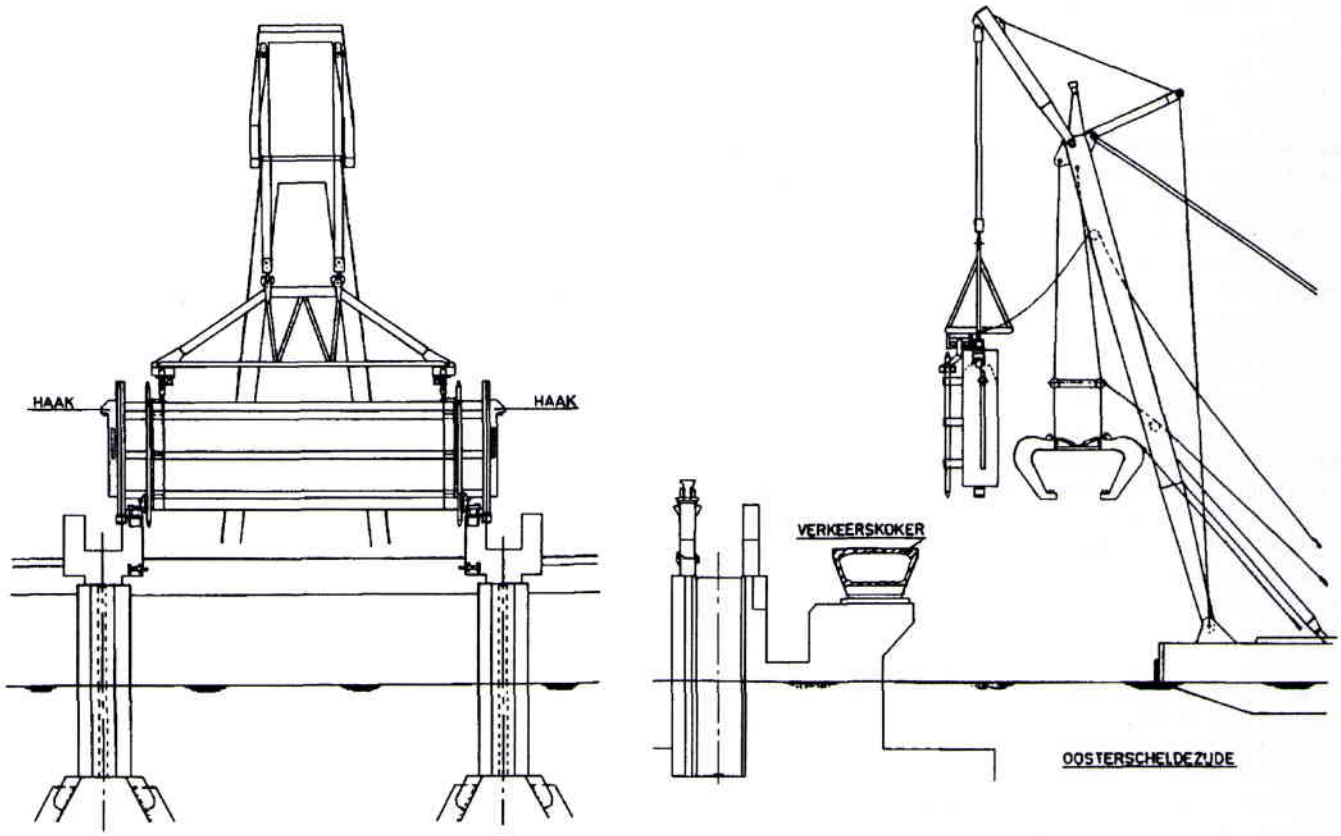
Het plaatsen van de schuiven heeft altijd plaatsgevonden rond de laagwaterkentering omdat golfslag en deining bij de laagwaterkentering geringer zijn dan bij de hoogwaterkentering. Op het moment dat de ebstroom afnam tot minder dan 1 m/s werd een transportponton met gereedstaande schuif voor de bok gebracht. Voor de bok was een speciaal hulpponton bevestigd om de tussenafstand



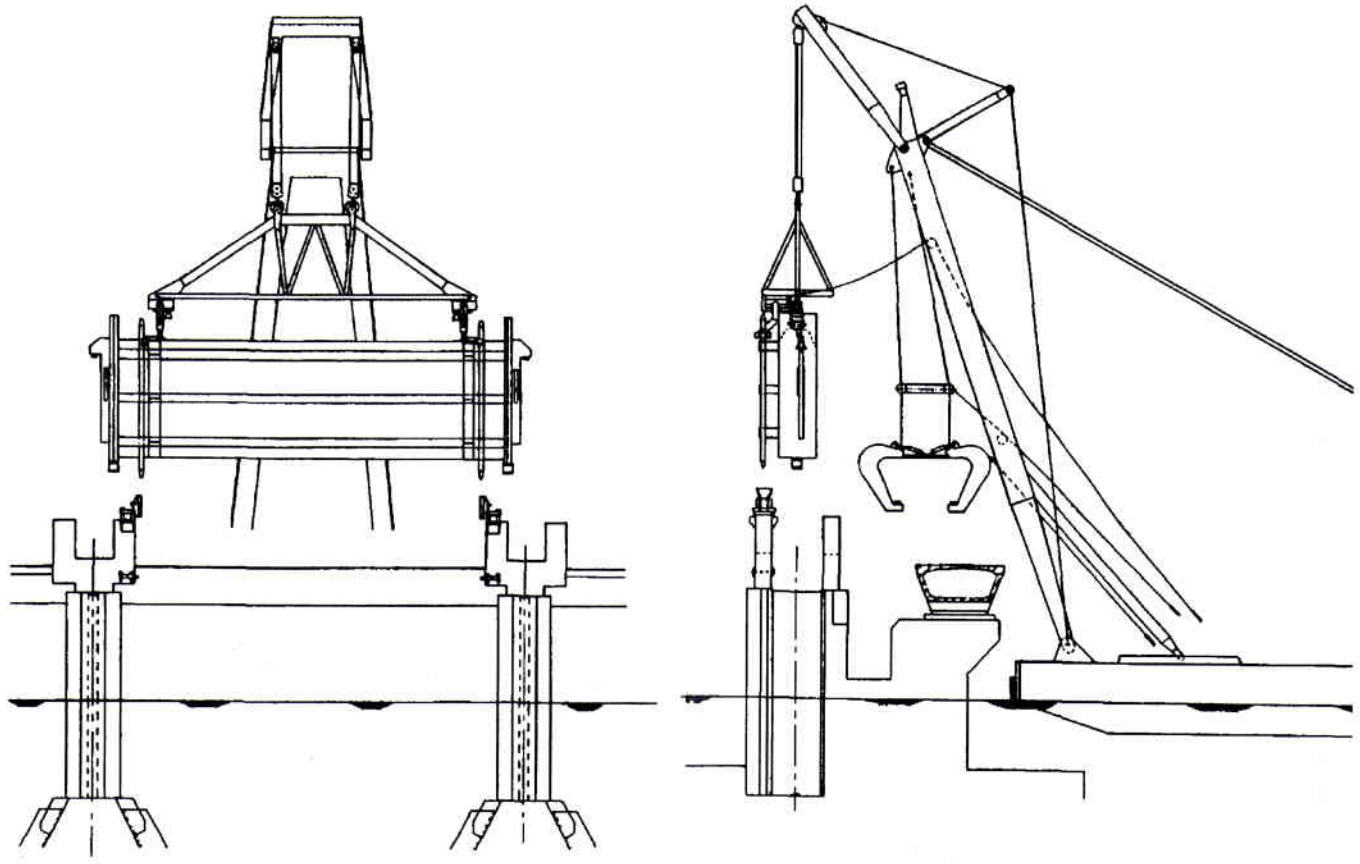
Figuur 7.4 Universeel hijsframe schuiven



Figuur 7.5 Oppakken schuif met Taklift 4



Figuur 7.6 Varen naar kering



Figuur 7.7 Schuif positioneren

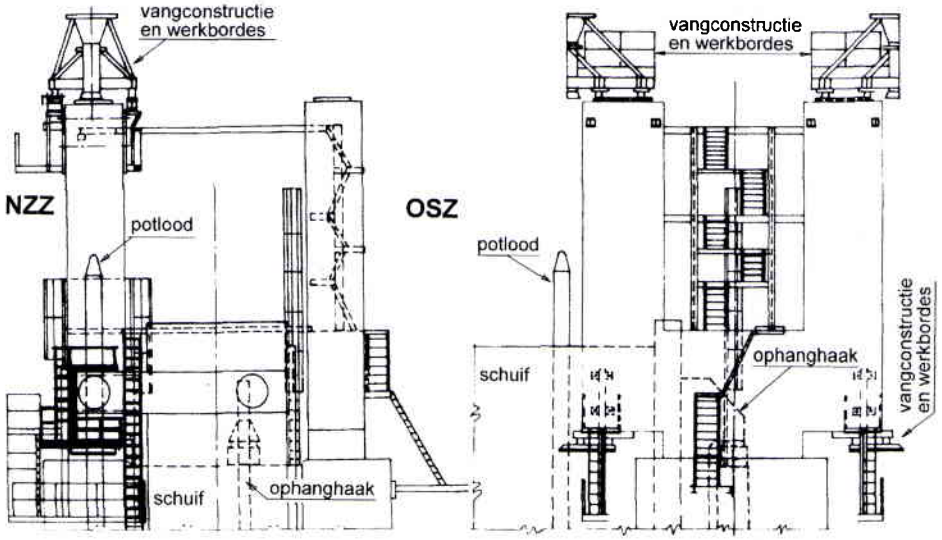
tussen transportponton en bok constant te houden. De constante tussenafstand vergemakkelijkte het oppakken van de schuif met de bok (figuur 7.5). Bij het oppakken bedraagt de sprei van de bok 20 m.

Aan het hijsframe bevinden zich vangen die over het deel van de potloden dat boven de eindkoker uitsteekt vallen en zodoende het hijsframe in de juiste positie boven de schuif brengen. Voor het inbrengen van de pennen in de hijsogen die de schuif koppelen aan het hijsframe zijn vijzels aanwezig. Als de schuif bevestigd is aan het hijsframe wordt ze eerst 0,5 m gehesen om de borging aan het transportponton los te koppelen. Middels de geleidingspijpen in de vangconstructies op het dek van het ponton blijft de horizontale positie van de schuif gefixeerd. Als de borging aan het transportponton los is wordt de onderzijde van de schuif direct gehesen tot 19 à 20 m boven de waterspiegel, een hoogte ruim boven het hoogste punt van de verkeerskoker en de hamerstukken (figuur 7.6). Tegelijk worden beide pontons (transportponton en hulpponton) afgekoppeld van de bok. Het oppakken van een schuif door de bok vindt plaats op een afstand van 200 m voor de kering. De afstand van 200 m tot de kering wordt door de bok op eigen kracht afgelegd, voor de veiligheid blijft de bok wel verbonden met twee standby aanwezige sleepboten.

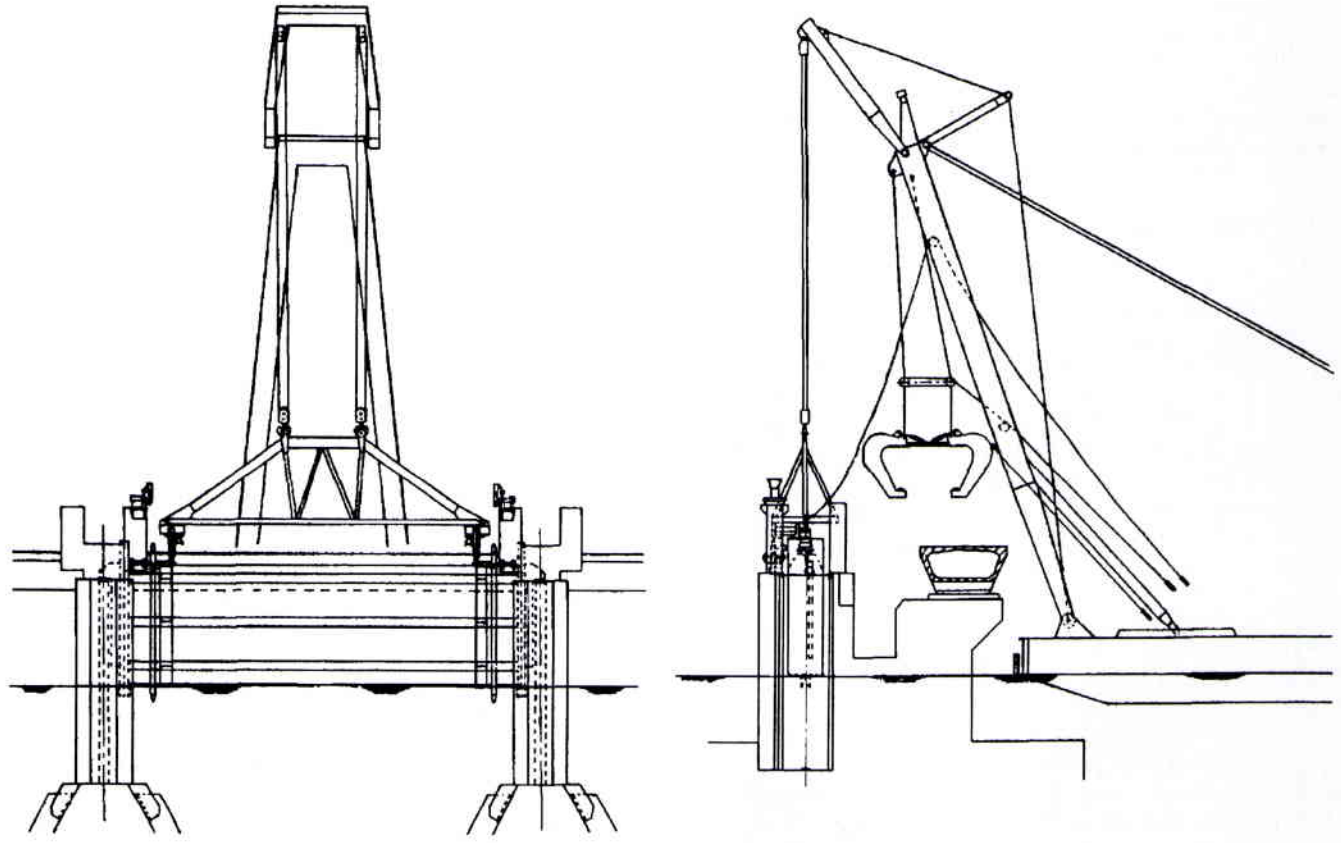
Als door de bok de schuif over de verkeerskoker boven de hamerstukken wordt gebracht neemt de sprei toe tot 23 m. Ter plaatse van de kering wordt de schuif met de aan de onderzijde uitstekende kant van de potloden gepositioneerd in vangconstructies aan de hamerstukken (figuur 7.7). De vangconstructies aan de hamerstukken zijn dubbel uitgevoerd. Eén grote vangconstructie bevindt zich op een hamerstuk, een tweede, kleinere vangconstructie bevindt zich aan de onderzijde daarvan (figuur 7.8). Hierdoor is het mogelijk de schuif de juiste positie én de juiste richting in een sponning te geven. Dit omdat er niet van uitgegaan mag worden dat twee naast elkaar gelegen pijlers eenzelfde scheefstand hebben. Bij een scheefstandsverschil tussen twee pijlers zal een theoretisch, vlakke schuif getordeerd moeten worden om deze te kunnen monteren. Om de schuif in de stand van de pijler in te brengen is het derhalve noodzakelijk de potloden te richten en te geleiden, wat gebeurt door het toepassen van de dubbele vangconstructie.

De eindkokers van de schuiven zijn voor de montage van een ophanghaak voorzien. Tijdens transport zijn deze haken gebruikt om de schuif in de A-frames op het transportponton te hangen, maar de primaire functie van de ophanghaken was om de schuif op te hangen aan de bovenzijde van de pijlers ter plaatse van de sponning (figuur 7.9). De haken aan de eindkokers konden pas verwijderd worden nadat de hydraulische cilinders waren aangesloten.

Het oppakken van een schuif van de ponton door de bok, de 200 m naar de kering varen en het plaatsen van de schuif duurt 3 à 4 uur. Inclusief voorbereidende werkzaamheden en het verhalen van de bok voor de volgende doorstroomopening duurt een plaatsingscyclus 12 uur [7.5]. De montage van de schuiven is afgewisseld met de montage van de bewegingswerken. Achtereenvolgens werden drie schuiven geplaatst en daarna zes bewegingswerken. De dagen benodigd voor het plaatsen van de bewegingswerken werd benut om de hulpconstructies op de schuiven en de pijlers te demonteren voor hergebruik bij de volgende te plaatsen schuiven.



Figuur 7.8 Vangconstructies op hamerstuk



Figuur 7.9 Schuif inhangen op haken

7.4 Onderhoud

Onderhoud van de schuiven bestaat in hoofdzaak uit onderhoud van het conserveringssysteem en in mindere mate uit onderhoud aan de staalconstructie zelf. Het conserveringssysteem wordt door omgevingsinvloeden als temperatuur, UV-licht, stromend water en wind aangetast waardoor het zijn beschermende functie verliest. De staalconstructie kan bij verminderde bescherming, of afwezigheid, van de conservering onder invloed van de omgevingsomstandigheden gaan corroderen. Daarnaast wordt de staalconstructie, als de kering in gebruik is, door de golf- en vervalbelastingen op vermoeiing belast. Inspectie van de schuiven vindt plaats met een speciaal daartoe ontwikkeld voertuig, zie hiervoor deelnota 7. Met dit voertuig is het ook mogelijk lokaal, en met beperkte hulpmiddelen, reparaties aan de conservering en de staalconstructie uit te voeren. Vanwege praktische redenen (weersomstandigheden) vindt inspectie en onderhoud voornamelijk plaats gedurende de zomermaanden.

Voor het herstel van de conservering op grote schaal is het inspectievoertuig niet geschikt. Dit zgn. 'groot onderhoud' van een schuif kan goedkoper en beter gebeuren door grootschaliger te werken. Hiertoe zijn twee uitvoeringsmethoden onderzocht, te weten;
1. schuiven volledig verwijderen
2. onderhoud op locatie

Voor beide uitvoeringsmethoden geldt dat de beschikbaarheid van de kering aan de gestelde jaarlijkse faalkans van $2{,}5 \times 10^{-4}$ dient te blijven voldoen. Dit houdt in dat een jaarlijkse buitengebruikstelling van 4 schuiven toelaatbaar is, zie ook Boek 1, deelnota 2 en deelnota 5. In aanvulling hierop zijn faalkansberekeningen gemaakt die niet uitgaan van een periode van 1 jaar, maar onderscheid maken tussen het zomerseizoen (april-september) en het stormseizoen (oktober-maart). Met dit onderscheid is het mogelijk in het zomerseizoen nog aan de gestelde faalkans te voldoen bij een buitengebruikstelling van 8 schuiven [7.6]. Verschil tussen beide uitvoeringsmethoden is gelegen in de beschikbaarheid van de schuif en de mogelijkheden van conservering van de eindkokers en schaalbeplating onder de onderste vakwerkligger.

Ad1.
Het verwijderen van een volledige schuif heeft naast hoge kosten ook een verminderde bedrijfszekerheid van de kering tot gevolg. Dit onderhoudsalternatief is daarom niet verder onderzocht in de ontwerpfase. In 1994 is bij wijze van proef schuif Roompot 2 (schuifhoogte 6,9 m) gedemonteerd en in een straal- en verfloods op de wal volledig geconserveerd [7.7]. De afwezigheid van een schuif gedurende de zomerperiode, wanneer de kans op het voorkomen van een stormvloed klein is, vermindert de veiligheid van de kering niet noemenswaardig. Deze methode van conservering heeft geen vervolg gekregen vanwege de aanzienlijke kosten van (de)montage en transport. De demontage van een schuif, en later weer de montage, zijn ingewikkelde operaties die een nauwkeurig draaiboek en specifieke kennis over het stromingsbeeld rond de Oosterscheldekering vereisen. Bij het incidenteel (de)monteren van een schuif voor conservering treden geen leer-effecten en/of schaalvoordelen op zoals ten tijde van de bouw van de kering, toen in een aaneengesloten periode 62 schuiven geplaatst zijn.

Ad2.
Bij onderhoud op locatie zijn twee varianten onderzocht. Onderhoud kan plaatsvinden in de 'normale' geheven stand en onderhoud kan plaatsvinden in een opgevijzelde stand. Beide varianten gaan ervan uit dat rond de schuif een afgeschermde, tijdelijke werkruimte gebouwd wordt waarbinnen de conserveringswerkzaamheden plaatsvinden. Bij deze methode van onderhoud op locatie spelen de volgende aspecten een belangrijke rol:

- Beperking milieuoverlast
  De milieuoverlast die bij het conserveren van een schuif ontstaat zal tot een minimum beperkt moeten worden. Verfafval en straalgrit mogen niet in het leefmilieu van de Oosterschelde terechtkomen. Werkzaamheden moeten in afgeschermde ruimten plaatsvinden.
- Natuurrandvoorwaarden
  De natuurrandvoorwaarden die bij het onderhoud optreden zijn golf- en windbelastingen. De schuiven staan in de geopende



Figuur 7.10 Onderhoud schuif in opgevijzelde toestand

stand zodanig hoog geparkeerd dat golven alleen bij zware storm tot de onderzijde van de constructie reiken. Omdat zich onder de schuif een opvangconstructie bevindt voor verfresten en straalgrit kan deze opvangconstructie bij hoge waterstanden en stormcondities belast worden door golfklappen. Om te voorkomen dat de afschermconstructie gedimensioneerd moet worden op de extreem zware belastingen door wind en golfklappen is ervoor gekozen alleen groot onderhoud aan de schuiven te plegen buiten het stormseizoen.

- Bedrijfszekerheid van de kering
  Omdat de bedrijfszekerheid van de kering ook bij groot onderhoud niet in gevaar mag komen is het aantal schuiven dat tegelijk onderhouden kan worden beperkt. De keuze buiten het stormseizoen te conserveren betekent dat bij eenzelfde bedrijfszekerheid van de stormvloedkering meer schuiven tegelijk geconserveerd kunnen worden.

Het verschil tussen beide varianten van onderhoud op locatie is gelegen in de gevoeligheid voor de natuurrandvoorwaarden en de bedrijfszekerheid. Bij onderhoud in de normale geheven stand blijft het bewegingswerk aan de schuif gekoppeld waardoor de schuif altijd beschikbaar is. Bezwaar van onderhoud in de normale geheven stand is dat de constructies onder het niveau van de onderste vakwerkligger (een deel van de eindkoker en een deel van de schaalbeplating) niet goed bereikbaar zijn en niet goed geconserveerd kunnen worden. De laagste delen van de schuiven bevinden zich in de normale geheven toestand op N.A.P.+2.40 m en lopen daarom kans, ook in de zomerperiode, nat te worden. Een eventuele afschermingconstructie om de onderzijde van de schuif droog te houden zou belast kunnen worden door golfklappen.

Bij onderhoud in opgevijzelde stand worden er onder de cardanbalken speciale opzetstoelen van 3 m hoogte aangebracht zodanig dat de onderzijde van de schaalbeplating, als laagste punt van de schuif, op N.A.P.+5.40 m komt te liggen (figuur 7.10). Door de hoge positie van de schuif bevinden de eindkokers zich ter plaatse van de verjonging van het lijf van de pijler, en zijn ze goed bereikbaar voor conservering, en is ook het onderste deel van de schaalbeplating beter bereikbaar. Een nadeel van het opvijzelen zijn de extra kosten die eraan verbonden zijn en de verminderde beschikbaarheid van de schuif. Een opgevijzelde schuif kan niet gesloten worden [7.8].

8. Documentatie

[1.1]	Eindrapport Stormvloedkering Oosterschelde, de zgn. 'Blauwe nota'	
[2.1]	Belastingen stormvloedkering Oosterschelde	nota 6PROBU-86056
[2.2]	Belastingen stormvloedkering Oosterschelde	*verzamelrapport* DDWT-nota's 6PROBU-86056
[2.3]	Belastingen tijdens sluiten	notitie DDWT-79.368
[2.4]	Golf- en vervalbelasting vakwerkschuiven gesloten situatie	notitie DDWT-80.411
[2.5]	IJsvorming en ijsbeweging 'open' Oosterschelde	nota W-76.033
[2.6]	Oosterscheldekering vastvriezen schuiven	notitie 6PROBU-M-83008
[2.7]	IJsbelasting op schuif en bovenbalk	notitie DDWT-80324
[2.8]	Oosterscheldekering bewegingstest ivm ijsafzetting	notitie 6PROBU-M-87003
[3.1]	Ontwerp schuiven en balken en hydr. aspecten	rapport mei 1978
[3.2]	Schuifontwerp met vakwerkliggers	notitie 6PROBU-M-78079
[3.3]	Vgl. plaatliggerschuif met vakwerkschuif	notitie 6PROBU-M-80032
[3.4]	Ontwerpwijzigingen schuiven	notitie 6PROBU-M-80159
[4.1]	Onderbouwing veiligheidscoëfficiënten	nota SOOCOO-N-79364
[4.2]	Verticale golfbelastingen vakwerkschuiven	rapport WL M1723/M1687
[4.3]	Verticale belastingen vakwerkschuiven sluiten/openen	notitie DDWT-80.489
[4.4]	Berekening toegevoegde watermassa schuiven	rapport TNO-IWECO 5061060
[4.5]	Dynamic analysis steel gates Oosterschelde storm surge barrier	artikel congres "Modeling and simulation of large-scale structural systems" Capri 1984
[4.6]	Conditiebewaking Oosterscheldekering	rapport CONDITS-R-96010
[5.1]	Stabiliteit schaalbeplating	berekening 96196/B.SS/NIS
[5.2]	Stompberekening	berekening 96193/B.SS/NIS
[5.3]	Stompberekening	berekening 96194/B.SS/NIS
[5.4]	Eindkoker- en kramberekening	berekening 96218/B.SS/NIS
[5.5]	Berekening knieschotten eindkokers	berekening 96220/B.SS/NIS
[5.6]	Levensduur hoofddraagsysteem	notitie 6PROBU-M-82094
[5.7]	Onderzoek spanningsconcentratiefactoren	notitie 6PROBU-M-80144a
[5.8]	Stress concentration factors at K- and KT-tubular joints	A.C. Wordsworth, 1981
[5.9]	Modelonderzoek knooppunten	rapport TNO-IBBC B-81-123
[5.10]	Rekconcentratiefactor knooppunten	rapport TNO-IBBC B-81-352
[5.11]	Spanningsberekening T-verbinding	rapport TNO-IBBC B-85-420
[5.12]	Spanningsberekening KT-verbinding	rapport TNO-IBBC B-85-488
[5.13]	Spanningsconcentratiefactoren	rapport TNO-IBBC B-85-527
[5.14]	Vermoeiingssterkte lasverbindingen	notitie 6PROBU-B-83081
[5.15]	Guidance on some methods for the derivation of acceptance levels for defects in fusion welded joints	Published Document 6493 British Standards Institution 1980
[5.16]	Bepaling toelaatbare defectgrootte ivm bros breken	rapport MI-TNO 84M/35/03626/AVE/MSL
[5.17]	Schrijven ontwerpnota Oosterscheldekering	boek4 LOOR/1998-2002/ztm
[6.1]	Materiaalonderzoek buisprofielen	notitie 6PROBU-M-85012
[6.2]	Materiaalproblematiek	notitie 6PROBU-M-85048a
[6.3]	Vermoeiingsscheurgroei buisverbindingen staal met lage COD	rapport MI-TNO 85M/04874/TIC/RAN
[6.4]	Functie, constructie en materiaal	artikel "Bouwen met staal" nr.76, juni 1986
[6.5]	Materiaalproblematiek	*notitie* 6PROBU-M-85125a
[6.6]	Overzicht warmgewalste staven	rapport 6PROBU-85173
[6.7]	Uitbreiding materiaalonderzoek	notitie 6PROBU-M-85049
[6.8]	Onderzoek niet-destructieve behandelingsmethoden	artikel "Bouwen met staal" nr.76, juni 1986
[6.9]	Spanningsarm gloeien schuif S4	rapport MI-TNO 85M/33/012121
[6.10]	Invloed peenen vermoeiingsgedrag	rapport TNO-IBBC B-85-593
[6.11]	Vermoeiing gelaste buisverbinding	rapport TNO-IBBC B-85-625
[6.12]	Vermoeiing gelaste/geslepen plaatverb.	rapport TNO-IBBC B-87-273
[6.13]	Belastingspectrum voor random vermoeiingsproef	rapport TNO-IBBC B-87-601
[6.14]	Vermoeiing geslepen buisverbinding	rapport TNO-IBBC B-89-146
[6.15]	Beoordeling breuktaaiheidseigenschappen buismateriaal gelaste knooppunten	artikel "Bouwen met staal" nr.76, juni 1986

[6.16]	Eindbeslissing Rijkswaterstaat	artikel "Bouwen met staal" nr.76, juni 1986
[6.17]	Lasteenverbetering, slijpmethodiek	notitie 6PROBU-M-85140
[6.18]	Materiaalproblematiek schuiven	notitie 6PROBU-M-85132
[6.19]	Selectie en optimalisatie NDO voor lasverbindingen	notitie 6PROBU-M-85148
[7.1]	Conservering schuiven	notitie 6PROBU-M-88001
[7.2]	Hoofdstuk voorzieningen, conservering	handboek Oosterscheldekering
[7.3]	Rapport schadeprognose schuiven	PBOK.SPO-4-95068
[7.4]	Evaluatie conserveringssysteem	notitie 6PROBU-N-90005
[7.5]	Plaatsing van schuiven en bewegingswerken	3-maandelijkse berichten nr.113
[7.6]	Aantal gelijktijdig te conserveren schuiven	memo BNW-M-96022 / BSE-M-96004
[7.7]	Conserveren schuif Roompot 2	berekening 96255/B.SS/NIS
[7.8]	Evaluatie werkmethoden onderhoud	memo PB-N-93.103

Deelnota 4: Schuifgeleidingen

Inhoud

1.	**Inleiding**	pagina **122**
2.	**Uitgangspunten en ontwerpeisen**	**124**
2.1	Breedte en positie schuifgeleiding	
2.2	Materiaalkeuze schuifgeleiding	
2.3	Werking schuifaanslagen	
2.4	Werking zijaanslagen	
3.	**Onderzoek**	**128**
3.1	Materiaalonderzoek schuifgeleidingen	
3.2	Materiaalonderzoek ondersabelingsmortel	
3.3	Rubberpakketten schuifaanslagen	
4.	**Schuif- en zijgeleiding**	**132**
4.1	Materiaal schuif- en zijgeleiding	
4.2	Ontwerp schuifgeleiding	
4.3	Ontwerp zijgeleiding	
5.	**Schuifaanslagen**	**136**
5.1	Verdeling rubberpakketten	
5.2	Nokken schuifaanslagen	
5.3	Schraper	
6.	**Zijaanslagen**	**141**
6.1	Belasting zijaanslagen	
6.2	Ontwerp zijaanslagen	
6.3	Vermoeiing zijaanslagen	
7.	**Onderaanslagen**	**146**
8.	**Montage en sponningkuip**	**148**
8.1	Montage verankeringsconstructie	
8.2	Aanbrengen epoxymortel	
8.3	Sponningkuip	
9.	**Documentatie**	**150**

1. Inleiding

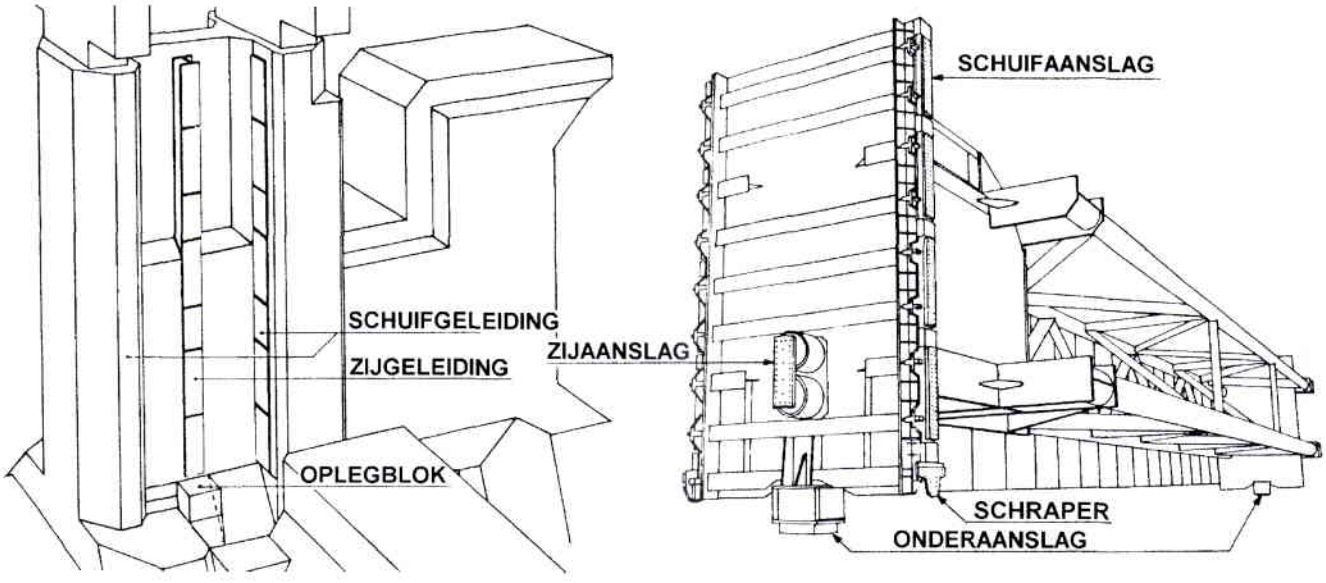
De schuifgeleiding vormt het verbindende element in de krachtsoverdracht van de stalen schuiven naar de betonnen pijlers. Golf- en vervalbelastingen op de schuiven worden door aanslagen op de eindkokers overgebracht op geleidingen in de sponningen van de pijlers (figuur 1). Tevens zorgt de schuifgeleiding voor het geleiden van de schuif tijdens het sluiten en openen. De beide functies (overdracht van belasting en geleiding) zijn in één constructie ondergebracht.

Bij de beschrijving van de schuifgeleidingen zal de volgende terminologie gebruikt worden;

- Aanslag = constructie van staal, rubber en kunststof op een eindkoker van een schuif die via contactdruk belastingen overbrengt naar een glijplaat in de sponning van de pijler. Te onderscheiden zijn per eindkoker de schuifaanslagen voor golf- en vervalbelasting, een zijaanslag en een onderaanslag. In engere zin wordt het woord aanslag ook gebruikt voor de kunststof strippen die door contactdruk de belasting afgeven aan de glijplaten van de schuifgeleiding.
- Schraper = onderste element van de schuifaanslagen, speciaal vormgegeven om bij het sluiten van de schuiven aangroei van de schuifgeleiding af te schrapen. De breedte van de schrapers is gelijk aan de breedte van de glijplaten tussen de gaten van de bevestigingsbouten minus de bewegingsruimte van de schuif in lengterichting.
- Glijplaat = oplegvlak op de pijler waarover een aanslag kan bewegen en die door contactdruk de belasting uit de aanslag opneemt. Glijplaten zijn een onderdeel van de schuif- en zijgeleiding.
- Schuifgeleiding = geheel van glijplaten, epoxyondersabeling en verankeringsconstructies in de sponning van de pijler, meer in het bijzonder wordt deze aanduiding gebruikt voor de geleiding aan de Noordzee- en Oosterscheldezijde van de sponning die de krachten uit golf- en vervalbelasting overdraagt aan de pijler.
- Zijgeleiding = geheel van glijplaten, epoxyondersabeling en verankeringsconstructies op de schacht van de pijler, toegepast voor de krachtsoverdracht en geleiding in lengterichting van de schuif.

Omdat de Stormvloedkering is uitgevoerd met hefschuiven bestaat de beweging van de 'transformatiefunctie' uit een verticale translatie (zie boek 1, deelnota 2, hoofdstuk 2, 'functionele analyse'). In principe kan de geleiding van deze beweging verzorgd worden door zowel loopwielen, als door schuifaanslagen. Vanwege de grote, lokaal optredende, belastingen bij toepassing van loopwielen, en vanwege het aanzienlijke ruimtebeslag van een constructie met loopwielen is al vroeg in de ontwerpfase gekozen voor schuifaanslagen met geleidingen op de pijler.

Het doel van de schuifgeleidingen is tweeledig; enerzijds vormen de geleidingen de opleggingen waaraan de schuif de golf- en vervalbelastingen dient af te geven, anderzijds dienen de geleidingen



Figuur 1 Overzicht geleidingen en aanslagen

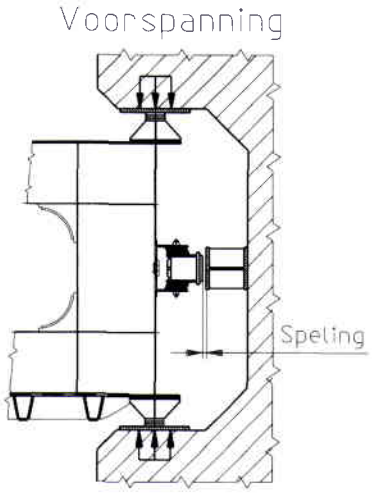
de bewegende schuif onder zo gering mogelijke wrijvingskrachten te geleiden. Dit laatste om tijdens openen en sluiten van de kering de vanuit het bewegingswerk benodigde krachten te beperken.

Op de eindkokers van de schuiven zijn aan de Noordzee- en de Oosterscheldezijde aanslagen aangebracht voor de overdracht van de belastingen. Op de kopse kanten van de eindkokers bevinden zich aanslagen voor de zijgeleiding van de hefschuiven. Tegenover elk van de aanslagen bevindt zich in de sponning een glijplaat. De aanslagen zijn tussen de schuifgeleidingen voorgespannen, waardoor de verplaatsingen van de hefschuif in die richting sterk gelimiteerd zijn. De zijaanslagen zijn niet, of in geringe mate, voorgespannen. Door eventuele zetting van de pijlers kan de speling in lengterichting groter of kleiner worden. Binnen bepaalde grenzen kan een hefschuif in lengterichting vrij bewegen.

In de navolgende hoofdstukken worden de eisen geformuleerd waaraan de schuifgeleiding en de aanslagen tijdens de bouw en in het gebruik moeten voldoen. Vervolgens wordt het uitgevoerde onderzoek t.b.v. de materiaalkeuze beschreven. Daarna zal de constructie van de verschillende glijplaten en aanslagen beschreven worden. Hieronder vallen ook de onderaanslagen van de hefschuiven, die geen geleidende functie hebben, maar bij een gesloten kering wel verticale krachten overdragen van de schuiven naar de pijlers. De deelnota besluit met de montage en uitvoeringsmethodiek van de schuifgeleidingen.

2. Uitgangspunten en ontwerpeisen

De schuiven van de Stormvloedkering vormen, evenals de bruggiggers, een verbindend element tussen de onafhankelijk van elkaar gefundeerde pijlers. Door de gestapelde bouw van de gehele Stormvloedkering speelt de nauwkeurigheid van plaatsing, en de maatvoering van de elementen een zeer belangrijke rol, zie boek 3, deelnota 1, hoofdstuk 6 'maatafwijkingen en toleranties'. Onder tolerantie wordt de toegestane afwijking van de ideale positie verstaan; maatafwijkingen van elementen dienen binnen de gestelde toleranties te liggen. Speling is vrije ruimte waarbinnen een element elke positie aan kan nemen. Een schuif heeft alleen in lengterichting, tussen de zijgeleidingen, speling (figuur 2).

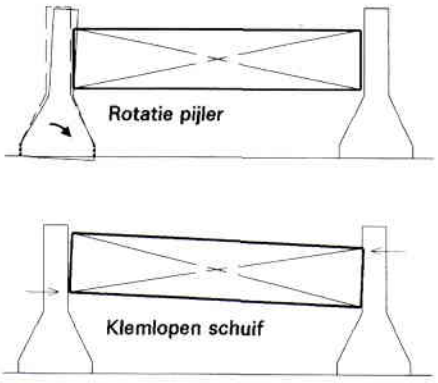


Figuur 2 Speling geleidingen

Uitgangspunt voor het schuifontwerp is dat afwijkingen in de stand van de pijlers voor montage van de schuiven nog gecompenseerd konden worden in het ontwerp door de mogelijkheid open te houden de schuiven langer of korter te fabriceren (zie deelnota 3). Ongelijkmatige zettingen van de pijlers ná het aanbrengen van de schuiven moeten door speling kunnen worden opgenomen. Torsie van een schuif door ongelijkmatige zettingen van de pijlers kan zonder grote spanningstoename in de schuif, en pijler, opgenomen worden.

Uitgangspunt bij de bepaling van de noodzakelijke toleranties in lengterichting is de dat schuif niet mag klemlopen. De bewegingswerken en de schuifconstructie zijn van een zodanige sterkte dat ze bij klemlopen in staat zijn de pijlerwand kapot te drukken, of de pijler om te drukken. Klemlopen van een schuif kan ontstaan door ongelijkmatige zettingen van de pijlers of extreme scheefstand van een schuif (figuur 3).

De kans hierop dient zodanig klein te zijn dat de kerende functie van de volledige Stormvloedkering hierdoor niet in gevaar komt.



Figuur 3 Klemlopen schuif

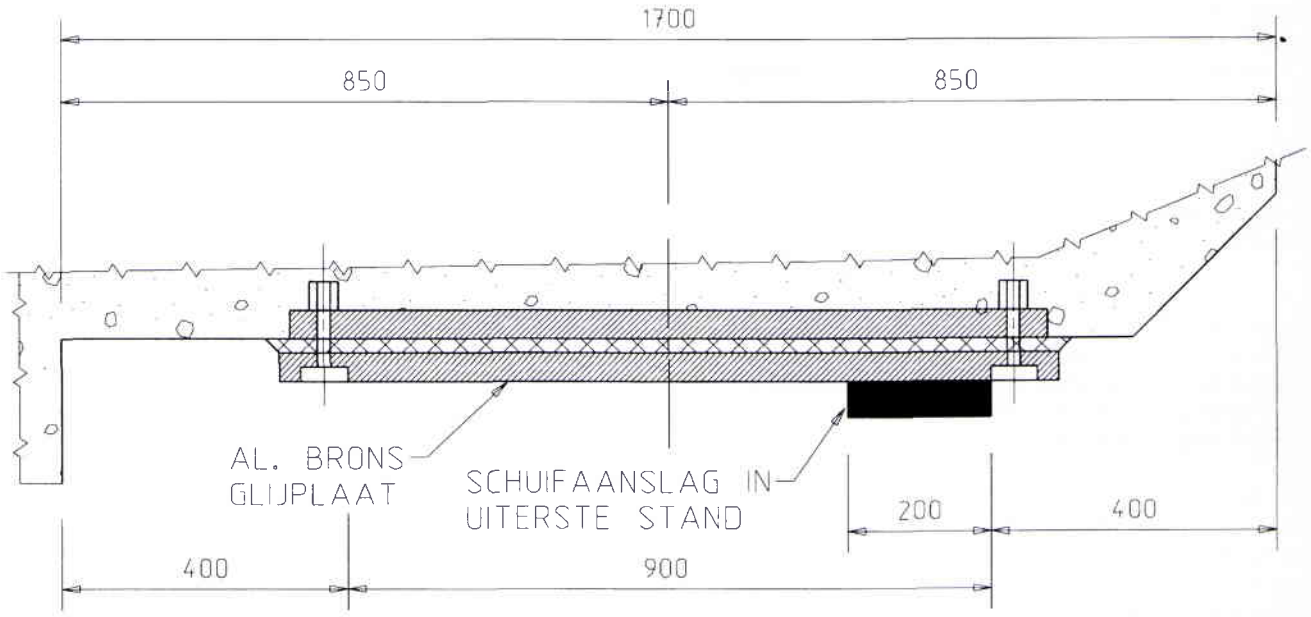
Uit de kans van optreden van zettingen zijn de te verwachten verplaatsingen terug te rekenen. Dit uitgangspunt bij het ontwerp heeft geresulteerd in de diepte van de sponning van 1,7 m en een zodanige hoogteligging van de zijaanslagen dat de kans op klemlopen niet aanwezig is. De eis van niet-klemlopen door scheefloop van de schuif tijdens bewegen wordt behandeld in deelnota 5.

Een uitgangspunt bij de fabricage van de schuifaanslagen is geweest dat het aanslagmateriaal pas na de fabricage van de eindkokers en het inmeten van de afstand tussen de schuifgeleidingen op maat is geschaafd en aangebracht. Hierdoor is het aanslagmateriaal van de schuifaanslagen a.h.w. het passtuk van de eindhar. De eindhar is een zwaar belast constructief onderdeel van de eindkoker waarin het moeilijk was een stelmogelijkheid in te bouwen.

Als laatste dient opgemerkt te worden dat de schuifgeleiding van de Stormvloedkering niet op het kritieke pad van het falen van de kering ligt. Ook met een beschadigde geleiding kunnen de schuiven bewogen worden.

2.1 Breedte en positie schuifgeleiding

De pijlerverplaatsingen t.g.v. zettingen moeten binnen de toleranties van de schuifgeleidingen vallen, waarbij rekening moet worden gehouden met de initiële scheefstand van de pijler. Zowel de diepte van de sponning als de breedte van de schuifgeleidingen zijn voornamelijk bepaald door de mogelijk optredende zettingen in de ondergrond en de onvlakheid van het fundatiebed bij plaatsing van een pijler [2.1]. Omdat aanzanding of uitspoeling, ook na ingebruikname, op voorhand niet voldoende nauwkeurig was te voorspellen en te corrigeren, is tijdens de bouw besloten de glijplaten van de schuifgeleiding met 100 mm te verbreden. In lengterichting van de schuif zijn de onzekerheden omtrent de pijlerverplaatsingen ondervangen in het ontwerp van de zijaanslagen, zie hiervoor hoofdstuk 2.4 en hoofdstuk 6.



Figuur 4 Randafstand glijplaat op pijler

De effectieve breedte van de glijplaten wordt bepaald door de eis dat de aanslagen alleen in extreme situaties, bij overschrijding van de ontwerpuitgangspunten, over de gaten van de bevestigingsbouten mogen glijden. Speling in lengterichting, bouwfouten en ongelijkloop van de hefcilinders veroorzaken kleine verplaatsingen van de aanslagen over de glijplaten. Grotere verplaatsingen ontstaan als de pijlers roteren door de onvlakheid van het fundatiebed bij plaatsing, of door ongelijkmatige zettingen van de pijlers in de tijd. Gevolg van de verplaatsingen is dat de schuifaanslagen en de schuifgeleidingen niet meer centrisch tegenover elkaar liggen. Met een statistische analyse van het mogelijke verloop van de zettingen is er per pijler een minimale glijplaatbreedte bepaald (boek 3, deelnota 1, hoofdstuk 6.3). Voor de dieper gefundeerde pijlers zijn, door de grotere hoogte van de sponning, bredere glijplaten nodig dan bij de ondieper gefundeerde pijlers [2.2]. Globaal is de effectieve breedte van een glijplaat 3 à 4 keer de breedte van de aanslag.

Randvoorwaarden bij de uitwerking van de glijplaatbreedte zijn de diepte van de sponning, de minimale randafstand van het beton en de vrijloop van de flens van de achterhar t.o.v. de pijlerwand. In de uiterste positie van een aanslag op een glijplaat dient de afstand tot de rand van het beton van de pijler minstens 400 mm te bedragen (figuur 4) [2.3]. De breedte van de flens van de eindhar, die 360 mm buiten de hartlijn van de aanslag steekt, vereist in samenhang met de mogelijke verplaatsingen van de pijler en de doorbuigingen van de schuif een afstand van 400 mm tot het lijf van de pijler. Van de sponningdiepte van 1700 mm resteert een maximale schuifgeleidingsbreedte van 900 mm. Een deel van de schuifgeleiding bevindt zich in randzone van het beton [2.4].

Aan de schuifgeleidingen en de zijgeleiding zijn zeer strenge eisen gesteld ten aanzien van rechtheid, parallelliteit en positionering. Rechtheid is noodzakelijk voor een gelijkmatige krachtsafdracht, parallelliteit voor een gelijkmatige voorspanning en de juiste positionering is sterktetechnisch noodzakelijk.

De eis gesteld aan de rechtheid van de schuifgeleidingen is een verloop van ten hoogste 1/1000. De eis aan de parallelliteit is een afwijking van +/-1 mm ten opzichte van de verticale referentielijn in de as van de pijler. Daarnaast mag de lijn in het midden van beide schuifgeleidingen niet meer dan +/-7 mm afwijken van de hartlijn van de sponning. De zijgeleiding moet binnen een tolerantie van +/-1 mm ten opzichte van de hartlijn van de pijler aangebracht zijn [2.5].

2.2 Materiaalkeuze schuifgeleiding

De schuifgeleiding bestaat uit de combinatie van glijplaten en schuifaanslagen. Het betreft beide elementen die vervangen kunnen worden. Hierdoor is het niet noodzakelijk de schuifgeleiding te ontwerpen op een levensduur van 200 jaar. Het is mogelijk tussentijds onderhoud aan de glijplaten te plegen door gebruik te maken van een sponningkuip (zie hoofdstuk 8). Vervangen van de glijplaten blijft evenwel een dure en ingewikkelde operatie die onder moeilijke omstandigheden moet plaatsvinden. Het vervangen van de schuifaanslagen op de schuiven is eenvoudiger uit te voeren. Om deze reden is het meest slijtvaste materiaal van de combinatie glijplaat-aanslag aan de pijler bevestigd.

De eisen die gesteld worden aan de glijplaten van de schuifgeleidingen, in combinatie met de aanslagen, en waartoe ook onderzoek is uitgevoerd [2.6], zijn:
1) weinig gevoelig voor aangroeiing
2) zeewater- en corrosiebestendig, niet verouderingsgevoelig
3) lage dynamische en statische wrijvingscoëfficiënt
4) kleine verhouding van $\mu_{statisch}/\mu_{dynamisch}$
5) grote slijtvastheid
6) goede warmtegeleiding bij toepassing van kunststoffen

ad1)
De meest voorkomende aangroeiingen bestaan in het Oosterscheldemilieu uit zeepokken en zeewier. Uit onderzoek blijkt dat op de plaats waar zeepokken verwijderd zijn een kalkring op het materiaal achterblijft, waardoor lokaal de wrijvingscoëfficiënt van de glijplaat verhoogd wordt.

ad2)
De materialen worden aangebracht in een zoutwatermilieu. Boven

water noch onder water mag er functieverlies optreden door uitlogen, verwering of corrosie. Ter voorkoming van galvanische werking (contactcorrosie) moeten de metaalcombinaties die daar gevoelig voor zijn elektrisch gescheiden gemonteerd worden.

ad3)
Bij beweging van de schuif dienen de in de schuifgeleiding optredende wrijvingskrachten beperkt te blijven om zo de door de hefcilinders te leveren krachten laag te houden.

ad4)
Om ongewenste dynamische effecten t.g.v. stick-slipverschijnselen te voorkomen dient de verhouding $\mu_{statisch}/\mu_{dynamisch} < 1{,}5$ te zijn. Stick-slip veroorzaakt het schokkerig bewegen van de schuif en daardoor extra slijtage van de aanslagen. Daarnaast kunnen er door stick-slip ongewenste trillingen in de cilinders en schuiven optreden.

ad5)
Beperking van de slijtage garandeert dat de schuifgeleidingen langere tijd binnen de gestelde toleranties van de voorspanning kunnen blijven functioneren. Dit is van belang i.v.m. een beperking van de hoeveelheid onderhoud.

ad6)
Bij het bewegen van de schuiven ontwikkelt er zich wrijvingswarmte, deze warmte moet afgevoerd kunnen worden. Deze eis is voornamelijk van belang ingeval kunststof of houten aanslagen met kunststof glijplaten gecombineerd worden, bij hogere temperaturen kan verweking van het kunststof optreden.

2.3 Werking schuifaanslagen

De schuifaanslagen vormen door de aanwezigheid van de rubberpakketten het meest flexibele element in de krachtsoverdracht van de schuiven naar de pijlers. Met hun slappe vervormingsgedrag, in vergelijking tot de overige elementen van de Oosterscheldekering, vervullen de rubberpakketten in de schuifaanslagen verscheidene functies. De rubberpakketten dienen voor:

1) Opname van rotaties in de stand van de pijlers t.g.v. ongelijkmatige zettingen en plaatsingsfouten.
2) Het opvangen van uitlijningsfouten van de pijlers.
3) Vereffening van kleine maatafwijkingen in de schuifgeleidingen.
4) Opname van rotaties van de schuiven door doorbuiging onder golf- en vervalbelasting.
5) Opname van geringe verplaatsingen in langsrichting van de schuif.
6) Gelijkmatige belastingafdracht over de hoogte van de eindhar.
7) Het d.m.v. voorspanning voorkomen van stootbelasting (klapperen) van de schuiven tegen de pijlers.
8) Het permanent tegen de glijplaten drukken van de schrapers.
9) Vereffening van slijtage van de aanslagen.

ad4) en 5)
Door de rubberpakketten schuifaanslagen worden rotaties van de eindhar en kleine verplaatsingen van de schuif in lengterichting opgenomen zonder dat het Hakorit van de aanslagen over de glijplaten beweegt.

ad7)
Om de botsbelastingen van de schuiven tegen de pijlers te beperken zijn de schuifaanslagen voorgespannen. Botsen van de schuiven tegen de pijler wordt aangeduid met 'klapperen' en kan optreden als de schuif in vervalrichting speling heeft tussen de geleidingen. Klapperen van een schuif ontstaat bij een ongeveer gelijke waterstand op de Noordzee en de Oosterschelde wanneer de schuif door de golfbelasting wisselend belast wordt [2.7].

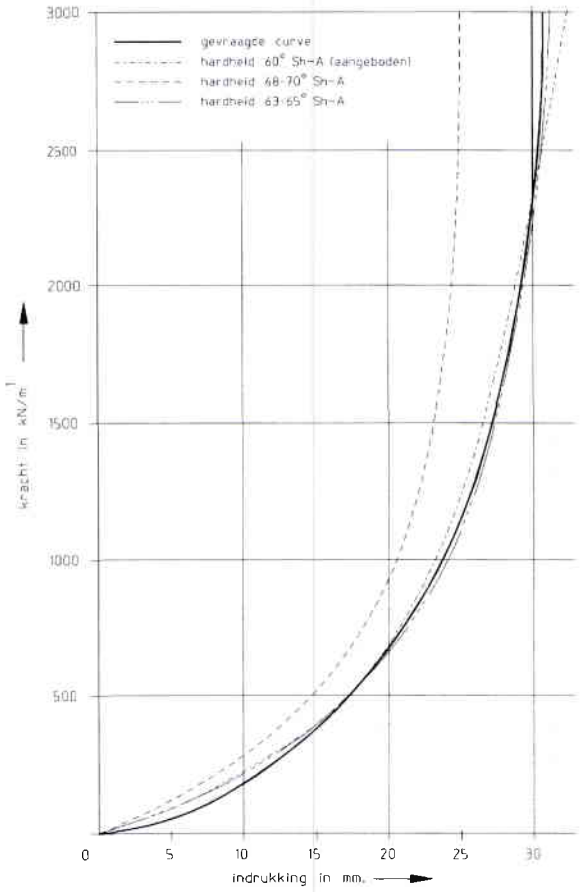
ad9)
Tijdens onderhoudssluitingen is er weinig vervalbelasting aanwezig. Door de voorspanning zijn de schrapers altijd tegen de glijplaten aangedrukt en werken daardoor effectiever bij het wegschrapen van aangroeiingen.

Het niveau van de voorspanning mag niet te hoog zijn omdat de voorspankracht de door de hefcilinders te leveren krachten vergroot. Daarnaast kan er door een grote voorspanning bij de onderhoudssluitingen teveel slijtage in de aanslagen optreden. De voorspanning mag echter ook niet te laag zijn omdat dan, bij grotere vervallen en golfbelastingen, de schuiven los kunnen komen door maatafwijkingen en slijtage. Het voorspanniveau is op twee manieren van invloed op het dynamisch gedrag van de schuiven. Tijdens openen en sluiten is de voorspanning van invloed op eventuele stick-slipverschijnselen. Verder is de stijfheid van de schuifaanslagen aan de Oosterscheldezijde bij neergelaten schuiven onder een positief vervalbelasting van invloed op het dynamisch gedrag van de schuiven. Een hoge veerstijfheid van de schuifaanslagen resulteert ook in hogere eigenfrequenties van de schuiven.

De totale veerkarakteristiek van de samengestelde schuifaanslagen is bepaald vanuit de grenzen die aan het vervormingsgedrag gesteld kunnen worden in de situatie van de onderhoudssluitingen en in de situatie van de stormsluitingen. Voor de onderhoudssluitingen, die veel vaker voorkomen dan stormsluitingen, dient de voorspanning (en daarmee de contactdruk van de aanslagen tegen de geleidingen) gering te zijn zodat de slijtage van het Hakorit in de aanslagen beperkt blijft. Gesteld is dat bij een indrukking van 10 mm van de beide schuifaanslagen op een eindhar (de schuifaanslag aan de Noordzeezijde en de tegenovergelegen schuifaanslag aan de Oosterscheldezijde) de voorspankracht 200 kN/m mag bedragen. De vlaktedruk in het aanslagmateriaal bedraagt dan 1 N/mm^2. Bij de maximale belasting van de schuifaanslagen (3000 kN/m) tijdens stormvloedcondities mag de indrukking aan de Oosterscheldezijde niet meer dan 30 mm bedragen [2.8]. Dit om schade aan de aluminiumbronzen glijplaten door aanlopen van de zijnokken en bovennok van de schuifaanslagen te voorkomen [2.9]. De contactdruk van de aanslagen tegen de geleidingen bedraagt bij de maximale belasting 15 N/mm^2. Uitgaande van bovenstaande grenzen is de gewenste veerkarakteristiek van de rubberpakketten in de schuifaanslagen vastgelegd (figuur 5). De gewenste veerkarakteristiek van de schuifaanslagen is zodanig dat ze zich bij geringe krachten relatief slap gedragen. Hierdoor leiden slijtage, oneffenheden, rotaties van de pijlers en andere variaties in indrukking nauwelijks tot een wijziging van de (voorspan)krachten. Bij de maximale optredende krachten reageren de schuifaanslagen veel stijver waardoor blijven de vervormingen beperkt blijven. Aan de rubberpakketten is verder de eis gesteld van een levensduur van 25 jaar t.a.v. veroudering en vermoeiing.

2.4 Werking zijaanslagen

Tijdens de bouw (beginsituatie) is de stand van de pijlers en de afstand tussen de pijlers ingemeten. Met de mogelijke zettingen van de ondergrond is de afstand tussen de pijlers in de eindsituatie berekend. In de eindsituatie dient er een vervormingscapaciteit in de zijaanslagen van tenminste 2x50 mm aanwezig te zijn om klemlopen door ongelijkmatige zettingen te voorkomen. Terugrekenend vanuit de eindsituatie kan de vervormingscapaciteit bepaald wor-



Figuur 5 Veerkarakteristiek schuifaanslag

den die tijdens de bouw aangebracht moet worden. Voor een aantal schuiven is deze vervormingscapaciteit in de beginsituatie negatief wat inhoudt dat deze schuiven met voorspanning gemonteerd moeten worden. De mate van voorspanning is afhankelijk van de grootte van de optredende verplaatsingen, die weer voornamelijk bepaald wordt door de positie van de pijlers in een sluitgat. In de diepere sluitgaten hebben ongelijkmatige zettingen in de ondergrond door de grotere pijlerhoogte ook grotere verplaatsingen van de pijlers tot gevolg [2.10].

Inherent aan het toepassen van speling in lengterichting van de schuif is het optreden van botsbelastingen van de schuif tegen de pijler door scheef inlopende golven. De sterkte van de pijlerwand, vooral het verjongde deel boven N.A.P., bepaalt de grootte van de toelaatbare botsbelastingen. De optredende versnellingen mogen, vanwege het optreden van horizontale massatraagheidskrachten op de hefcilinders, de waarde van 3 m/s^2 niet overschrijden. Analyse van de optredende schuifbewegingen en de botsbelastingen maakte het noodzakelijk slappe, dempende elementen in de zijaanslagen toe te passen, zie hiervoor hoofdstuk 6.

3. Onderzoek

Voor de materiaalkeuze en uitvoering van de schuifgeleidingen is grootschalig onderzoek verricht. Reeds in 1977 is begonnen met een programma waarin verschillende materialen, die gebruikt zouden kunnen worden als aanslag en glijplaat, langdurig blootgesteld zijn aan het Oosterscheldemilieu. Nadat de keuze voor het type schuifgeleiding gemaakt was, is onderzoek verricht naar de epoxymortelondersabeling van de glijplaten. In een latere fase is er onderzoek verricht aan de toe te passen rubberpakketten in de schuifaanslagen.

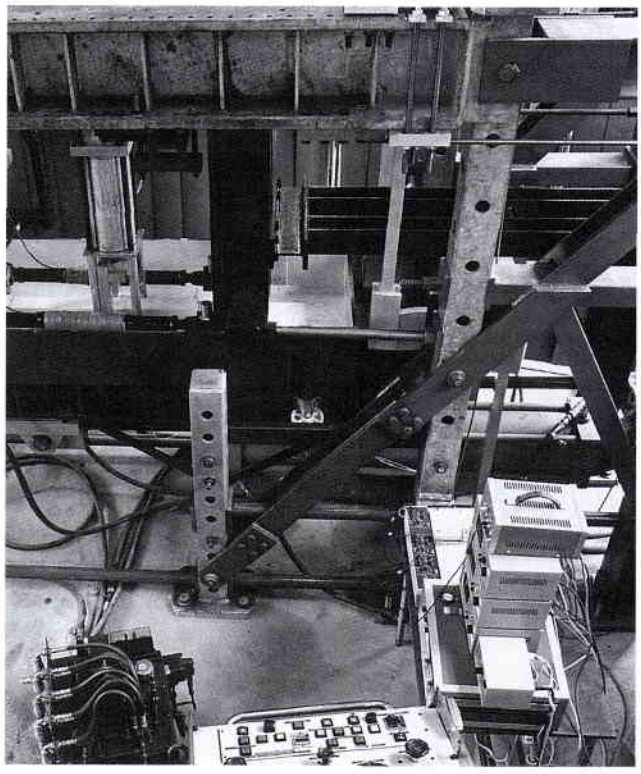
3.1 Materiaalonderzoek schuifgeleidingen

Het materiaalonderzoek aan de schuifgeleidingen had ten doel de meest optimale materiaalcombinatie te vinden voor de aanslag op de schuif en de glijplaat in de sponning. In de eerste fase van het onderzoek zijn voor de aanslag de materialen Arnite (PETP), Ferobestos (HAWE), Railko (HAWE), wit Hakorit (UHMPE), roestvaststaal (afk. RVS) en Azobé (hout) beproefd. Voor de glijplaten richtte het onderzoek zich op aluminiumbrons, RVS, zwart Hakorit (UHMWPE) en Arnite [3.1].

Een belangrijk verschil tussen een glijplaat en een aanslag is de blootstelling aan zeewater. In principe zijn de aanslagen door voorspanning altijd tegen de glijplaten gedrukt. Het glijvlak van een aanslag zal zodoende nooit blootstaan aan aangroei door maritieme organismen. Het deel van de glijplaten daarentegen dat zich onder water bevindt staat altijd bloot aan aangroei. Het onderzoek is dan ook uitsluitend uitgevoerd met het in de getijzone en volledig onder water aanbrengen van strippen glijplaatmateriaal. Als testlokatie is gekozen voor Schelphoek, een krekengebied in de Oosterschelde nabij Serooskerke op Schouwen-Duiveland.

De beproeving van de materiaalcombinaties is door TNO uitgevoerd. Er is een speciale meetopstelling gebouwd waarmee de wrijvingscoëfficiënt bepaald kon worden (figuur 6). In de opstelling is een strip glijplaatmateriaal uit Schelphoek, compleet met aangroeiing, liggend in een bak met zeewater gemonteerd. De strip heeft een breedte van 100 mm. Op een schoongemaakt stukje glijplaat wordt met een bekende, verticale kracht een blokje aanslagmateriaal van 120 mm breedte gedrukt. Vervolgens wordt de gehele bak met zeewater en glijplaat horizontaal heen-en-weer bewogen waarbij de benodigde horizontale kracht wordt gemeten. Het meettraject voor het bewegen had een lengte van 700 mm. De gemeten wrijvingscoëfficiënt is hierbij inclusief de weerstand om de aangroeiing van de glijplaat af te schrapen.

Met deze opstelling zijn de statische en de dynamische wrijvingscoëfficiënten bepaald, alsmede het eventueel optreden van stick-slip verschijnselen. Na beproeving van de glijplaatmaterialen zijn deze weer naar Schelphoek gebracht. Om de drie maanden zijn de proeven herhaald. In totaal zijn er 8 proeven uitgevoerd en hebben de proefstukken ongeveer 2 jaar in het water van de Oosterschelde gelegen. Ook tijdens de proeven bij TNO werden de proefstukken in zeewater bewaard om de aanwezige organismen in leven te houden.



Figuur 6 Beproevingsinstallatie glijplaat en aanslag

Belangrijke (tussentijdse) resultaten van het onderzoek waren;

- Aluminiumbrons vertoont nauwelijks aangroei, van zeepokken noch zeewier.
- Putvormige aantasting van RVS door aangroei van zeepokken. Nader onderzoek door de leverancier bracht aan het licht dat het materiaal, door een niet goed uitgevoerde warmtebehandeling, niet de juiste structuur bezat. Nieuwe RVS glijplaten, van dezelfde samenstelling met een gecontroleerde warmtebehandeling, vertoonden geen putvormige aantasting meer.
- Azobé vertoont, ongeacht het materiaal van de glijplaat, altijd stick-slip en tamelijk hoge wrijvingscoëfficiënten.
- De combinatie aluminiumbrons met Hakorit vertoont nooit stick-slip ook al ligt de verhouding $\mu_{statisch}/\mu_{dynamisch}$ boven de voorafgewenste verhouding van 1,5.

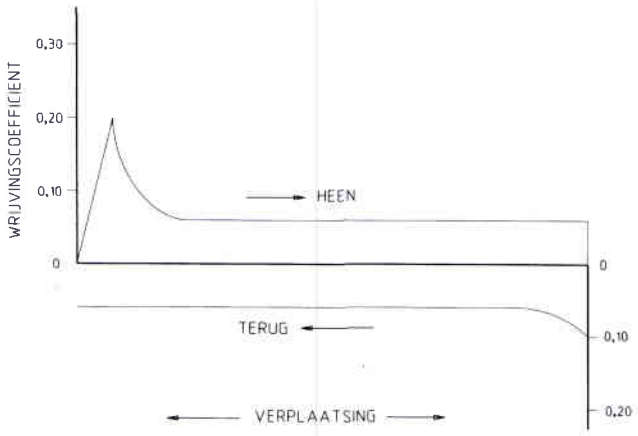
Op grond van de onderzoekingen is gekozen voor glijplaten van aluminiumbrons [3.2]. Na ingebruikname van de schuiven is er aantasting door putcorrosie van een aantal aluminiumbronzen glijplaten opgetreden. Afwijkend van de onderzoekssituatie bij

Schelphoek, waar de strippen aluminiumbrons jarenlang in nagenoeg stilstaand water gelegen hebben, zijn de hoge stroomsnelheden in de doorstroomopeningen van de kering en de combinatie van grote 'schoongeschraapte' oppervlakken met aangrenzend begroeide randzones. In deze omstandigheden kon door differentiële beluchting de aantasting van het oppervlak van de glijplaten optreden [3.3]. Na het aanbrengen van kathodische bescherming met opgedrukte spanning op de glijplaten is deze aantasting volledig gestopt.

Aansluitend op de proeven ter bepaling van de wrijvingscoëfficiënten zijn er slijtproeven uitgevoerd met de aanslagmaterialen Hakorit, hard polytheen, Thordon, Ferobestos en Railko. De nieuw op de markt gebrachte materialen hard polytheen en Thordon zijn pas in deze fase aan het onderzoek toegevoegd, en zijn dus niet langdurig aan zeewater blootgesteld geweest. De slijtproeven zijn eveneens door TNO uitgevoerd. De installatie ter bepaling van de wrijvingscoëfficiënten hoefde hiervoor slechts weinig verbouwd te worden. De proeven omvatten de slijtage van bovengenoemde materialen op aluminiumbrons. Als gunstigste materiaal, lage wrijvingscoëfficiënt en weinig slijtage, kwam het nieuwe materiaal hard polytheen naar voren [doc.3.4]. Dit materiaal is gekozen voor de aanslagen op de schuiven. De naam 'hard polytheen' is in deze verwarrend omdat het een verzamelnaam is voor alle kunststoffen die uit ultrahoogmoleculair lagedruk polytheen (UHMWPE) bestaan, ook het in de proeven gebruikte Hakorit bestaat uit UHMWPE [3.5].

Het overschrijden van de toelaatbare zettingen van de pijlers zou er toe kunnen leiden dat de aanslagen over de boutgaten komen te glijden. Dit kan extra slijtage tot gevolg hebben door het uitstulpen van het Hakorit in de boutgaten. Daarom is er een slijtproef uitgevoerd van Hakorit op aluminiumbrons met boutgaten. In de proef is de slijtage bepaald door een de jaarlijkse af te leggen weg van een aanslag te simuleren. Bij de maximale oplegdruk van 6 N/mm^2, voorkomend bij een stormvloedsluiting, is de aanslag gedurende een uur boven een boutgat stilgezet waarna de slijtproef weer is hervat. Het uitstulpen van het Hakorit boven een boutgat trad op maar er is geen extra slijtage geconstateerd [3.6]. Nog meer zekerheid tegen uitstulpen is verkregen door het materiaal te vernetten waardoor de materiaalkruip verder vermindert (vernetten is het chemisch verknopen van de raakpunten van de afzonderlijke ketens polytheen zodanig dat een ruimtelijk netwerk ontstaat).

De combinatie van aluminiumbrons met hard polytheen blijkt nooit stick-slip te vertonen. De statische wrijvingscoëfficiënt van hard polytheen bedraagt 0,16 en de dynamische wrijvingscoëfficiënt is



Figuur 7 Statische/dynamische wrijvingscoëfficiënt

0,05. Aan het eind van de slag, als de bewegingsrichting van het aanslagblokje omgekeerd wordt, treedt door heroriëntatie van de moleculen in het aanslagmateriaal een kleine verhoging op van de dynamische wrijvingscoëfficiënt (figuur 7). Dit zgn. borsteleffect is niet meegenomen in de berekeningen.

Voor de dimensionering van de hefcilinder is aangehouden $\mu_{statisch}$= 0,30 en $\mu_{dynamisch}$=0,10 voor gunstig werkende belastingen, en $\mu_{statisch}$= 0,40 voor ongunstig werkende belastingen. Om voor leveranciers tot een eenduidige karakterisering van het materiaal te komen is er een aanvullend onderzoek uitgevoerd naar de relevante eigenschappen van hard polytheen dat wordt omschreven als 'vernet UHMWPE' [3.7]. De belangrijkste eigenschappen (met de gemeten waarden van Hakorit) zijn:

- kerfslagsterkte 56 kJ/m^2
- treksterkte 12,6 N/mm^2
- rek bij breuk 500%
- dichtheid 970 kg/m^3
- vernettingsgraad 93%
- samenstelling 91% PE, 4,5% roet, 4,5% vulstof/pigment/stabilisator
- smeltpunt, smeltwarmte 134°C, 125 J/g

Voor de aanslagen in de kering is Hakorit, en later ook Hollodeen, toegepast. Hollodeen (merknaam) verschilt slechts gradueel van Hakorit en bleek na onderzoek ook te voldoen aan de eerder opgestelde materiaalkarakterisering van 'hard polytheen' [3.8].

3.2 Materiaalonderzoek ondersabelingsmortel

Om te kunnen voldoen aan de gestelde toleranties ten aanzien van rechtheid en parallelliteit zijn de schuifgeleidingen apart gesteld op de ingestorte, stalen verankeringsconstructie, de zogenaamde ibo's (in te betonneren onderdelen). De ruimte tussen de platen van de verankeringsconstructie en de aluminiumbronzen glijplaten is gevuld met een materiaal dat de belastingen uit de schuiven kan overdragen naar de pijler. Daarbij dient het gekozen materiaal de ruimte ook volledig waterdicht af te sluiten en moet het materiaal een elektrische isolator zijn ter voorkoming van contactcorrosie [3.9].

Op grond van een drietal redenen is er op voorhand gekozen voor het toepassen van epoxyhars als ondersabelingsmateriaal van de glijplaten;

- Het materiaal is sterk en goed verwerkbaar.
- De chemische resistentie is groot.
- Het is een elektrische isolator.

Onbekend waren op dat moment nog de volgende punten;

- De levensduur en gevoeligheid voor veroudering in een maritiem milieu.
- De hechting van epoxyhars aan staal en aluminiumbrons.
- De verwerking van grote hoeveelheden en de verwerking bij lage temperaturen.

In samenwerking met het Rijkswegenlaboratorium en met het Kunststoffen en Rubber Instituut van TNO is een onderzoeksprogramma opgezet dat uitsluitsel diende te geven over bovenstaande punten, en dat tegelijk de meest kansrijke producten uit de 'markt' moest testen op hun toepasbaarheid voor de Stormvloedkering.

Na een voorselectie zijn er vier producten gekozen voor beproeving. Twee leveranciers boden hun product aan in een aparte

'winter- en zomerkwaliteit', zodat er in totaal zes verschillende epoxyharsmortels zijn onderzocht. Bij de proeven zijn de materiaaleigenschappen bij minstens twee temperaturen bepaald. Dit omdat in verband met het krappe bouwschema ook 's winters gewerkt moest worden. Voor winteromstandigheden gold een beproevingstemperatuur van 5°C, voor zomeromstandigheden een beproevingstemperatuur van 23°C.

Het onderzoek van het Rijkswegenlaboratorium heeft zich toegespitst op de verwerkbaarheid, de sterkte-eigenschappen na uitharden en de hechting [3.10]. Het onderzoek van het Kunststoffen en Rubber Instituut betrof de invloed van zeewater, elektrische weerstand, veroudering en verwerking op grote schaal [3.11]. De beproevingen op zeewaterbestendigheid en veroudering zijn zoveel mogelijk uitgevoerd volgens standaardmethoden gegeven in ISO en ASTM normen. De verouderingsproeven zijn uitgevoerd bij 50°C, wat overeenkomt met een versnellingsfactor van 35 ten opzichte van zeewater van 10°C.

Een belangrijk resultaat van het onderzoek is dat de afschuifsterkte van de verbinding mortel-aluminiumbrons bepaald wordt door de afschuifsterkte van het beton, slechts bij enkele proefstukken is afschuifbreuk van de mortel geconstateerd. Het verloop van de sterkte (afschuif- en druksterkte) in de tijd vertoonde bij de mortels bestaande uit een hars, een harder en een meegemengde vulstof een grotere teruggang dan bij de mortel waarbij het hars en de harder tussen vooraf aangebracht fijn grind is gegoten. De afname van de elektrische weerstand is bij alle epoxymortels evenredig met de absorptie van zeewater, waarbij de mortel met het grind als vulstof de laagste waterabsorptie had. Bijkomend voordeel van deze mortel was de gunstige prijs en de goede verwerkingsmogelijkheid. Doordat de vulstof niet meegemengd hoeft te worden in de epoxymassa trad het probleem van 'uitzakken' niet op.

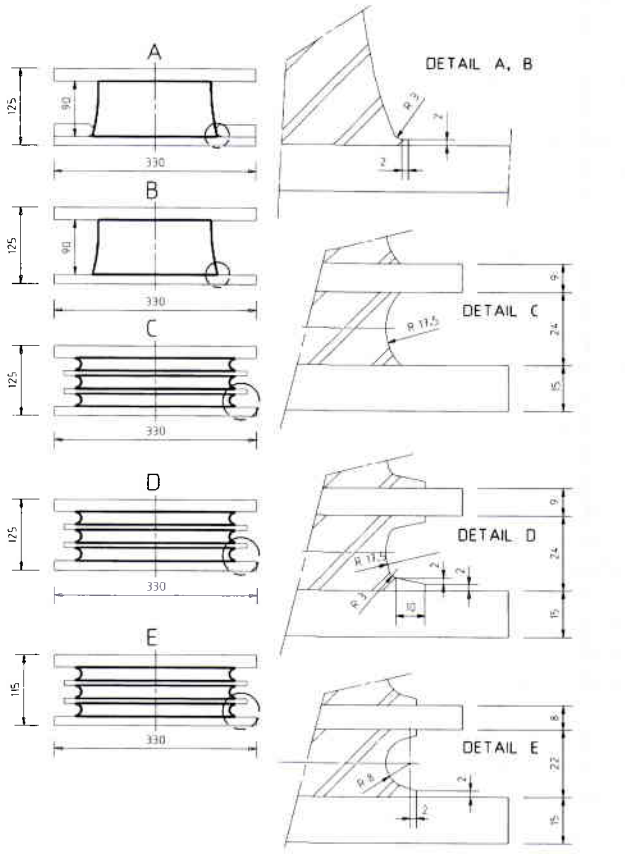
Uitkomst van het vergelijkende onderzoek was dat alle epoxymortels voldeden aan de gestelde eisen. Naast de laagste prijs bood de epoxymortel waarbij het grind vooraf in de bekisting was aangebracht de meest constante eigenschappen in de tijd. Reden om voor deze epoxymortel te kiezen. De toegepaste epoxymortel bestaat uit hars Epikote NDV 317A met harder Epikure NDV 317B. Als vulmateriaal is rond riviergrind van 3 tot 5 mm gebruikt. De gewichtverhouding hars:harder is 300:100, de gewichtverhouding epoxymortel:grind is 100:360.

3.3 Rubberpakketten schuifaanslagen

Om de veerkarakteristiek en de vermoeiingseigenschappen van de rubberpakketten te bepalen is door TNO onderzoek verricht. Belangrijk in het onderzoek is het effect van een combinatie van indrukking en rotatie van het rubber. Door het ontbreken van rekenregels voor de interactie van beide vervormingen was het gedrag hiervan onbekend.

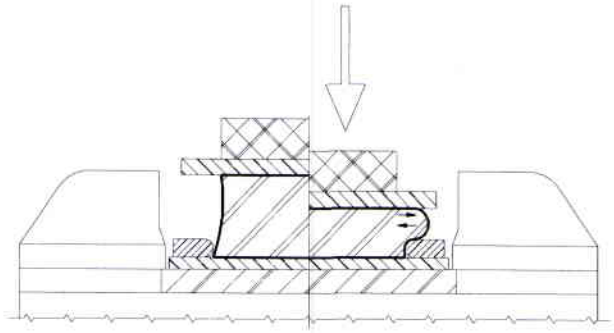
Uit het onderzoek bleek dat er geen mogelijkheid was de gewenste veerkarakteristiek, sterkte en vermoeiingseigenschappen te verenigen in één rubberpakket. Door twee typen rubberpakketten in de schuifaanslagen toe te passen konden de problemen met de afwijkende veerkarakteristieken en het slechte vermoeiingsgedrag van de massieve rubberblokken worden opgelost. Het splitsen van de functie voorspanning en de functie sterkte/vermoeiing van de aanslagen resulteerde in het gebruik van twee typen rubberpakketten. Een slapper rubberblok (een zgn. 'zachte' aanslag) in een schuifaanslag voor de voorspanning (proefstukken A,B), en een stijver 3-laags-rubberpakket (een zgn. 'harde' aanslag) in een aanslag voor de sterkte en vermoeiing (proefstukken C,D,E, (figuur 8)). Door een juiste combinatie van de beide typen rubberpakketten per schuifzijde toe te passen is bereikt dat de schuifgeleiding, rekening houdend met de verdeling van de optredende golf- en vervalbelastingen, als geheel voldoet aan de eisen die eraan gesteld worden. Zie hiervoor verder hoofdstuk 5. Navolgend wordt (de ontwikkeling van) het onderzoek aan de rubberpakketten gegeven.

Voor het onderzoek aan de rubberpakketten is bij TNO een proefopstelling gebouwd waarmee op een onder water gelegen proefstuk een vermoeiingsproef kon worden uitgevoerd. De vervormingen die opgelegd zijn bestaan uit een volledig spectrum van indrukkingen, afschuivingen en rotaties dat overeenkomt met belastingen gedurende 100 jaar (40.000 wisselingen). In deze proefopstelling zijn vijf verschillende proefstukken, op ware grootte, beproefd [3.12].



Figuur 8 Proefstukken rubberpakketten

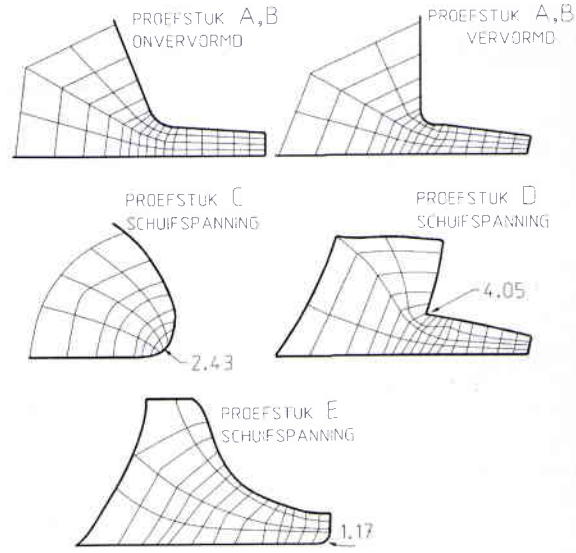
Het resultaat van de beproevingen was dat het proefstuk A (met de klemstrippen, figuur 8) voldeed aan de veerkarakteristiek, maar totaal niet voldeed aan de vermoeiingseis van een volledig lastspectrum. Door wrijving van het uitstulpende rubber over de klemstrippen ontstaat er slijtage en grote scheurvorming in het rubber (figuur 9). Van verder gebruik van klemstrippen is op grond van de resultaten van proefstuk A afgezien. Na deze proef is de functiesplitsing van de rubberpakketten doorgevoerd in het ontwerp. Het proefstuk B is qua materiaal en geometrie gelijk aan proefstuk A maar bevat geen klemstrippen meer. Proefstuk B voldoet aan de gewenste veerkarakteristiek m.b.t het voorspannen van de schuifgeleiding en voldoet aan de vermoeiingseis van een gereduceerd lastspectrum.



Figuur 9 Wrijvingsslijtage uitstulpend rubber

Bij proefstuk C wordt de vervorming van het rubber sterk beperkt door drie dunnere pakketten toe te passen. Hierdoor verbetert de sterkte t.a.v. vermoeiing aanzienlijk, de gewenste veerkarakteristiek (figuur 5) wordt evenwel niet meer benaderd. Er ontstaat door het opgelegde vervormingsspectrum van 100 jaar alleen vermoeiingsschade ter plaatse van de overgang rubber-staal. Gedurende de vermoeiingsproef van proefstuk C is verschillende malen, bij toenemende scheurgrootte, de veerkarakteristiek bepaald. De optredende scheurvorming in de overgang rubber-staal blijkt de veerkarakteristiek niet te beïnvloeden.

Omdat scheurvorming in de overgang rubber-staal een negatieve invloed heeft op de levensduur (corrosie) is bij proefstuk D eenzelfde opbouw met drie dunnere rubberpakketten gebruikt met een aangepaste overgang rubber-staal. De grote afrondingsstraal en de lange lip in de overgang rubber-staal geeft betere resultaten in de vermoeiingsproef maar maakt het rubberprofiel nog wat stijver. De proefondervindelijk gekozen vormgeving is gelijktijdig rekenkundig onderbouwd door berekeningen die uitgevoerd zijn ter bepaling van de spanningen in de overgang rubber-staal [doc.3.13]. Want het onderzoek naar de veerkarakteristiek en de vermoeiingsschade is tegelijk gebruikt om de beste vormgeving van de bevestigingslip van het rubber aan de staalplaten te bepalen. Met een beperkt eindig elementen model zijn bij TNO-IBBC niet-lineair elastische berekeningen uitgevoerd. De oorspronkelijke vormgeving van de overgang rubber-staal van proefstuk C wordt voor proefstukken D en E aangepast n.a.v. de berekeningen. De in figuur 10 opgenomen schuifspanningen mogen niet geïnterpreteerd worden als absolute waarden, de getallen dienen slechts om de verschillende geometrieën te vergelijken.



Figuur 10 Piekspanningen vervormd rubber

In de schuifaanslagen zijn de rubberpakketten B en E toegepast, met de gegeven detaillering van de overgang rubber-staal, onder de benamingen 'zachte' en 'harde' schuifaanslag. De schrapers zijn van kortere rubberpakketten voorzien die dezelfde veerkarakteristieken hebben.

In een laatste afsluitende vermoeiingsonderzoek is het moment van 'bezwijken' van een 3-laags-rubberpakket bepaald [doc.3.14]. Proefstuk E is uitgevoerd met de definitieve vormgeving van de overgang rubber-staal. Het rubberpakket is onderworpen aan het volledige vervormingsspectrum overeenkomend met de vervormingen die optreden gedurende 100 jaar. Bezwijken is gedefinieerd als de gemeten kracht-indrukkingsgrafiek meer dan 50% afwijkt van de grafiek bij aanvang van de proef. Ondanks grote scheurvorming langs de rand in de overgang rubber-staal, waardoor de aanslag zich bij het beëindigen van de proef half zo stijf gedroeg als bij aanvang, bleek dat de sterkte van het rubberpakket niet noemenswaardig verminderd was. Het rubberpakket was nog steeds in staat de maximale belastingen over te dragen. Dit resultaat houdt in dat bezwijken van een aanslag altijd duidelijk zichtbaar zal zijn aan de scheurvorming langs de rand, maar dat er tussen zichtbare schade en uiteindelijk falen nog een aanzienlijke tijdsperiode zit.

4. Schuif- en zijgeleiding

4.1 Materiaal schuif- en zijgeleiding

In de schuif- en zijgeleiding zijn drie verschillende materialen toegepast; aluminiumbrons voor de glijplaten, staal voor de ingestorte verankeringsplaten en nodulair gietijzer voor de stoel van de zijgeleiding. Ter voorkoming van galvanische werking is het aluminiumbrons volledig elektrisch van de verankeringsplaten en het gietijzer gescheiden.

De verankeringsplaten zijn gemaakt van staal Fe360B van 25 mm dikte. Vanwege de volledige omhulling door beton en epoxymortel zijn er geen speciale eisen gesteld aan de kwaliteit van deze platen, de verankeringsplaten zijn ook niet geconserveerd. De stoel van de zijgeleiding is van nodulair gietijzer. Dit materiaal is goed zeewaterbestendig waarbij alle aan zeewater blootgestelde vlakken een corrosietoeslag van 7,5 mm hebben gekregen. De verwachte levensduur van de stoel is meer dan 100 jaar [4.1].

De glijplaten zijn uitgevoerd in aluminiumbrons CuAl10Ni met de samenstelling volgens tabel 1. Dit materiaal kwam als meest gunstige naar voren uit de vergelijking van verschillende legeringen van aluminiumbrons en roestvaststaal.

Cu	Al	Ni	Fe	Pb	Sn	Zn	Si	Mg
76,5-84,5	8,5-10,5	4-6	2-5	0,05	0,2	0,2	0,1	0,05

Tabel 1 Materiaalsamenstelling CuAl10Ni (gewichtspercentages)

Door het hoge kopergehalte vertoont aluminiumbrons weinig aangroei van zee-organismen. Elektrisch geïsoleerd van andere metalen vertoont aluminiumbrons nauwelijks corrosie, onder water noch in de getijzone. De verwachte levensduur van de schuifgeleiding ligt op 200 jaar. Indien aluminiumbrons echter contact maakt met andere metalen treedt over het algemeen putvormige contactcorrosie op. Daarom zijn de glijplaten en de bevestigingsbouten volledig elektrisch geïsoleerd van elkaar en van de ingestorte verankeringsplaten.

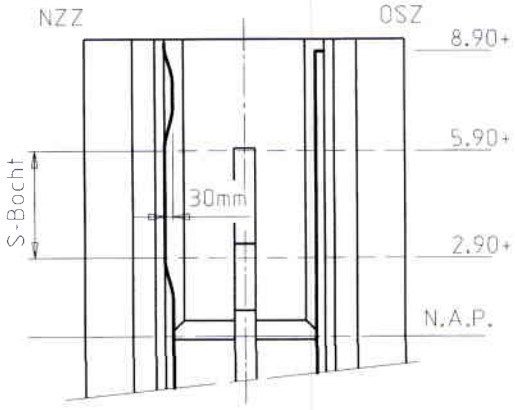
Ondanks de uitgebreide proefnemingen, die tot bovenstaande materiaalkeuze geleid hebben, kwam bij een inspectie, kort na de oplevering van de kering, van onderwater gelegen glijplaten duidelijke putcorrosie voor. Roodverkleuring en sterke aangroei van de glijplaten was al eerder geconstateerd [4.2]. De putcorrosie is ontstaan door het uittreden van aluminium als gevolg van differentiële beluchting (verschil in zuurstofconcentratie), wat weer in de hand gewerkt werd door de combinatie van aangroeiing naast schoongeschraapte oppervlakken en zuurstofrijk zeewater dat met hoge stroomsnelheden passeert. Vanwege de mogelijke bewegingen in lengterichting van de schuiven zijn de glijplaten breder dan de schrapers. Hierdoor zijn er zones van de glijplaten, buiten de breedte van de schrapers, die zelden schoongeschraapt worden en waar dus langdurige aangroei plaats kan vinden. Deze zones bevinden zich naast de grote schoongeschraapte oppervlakken die direct in contact staan met het stromende zeewater. Dit in tegenstelling tot de proeven bij Schelphoek waar de stroming gering was, en de glijplaten regelmatig volledig ontdaan zijn van aangroeiing t.b.v. de wrijvingsproeven, waardoor dit fenomeen niet opgetreden is.

Als eerste bescherming ter voorkoming van de putcorrosie is op alle glijplaten zeewaterbestendig vet aangebracht. Het toegepaste vet G-460 is loodhoudend en kon daarom geen blijvende oplossing zijn. Tegelijk met het invetten is er in de twee sponningen van pijler Roompot 18 als proefproject kathodische bescherming op de glijplaten aangebracht. De resultaten van beide methoden verschilden sterk. Het zeewaterbestendige vet was na een half jaar verdwenen, maar met kathodische bescherming kon volledige bescherming van de glijplaten verkregen worden. Ook het uittreden van aluminium, de roodverkleuring en de sterke aangroeiing kon worden voorkomen [4.3]. Naar aanleiding van dit gunstige resultaat is op alle aluminiumbronzen glijplaten kathodische bescherming aangebracht.

4.2 Ontwerp schuifgeleiding

De bovenzijde van de schuifgeleiding ligt in alle sponningen op N.A.P.+8,90 m. De ligging van de onderzijde is variabel en wordt bepaald door de verschillende schuifhoogten. De schuifgeleiding loopt voor elke schuif door tot aan de bodem van de sponning. De afzonderlijke verankeringsplaten en glijplaten hebben een lengte van 2090 mm of 2990 mm, dit in overeenstemming met de storthoogtes van de pijleropbouw (zie boek 3, deelnota 2, hoofdstuk 1.4). De verticale ruimte tussen twee platen bedraagt 10 mm. De randen ter plaatse van de overgang van twee glijplaten zijn afgerond met een straal van 10 mm (de randen van de verankeringsplaten zijn niet afgerond), de glijplaten zijn 40 mm dik.

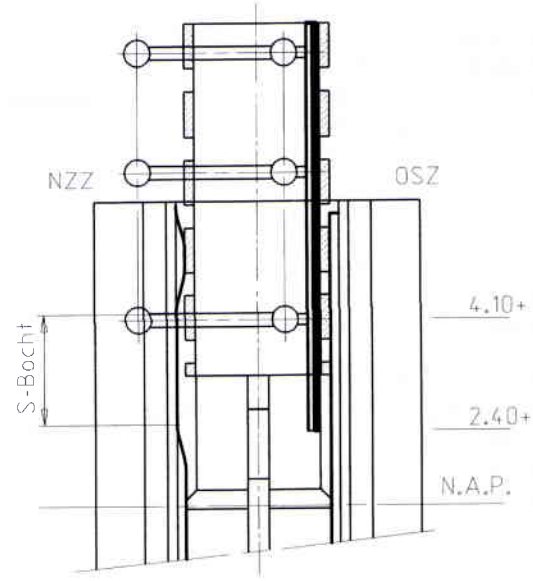
Om vervanging van de schuifaanslagen aan de Noordzeezijde mogelijk te maken, zonder dat het noodzakelijk is de hydraulische cilinder los te koppelen van de schuif, is de een-na-de-bovenste glijplaat aan de Noordzeezijde niet aangebracht (de ingestorte verankeringsplaat en een epoxymortellaag van 20 mm dikte zijn wel aanwezig). Hierdoor ontstaat de zgn. S-bocht. Over een hoogte van 3 m is hier een speling van 30 mm aanwezig (figuur 11). In deze ruimte heeft een aanslag aan de Noordzeezijde geen voorspanning en kan deze verwijderd worden.



Figuur 11 Verloop glijplaten in S-bocht

Om aan de Oosterscheldezijde aanslagen te vervangen dient de schuif tot boven de schuifgeleiding gebracht te worden, hierbij is het altijd noodzakelijk de hydraulische cilinder los te koppelen van de schuif.

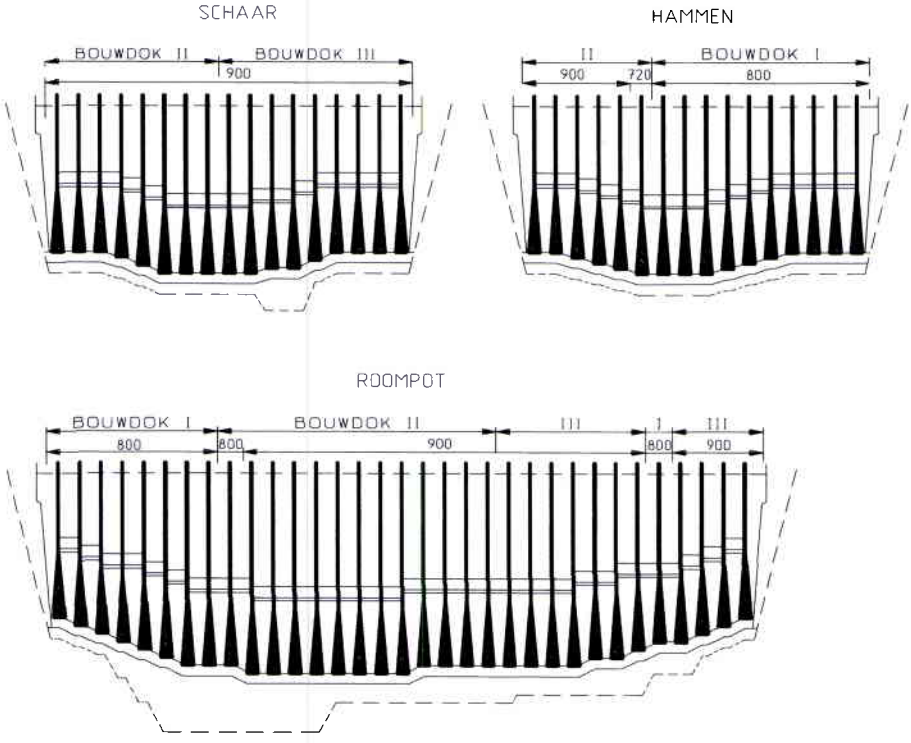
Een uitgangspunt in het ontwerp van de kering was dat de onderkant van de schuiven zich zou bevinden op een niveau van N.A.P.+1,20 m. In geopende stand bevond de schraper aan Noordzeezijde zich dan nog onder de S-bocht. De schuif zou dan onder en boven de S-bocht voorgespannen zijn, en klapperen in de geopende stand zou niet kunnen optreden. Om corrosieproblemen met de zuigerstangen te voorkomen zijn de schuiven evenwel permanent hoger opgetrokken tot het niveau van de onderhoudsstand. In de onderhoudsstand (onderzijde schuiven op niveau N.A.P.+2,40 m) bevindt de schraper aan de Noordzeezijde zich in de S-bocht. Hierdoor wordt de schuif aan de Noordzeezijde alleen nog boven de S-bocht voorgespannen en ontstaat een drie-punt-



Figuur 12 Driepuntsoplegging geopende schuif

soplegging (figuur 12). In deze stand kan klapperen van de schuiven optreden als de waterstand op de Oosterschelde minstens N.A.P.+2,40 m is en daarbij ook 0,50 m hoger is dan de waterstand op de Noordzee. De kans van voorkomen van deze situatie is echter klein en de krachten die daarbij op de schuiven optreden zijn kleiner dan de ontwerpbelastingen [4.4].

Bij aanvang van de bouw waren de glijplaten in drie effectieve breedteklassen ingedeeld (breedte glijvlak 650, 720 en 800 mm). De uiterste positie van het belastingvlak lag toen voor de grootste breedteklasse op 450 mm van de rand van het beton. Vanwege on-



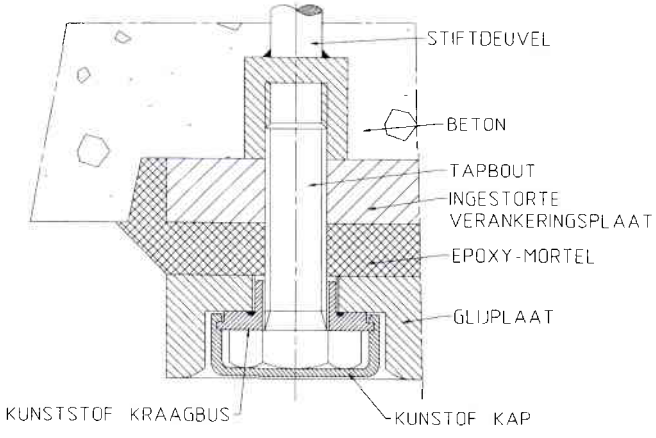
Figuur 13 Breedteklassen schuifgeleiding

zekerheid omtrent de nauwkeurigheid van plaatsing en de vlakheid van het fundatiebed zijn alle glijplaten van de pijlers uit bouwdok I al 800 mm breed gemaakt. Toen na plaatsing van de eerste serie pijlers uit bouwdok I bleek dat de onzekerheid omtrent aanzanding van het fundatiebed groter was dan de aannames zijn alle glijplaten voor de pijlers in de bouwdokken II en III met 100 mm verbreed tot de effectieve breedteklassen 750, 800 en 900 mm [4.5]. Tegelijk is de uiterste positie van het belastingsvlak van de aanslag op de glijplaat tot de rand van het beton teruggebracht tot 400 mm (figuur 4). De indeling in breedteklassen is een compromis tussen standaardisatie en optimalisatie. Zie voor de breedteklassen van de schuifgeleiding in de hele kering figuur 13.

De verbreding van de glijplaten geeft voor de diepst gefundeerde pijlers echter nog geen zekerheid dat de aanslagen niet over de boutgaten zullen lopen. Bovenin de pijleropbouw kunnen de aanslagen door een pijlerrotatie tot buiten de effectieve breedte komen. Het hoogst gelegen deel van de glijplaten wordt echter alleen in geheven toestand van de schuif door de aanslagen belast. In deze situatie werken er geen grote krachten op de schuifgeleiding en is deze onzekerheid geaccepteerd. Verder hebben later uitgevoerde proeven met Hakorit aanslagen op boutgaten aangetoond dat dit geen verhoogde slijtage geeft (hoofdstuk 3.1).

Aan de ingestorte zijde van de verankeringsplaten zijn langs de randen strippen van 40x40 mm^2 gelast waarin de gaten voor de bevestigingsbouten van de glijplaten getapt zijn. Aan deze strippen zijn stiftdeuvels ∅22 mm voor de verankering in het beton bevestigd. Vanwege de grote breedte van de verankeringsplaten zijn in het midden twee extra rijen stiftdeuvels aangebracht. De stiftdeuvels staan h.o.h. 150 mm, de gaten voor de tapbouten zijn eveneens h.o.h. 150 mm aangebracht.

De glijplaten zijn op de ingestorte verankeringsplaten bevestigd met verzonken tapbouten van aluminiumbrons. De boutgaten in de glijplaten zijn afgerond met een straal van 15 mm tot een diepte van 4 mm. Ter voorkoming van galvanische werking tussen de stalen verankeringsconstructie en de aluminiumbronzen glijplaten zijn de bouten voorzien van kunststof kraagbussen en kunststof kappen (figuur 14). De kraagbussen en kappen zijn van Durapox gemaakt en uitgevoerd met een kliksysteem voor de bevestiging van de kappen. De afstand tussen de verankeringsplaten en de glijplaten is gemiddeld 20 mm, en is volledig gevuld met epoxymortel. De epoxymortel omsluit de stalen verankeringsconstructie volledig zodat deze nooit aan het zeewater is blootgesteld [4.6].



Figuur 14 Bevestiging glijplaat

De berekening van de schuifgeleiding is een afgeleide van de berekening van de schuifaanslagen. Pas nadat de definitieve krachten door de golf- en vervalbelasting waren bepaald kon de schuifgeleiding worden berekend. In verband met de bouwvolgorde van de kering, de verankeringsconstructies moesten tijdens de bouw van de pijlers al ingestort worden, is de schuifgeleiding ontworpen met een grote veiligheidsmarge. De berekening van de schuifgeleiding bestond hierdoor vnl. uit een controle van de gebouwde constructie. Tenzij anders vermeld zijn de hierna genoemde spanningen en krachten gebruikswaarden, d.w.z. berekend met een belastingfactor γ=1,0.

De glijplaten worden belast met contactdrukken en wrijvingskrachten. De maximale contactdrukken treden op in gesloten toestand van de kering tijdens positief verval ter plaatse van de onderste schuifaanslagen van de 5,9 m schuiven in de Roompot. De contactdruk tussen de aanslag en het aluminiumbrons bedraagt 15 N/mm^2. De epoxymortel draagt via contactdruk kracht over van de glijplaten naar de verankeringsplaten. Door de lastspreiding in de glijplaat (aanname 2x45°) bedraagt de maximale druk in de epoxymortel 11 N/mm^2. De gemeten druksterkte (aanvangsdruksterkte) van de toegepaste epoxymortel varieert van 65 tot 100 N/mm^2 [4.7].

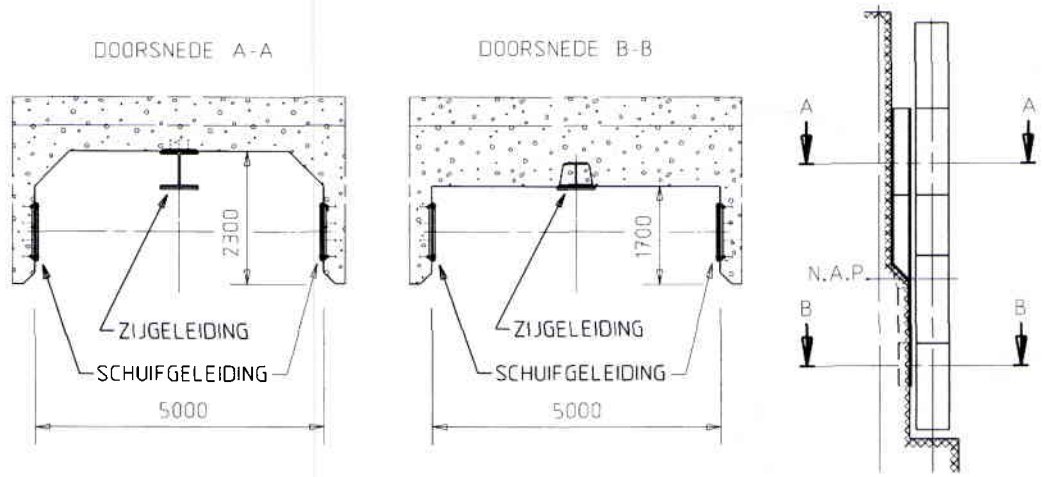
De afschuifkrachten in de tapbouten en stiftdeuvels ontstaan door de wrijving tussen aanslag en glijplaat tijdens het bewegen van de schuif. Deze kracht is maximaal tijdens een groot verval en onder de aanname van een wrijvingscoëfficiënt μ=0,4. Per tapbout kan een maximale schuifkracht optreden van 70 kN. Krachtsafdracht door hechting tussen de glijplaat en de epoxymortel wordt hierbij verwaarloosd. De afschuifsterkte van de aluminiumbronzen bouten bedraagt 100 kN.

4.3 Ontwerp zijgeleiding

Bij het afdragen van de belastingen door scheef inlopende golven op de schuiven oefenen de zijaanslagen stootbelastingen uit op de pijler. Door de relatief geringe afmetingen van de zijaanslagen werken deze stootbelastingen als een puntlast op de zijgeleiding. Om te voorkomen dat het beton van de pijler bezwijkt worden in de zijgeleiding een ingestort profiel (onder N.A.P.) en een gietijzeren stoel (boven N.A.P.) toegepast. Hierdoor worden de stootbelastingen gespreid over een groter oppervlak.

De bovenzijde van de zijgeleiding ligt voor twee-regelige schuiven op het niveau van N.A.P.+5,90 m, en voor drie-regelige schuiven op het niveau van N.A.P.+8,90 m. De ligging van de onderzijde is variabel en wordt bepaald door de positie van de zijaanslag op een schuif. Hierdoor is het, in tegenstelling tot de schuifgeleiding, niet noodzakelijk dat de zijgeleiding doorloopt tot de bodem van de sponning. De constructieve opbouw en uitvoering van de zijgeleiding is grotendeels gelijk aan die van de schuifgeleiding. Door de geringe verplaatsingen van de schuiven in de vervalrichting kan de breedte van de glijplaten beperkt blijven tot 650 mm.

Afwijkend zijn bij de zijgeleiding de verankeringsconstructies voor de glijplaten. Door het verjongen van het lijf van de pijler in hoogterichting ontstaat er een verschil in de ligging van het verankeringsvlak. Onder N.A.P. is er een stalen profiel in het beton van de pijlerwand opgenomen, zodanig dat een flens gelijkligt met het betonoppervlak (figuur 15). De glijplaat is met aluminiumbronzen tapbouten aan deze flens bevestigd op dezelfde wijze als de glijplaten van de schuifgeleiding (figuur 14). De ruimte tussen de flens en de glijplaat (20 mm) is gevuld met epoxymortel.



Figuur 15 Zijgeleiding

Boven N.A.P. verjongt het lijf van pijler met 600 mm, hierdoor wordt de eindhar van de hefschuif aan de kopse kanten beter toegankelijk voor inspectie en onderhoud. De glijplaat boven N.A.P. is, met een tussengelegen kunststof isolatiestrook van 1 mm dikte, bevestigd op een stoel van nodulair gietijzer (figuur 15). De bevestiging is ook met elektrisch geïsoleerde aluminiumbronzen tapbouten. De gietijzeren stoel is met eenzelfde bevestiging aan de ingestorte verankeringsconstructie bevestigd. De ruimte tussen de flens van de stoel en de verankeringsplaat (20 mm) is gevuld met epoxymortel, ook weer zodanig dat de ingestorte verankeringsplaat niet blootgesteld wordt aan het zeewater. De ingestorte verankeringsplaten van de zijgeleiding bevatten drie rijen stiftdeuvels. De stiftdeuvels in de rijen staan, net als de twee rijen tapbouten voor de bevestiging van de glijplaten, h.o.h. 150 mm.

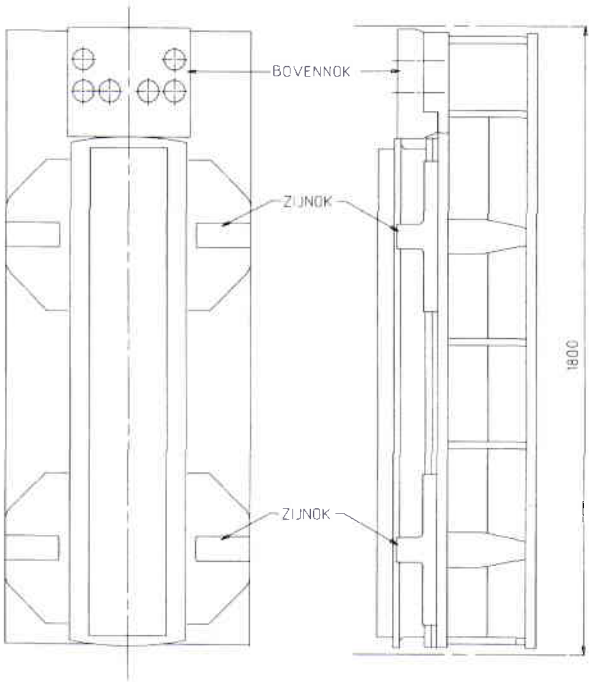
De berekening van de zijgeleiding is, net als de berekening van de schuifgeleiding, een afgeleide van de berekening van de aanslagen. De stootbelastingen die door de zijaanslagen uitgeoefend worden zijn berekend nadat de zijgeleiding al was aangebracht op de pijler. Zie voor een gedetailleerde berekening van de botskrachten hoofdstuk 6.

Bij de zijgeleidingen treedt de maximale contactdruk tijdens een stootbelasting van 2770 kN. De zijaanslag bevindt zich dan in het gebied tussen N.A.P. +0 tot +2,5 m. De contactdruk tussen aanslag en glijplaat bedraagt hierbij 6 N/mm^2 (belastingfactor γ=1,0). De epoxymortel draagt alleen via contactdruk kracht over.

5. Schuifaanslagen

De schuifaanslagen zijn samengesteld uit Hakorit, rubber en staal. Bij het ontwerp van de schuifaanslagen zijn berekening en beproeving gelijk opgegaan. Het uiteindelijke ontwerp is tot stand gekomen na een serie onderzoeken en tests die zijn begonnen met de bepaling van de wrijvingscoëfficiënten en de keuze van het aanslagmateriaal en de bepaling van de vormgeving van de rubberpakketten. Zie voor het onderzoek en de keuze van het type aanslagmateriaal in relatie tot het materiaal voor de glijplaten hoofdstuk 3.1. De vormgeving van de rubberpakketten is van grote invloed op de (vermoeiings)levensduur en de veerkarakteristiek. Zie voor de uitgangspunten van het ontwerp en de afleiding van de gewenste veerkarakteristiek hoofdstuk 2.3 en voor het onderzoek hoofdstuk 3.3. De onderzoeken zijn beëindigd met vermoeiingsproeven op de definitieve rubberpakketten van de schuifaanslag [5.1].

De schuifaanslagen bevinden zich op de flenzen van de eindhar (de achterwand van de eindkoker). Een volledige aanslag is opgebouwd uit een aantal elementen van 1,8 m lengte met onderaan een schraperelement (zie hoofdstuk 5.3). De afzonderlijke elementen van de schuifaanslag zijn opgebouwd uit een kunststof aanslag die over de aluminiumbronzen glijplaat beweegt, een bovenplaat, een rubberpakket en een onderplaat met begrenzingsnokken in verticale richting en in zijdelingse richting (figuur 16). De onderplaat van een schuifaanslagelement wordt met bouten aan de flens van de eindhar van de schuif bevestigd.



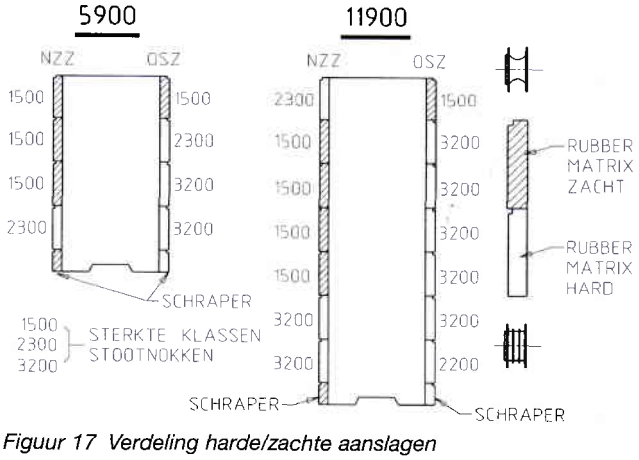
Figuur 16 Nokken schuifaanslag

5.1 Verdeling rubberpakketten

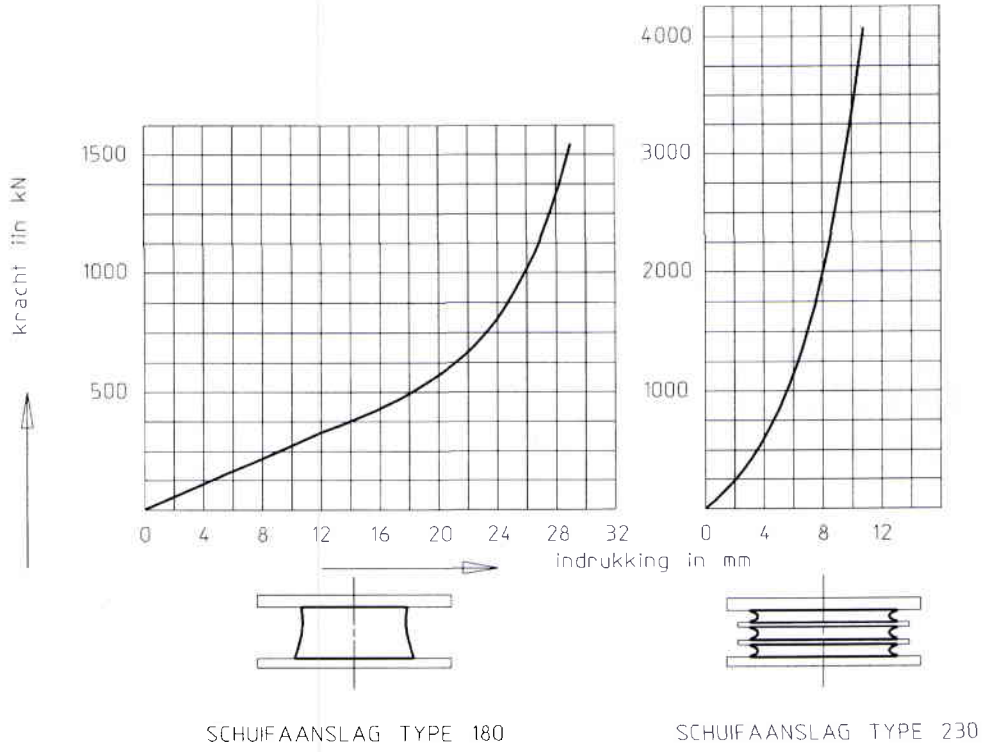
De toepassing van de rubberpakketten verschilt voor de Noordzeezijde en Oosterscheldezijde. In de aanslagen aan de Oosterscheldezijde zullen bij een stormvloed de grootste belastingen optreden, hier zijn dan ook meerdere harde rubberpakketten toegepast. Bijkomend voordeel is dat door de grote stijfheid van de harde aanslagen aan de Oosterscheldezijde de eigenfrequenties van de schuiven verhoogd worden. De aanslagen aan de Noordzeezijde worden belast door een veel geringere vervalbelasting uit het Oosterscheldebekken en kunnen daarom met minder harde rubberpakketten toe. De vereiste voorspanning van de schuifgeleidingen wordt bereikt door aan de Noordzeezijde voornamelijk zachte rubberpakketten op te nemen. Deze kunnen door hun slappere vervormingsgedrag de gewenste voorspanning tot stand brengen zonder al te gevoelig te zijn voor maatafwijkingen in de glijplaten en slijtage van de aanslagen.

Door de verschillende schuifhoogten en vervalbelastingen is er een grote variatie in de samenstelling van de schuifaanslagen op de schuiven (figuur 17). Toch is het noodzakelijk dat elke volledige schuifaanslag de gewenste veerkarakteristiek zo goed mogelijk benadert. Door het combineren van de twee typen rubberpakketten, het zachte rubberpakket en het harde rubberpakket, kunnen alle samenstellingen tot stand gebracht worden. De type-aanduidingen 1500, 2300 en 3200 staan voor de maximaal over te dragen kracht in kN/m van een schuifaanslagelement en hebben alleen betekenis voor de staalconstructie op de onderplaat en de stootnokken.

Het zachte rubberpakket bestaat uit een blok natuurrubber, 65° shore, met een breedte van 180 mm en een hoogte van 88 mm. Het harde rubberpakket bestaat uit drie lagen natuurrubber, 60° shore, met twee stalen tussenplaten. De breedte van het rubber is 230 mm en de hoogte van elke laag is 21 mm. De uitvoering en



Figuur 17 Verdeling harde/zachte aanslagen



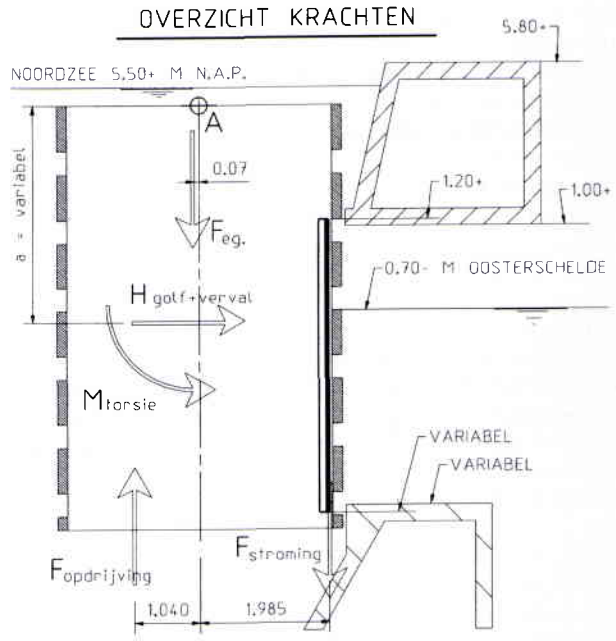
Figuur 18 Veerkarakteristiek schuifaanslagen

veerkarakteristieken van de beide typen schuifaanslagen staan afgebeeld in figuur 18. De lengte van het rubberpakket in een schuifaanslag-element is 1,35 m. De detaillering van de overgang rubber-staal is conform de details B en E in figuur 5. Het rubber is gevulcaniseerd aan de onder- en bovenplaat bij de zachte schuifaanslagen, en aan de onder- en bovenplaat en tussenplaten bij de harde schuifaanslagen. Na vulcaniseren zijn alle staalplaten geconserveerd.

In de berekening van de schuifaanslagen is rekening gehouden met de voorspanning, de verschillende stijfheden van de rubberpakketten en de discrete ondersteuning (de elementen van de schuifaanslagen hebben een lengte van 1800 mm waarvan slechts 1400 mm middels het Hakorit daadwerkelijk aanligt op de glijplaten). Om alle invloeden van de verschillende berekeningsparameters afzonderlijk te kunnen volgen is de berekening uit een aantal stappen opgebouwd [5.2]. De berekeningen zijn uitgevoerd voor drie maatgevende belastinggevallen.

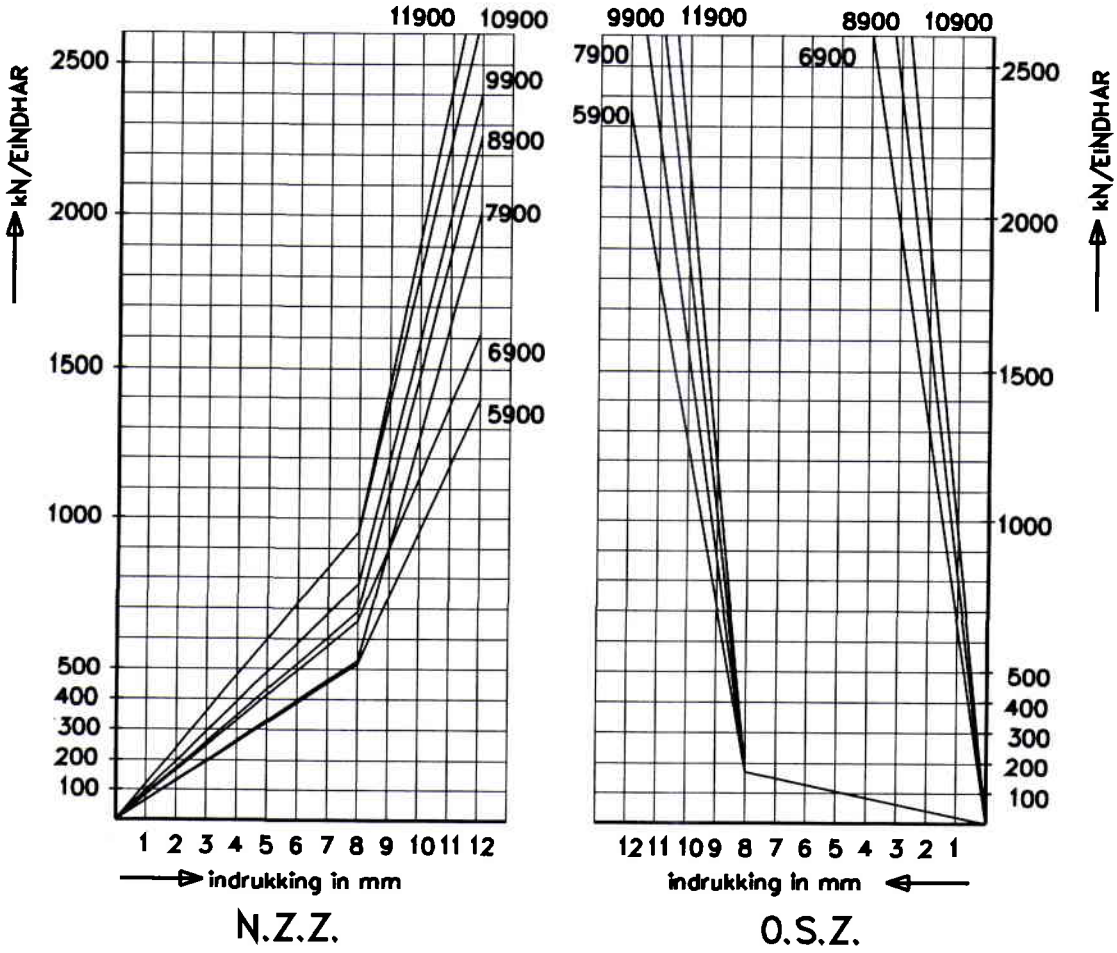
Als eerste zijn per schuifhoogte per belastinggeval de horizontale reactiekracht en het moment bepaald. Meegenomen zijn de golfbelasting, de vervalbelasting, het eigen gewicht, de opdrijving, de wrijving, de stroming door de spleet en de torsie in de schuiven door verdraaiing van de pijlers (figuur 19). Het moment op een schuif is berekend ten opzichte van de bovenzijde van de schuifgeleiding.

De som van de veerstijfheden van de schuifaanslagen over de volledige hoogte van de eindhar is bepaald voor elk schuiftype, zowel aan de Noordzeezijde als aan de Oosterscheldezijde. Waar zachte en harde schuifaanslagen naast elkaar voorkomen, steken de zachte aanslagen 8 mm uit. Dat er een knik in de lijnen optreedt vanaf een indrukking van 8 mm komt omdat vanaf die indrukking de harde schuifaanslagen ook gaan meedragen (figuur 20). De lijnen in de grafiek beschrijven het gelineairiseerde gedrag.



Figuur 19 Berekening schuifaanslagen

Bij de schuiftypen 6900/8900/10900 zijn er geen zachte schuifaanslagen aan de Oosterscheldezijde aanwezig zodat daar de indrukkingslijnen ook geen knik vertonen. De rechte lijnen in figuur 20 vormen een benadering van het begintraject van de gewenste veerkarakteristiek zoals gegeven in figuur 5. Hierbij moet opgemerkt moet worden dat de krachten in figuur 5 per eenheid van lengte zijn en niet rechtstreeks vergeleken kunnen worden met de totaalkrachten in figuur 20.



Figuur 20 Kracht-indrukkingslijnen schuifaanslagen

De voorspanning in de schuifaanslagen komt tot stand doordat de dagmaat van de aluminiumbronzen glijplaten kleiner is dan de breedte van de schuif over de aanslagen in ontspannen toestand (dagmaat glijplaten 4880 mm). Uitgangspunt bij het aanbrengen van de aanslagen is een voorspanniveau van 200 kN/m. Vanwege het verschil in stijfheid tussen de harde en zachte schuifaanslagen betekent dit ook een verschil in de benodigde indrukking van de harde en zachte aanslagen. In ontspannen toestand steken de zachte aanslagen 8 mm buiten de dagmaat uit en de harde aanslagen 2 mm. Bij het neerlaten van de schuif vernauwt de dagmaat van de glijplaten en worden de aanslagen vanzelf *voorgespannen*.

Bij de schuiftypen 5900, 7900, 9900, 11900 is de dagmaat van de schuifgeleidingen 18 mm kleiner dan de breedte van de eindhar met schuifaanslagen in onbelaste toestand. Bij de schuiftypen 6900, 8900, 10900 is de dagmaat tussen de schuifgeleidingen 10 mm kleiner. Het verschil komt voort uit het eenzijdig of tweezijdig toepassen van zachte aanslagen. Uit figuur 20 zijn de indrukkingen van de aanslagen aan de Noordzeezijde en Oosterscheldezijde af te lezen. Voor de verschillende schuiftypen gelden de voorspankrachten in tabel 2.

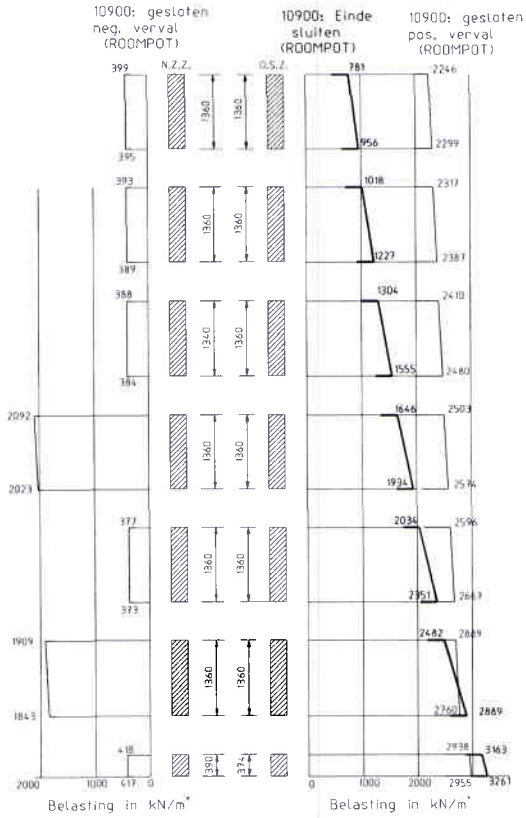
De voorspankrachten van de schuiven blijven onder de grenswaarde van 200 kN/m die gesteld is voor de onderhoudssluitingen. De voorspankrachten zijn relatief klein ten opzichte van de reactiekrachten die optreden bij de maatgevende golf- en vervalbelastingen (zie deelnota 3 'schuiven').

Indrukkingen per eindhar [mm]				Voorspankracht
Schuiftype	Nzz	Osz	totaal	[kN]
5900	9,0	9,0	18,0	750
6900	8,7	1,3	10,0	800
7900	9,0	9,0	18,0	900
8900	8,8	1,2	10,0	1000
9900	8,9	9,1	18,0	1180
10900	8,9	1,1	10,0	1150
11900	8,9	9,1	18,0	1370

Tabel 2 Voorspankracht schuiven

Voor de berekening van de verdeling van de krachten over de afzonderlijke schuifaanslagelementen is gebruik gemaakt van een iteratief computerprogramma dat de indrukking berekent boven en onder in elk schuifaanslagelement bij een opgegeven reactiekracht en moment per schuiftype. Hierbij heeft het programma als uitgangspunten horizontaal evenwicht, momentevenwicht en onvervormbaarheid van de eindhar. Per schuif worden de schuifaanslagelementen ingevoerd met hun dragende lengte en stijfheid. Er wordt niet gerekend met een over de gehele hoogte van de kering ondersteunde eindhar, maar met de discrete schuifaanslagele-

menten. Ter plaatse van de bovennokken dragen de aanslagen derhalve geen krachten over op de schuifgeleiding. De uitvoer bestaat per belastinggeval uit reactiekrachten per schuifaanslagelement. Voor de drie maatgevende belastinggevallen 'einde sluiten', 'positief verval' en 'negatief verval' zijn van alle schuifaanslagen in de kering de krachten bepaald (figuur 21). De gegeven waarden zijn t.g.v. de extreme belastingen (zie belastingtabellen in hoofdstuk 2 van deelnota 3).



Figuur 21 Reactiekrachten schuifaanslagen

De maximale belasting in een schuifaanslag treedt op tijdens 'einde sluiten' in de schuiven van 5,9 m hoogte in de Roompot. Voor de meeste schuiven geeft de situatie 'einde sluiten' in de onderste schuifaanslagen aan de Oosterschelde hogere belastingen dan de situatie 'positief verval'.

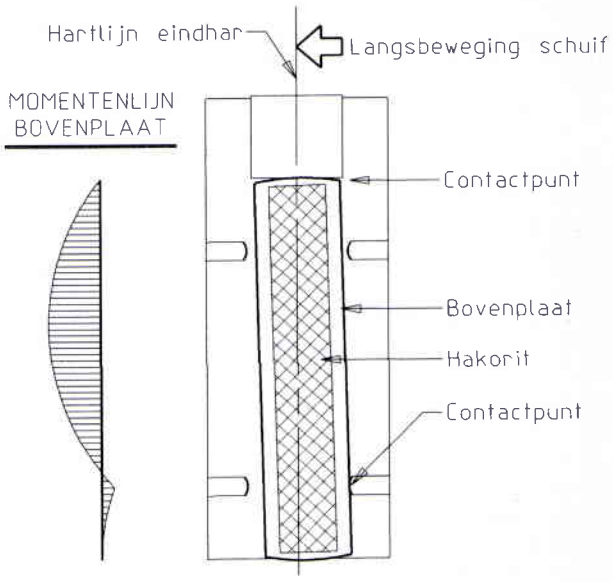
5.2 Nokken schuifaanslagen

De wrijvingskrachten die bij het bewegen van een schuif ontstaan in het contactvlak van de aanslag en de glijplaten kunnen door de rubberpakketten maar in beperkte mate overgedragen worden. Om grote wrijvingskrachten op te nemen, en om de verplaatsingen van de rubberpakketten te beperken, zijn de schuifaanslagen voorzien van nokken. Binnen de spelingsruimte van de nokken kan het rubber door afschuifvervorming de verplaatsingen van de schuif volgen. Per schuifaanslag-element zijn er vier nokken aanwezig voor de opname van zijdelingse krachten en een bovennok voor verticale krachten. Bij een verticale beweging van de 'eigen' bovennok af wordt de bovenplaat van een schuifaanslagelement tegengehouden door de bovennok van een ondergelegen element (figuur 16). De speling in hoogterichting van een bovenplaat tussen de bovennokken bedraagt 30 mm.

Bij het openen/sluiten van de schuif kan de bovenplaat de bovennok belasten met een maximale kracht van 1200 kN. Deze kracht is gebaseerd op de maximale golf- en vervalbelasting tijdens openen/sluiten en een wrijvingscoëfficiënt van μ=0,4.

De bovenplaat van de harde schuifaanslagen is gemaakt van Naxtra 70, een gelegeerde staalsoort met een hoge vloeigrens. Bij de zachte schuifaanslagen is de bovenplaat van staalkwaliteit Fe510D. De zijnokken voor het opvangen van de zijdelingse beweging zijn van gietstaal, kwaliteit C-52K. Elke nok is bevestigd aan de onderplaat met injectiebouten M30-10.9. Afhankelijk van de over te dragen krachten per schuifaanslagelement zijn de zijnokken in drie verschillende sterkteklassen verdeeld (figuur 17). Alle contactvlakken van de gevulcaniseerde platen en nokken zijn voorzien van het slijt- en corrosievaste oplasmateriaal Stellite 7A. De chemische samenstelling van dit materiaal is 61% kobalt, 30% chroom, 5,5% molybdeen, 3% nikkel en 0,2% koolstof.

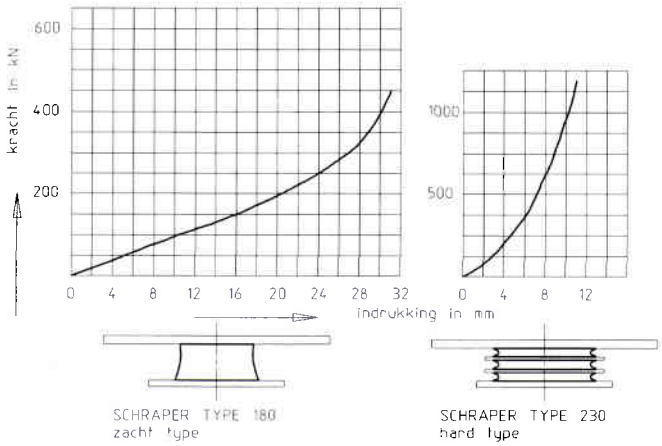
In gesloten toestand van de kering wordt de schuif door de hydraulische cilinders op de onderaanslagen gedrukt. Verticale verplaatsingen van de schuif zijn in dit geval zeer beperkt, maar de schuif kan nog wel grote verplaatsingen in lengterichting ondergaan door scheef inlopende golven. In lengterichting van de schuif, dit is de zijdelingse richting van de schuifaanslagen, bedraagt de speling van de bovenplaat tussen de zijnokken 2x30 mm. Binnen deze speling kan de verplaatsing van de schuif door afschuifvervorming van het rubberpakket gevolgd worden zonder dat de aanslagen over de glijplaten verschuiven. Zijn de langsbewegingen van de schuif groter dan de toegestane speling dan zullen de zijnokken tegen de bovenplaat aanlopen en deze dwingen de verplaatsing van de schuif te volgen. De bovenplaat zal dan lokaal ondersteund worden door de zijnokken en hierdoor in zijn vlak op buiging worden belast. Vooral tijdens stormvloedcondities, waarbij grote golf- en vervalbelastingen optreden, kunnen er grote wrijvingskrachten, en dus ook grote krachten op de bovenplaat en zijnokken, ontstaan. Een ongunstige situatie voor zowel de bovenplaat als een zijnok van een element is als de bovenplaat wordt meegenomen door de bovennok en aanligt tegen de onderste zijnok (figuur 22). De zijnok wordt dan belast met 1200 kN terwijl de bovenplaat in zijn vlak gebogen wordt met 200 kNm (gebruikswaarden, γ=1,0).



Figuur 22 Belasting bovenplaat en nokken

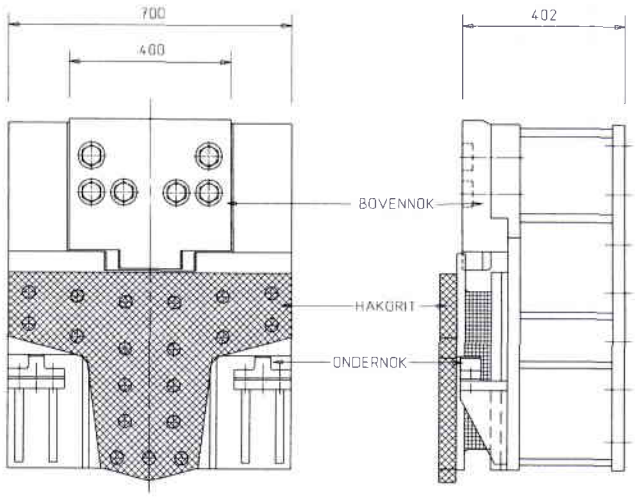
5.3 Schraper

Het onderste element van de schuifaanslag is een speciale schraapconstructie die tot doel heeft bij het bewegen van de schuif de aluminiumbronzen glijplaten over de breedte van het loopvlak van aangroeiing te ontdoen. Deze zgn. schraper bestaat zowel in een uitvoering met een zacht rubberpakket, aan de Noordzeezijde van de kering, als met een hard rubberpakket, aan de Oosterscheldezijde van de kering. Reden hiervoor is dat de schrapers ook meedoen in de belastingoverdracht van de schuifaanslag. De veerkarakteristiek van de schrapers (figuur 23) is vergelijkbaar met die van de schuifaanslagen (figuur 18). Verschillen treden op in de totaalkracht die per element overgedragen kan worden. De lengte van de rubberpakketten in de schrapers is nog geen 400 mm terwijl de lengte van de rubberpakketten in de gewone schuifaanslagen 1350 mm bedraagt.



Figuur 23 Veerkarakteristiek schrapers

De constructieve opbouw van de schrapers is vergelijkbaar met de gewone schuifaanslagelementen. Een schraper bevat een rubberpakket dat is gevulcaniseerd aan een boven- en onderplaat. De onderplaat is met bouten bevestigd aan de eindhar, op de bovenplaat bevindt zich het aanslagmateriaal. Afwijkend bij de schrapers is de vorm van de bovenplaat en het aanslagmateriaal dat hierop



Figuur 24 Schraper

bevestigd is. De bovenplaat is voor de schrapers T-vormig en heeft een breedte van 700 mm. Op deze plaat is het Hakorit bevestigd van eveneens 700 mm breedte (figuur 24). Door deze breedte wordt bij het verticaal bewegen van de schuif het loopvlak van de gewone schuifaanslagen op de glijplaten schoongeveegd.

Eveneens afwijkend bij een schraper zijn de verschillende nokken ter begrenzing van de verticale en horizontale vervormingen van het rubberpakket. Omdat een schraper het onderste element van een volledige schuifaanslag is bevindt zich onder de schraper geen element meer met een bovennok (figuur 16). De schrapers zijn daarom uitgerust met ondernokken om bij opwaartse schuifbewegingen de verplaatsing van de bovenplaat te begrenzen. Om horizontale (zijdelingse) verplaatsingen van de bovenplaat te begrenzen zijn er geen aparte zijnokken in de schrapers aanwezig. De bovenplaat wordt in zijdelingse richting begrensd door de bovennok en de ondernokken (figuur 24). De speling in verticale richting is 5 mm, de speling in horizontale richting is 2x30 mm. In verticale richting zal de bovenplaat van de schraper altijd aanliggen tegen de bovennok of de ondernokken, dit afhankelijk van de bewegingsrichting van de schuif.

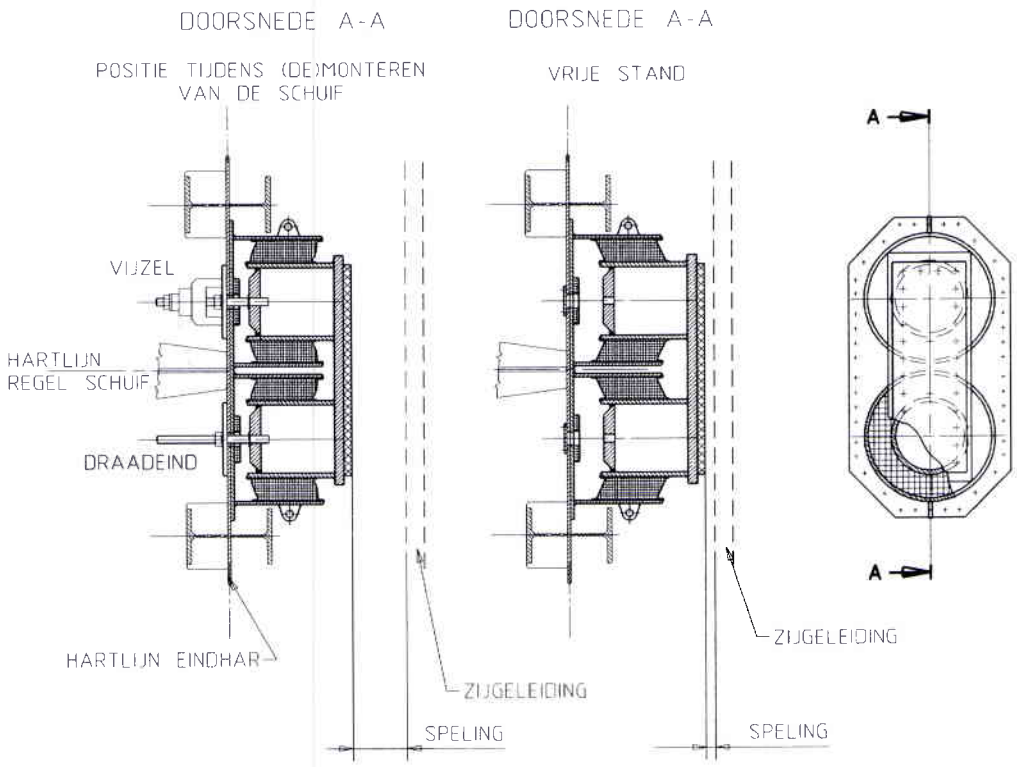
6. Zijaanslagen

6.1 Ontwerp zijaanslagen

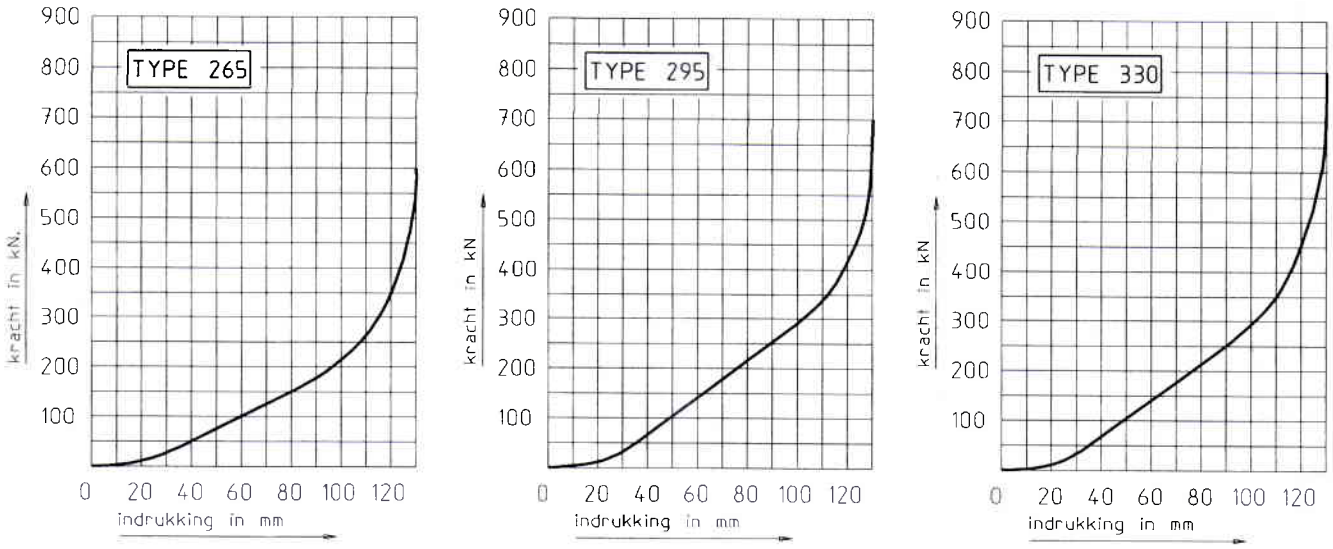
In de eerste ontwerpen waren de schuiven voorzien van een massief rubberblok met een glijplaat als zijaanslag. Met een speling van 2x50 mm in lengterichting als beginsituatie zou een schuif hiermee tussen de pijlers gemonteerd moeten worden. Uit onderzoek van het Waterloopkundig Laboratorium bleek dat bij toepassing van dit type zijaanslagen botskrachten op zouden kunnen treden groter dan de toelaatbare belasting van de pijlerwand. Om de grootte van de botskrachten te beperken werd er in eerste instantie voor gekozen minder stijve rubberblokken toe te passen. De invloed van zettingen en rotaties van de pijlers bleek echter met deze slappere zijaanslagen niet volledig te ondervangen.

Door de te verwachten ongelijkmatige zettingen van de pijlers kan de speling tussen de zijaanslag op de schuiven en de glijplaten in de sponning toenemen of afnemen. Toenemende speling heeft grotere botskrachten tot gevolg, door afnemende speling kan er een ongewenste voorspanning in de schuiven ontstaan en mogelijk kan klemlopen van de schuiven optreden. Om dit te voorkomen is het ontwerp van de massieve zijaanslagen gewijzigd in de huidige 'shock-cells'. Dit type aanslag heeft een wezenlijk slappere veerkarakteristiek dan massieve rubberblokken. Neemt de speling tussen schuif en pijler toe dan blijven de extra botskrachten door de verende werking van de shock-cells beperkt. Verdwijnt de speling tussen schuif en pijler dan ontstaat er door de slappe veerkarakteristiek van de shock-cells slechts een geringe voorspankracht. Een bijkomend voordeel van de gekozen uitvoering met shock-cells is de mogelijkheid deze tijdens montage volledig 'in te trekken' om zo tijdens het plaatsen van de schuiven extra speelruimte te creëeren (figuur 25).

Een zijaanslag is opgebouwd uit twee boven elkaar staande shock-cells, gekoppeld door een staalplaat met daarop een strip aanslagmateriaal. Elke shock-cell bestaat uit een binnenpijp en een buitenpijp, met elkaar verbonden door een gevulcaniseerde ring van natuurrubber (kwaliteit 70°-75° shore). Er zijn drie typen shock-cells toegepast die alleen verschillen in de lengte van de rubberring (265, 295 en 330 mm) en daardoor in veerkarakteristiek (figuur 26). De dikte van de rubberring is 126 mm bij elke uitvoering van de shock-cell. De buitenpijpen zijn bevestigd aan de eindkoker, de binnenpijpen zijn bevestigd aan de koppelplaat. Intrekken van de binnenpijpen is mogelijk door vanuit de eindkoker een draadstang in het deksel van de binnenpijp te draaien. Met vijzels kunnen de binnenpijpen vervolgens ingetrokken worden.



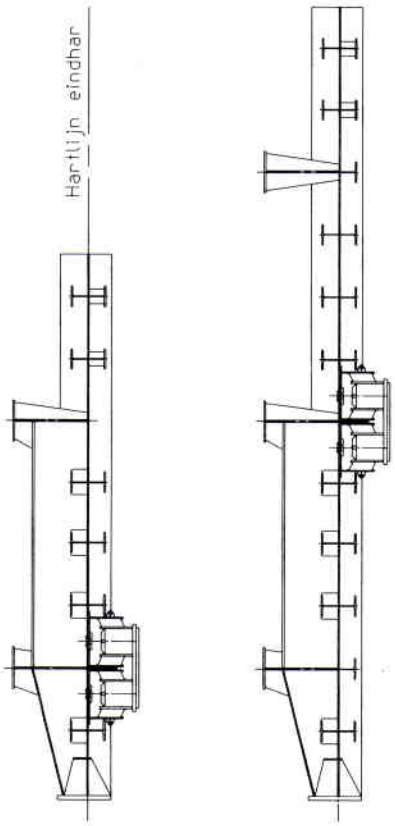
Figuur 25 Zijaanslag; ingetrokken en normale positie



Figuur 26 Veerkarakteristiek zijaanslagen

Voor een directe krachtsafdracht zijn de zijaanslagen ter hoogte van de vakwerkliggers op de eindkokers aangebracht (figuur 27). Bij de plaatsing van de zijaanslagen speelt ook mee dat bij de 3-regelige schuiven scheefloop van de schuiven niet mag leiden tot klemlopen van de schuif. Om klemlopen te voorkomen dienen bij de 3-regelige schuiven de zijaanslagen ter hoogte van de middelste vakwerkligger aangebracht te worden.

Uit het hydraulisch onderzoek aan de schuiven door het Waterloopkundig Laboratorium bleek dat de grootste langskrachten optreden bij gedeeltelijk geheven schuiven als tijdens stormvloedcondities de onderste vakwerkligger van een 2-regelige schuif, of de middelste vakwerkligger van een 3-regelige schuif, de stilwaterlijn passeert (figuur 32). De golfbeweging in de sponning blijft dan onder de bovenkant van de eindkoker en reductie van de langsbelasting door golfoverslag naar de eindkoker treedt niet op. Bij hogere schuifstanden is er minder overdracht van de langsbelasting op de schuif, bij lagere schuifstanden treedt reductie van de invloed van de langsbelasting op door golfoverslag in de eindkokers [6.1].



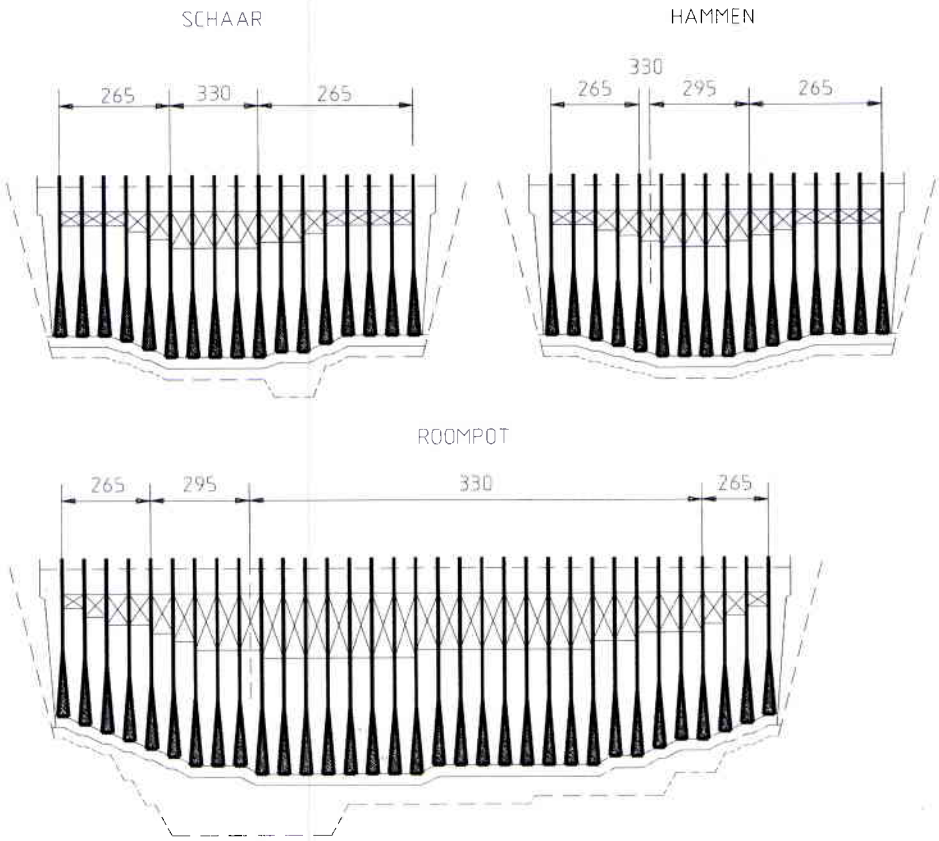
Figuur 27 Posities zijaanslagen

In het ontwerp van de shock-cells is rekening gehouden met de mogelijk optredende zettingen en rotaties van de pijlers, de aangrijpende langskrachten en de toelaatbare belastingen op de pijler. Voor de berekening (zie 6.2) is uitgegaan van de situatie dat de speling in de eindsituatie maximaal is, d.w.z. dat de pijlers uit elkaar bewegen. Met een uitgebreid 4-massa-veer-model zijn de bewegingen, snelheden, versnellingen en krachten van de schuiven en de zijaanslagen op de zijgeleiding berekend.

In de eindsituatie dient er een nog altijd een vervormingscapaciteit van tenminste 2x50 mm aanwezig te zijn om klemlopen door ongelijkmatige zettingen te voorkomen. Terugrekenend vanuit de eindsituatie kan de vervormingscapaciteit bepaald worden die tijdens de bouw aangebracht moet worden. Voor een aantal schuiven is de vervormingscapaciteit in de beginsituatie negatief wat inhoudt dat deze schuiven met voorspanning gemonteerd moeten worden. De mate van voorspanning is afhankelijk van de grootte van de verplaatsingen, die weer voornamelijk bepaald wordt door de positie van de pijlers in een sluitgat (figuur 28). In de diepere sluitgaten hebben ongelijkmatige zettingen in de ondergrond door de grotere pijlerhoogte ook grotere verplaatsingen tot gevolg.

6.2 Berekening zijaanslagen

De langsbelasting op de schuiven ontstaat door een verschil in waterstand in de schuifsponningen van de pijlers waartussen de schuif beweegt. Dit waterstandsverschil is een gevolg van scheef inlopende golven. Op basis van metingen in een schaalmodel zijn de waterstandsverschillen bepaald en overdrachtsfuncties naar de schuif opgesteld, zie ook deelnota 2.



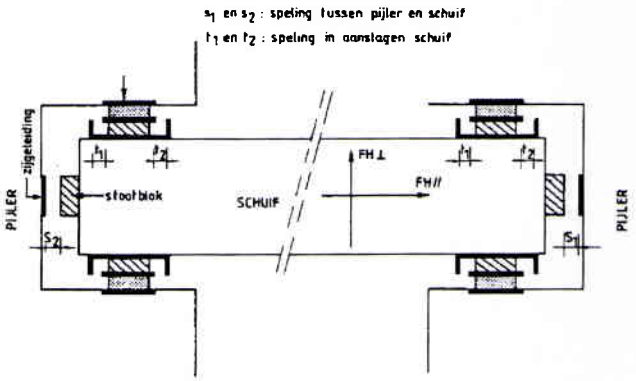
Figuur 28 Verdeling typen zijaanslagen

Binnen de spelingsruimte kan een schuif onder invloed van een langsbelasting in lengterichting bewegen. Wanneer deze beweging door een pijler wordt gestopt veroorzaakt dit een botskracht op de pijler, en in de schuif, en ontstaan er vertragingskrachten op het bewegingswerk.

De grootte van de botskrachten tegen de pijlers is afhankelijk van de waterstandsverschillen in de sponningen, de speling, de wrijving, de voorspanning in de schuifgeleidingen en de veerkarakteristiek van de zijaanslagen. Met deze factoren als functies van de belasting is een 4-massa-veermodel opgesteld waarmee langsbelastingen, verplaatsingen en versnellingen zijn berekend (zie figuur 38, deelnota 2). Voor de wrijvingscoëfficiënt in de schuifgeleiding is zowel statische waarde als de dynamische waarde opgenomen in het model. De in het model opgenomen spelingen betreffen de speling van de zijaanslagen tot de pijlers (s1, s2) en de speling in de schuifgeleidingen ten opzichte van de zijnokken (t1, t2), zie figuur 29.

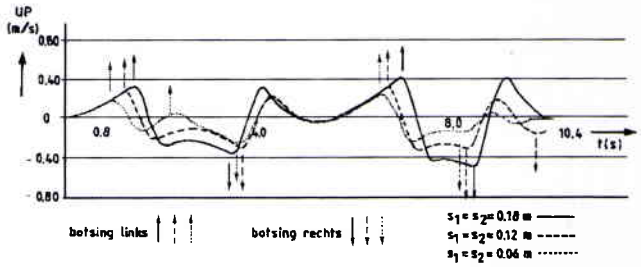
De grootste botskrachten treden op in situaties met een grote speling, grote langsbelasting en een kleine vervalbelasting. Bij een geringe vervalbelasting zijn de wrijvingskrachten in de schuifgeleiding klein waardoor de langsbeweging weinig afgeremd wordt.

De meest invloedrijke parameters van het 4-massa-veermodel zijn de veerstijfheid van de zijaanslag (k2) en de speling van de zijaanslag (s1, s2). Door een juiste keuze van de veerkarakteristiek van de zijaanslagen, en een beperking van de speling, kunnen de langskrachten van de schuif op de pijler beperkt worden zodanig dat de toelaatbare belasting op het lijf van de pijler niet wordt overschreden. Als voorbeeld in figuur 30 een vergelijking van de snelheden van een botsende schuif bij verschillende spelingen. De



Figuur 29 Modelspelingen in langsrichting

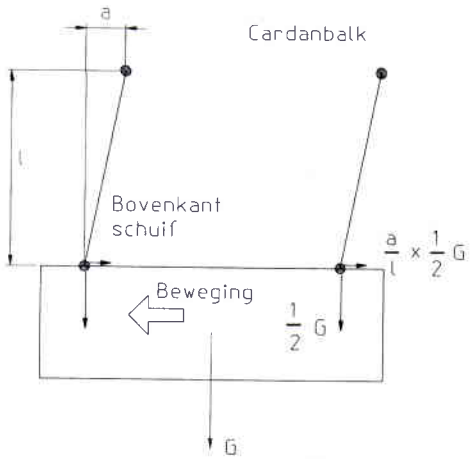
snelheidsontwikkeling is in de drie berekeningen gelijk, maar bij een grotere speling wordt een grotere snelheid opgebouwd voordat de botsing tegen de pijler plaatsvindt. De berekende bots-



Figuur 30 Relatie bewegingsnelheid en speling

krachten zijn te relateren aan de impuls (massa x snelheid) op het moment van botsen. Omdat de massa van de schuif gelijk is in de berekeningen is de botskracht evenredig met de snelheid op moment van botsen.

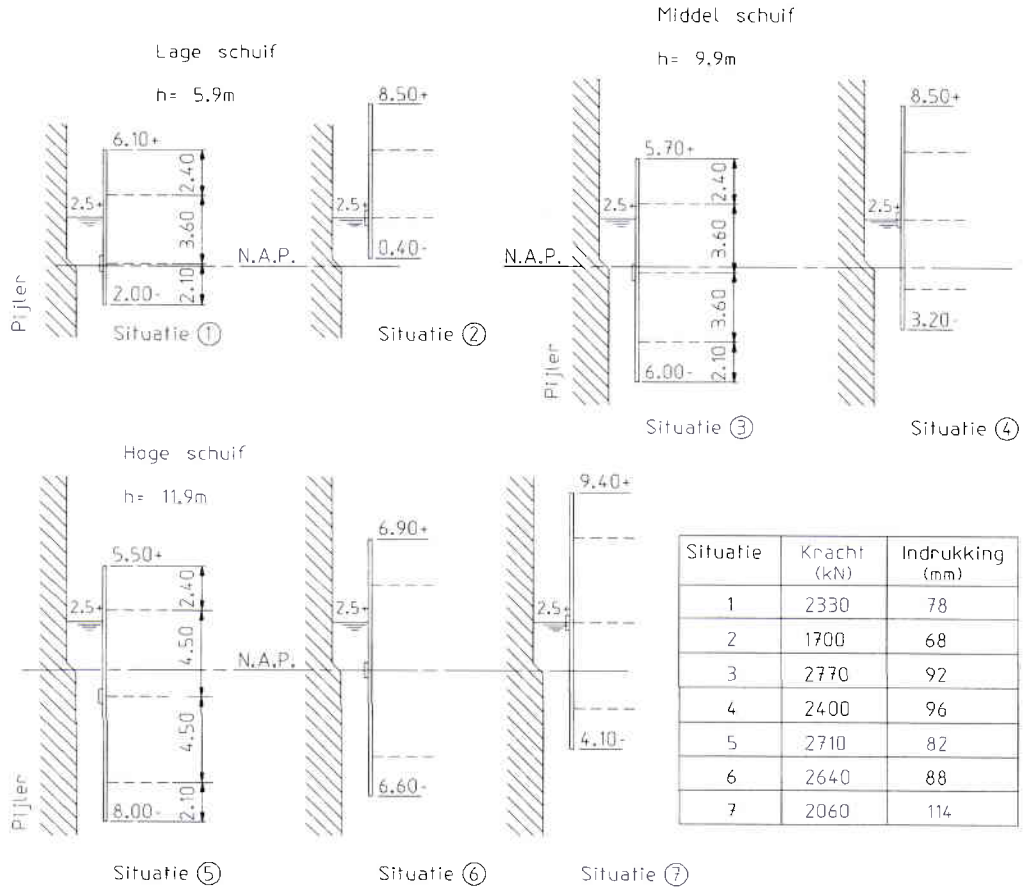
Naast de veerstijfheid van de zijaanslag en de grootte van de speling is de veer k6 van belang. Deze combineert de hydro-dynamische stijfheid en demping van het water in de sponning met het pendel-effect van de schuif (figuur 31). Het pendeleffect resulteert in een kracht tegengesteld aan de langsbelasting door golven.



Figuur 31 Pendeleffect schuifgewicht

Vooral bij schuifstanden waar de zijaanslag hoger ligt dan N.A.P. +2,50 m, en dus de uitgeschoven lengte van de cilinder relatief klein is, is de invloed van het pendel-effect van de schuif via de veer k6 aanzienlijk. Door het toevoegen van het pendel-effect bleken de krachten van de zijaanslagen op de zijgeleidingen in de 'hoge' schuifposities met een derde te reduceren tot de waarden vermeld in figuur 32.

Omdat het lijf van de pijler verjongt boven N.A.P.+0,0 m, waardoor de toelaatbare belastingen op de pijler afnemen, treden de meest kritische situaties m.b.t. de langsbelasting derhalve op bij schuifstanden waarbij de zijaanslag zich ter hoogte van N.A.P.+0,0 m bevindt. Maatgevend voor de berekening zijn de situaties zoals in figuur 32 weergegeven. De maximale krachten van de zijaanslagen op de zijgeleiding die in deze situaties optreden staan vermeld in de tabel. Het betreft hier extreme belastingen met een berekende overschrijdingskans van $2{,}5 \times 10^{-4}$. De aan deze overschrijdingskans gerelateerde sterkte van de pijlerwand onder N.A.P. -2,5 m is 5400 kN en boven N.A.P.+2,5 m 1800 kN. In het gebied van N.A.P.-2,5 m tot N.A.P.+2,5 m verloopt de sterkte van de pijlerwand lineair. De sterkte van de pijlerwand is inclusief een vergrotingsfactor van 1,2 die een verhoging van de sterkte toestaat voor kortdurende belastingen. Voor de situaties 4 en 7 in figuur 32 wordt de sterkte van de pijlerwand nog overschreden. Bij de schuiven waar dit optreedt is de botskracht verder teruggebracht door de speling in langsrichting te verkleinen door de zijaanslagen onder voorspanning te monteren.



Situatie	Kracht (kN)	Indrukking (mm)
1	2330	78
2	1700	68
3	2770	92
4	2400	96
5	2710	82
6	2640	88
7	2060	114

Figuur 32 Botskrachten zijaanslagen

Met de berekeningen is de gewenste veerkarakteristiek van de zijaanslagen bepaald, de daarbij horende indrukkingen liggen in de grootte-orde van 100 mm. De dimensionering van de shock-cells is gebaseerd op de omzetting van kinetische energie in veerenergie:

$$^1/_2 M \cdot v^2 = {}^1/_2 F_{bots} \cdot \delta$$

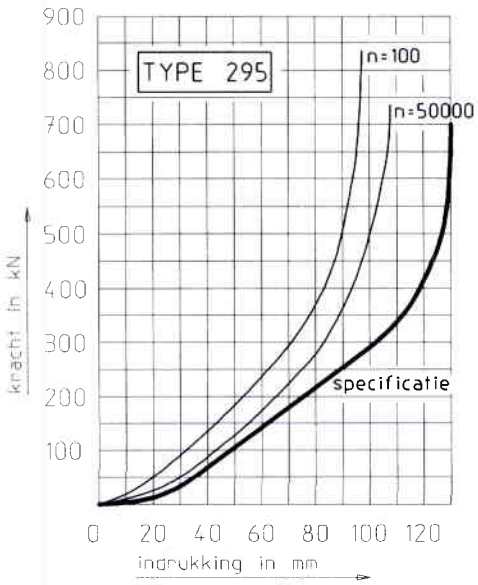
$$F_{bots} = M \cdot \frac{v^2}{\delta}$$

Voor een schuif van 11,9 m, met M=1.070.000 kg (inclusief meewerkende watermassa), is een maximale botssnelheid berekend van v=0,47 m/s en een daarbij optredende botskracht van 2700 kN. Dit is in overeenstemming met de bijbehorende indrukking van d=0,082 m in de zijaanslag.

6.3 Vermoeiing zijaanslagen

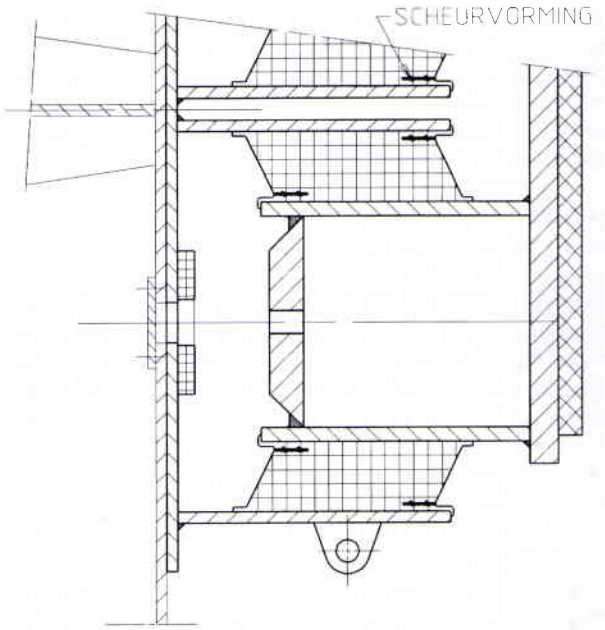
Enkele jaren na oplevering van de kering zijn bij de zijaanslagen scheuren in het rubber geconstateerd ter plaatse van de bevestigingslip aan de buitenpijp. De scheuren zijn waarschijnlijk geïnitieerd door blootstelling aan ozon. Door de krappe afrondingsstralen ter plaatse van de aansluitingen konden deze scheurtjes door de wisselende belastingen uitgroeien tot diepere vermoeiingsscheuren. Teneinde de ernst van de scheurvorming te onderzoeken is een reserve exemplaar van een zijaanslag type 295 bij TNO beproefd op vermoeiing [6.3].

Bij de beproeving bleek de shock-cell zich stijver te gedragen dan op basis van de specificaties verwacht mocht worden (stijfheid 60% groter). Dit betekent dat zowel de botskrachten van de schuif tegen de pijler, als een eventueel aanwezige voorspankracht in lengterichting, groter kunnen zijn dan berekend. In de vermoeiingsproef is de belasting in eerste instantie vergroot om tot een vervorming in dezelfde orde grootte als bij de specificatie te komen. Omdat de stijfheid van de shock-cell door de toenemende scheurvorming afnam, namen de verplaatsingen zodanig toe dat aanlopen van de koppelplaat tegen de buitenbuis optrad. Om deze reden is gedurende de proef de grootte van de belasting stapsgewijs gereduceerd.



Figuur 33 Stijfheid zijaanslag tijdens beproeving

De achteruitgang van de stijfheid door vermoeiing van de zijaanslag verloopt geleidelijk, de gescheurde aanslag vertoont met het groeien van de scheuren een veerkarakteristiek die steeds beter op de specificatie lijkt (figuur 33). Bij het beëindigen van de proef, na 50.000 wisselingen, ligt de stijfheid van de shock-cell nog steeds boven de gespecificeerde waarde. De scheuren die langs de rand van het rubber aan de buitenbuis zijn ontstaan hebben een diepte van maximaal 55 mm (figuur 34). Bij de aansluiting van het rubber aan de binnenbuis zijn eveneens scheuren van 55 mm lengte ontstaan [6.4].



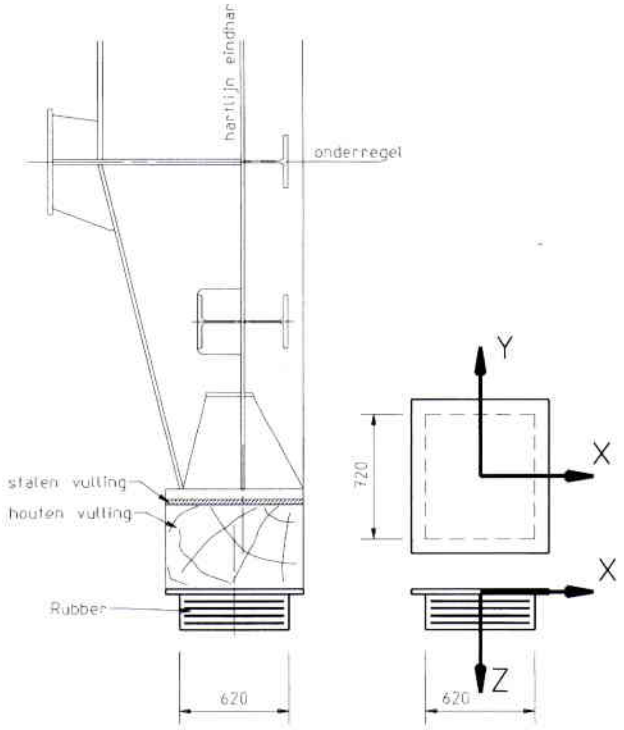
Figuur 34 Scheurvorming zijaanslag na beproeving

De vermoeiingsproef op de zijaanslag is uitgevoerd met een zwaarder belastingspectrum dan in werkelijkheid op zal treden. De proef toont dat de kans op plotseling bezwijken van de zijaanslagen door excessieve scheurvorming gering is. Het advies is regelmatig het rubber te inspecteren en bij twijfel omtrent de kwaliteit de veerkarakteristiek van de zijaanslagen in de praktijk vast te stellen. Als laatste actie zijn de beproefde shock-cell en een licht door ozon aangetaste shock-cell uit de kering met elkaar vergeleken. Het blijkt dat de materiaalstructuur van het zwaar gescheurde rubber niet wezenlijk veranderd is door vermoeiing. Vermoeiing heeft voornamelijk grotere en diepere scheuren tot gevolg [6.5].

7. Onderaanslagen

De onderaanslagen zijn bevestigd aan de schuifconstructie aan de onderzijde van de eindkokers. Het doel van de onderaanslagen is tweeledig. Met de onderaanslagen zijn tijdens de bouw verschillen in de hoogteligging van de pijlers gecorrigeerd, en daarnaast maken de onderaanslagen het mogelijk om de schuif in gesloten toestand voor te spannen. Dit wordt gedaan om te voorkomen dat er door verticale golfbelastingen grote belastingwisselingen in de bewegingswerken optreden en om de verticale bewegingen van de schuif in gesloten toestand te beperken.

De onderaanslagen bestaan uit een gestapelde constructie van een rubberpakket, een groot houten vulblok en, eventueel, stalen vullingen (figuur 35). Met draadstangen is het gehele pakket aan de onderzijde van de eindkokers bevestigd. Het oppervlak van het rubberpakket is voor alle onderaanslagen gelijk, de hoogte van het rubberpakket is afhankelijk van de optredende krachten en de zettingen van de pijlers. Het rubberpakket bevat 5 tot 7 gevulcaniseerde staalplaten waardoor de hoogte varieert van 172, 198 of 224 mm. De rubberkwaliteit is 60° shore. Voor de houten vulblokken is Azobé toegepast. De hoogte van de onderaanslagen is passend gemaakt na meting van de stand van de pijlers. Voor het overbruggen van grote verschillen dienen de houten vulblokken, de nauwkeurige afstelling is bereikt met de stalen vullingen.



Figuur 35 Onderaanslag

Bij een gesloten schuif moet het rubberpakket van de onderaanslag de rotaties en spelingen door de bewegingen van de schuif opnemen. Voor alle onderaanslagen gelden de randvoorwaarden uit tabel 3. De waarden van de verplaatsingen en rotaties kunnen zowel positief als negatief zijn.

Beweging	Max. waarde	Richting
δX	35 mm	Vervalrichting
δY	50 mm	Lengterichting
Φ_x	0,020 rad	Vert. doorbuiging schuif
Φ_y	0,015 rad	Kantelen
Φ_z	0,010 rad	Hor. doorbuiging schuif

Tabel 3 Randvoorwaarden onderaanslagen

In gesloten toestand van de kering wordt een schuif met voorspanning op een oplegvlak (van beton) onderin de sponning gedrukt. Tegenover de onderaanslagen is geen aparte voorziening in het beton van de pijler opgenomen. Bij een stormvloedsluiting worden de schuiven door de cilinders met een kracht van 5100 kN tot 9050 kN, afhankelijk van het cilindertype, dichtgedrukt (totaalkracht uitgeoefend door beide cilinders samen). De cilinders zijn op deze krachten uitgelegd om de schuif onder de ontwerp-omstandigheden te kunnen sluiten. De in tabel 4 opgenomen krachten hebben betrekking op een totale schuif, d.w.z. met twee cilinders en twee onderaanslagen. De grootte van de voorspankracht is gebaseerd op de maximaal opwaarts werkende kracht tijdens sluiten. Deze opwaarts werkende kracht bestaat tijdens sluiten uit een opwaartse verticale golfbelasting en de tegen de neerwaartse schuifbeweging werkende wrijvingskracht in de geleidingen (met μ=0,4). Zie hiervoor ook de krachtdiagrammen van de bewegingscyclus in deelnota 5. In gesloten toestand, als er niet meer met wrijving in de schuifgeleidingen gerekend mag worden (μ=0), is de voorspankracht ruim voldoende om de verticale golfbelastingen op te nemen.

De minimale indrukking die in gesloten toestand vereist is, is gesteld op 5 mm. Tezamen met de randvoorwaarden en de eis dat bij het sluiten de neerwaartse kracht (neerwaartse verticale golfbelasting is ook mogelijk) niet groter mag zijn dan de uiteindelijke sluitkracht is de veerstijfheid van het rubberpakket in de onderaanslag bepaald.

Vanwege de geringe sluitsnelheid van de schuiven van 3 mm/s is de botskracht die optreedt bij het sluiten van de kering minimaal. Bepalend in de dimensionering van de onderaanslagen is de maximale horizontale verplaatsing van 50 mm in lengterichting van de

Schuif-hoogte	Droog schuif-gewicht	Nat schuif-gewicht	Voorspan-kracht 2 cilinders	Verticale belasting 2 oplegblokken
[m]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
5,9	2570	1660	5100	6760
6,9	2870	1740	5800	7540
7,9	3150	1970	6550	8520
8,9	3720	2260	7040	9300
9,9	3990	2480	7800	10280
10,9	4470	2600	8400	11000
11,9	4790	2850	9050	11900

Tabel 4 Verticale krachten in gesloten toestand

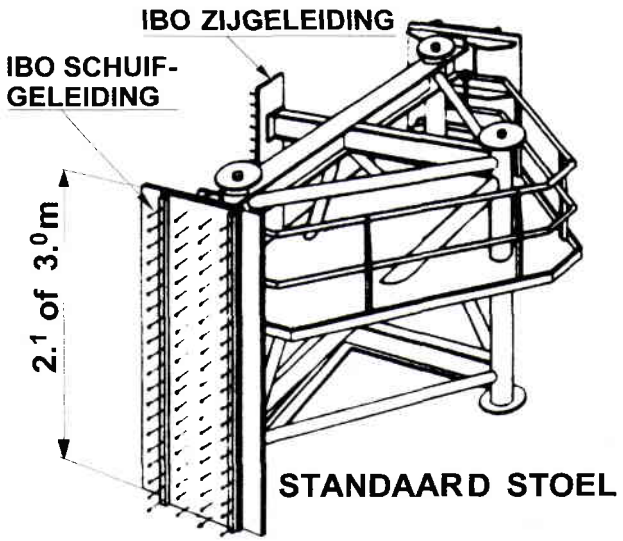
schuif. Onder invloed van scheef inlopende golven kan de schuif in lengterichting bewegen waarbij, door de verticale voorspanning uit de cilinders in gesloten toestand van de kering, de onderaanslag deze verplaatsing moeten volgen. Door de rubberpakketten voldoende hoog te kiezen kunnen de afschuifkrachten in het rubber t.g.v. deze verplaatsing (en ook de andere verplaatsingen en rotaties) beperkt blijven.

8. Montage schuifgeleidingen en sponningkuip

De montage van de schuifgeleidingen heeft in meerdere stappen plaatsgevonden. Eerst zijn de verankeringsconstructies in het beton van de pijlers ingestort. Daarna zijn de glijpaten aangebracht en afgesteld, en is de ruimte tussen de verankeringsconstructies en de glijplaten gevuld met fijn grind. Tenslotte zijn de glijplaten ondersabeld en na uitharden zijn de bevestigingsbouten van de glijplaten voorgespannen.

8.1. Montage verankeringsconstructie

De sponningen, zijnde de pijleropbouw van schachtaanzet tot onderzijde hamerstuk, zijn gestort in de 5e, 6e en 7e stort van de pijlerbouwcyclus (boek 3, deelnota 2,hoofdstuk 1.4). Voor het goed functioneren van de schuiven is een nauwkeurige afstelling van de hierin aangebrachte schuifgeleiding vereist. De verankeringsconstructies voor de bevestiging van de glijplaten zijn de zogenaamde 'in te betonneren onderdelen' (ibo's), die tijdens de bouw zijn ingestort in de sponningen. Teneinde een goede positionering van de ibo's te bereiken zijn er speciale stelconstructies toegepast. De stelconstructies bestaan uit ruimtelijke vakwerken van 2,1 of 3,0 m hoogte (figuur 36), overeenkomend in hoogte met de aan te brengen glijplaten.



Figuur 36 Stelconstructie schuifgeleidingen

Elke stelconstructie is zo vormgegeven dat de ibo's van de twee schuifgeleidingen en een zijgeleiding tegelijk gesteld kunnen worden. De stelconstructies worden aan weerszijden van de te storten pijleropbouw op elkaar gestapeld. Bij de 5e stort zijn de stelconstructies bevestigd aan het beton van de pijler onder de geleidin gen, bij de 6e en 7e stort zijn de stelconstructies bevestigd aan de ibo's van de 5e stort. Aan de bovenzijde, boven de bekisting van een stort, zijn de stelconstructies van de beide sponningen gekoppeld [8.1].

8.2. Aanbrengen epoxymortel

Nadat de gehele pijler is afgestort en uitgehard zijn de glijplaten aangebracht. Met een stelbaak en aparte stelbouten zijn de glijplaten nauwkeurig op de verankeringsconstructies gesteld. De stelruimte tussen de platen van de verankeringsconstructie en de glijplaten bedraagt gemiddeld 20 mm. Voor het aanbrengen van de epoxymortel fungeren de glijplaat en verankeringsconstructie als bekisting. De smalle spleet aan de zijkant van de glijplaten is gebruikt voor ontluchtingsgaten. De gekozen mortel bestaat uit vooraf aangebracht fijn grind waartussen de epoxyhars geïnjecteerd is.

De injectie van de epoxyhars vond plaats via de deling tussen twee glijplaten. Per glijplaat is in een continu proces van onder naar boven de ruimte tussen het grind gevuld. Door de grote hoogte van de sponningen was het niet mogelijk meerdere glijplaten tegelijk te ondersabelen. Na het ondersabelen van een glijplaat werden de injectiepunten verlegd naar de volgende, hoger gelegen, glijplaat waarna het injecteren verderging. Het aanmaken en mengen van de epoxyhars gebeurde continu en werd niet onderbroken voor het verzetten van de injectiepunten.

Na vijf dagen uitharden zijn de aluminiumbronzen tapbouten nagespannen met een klemkracht van 50 kN. De boutkop is vervolgens afgedekt met een kunststof kap die klemt op een kraagbus onder de boutkop. De stelbouten zijn verwijderd en de achtergebleven boutgaten zijn eveneens gevuld met epoxyhars.

Vanwege het strakke tijdschema van de bouw was het noodzakelijk ook in de winter te ondersabelen. Om problemen met het uitharden van de epoxyhars te voorkomen zijn gedurende de wintermaanden de sponningen verwarmd met kachels. Toch ontstonden er problemen bij het ondersabelen van de glijplaten van de eerste pijlers, juist gedurende een winterperiode. Een aantal proefstukken voldeed niet aan de specificaties en vertoonde daarnaast een grote spreiding in de eigenschappen. Ook de epoxymortel uit de kering bleek niet te voldoen aan de vooraf gestelde sterkte-eisen. Om het uitharden van de epoxymortel beter te laten verlopen is 10% meer hars aan het mengsel toegevoegd. Vanaf pijler twaalf van bouwdok I zijn alle glijplaten verder ondersabeld met een epoxymortel met een mengverhouding van 330 delen hars en 100 delen harder.

Onderzoek naar de wijze van vervaardigen van de proefstukken losten het probleem niet direct op, terwijl aanvullend onderzoek naar verharding van epoxymortel tijdens lage temperaturen ook geen uitsluitsel gaf. Uiteindelijk bleek dat door slechte menging de verhouding hars en harder soms 100% af kon wijken van de spe-

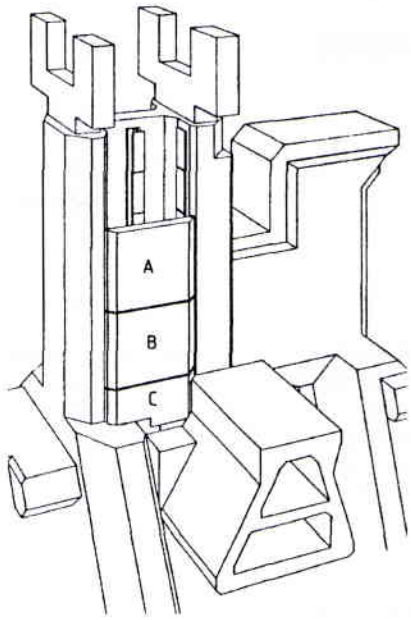
cificatie [8.2]. Door nauwkeuriger apparatuur toe te passen werd daarna wel de goede mengverhouding van het mengsel bereikt.

Aansluitend is er onderzoek gedaan naar de materiaaleigenschappen en het langeduurgedrag van epoxymortels met een mengselsamenstelling afwijkend van de door de fabrikant opgegeven verhouding. Onderzocht zijn vijf mengselsamenstellingen waarin de hoeveelheid hars varieert van 180 tot 420 delen, terwijl het aantal delen harder constant gehouden wordt op 100 [8.3]. De voorgeschreven mengverhouding in het bestek was 300 delen hars en 100 delen harder. Het verouderingsonderzoek is vanwege de tijdsdruk uitgevoerd bij een watertemperatuur van 100°C. Belangrijkste resultaat van het onderzoek is dat bij een groter aandeel hars gelijke of betere resultaten voor de druksterkte en duurzaamheid bereikt worden. Minder hars dan de voorgeschreven hoeveelheid van de mengverhouding geeft altijd slechtere resultaten. Dit onderzoek bevestigde de juistheid van de eerder genomen beslissing de hoeveelheid hars in de epoxymortel te vergroten [8.4].

8.3 Sponningkuip

De sponningkuip (droogzetkuip) is een hulpmiddel waardoor de schuifsponningen van de pijlers drooggezet kunnen worden. Dit kan nodig zijn om een eventuele reparatie of vervanging van een glijplaat mogelijk te maken. Ook het aanbrengen en uitharden van de epoxymortel tussen een glijplaat en de verankeringsconstructie dient in een droog milieu te gebeuren.

De sponningkuip is modulair ontworpen, er is rekening gehouden met de acht verschillende schacht-aanzetten van de sponningen en met de verschillende sponninghoogtes. Door het combineren van slechts vier kuipmodules (A1, A2, B1, B2) is het mogelijk voor elke sponninghoogte een sponningkuip samen te stellen. Vanwege de verschillende schachtaanzetten van de pijlers zijn echter altijd acht aparte beginmodules nodig (C1 t/m C8), zie figuur 37. In horizontale richting steunt de sponningkuip met houten aanslagen tegen de afgeschuinde randen van de pijler. Door de waterdruk wordt de sponningkuip altijd tegen de pijler aangedrukt. De verticale afdichting van beginmodule op de schachtaanzet wordt gerealiseerd door een oppompbare compressieafdichting, hiermee zijn maatafwijkingen en onvlakheden in de betonconstructie beter op te vangen dan met houten aanslagen.



Figuur 37 Ontwerp sponningkuip

Tijdens de bouw is er sprake geweest van het achter de hand houden van een Universeel Inzetbare Pijler (U.I.P.) die ingezet zou moeten worden ingeval van een calamiteit (zie boek 3, deelnota 2, hoofdstuk 1.5). Deze U.I.P. was alleen voorzien van ingestorte verankeringsconstructies. De gedachte was deze pijler ook van glijplaten te voorzien die bij calamiteiten eventueel gebruikt zouden kunnen worden in andere pijlers. Vanwege de hoge kosten zijn echter geen aluminiumbronzen glijplaten aangebracht noch in voorraad gehouden. Uit een analyse van de tijd benodigd om een sponningkuip te maken, en de tijd benodigd om aluminiumbronzen glijplaten te vervaardigen, bleek dat het laatste slechts twee maanden meer tijd kostte dan het eerste. Gezien het feit dat niet te voorspellen valt voor welk pijlertype een sponningkuip nodig zal zijn, en het vervaardigen en opslaan van alle sponningkuipmodules ook hoge kosten met zich meebrengt, is de vervaardiging van sponningkuipmodules achterwege gelaten [8.5].

9. Documentatie

Documenten in deze lijst zijn ontleend aan het archief van Rijkswaterstaat. De aanduiding PROBU verwijst naar het projectbureau dat tijdens de bouw het document heeft opgesteld.

[2.1]	toleranties en deformatie eisen	nota 50TOLE-N-80001
[2.2]	breedte schuifgeleidingen	notitie 6PROBU-M-79032
[2.3]	verbreding schuifaanslagen	notitie 6PROBU-M-80194
[2.4]	verbreding schuifgeleidingsbreedte	notitie 6PROBU-M-80187
[2.5]	tekening A75680	archief Rijkswaterstaat
[2.6]	wrijvingsonderzoek schuifgeleidingen	notitie 6PROBU-M-80008
[2.7]	voorspanniveau schuifaanslagen	notitie april 1980 berekeningsmap 96238/BSS/NIS
[2.8]	voorstel onderzoek rubber schuifaanslagen	notitie 6PROBU-M-82135
[2.9]	voorstel onderzoek rubber schuifaanslagen	notitie 6PROBU-M-82135
[2.10]	stand van zaken langsbelasting	notitie 6PROBU-M-82188
[3.1]	wrijvingscoëfficiënten	rapport TNO-IBBC B-77-387
[3.2]	wrijvingsonderzoek	notitie 6PROBU-M-80008
[3.3]	corrosie schuifgeleidingen	notitie 6PROBU-M-87063
[3.4]	slijtvastheid aanslagmateriaal	rapport TNO-IBBC B-80-626
[3.5]	materiaal schuifaanslagen	notitie 6PROBU-M-82198
[3.6]	slijtvastheid aanslagmateriaal	rapport TNO-IBBC B-81-456
[3.7]	karakterisering van polyetheenstroken	rapport KRI-TNO 256/83
[3.8]	keuring van polyetheenstroken	rapport KRI-TNO 124/84
[3.9]	ondersabeling schuifgeleidingen	notitie 6PROBU-M-79040
[3.10]	onderzoek epoxyharsgietmortel	rapport RL KBW-R-80.03
[3.11]	materiaalkeuze ondersabeling	rapport KRI-TNO 9/81
[3.12]	beproeving rubber schuifaanslagen	rapport TNO-IBBC B-84-164
[3.13]	rubber schuifaanslagen	notitie 6PROBU-M-83151
[3.14]	beproeving rubber schuifaanslag	rapport TNO-IBBC B-85-321
[4.1]	levensduurbeschouwing gietijzeren stoelen	notitie 6PROBU-M-78102
[4.2]	schuifgeleidingscorrosie	notitie 6PROBU-M-88027
[4.3]	schuifgeleidingscorrosie	notitie 6PROBU-M-89014
[4.4]	wijziging onderhoudsstand schuif	notitie 6PROBU-M-89010
[4.5]	verbreding schuifgeleidingsbreedte	notitie 6PROBU-M-80194
[4.6]	schuifgeleidingen	notitie 6PROBU-M-79028
[4.7]	epoxyharsgietmassa voor ondersabelen	verslag vergadering 6PROBU-M-81021
[5.1]	rubber t.b.v. schuifaanslagen	notitie 6PROBU-M-83151
[5.2]	berekening schuifaanslagen	berekeningsmap 96239/BSS/NIS
[6.1]	berekening zijaanslag	notitie 6PROBU-M-83103
[6.2]	berekening botskrachten lengterichting	rapport WL M1648 deel III
[6.3]	vermoeiingsproef zijaanslag	rapport TNO B-89-340
[6.4]	onderzoek zijaanslagen	notitie 6PROBU-N-90008
[6.5]	onderzoek rubber zijaanslag	rapport CPM/TNO 12/90
[8.1]	opbouw en werkwijze stelconstructie	tekening A75681, archief Rijkswaterstaat
[8.2]	aanvullend onderzoek ondersabeling	notitie 6PROBU-B-81052
[8.3]	langeduurgedrag epoxymortels	rapport KRI-TNO 29/82
[8.4]	werkvergadering ondersabeling	verslag 6PROBU-M-81152
[8.5]	sponningkuip	notitie 6PROBU-M-83134

Deelnota 5: Bewegingswerken

Inhoud

1. Inleiding pagina **154**

2. Uitgangspunten ontwerp **158**
2.1 Capaciteitsbepalende randvoorwaarden
2.1.1 Beheer bewegingswerken
2.1.2 Beheer bij stormsluiting
2.1.3 Waterstanden en golfhoogten
2.1.4 Schuifontwerp
2.2 Kwalitatieve eisen
2.2.1 Faalkans bewegingswerken
2.2.2 *Levensduur*
2.3 Belastingen
2.3.1 Overzicht belastingen
2.3.2 Grootte van de belastingen
2.3.3 Krachten onderoog zuigerstang
2.3.4 Golfbelasting
2.3.5 Massakrachten werkend op zuigerstangen
2.3.6 Optredende oliedrukken in cilinders
2.3.7 Reactiekrachten cilinders en cardanbalken
2.4 Sterkte toegepaste materialen
2.4.1 Inleiding
2.4.2 Toelaatbare spanningen en kerffactoren
2.4.3 Toelaatbare spanningen materialen cilinders
2.4.4 Toelaatbare spanningen cardanbalken

3. Algemene beschrijving systeem **172**
3.1 Overzicht en hoofdafmetingen
3.2 Overzicht installatie-typen
3.3 Verantwoording ontwerpkeuzen
3.3.1 Symmetrie pijleraanzicht
3.3.2 Hydraulisch versus mechanisch bewegingswerk
3.3.3 Wijze van montage
3.3.4 Toepassing cardanbalken
3.3.5 Extra slag cilinders
3.4 Stick-slip en dynamische analyse
3.5 Het *mechanisch bewegingswerk*

4. Beschrijving onderdelen **183**
4.1 Cilinder
4.1.1 Cilindermantel en cilinderdeksel
4.1.2 Lantaarnstuk
4.1.3 Zuiger en zuigerstang
4.1.4 Bevestiging onderoog aan zuigerstang
4.1.5 Afdichtingen
4.1.6 Assemblage cilinders
4.2 Cardanbalk en staalconstructie onderoog
4.2.1 Cardanbalk
4.2.2 Cardanstoel
4.2.3 Bevestiging onderoog aan schuif
4.2.4 Lagers
4.3 Hydraulisch systeem
4.3.1 Componenten hydraulisch systeem
4.3.2 Hydraulische olie
4.3.3 Hydraulisch schema
4.3.4 Beproeving hydraulisch systeem
4.4 Gelijkloopinstallatie
4.4.1 Keuze type gelijkloopinstallatie
4.4.2 Beschrijving gelijkloopinstallatie
4.5 Conserveringssysteem zuigerstangen
4.5.1 Ontwerpuitgangspunten en conserveringsmiddel
4.5.2 Werking en onderdelen conserveringsinstallatie
4.5.3 Pompsysteem conserveringsinstallatie
4.5.4 Modificaties conserveringsinstallatie
4.6 Containers
4.6.1 Toepassing containers
4.6.2 Constructie containers
4.6.3 Fabricage en montage containers
4.7 Trappen en bordessen
4.8 Bliksembeveiliging
4.8.1 Ontwerpoverwegingen bliksembeveiliging
4.8.2 Voorzieningen bliksembeveiliging

5. Uitvoeringsaspecten **216**
5.1 Risico-onderzoek
5.2 Assemblage en montage
5.2.1 Samenbouw cilinder met cardanbalk
5.2.2 Transport naar de kering
5.2.3 Montage op de kering

6. Onderhoudsaspecten **218**
6.1 Inleiding onderhoud
6.2 Planmatig onderhoud
6.2.1 Planmatig klein onderhoud
6.2.2 *Planmatig groot onderhoud*
6.3 Reservedelen

7. Documentatie **221**

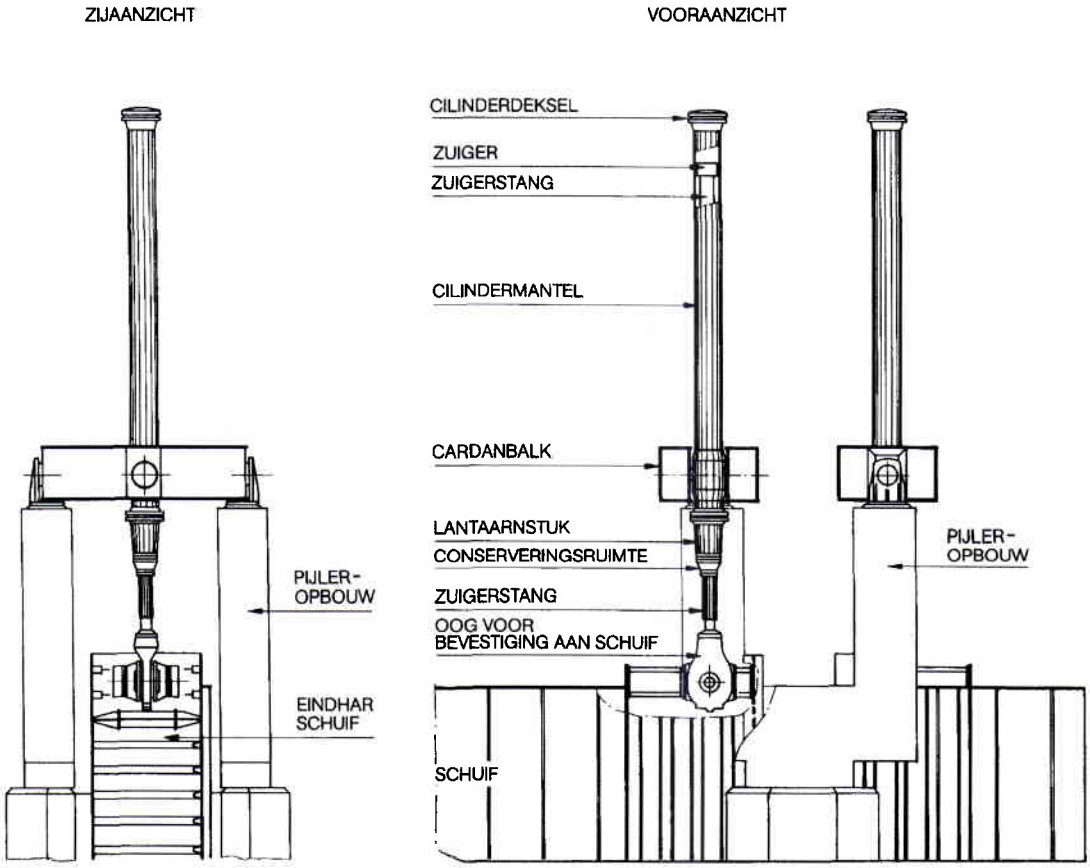
1. Inleiding

Het afsluitbare deel van de Stormvloedkering biedt aan het water van de Oosterschelde 62 doorstroomopeningen met een gelijke breedte en een variabele diepte. De doorstroomopeningen kunnen worden afgesloten met stalen schuiven (zie deelnota 3). De schuiven worden geleid langs aluminiumbronzen geleidingen, aangebracht in sponningen in de pijlerschachten (zie deelnota 4). In gesloten stand rusten de schuiven op onderaanslagen. De bewegingswerken staan op de hamerstukken van de pijlers en grijpen direct aan op de eindkokers van de schuiven. Elke schuif wordt aan beide uiteinden vastgehouden en bewogen. Er zijn per schuif twee bewegingswerken aanwezig die in principe onafhankelijk van elkaar werken. De hoofdcomponenten waaruit elk bewegingswerk is opgebouwd, zijn een dubbelwerkende hydraulische cilinder, een elektro-hydraulische aandrijfeenheid en een elektrische stuureenheid (figuur 1.1)

Bij een geopende kering worden de schuiven door de bewegingswerken in de geheven stand gehouden, waarbij de doorstroomopening tussen bovenbalk en dorpelbalk geheel vrij is. Bij het sluiten bewegen de schuiven zich rechtlijnig omlaag. De daarbij af te leggen weg is even groot als de schuifhoogte. De nominale slaglengte van de bewegingswerken varieert met de corresponderende schuifhoogte van 5,9 m tot 11,9 m in stappen van 1 m. Met de nominale slaglengte worden de bewegingswerken per type aangeduid. De werkelijke slaglengte van de bewegingswerken is 1,2 à 1,3 m groter om de schuiven voor inspectie en onderhoud over deze hoogte extra te kunnen heffen. De functionele eisen die aan de schuifbewegingswerken worden gesteld, kunnen als volgt worden samengevat:

1. de schuif in geheven stand houden
2. bij sluiten de schuif met constante snelheid omlaag bewegen
3. de gesloten schuif op de onderaanslagen gedrukt houden
4. bij openen de schuif heffen met een constante snelheid

Vanuit de veiligheidsfunctie van de Stormvloedkering moet aan de functionele eisen 2 en 3 met een hoge mate van betrouwbaarheid worden voldaan. De keuze van vakwerkschuiven als afsluitmiddel van de doorstroomopeningen, waarbij de vakwerkliggers in de rich-



Figuur 1.1 Overzicht bewegingswerk

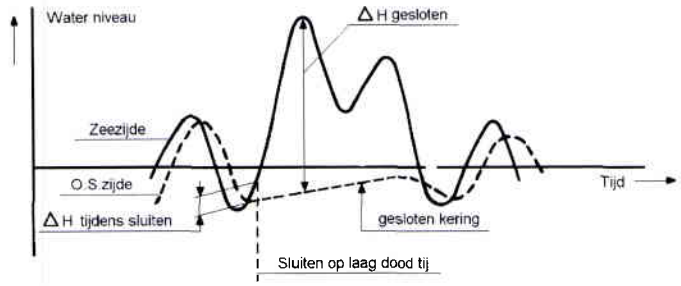
ting van de zee georiënteerd zijn (de richting van waaruit de zwaarste golfaanval verwacht kan worden), heeft consequenties voor de krachten die door de bewegingswerken moeten worden uitgeoefend, met name bij het sluiten van de schuiven. Meest bepalend voor de dimensionering van de bewegingswerken zijn dan ook de belastingen tijdens bewegen van een schuif, waarbij de volgende krachten een overheersende rol spelen:

- wrijvingskrachten schuifaanslagen op de geleidingen, hetzij door horizontale verval- en/of golfbelasting, hetzij door de voorspanning waarmee de schuif tussen de geleidingen is opgesloten
- verticale stroom en golfbelasting
- het (schijnbaar) schuifgewicht

Golfklappen op de schuiven, die bij het schuifontwerp zo'n belangrijke rol hebben gespeeld, zijn voor de bewegingswerken veel minder bepalend. Gezien het relatief lokale karakter en de zeer korte tijdsduur van de golfklappen, werken zij via de grote schuifmassa nauwelijks door op de bewegingswerken.
De hydraulische randvoorwaarden voor het ontwerp van de bewegingswerken zijn voornamelijk bepaald vanuit de randvoorwaarde "vrijheid van beheer". Met name de eis dat de keuze van het tijdstip van sluiten geheel vrij moet zijn, is hierbij bepalend, omdat verval en golfbelasting op de schuif sterk afhankelijk zijn van dit tijdstip. Bij relatief late sluitingstijdstippen (sluiten op grenspeil of bij alarmpeilsluitingen (zie [doc.1] deelnota 1.5, hoofdstuk 1 en [29]), zijn er grote vervallen over de kering tijdens het sluiten van de schuiven (figuur 1.2), terwijl er bij een vroege stormvloedsluiting vooral grote vervallen over de gesloten kering optreden (figuur 1.3).

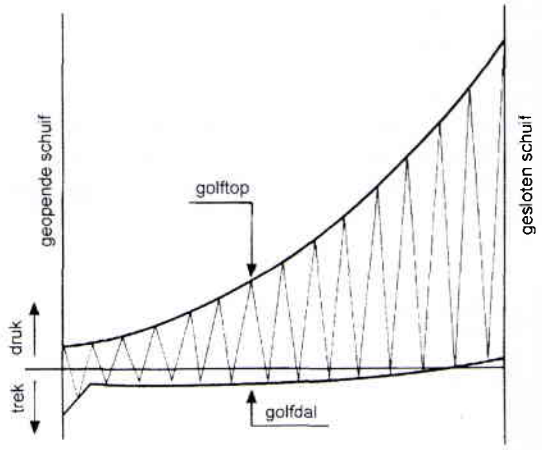


Figuur 1.2 Sluiten met groot verval



Figuur 1.3 Sluiten met klein verval

Omdat de golfhoogte is gekoppeld aan de waterstand, zijn bij late sluitingen grote golfbelastingen op de schuiven te verwachten. Belangrijk is dat tijdens het sluiten situaties kunnen voorkomen, waarbij de verticale belasting van richting omkeert als gevolg van de golfbelasting (figuur 1.4). Het bewegingswerk moet in staat zijn te voorkomen dat de schuif bij belastingomkering in de tegenovergestelde richting gaat bewegen. Dat een schuif bij de hoogste golven als gevolg van wrijving even blijft kleven is acceptabel.



Figuur 1.4 Belasting uit schuif op bewegingswerk tijdens sluiten

In de studie naar de beheers- of sluitingsstrategieën (zie [1], deelnota 1.5, hoofdstuk 1) is er van uitgegaan dat de schuiven in principe zouden worden geopend, zodra de waterstand aan de Noordzeezijde van de kering zou dalen onder de waterstand aan de Oosterscheldezijde. Een beperking van de beheersvrijheid voor de keuze van het tijdstip van openen leek dan ook acceptabel, al moest met een redelijke spreiding in de keuze van het tijdstip worden gerekend.

Hef- en daalsnelheid van de schuiven worden gedicteerd vanuit de eisen aan het hydraulisch gedrag van de sluitende en openende kering met betrekking tot het waterstandsverloop op het Oosterschelde-bekken. De kering mag niet sneller dan in ca. 1 uur gesloten zijn teneinde de translatiegolf op de Oosterschelde te beperken. Op deze randvoorwaarde zijn de bewegingswerken uitgelegd. Natuurlijk zou over het sluiten veel langer kunnen worden gedaan, maar dan moet de schuifsnelheid tot een technisch moeilijk te realiseren lage waarde worden teruggebracht, of zou de sluitbeweging een aantal malen moeten worden onderbroken. Een lagere bewegingssnelheid dan de nu gerealiseerde 3 mm/s zal onherroepelijk leiden tot stick-slip verschijnselen in de schuif- en zuigerstangbeweging en vaker onderbreken van de beweging zou de faalkans vergroten, omdat elke onderbreking een aantal schakelhandelingen vereist waarbij storingen kunnen optreden. Bij de nu gekozen sluitings- en openingswijze kunnen de hoogste schuiven zonder stoppen in ruim een uur gesloten of geopend worden; de kortere beweegtijd voor de lagere schuiven bij dezelfde bewegingssnelheid is acceptabel.

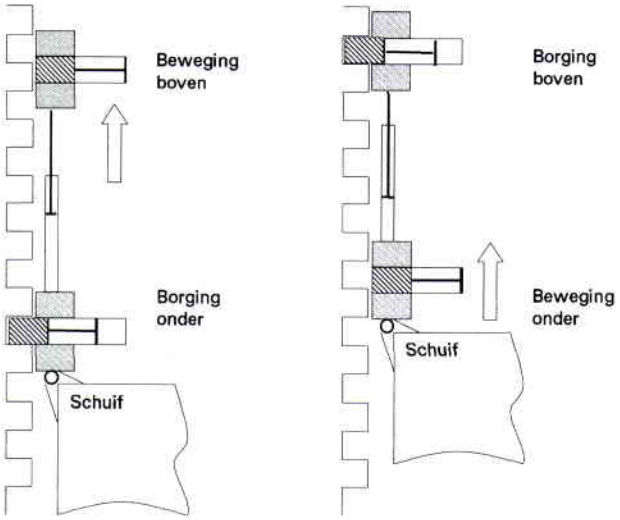
Voor het bewegen van de schuiven is een hydraulisch bewegingswerk gekozen dat is gebaseerd op hydraulische cilinders met een lange slag. Met zo'n bewegingswerk kan de schuif in één continue beweging geheel worden gesloten of geopend. Voorafgaand aan deze keuze is uitgebreid aandacht besteed aan alternatieve bewegingssystemen. Daarbij is drie maal een principekeuze gemaakt:

1. keuze tussen een continue of een intermitterende beweging
2. keuze tussen lange-slag bewegingswerken of een lierwerk
3. keuze tussen een hydraulische of een mechanische aandrijving

Ad 1.
De grootste afstand waarover een schuif bewogen moet kunnen worden, bedraagt 13,2 m. Dit geldt voor de hoogste schuiven: 11,9 m slag + 1,3 m extra hefhoogte t.b.v. onderhoud. Een lange slag met een bewegingswerk met beperkte afmetingen wordt bereikt

door toepassing van een intermitterend bewegingswerk (figuur 1.5). Daarbij wordt gebruik gemaakt van twee mechanismen:

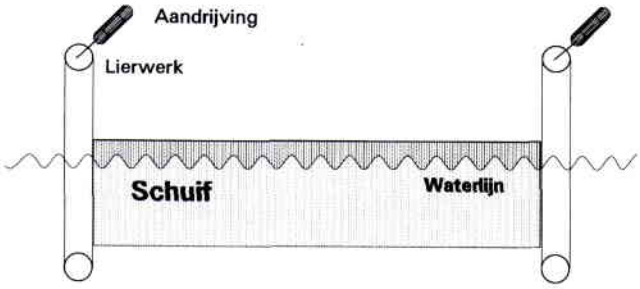
- een mechanisme dat zorgt voor het in beperkte stappen omhoog of omlaag bewegen van de schuif
- een vasthoudmechanisme dat de schuif fixeert wanneer het hef/daal-mechanisme van de schuif tussen twee stappen in weer in de uitgangspositie wordt teruggebracht.



Figuur 1.5 Intermitterend bewegingswerk

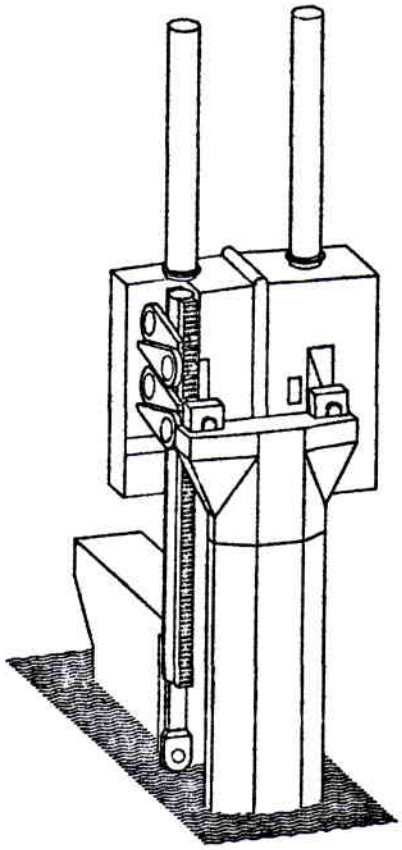
De verwachting was dat bij een intermitterend bewegingswerk door het grotere aantal schakelingen de kans op storingen ook groter zou zijn. Op grond van een globale inschatting van de bedrijfszekerheid is de voorkeur gegeven aan een bewegingswerk dat een continue schuifbeweging mogelijk maakt.

Ad 2.
Een geschikt type machinewerk voor een continue beweging met een lange slag is een lierwerk dat gebruik maakt van kabels. Voorwaarde voor toepassing is dat de belasting in alle situaties in dezelfde richting blijft werken, zodat altijd een trekkracht in de kabels optreedt. Zoals reeds is aangegeven, is dat echter voor de Oosterscheldekering niet te verwachten. Een enkelwerkend kabellierwerk viel daardoor als mogelijkheid af. Dubbelwerkende kabellierwerken (figuur 1.6), met onder de waterspiegel opgestelde omloopschijven voor het omlaag trekken van de schuif, zijn om redenen van onderhoud en beperkte levensduur in het zeemilieu buiten beschouwing gelaten.



Figuur 1.6 Dubbelwerkend kabellierwerk

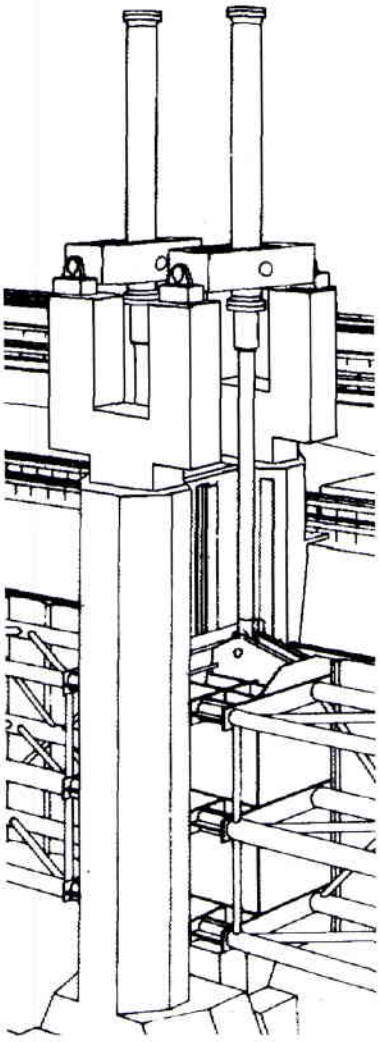
Onder de typen bewegingsmechanismen die wél in staat zijn zowel trek- als drukkrachten uit te oefenen, kwamen de tand- of pennenheugel (figuur 1.7) en de hydraulische cilinder (figuur 1.8) het meest in aanmerking. In beide gevallen zijn de toe te passen elementen langer dan de door de schuif af te leggen afstand.



Figuur 1.7 Mechanisch bewegingswerk met tand- of pennenheugel

Ad 3.
Van de overblijvende mogelijke lange-slag bewegingssystemen zijn er twee uitgewerkt tot een voorontwerp, zodat een vergelijking qua prestatie en prijs mogelijk was. In de afweging tussen beide systemen is o.a. aandacht besteed aan betrouwbaarheid, onderhoud, bouwplanning en esthetica. Ten aanzien van veel aspecten scoorden beide bewegingssystemen ongeveer gelijk. Uiteindelijk is gekozen voor het hydraulische systeem op grond van bouwkosten, esthetica en faalkans. In Boek 1, deelnota 1.2, par. 4.5 is aan de afweging tussen beide systemen reeds aandacht besteed. Voor een meer uitgebreide afweging tussen het mechanisch en het hydraulisch bewegingssysteem wordt verwezen naar hoofdstuk 3.3.2 en [6].

Als bewegingswerk is derhalve gekozen voor twee hydraulische lange slag cilinders per schuif. De cilinders worden met een cardanbalk in twee richtingen scharnierend ondersteund op de hamerstukken van de pijlers. De omlaaggerichte zuigerstangen van de cilinders zijn scharnierend verbonden aan de schuifuiteinden. Elke cilinder wordt door een apart hydraulisch aggregaat aangedreven. Via hydraulische leidingen wordt vanaf de aggregaten olie onder druk naar de cilinders gevoerd of van de cilinders afgevoerd. Op elk schuifuiteinde wordt door een gelijkloopinstallatie continu de hoogtestand van het betreffende schuifuiteinde gemeten. Bij af-



Figuur 1.8 Hydraulisch bewegingswerk met cilinder

wijkingen tussen de hoogtestanden van de twee uiteinden van een schuif zorgt de gelijkloopinstallatie voor een correctiesignaal naar de hydraulische schuifaandrijvingen.
Een conserveringsinstallatie bij elke cilinder zorgt voor een aanvullende corrosiebescherming van de zuigerstang door er, wanneer de stang bij het sluiten van de schuif omlaag beweegt, een film van sterk hechtende olie op aan te brengen.

In de hierna volgende hoofdstukken wordt een overzicht gegeven van de uitgangspunten en randvoorwaarden die gehanteerd zijn bij het ontwerp van het bewegingswerk, waarna het gekozen systeem zelf wordt beschreven ten aanzien van constructie, fabricage, montage en onderhoud.

2. Uitgangspunten van het ontwerp

De bewegingswerken vormen een onderdeel van het systeem dat de transformatiefunctie in de stormvloedkering verzorgt (zie ook deelnota 1 en [1], deelnota 2). De specifieke functie daarin is het bewegen, dan wel op hun plaats houden, van de schuiven. Dit betekent dat de capaciteit van de bewegingswerken, en de omstandigheden waaronder ze moeten functioneren, wordt bepaald door voornamelijk van buitenaf opgelegde eisen. Dit zijn de te verwachten natuurlijke omstandigheden en de daardoor uit de constructie van de schuiven volgende belastingen op de bewegingswerken. Deze belastingen kunnen gedeeltelijk worden gestuurd door het gebruik van de transformatiefunctie door de beheerder. In de functionele uitwerking van de stormvloedkering als geheel zijn de volgende eisen gesteld:

- vrijheid van beheer (strategieën voor sluiten en openen bij stormvloeden)
- veiligheid kering (overschrijdingskans van 2,5 x 10^{-4} per jaar bij maximale belastingcombinatie)

Deze twee eisen zou men kunnen samenvatten onder de term capaciteitsbepalende randvoorwaarden voor de bewegingswerken. Een uitwerking hiervan wordt gegeven in hoofdstuk 2.1.

Daarnaast zijn er eisen gesteld die vooral betrekking hebben op de uitvoering en kwaliteit van de bewegingswerken. Het gaat dan om de functionele uitwerking van eisen die voor de stormvloedkering als geheel zijn geformuleerd, zoals:

- levensduur van de kering
- betrouwbaarheid van de bewegingswerken

De eis voor de levensduur is maatgevend voor niet-vervangbare onderdelen. Voor de slijtagegevoelige vervangbare onderdelen van de bewegingswerken geldt deze eis minder stringent. Aan de totale faalkans van de stormvloedkering levert de kans van het niet kunnen bewegen van de schuiven een wezenlijke bijdrage [1]. Om deze reden is de betrouwbaarheidseis voor de bewegingswerken uitgewerkt tot een eis voor de storingskans in het systeem.

2.1 Capaciteitsbepalende randvoorwaarden

2.1.1 Beheer bewegingswerken

De wijze waarop de stormvloedkering zal worden gebruikt volgt uit de voorgenomen beheer- en sluitingsstrategieën. Voor het beheer van de bewegingswerken gelden de volgende uitgangspunten:

a) De stormvloedkering zal zoveel mogelijk open staan om een (gereduceerde) getijdenwerking op het Oosterscheldebekken in stand te houden. De schuiven zijn daarbij geheven tot de stand "Op". In deze stand lag de onderrand van elke schuif op N.A.P.+1,20 m. Later is besloten de in het systeem aanwezige extra onderhoudsslag te benutten en de schuiven verder te heffen, zodat thans de onderrand op ca. N.A.P.+2,30 m ligt. De schuiven zijn in die stand op de top van het normale getij vrij van het water. Bovendien is in deze stand slechts een heel klein deel van de kwetsbare zuigerstang geëxposeerd aan de buitenlucht.

b) De schuiven worden regelmatig geheel of gedeeltelijk gesloten om de bewegingsmechanismen gangbaar te houden, de bedrijfszekerheid te testen en de schuifgeleidingen te ontdoen van aangroeiing. De schuiven bewegen individueel of in kleine groepen. Uitgangspunt was een frequentie van bewegen van 1 maal per 4 weken. Later is dit om faalkansredenen bijgesteld naar 1 maal per 2 weken. Bij het testen zijn de schuiven slechts kort (< 1 uur) geheel of gedeeltelijk gesloten. Opgemerkt wordt dat de schuiven bij de 14 daagse beproevingen veelal slechts over ca. 1 m worden bewogen.

c) Veel minder frequent (naar verwachting 1 keer per jaar) vindt een stormsluiting plaats. Bij een stormsluiting moet rekening worden gehouden met grote vervallen over de kering tijdens het sluiten; de krachten op de bewegingswerken kunnen dan groot zijn. Het openen zal in principe met een ongeveer gelijke waterstand binnen en buiten plaats vinden. De vereiste sluitings- en openingstijd is ruim 1 uur. Zie voor een verdere uitwerking van het beheer bij stormsluitingen hoofdstuk 2.1.2.

d) Incidenteel wordt een alternatief gebruik van de kering verwacht (zie [1] deelnota 5). Hierbij kan worden gedacht aan reductorstrategieën, waarbij de schuiven naar individueel geregelde sluitingspercentages worden gestuurd. Ook is de mogelijkheid voorzien de kering te sluiten om te voorkomen dat extreem lage waterstanden op de Oosterschelde optreden. Met inachtname van de bij de situatie behorende belastinggrenzen is dit soort strategieën acceptabel voor de bewegingswerken.

e) Strategieën waarbij de schuiven gedurende langere tijd geheel of gedeeltelijk gesloten zijn, hebben geleid tot aanvullende maatregelen ter bescherming van de zuigerstangen tegen corrosie. De hydraulische cilinders zijn daartoe voorzien van een apart pompsysteem dat een sterk hechtende oliefilm op de zuigerstangen aanbrengt, elke keer als de schuiven worden gesloten en de zuigerstangen dus worden blootgesteld aan het zeewater. Dit zogenoemde conserveringssysteem is nader omschreven in hoofdstuk 4.5.

f) Er zijn geen maatregelen getroffen om bewegen onder extreme temperatuurcondities mogelijk te maken. Het bewegen van de schuiven moet mogelijk zijn in het temperatuurtraject -10°C tot +30°C. De kans dat stormvloedsluitingen optreden bij extreem hoge of extreem lage temperaturen wordt klein geacht. Andere typen sluitingen, zoals periodiek testen, kunnen, als de condities erg ongunstig zijn, zonder bezwaar enige dagen worden uitgesteld. Zo zijn bijvoorbeeld geen maatregelen getroffen om ijsafzetting op de schuiven te voorkomen. In het algemeen is het bewegingswerk wel in staat een geheven schuif omlaag te bewegen, en daarbij het ijs vóór de schuif op de geleidingen af te schuiven. Dikkere ijspakketten tussen de onderrand van de schuif en de bovenbalk zijn moeilijker te verbreken. Indien de schuif langdurig gesloten blijft dan kan bij lagere temperaturen sterke ijsafzetting op de zuigerstang, de gelijkloopkabels, etc. optreden. De kans van optreden van dergelijke situaties wordt zó gering geacht, dat het acceptabel lijkt in dergelijke situaties

speciale maatregelen te treffen om het gevormde ijs te verwijderen (zie ook deelnota 3).

g) Vanwege het feit dat de bewegingswerken in het algemeen gedurende lange tijd (2 weken) in rust zijn moet met aanzienlijke temperatuurvariaties van de onderdelen en de systeemolie gerekend worden. Hiervoor zijn temperatuurvariaties van 30°C gerekend.

2.1.2 Beheer bij stormsluitingen

De normale procedure die bij een stormsluiting wordt gevolgd, heet "Veilig sluiten". Daarbij worden vanuit het centrale bedieningsgebouw alle schuiven nagenoeg gelijk in beweging gezet. Omdat de schuiven alle een gelijke bewegingssnelheid hebben, zijn de doorstroomopeningen aan de randen van de sluitgaten (lage schuiven) het eerst dicht en wordt een sluitgat vervolgens naar het midden toe gesloten. De hoogste schuiven (in het midden van de Roompot) zijn het laatst dicht en hebben vanuit de geheel geheven stand dan ca. 5 kwartier bewogen. De laagste schuiven hebben voor de sluitbeweging ca. 3 kwartier nodig. Bij het openen treedt het omgekeerde op. De schuiven beginnen in principe alle ongeveer gelijk met openen, zodat de schuiven aan de randen van de sluitgaten als eerste weer geheel geopend zijn. Gaande naar het midden van de sluitgaten volgen de andere schuiven.

Vanuit het beheer zijn eisen gesteld aan de snelheid van sluiten en openen van de kering. Een korte sluitings- of openingsduur bij een sterke stroming, of een groot verval in de sluitgaten, kan leiden tot ongewenste translatiegolven in het Oosterscheldebekken. De sterkte van deze verschijnselen hangt af van de keuze van het moment van sluiten of openen ten opzichte van de getij-fase. Bij het sluiten moet een nagenoeg absolute vrijheid in de keuze van dit moment bestaan. Het sluiten bij een maximale stroom in de sluitgaten is bepalend geweest voor de minimale duur van een sluiting van ruim 1 uur (bij de hoogste schuiven). De snelheid van de schuiven bij continue beweging bedraagt dan 3 mm/sec.
Lagere schuifsnelheden vergroten de kans op het optreden van stick-slip, hetzij van de schuiven op de geleidingen, hetzij van de zuigerstangen in de hydraulische cilinders; 3 mm/sec wordt voor beide bewegingen beschouwd als een nog acceptabele ondergrens.
Het alternatief is om de schuiven te bewegen met een hogere snelheid en tussentijds geregeld te stoppen. Hiervan is afgezien ter beperking van het benodigd vermogen (evenredig met de snelheid) en uit faalkansoverwegingen. Tussentijds stoppen en weer op gang brengen van de beweging verhoogt de kans op storingen in het bewegingsmechanisme. Het risico van stick-slip bij de beweging is dan ook bewust geaccepteerd. De mogelijke gevolgen van stick-slip zijn onderzocht in een dynamische analyse van het hydraulische bewegingswerken (hoofdstuk 3.4) en acceptabel bevonden.

De maatgevende belastingen voor de bewegingswerken treden op bij sluiten onder stormvloedcondities en bij het daarop volgende openen van de schuiven. Met name de keuze van het tijdstip van sluiten en openen in relatie tot de getijfase is sterk bepalend voor het verval over de schuiven tijdens sluiten, in gesloten toestand en tijdens openen. Sluiten op of rond de laagwaterkentering leidt tot kleine vervallen over de kering tijdens het bewegen van de schuiven, maar tot grote vervallen over de kering in gesloten toestand. De belasting voor het machinewerk is laag, maar voor de schuiven en de stabiliteit van de kering hoog (figuur 1.2).

Sluiten op een relatief laat tijdstip (grenspeil- of alarmpeilsluiting) leidt tot grote vervallen over de schuiven tijdens bewegen en daarmee tot hoge belastingen voor het machinewerk. In de gesloten situatie is het verval over de kering echter relatief klein, terwijl de invloed van de golfbelasting op de schuiven en de rest van de kering daardoor relatief groot is (figuur 1.3). In deze situatie moeten de bewegingswerken in staat zijn de schuif op de onderaanslag gedrukt te houden, teneinde te voorkomen dat schuif door de wisselende golfbelasting op de vakwerkliggers ongecontroleerd zou gaan bewegen. Analyses van de mogelijke situaties geven aan dat de maatgevende situaties voor het verval over de schuiven tijdens bewegen worden gevormd door grenspeil- of alarmpeilsluitingen, waarbij de grootste belastingen worden bereikt bij "Einde sluiten". Hierbij zijn de schuiven geheel ondergedompeld.

In het algemeen zal de kering na het passeren van de stormvloed worden geopend, zodra de buitenwaterstand (Noordzee) daalt onder de binnenwaterstand (Oosterschelde), dit ongeacht het feit of nog een tweede grens- of alarmpeil waterstand op de Noordzee wordt verwacht. Door het verloop van de waterstanden tijdens openen, en een mogelijk onjuiste keuze van het tijdstip van openen, zullen de schuiven altijd onder enig verval geopend moeten kunnen worden. Ook golven hebben daarbij invloed. De situatie bij begin openen (schuiven dus nog geheel dicht) is daarbij maatgevend. Een equivalent verval (verval + golfbelasting) op de schuif van ca. 2,5 m kan met de bewegingswerken bij openen worden overwonnen.

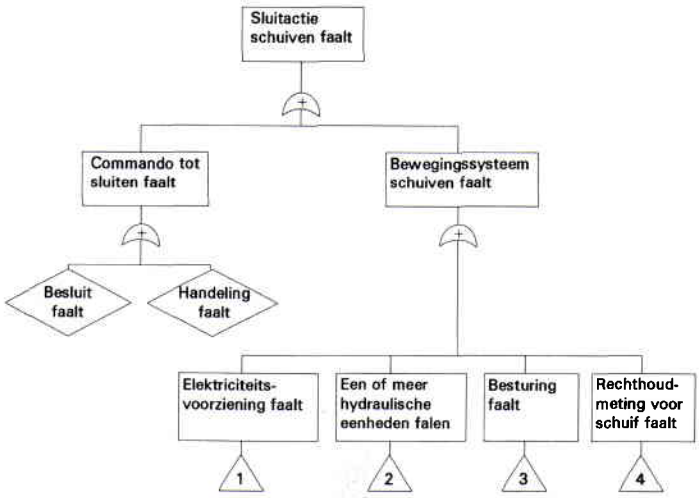
2.1.3 Waterstanden en golfhoogten

De te verwachten waterstanden op de Noordzee en de Oosterschelde, samen resulterend in een vervalbelasting op de schuiven, zijn bepalend voor de op te brengen krachten van de bewegingswerken. Bij de vervalbelasting moet nog de invloed van horizontale en verticale golfbelasting opgeteld worden. De voor de bewegingswerken maatgevende golven komen alleen aan de Noordzeezijde voor.

De situaties tijdens sluiten of openen, alsmede de situatie "Schuif gesloten", leveren alle een vervalbelasting op. Het tijdstip van sluiten of openen is bepalend voor de aan te houden hydraulische randvoorwaarden. Deze hydraulische randvoorwaarden zijn verschillend voor de situaties waarin de schuif zich kan bevinden. In [doc.1] deelnota 1.3, hoofdstuk 4 is in algemene zin de probabilistische analyse gegeven van de hydraulische randvoorwaarden voor de kering onder verschillende omstandigheden. Rekening houdend met de eis van vrijheid van beheer, is voor de maximale belasting van de bewegingswerken tijdens het sluiten gekeken naar de mogelijke sluitingsstrategieën. In de Belastingennota [doc. 17] wordt aangegeven welke belastingen op de schuif voor de situatie sluiten moeten worden aangehouden. Het maatgevende verval volgt uit een buitenwaterstand van N.A.P.+4,50 m en een binnenwaterstand van N.A.P.+0,00 m. Deze combinatie heeft een overschrijdingskans van $2{,}5 \times 10^{-4}$ per jaar en treedt op tijdens het laatste deel van het sluitingstraject. De schuif is dan geheel ondergedompeld. De bijbehorende significante golfhoogte bedraagt 4,0 m.

2.1.4 Schuifontwerp

De afmetingen, vormgeving en het gewicht van de schuif vormen, evenals de golf- en vervalbelastingen, een randvoorwaarde voor het ontwerp van de bewegingswerken. Om redenen die in deelnota 4 zijn genoemd, is gekozen voor een glijschuif als bewegend keringsmiddel. Relatief kwetsbare werktuigkundige onderdelen als wielen, rails en railfundaties kunnen daardoor vervallen, maar daar staat tegenover dat bij bewegen verval en horizontale golf-



Figuur 2.1 Foutenboom schuifbewegingswerken

krachten aanleiding geven tot wrijvingskrachten tussen geleidingen en schuifaanslagen. De wrijvingskrachten zijn evenredig met de schuifafmetingen en worden bovendien bepaald door de wrijvingscoëfficiënt van de over elkaar glijdende materialen. Daarnaast kan het optreden van wrijving aanleiding geven tot stick-slip. Dit verschijnsel treedt op wanneer de wrijvingscoëfficiënt in rust groter is dan die tijdens bewegen. Onder invloed hiervan zal tijdens bewegen van de schuif een schoksgewijze beweging plaatsvinden, met een frequentie die wordt gedicteerd door de eigenfrequentie van het elastische systeem bestaande uit de schuif met meebewegend water en de cilinders.

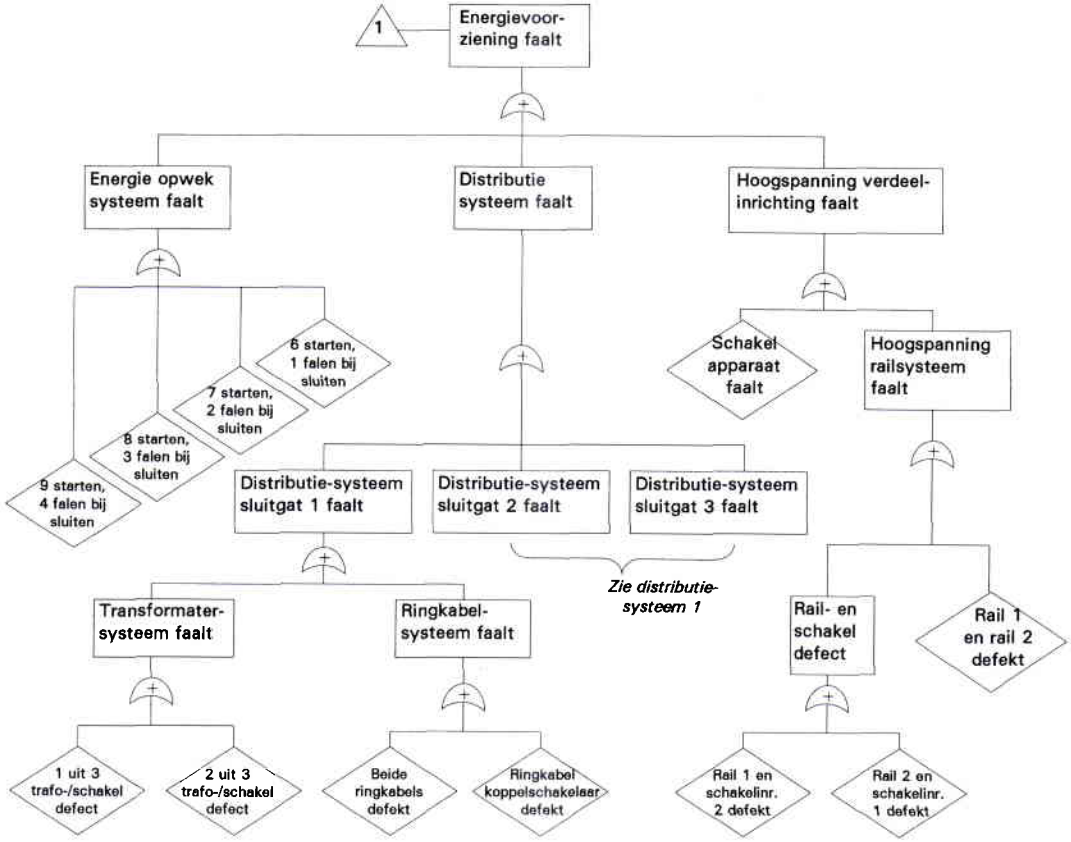
Door de vormgeving van de schuif met de vakwerkliggers aan Noordzeezijde is deze gevoelig voor verticale golfkrachten. Tijdens het bewegen moeten deze krachten worden overwonnen door het bewegingswerk, waarbij hun wisselend karakter een complicerende factor vormt. Als gevolg van de constructie van de schuif met buisprofielen verandert bovendien het opdrijvende vermogen van de schuif tijdens het onderdompelen in het water. Door de wisselende horizontale golfbelastingen op de schuif zou deze in de sponning heen en weer kunnen slaan, daarbij botsbelastingen op de pijlers uitoefenend. Om dit zoveel mogelijk te voorkomen is de schuif met voorspanning tussen de geleidingen geklemd. Ook zonder horizontale verval- of golfbelasting op de schuif moeten daarom al wrijvingskrachten worden overwonnen bij het bewegen van de schuif.

Omdat er spelingsruimte nodig is voor eventuele scheefloop van de schuif of voor pijlerrotaties ten gevolge van ongelijke zettingen, kan de schuif in langsrichting niet tussen de pijlers worden geklemd. Als de schuif door scheef inlopende golven wordt belast, kan ze met de kopse kant tegen de pijler slaan. Zijaanslagen dempen tot op zekere hoogte de daarbij optredende stoten, maar kunnen niet verhinderen dat de scharnierend aan de schuif verbonden cilinders door deze stoten worden belast met versnellings- en vertragingskrachten. Bij het bevestigingsoog van de zuigerstang aan de eindkoker is gerekend met een vertraging van 3 m/s^2.

2.2 Kwalitatieve eisen

2.2.1 Faalkans bewegingswerken

De faalkans van de bewegingswerken vormt één van de hoofdrandvoorwaarden in het ontwerp van de bewegingswerken van de

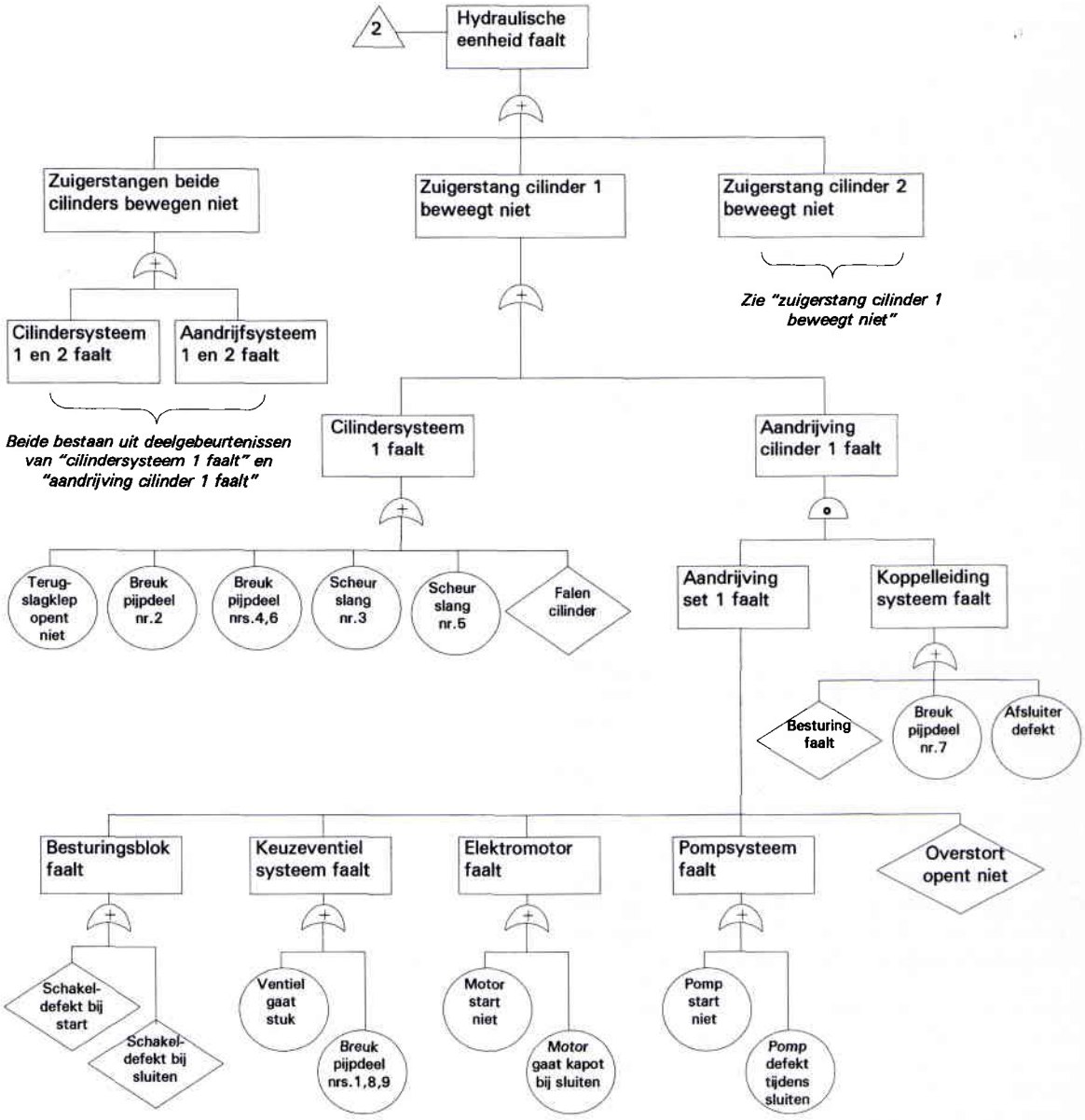


Figuur 2.2 Foutenboom energievoorziening

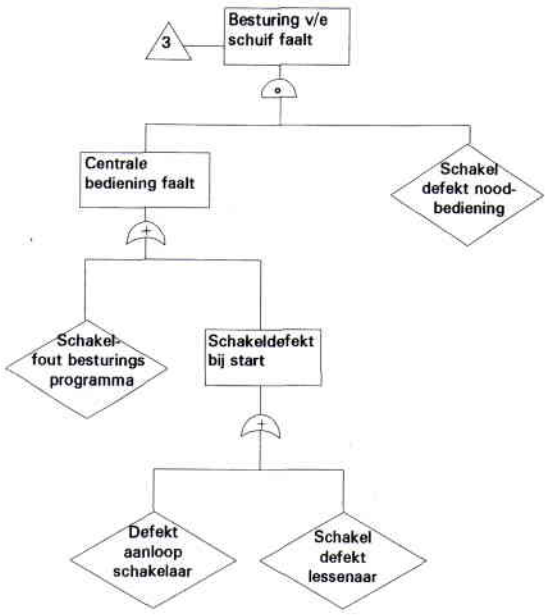
schuiven. Reeds in een vroeg stadium van het ontwerp zijn door TNO fouten- en gebeurtenissenbomen opgezet met een kans van optreden van overstroming van delen van Zeeland van ordegrootte 10^{-7} (*zie ook* [1] deelnota 1.2, hoofdstuk 3). In deze kans speelt het weigeren van één of meer schuiven een belangrijke rol [7]. Teneinde tot een evenwichtig ontwerp van de gehele kering te komen zijn aan de verschillende onderdelen van de kering toelaatbare faalkansen toebedeeld. Ook aan de bewegingswerken is een faalkans opgelegd. Deze maakt onderdeel uit van de kans van falen van een schuif en is opgebouwd uit bijdragen vanuit het werktuigkundig deel en de elektrische installatie. De kans van falen van de bewegingswerken van een schuif mocht niet meer bedragen dan 2×10^{-3} per gevraagde beweging.

Opgemerkt zij dat aanvankelijk uitsluitend is gekeken naar de kans van falen bij sluiten van een schuif. Naderhand kwam aan het licht dat een deel van de bodembescherming ook gevoelig is voor de optredende hydraulische belastingen indien enkele naast elkaar gelegen schuiven dicht blijven in een verder geopende kering. Vanaf dat moment ontstond ook belangstelling voor de kans van weigeren van schuiven bij het openen van de kering. Op het definitieve ontwerp van het hydraulische bewegingssysteem heeft deze nieuwe randvoorwaarde geen invloed meer kunnen uitoefenen en is een oplossing gevonden in het aanpassen van de bodembescherming.

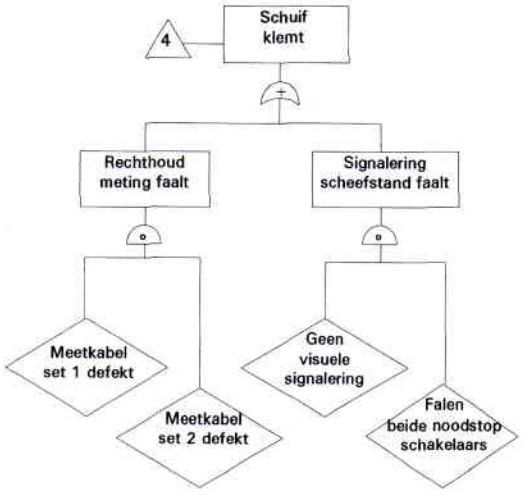
Voorafgaand aan het definitieve ontwerp is door TNO (Hoofdafdeling Maatschappelijke Technologie) een faalkansanalyse uitgevoerd van het voorlopige schuifbewegingssysteem (figuur 2.1 en [8]). Voor de analyse is het falen van een schuif als volgt gedefinieerd:
"een schuif faalt wanneer hij niet, of slechts met een vertraging groter dan 1 uur, gesloten kan worden ingeval de weersgesteldheid (storm) noodzaakt tot het afsluiten van de Oosterschelde".
Bij de analyse van het falen van de bewegingswerken is aandacht besteed aan het falen van de energievoorziening (figuur 2.2), de hydraulische aandrijving (figuur 2.3), de besturing (figuur 2.4) en de invloed van het rechthoudsysteem (figuur 2.5) van de schuiven.



Figuur 2.3 Foutenboom hydraulische aandrijving



Figuur 2.4 Foutenboom besturing



Figuur 2.5 Foutenboom rechthoudsysteem

Uit de analyse bleek het hydraulische deel van de bewegingswerken het meest bepalend voor de kans van falen van een schuif. In ontwerptechnische zin zijn uit de analyseresultaten de volgende conclusies getrokken:

- de dieselcentrale voor de energievoorziening wordt in twee gescheiden, brandvrije ruimten ondergebracht;
- de dieselcentrale wordt zo gedimensioneerd dat één dieselcentrale (bijna) alle schuiven tegelijk kan bewegen (zie deelnota 6);
- er wordt voorzien in een omschakelmogelijkheid tussen de hydraulische systemen van twee naast elkaar gelegen schuiven;
- in de richting "Sluiten" moeten hogedruk slangverbindingen met gestuurde terugslagkleppen dubbel worden uitgevoerd.

Na doorvoering van bovenstaande maatregelen is door TNO het spreidingsgebied voor het falen van de bewegingswerken op $3x10^{-3}$ à $3x10^{-5}$ ingeschat. Aan KEMA is vervolgens gevraagd een contra-expertise uit te voeren [9]. KEMA heeft een schatting gemaakt van de niet-beschikbaarheid van de schuiven, waarbij de analyse zich alléén heeft gericht op de neergaande beweging van de schuiven. Bij de analyse is onderscheid gemaakt tussen de niet-beschikbaarheid als gevolg van falen, testen en reparatie. Daarbij blijkt falen (al dan niet bemerkt) van de hydraulische installaties de grootste bijdrage aan de niet-beschikbaarheid te leveren. KEMA wijst er daarbij op dat, door het grote aantal aandrijvingen, de kans op niet-beschikbaarheid van één van de 62 schuiven relatief groot is en dat deze kans ook bij verdergaande inspanningen aanzienlijk zal blijven.

Omstreeks de tijd dat een definitieve keuze moest worden gemaakt tussen hydraulische (cilinder) en mechanische (tandheugel) bewegingswerken, is door TNO een faalkansanalyse voor de mechanische bewegingswerken uitgevoerd [10]. In tegenstelling tot wat aanvankelijk werd verwacht, concludeerde TNO dat de faalkans van de mechanische bewegingswerken niet beter is, maar in dezelfde orde van grootte ligt als die voor een hydraulisch systeem. De grootste bijdrage in de faalkans van de mechanische bewegingswerken bleek te worden geleverd door de lagers, de tandwielen en de ventilatoren van de koelinstallaties. Hoewel deze componenten zeker beschouwd kunnen worden als beproefde en betrouwbare werktuigonderdelen, is de gevonden grote faalkans te wijten aan de zeer grote aantallen van met name lagers en tandwielen die in het systeem nodig zouden zijn.

Nadat de keuze voor een hydraulische schuifaandrijving definitief was gemaakt, is dit systeem in de loop van het ontwerpproces verder uitgewerkt en aangepast aan de resultaten van het Hydraulisch Onderzoek Sluitingsmiddelen (HOS) door het Waterloopkundig Laboratorium, alsmede aan de fabricagemogelijkheden van de leverancier. Ook kostenoptimalisaties hebben invloed gehad op de samenstelling van het systeem. Dit heeft onder andere geleid tot een sterke reductie van de omvang van het leidingwerk (kilometers!) en het aantal componenten. Aan de kwaliteit van de gekozen componenten is veel aandacht besteed, juist met het oog op de gewenste bedrijfszekerheid. Op het definitieve ontwerp van de bewegingswerken is, toen de hydraulische en elektrische installaties reeds in productie waren, opnieuw een faalkansanalyse uitgevoerd [doc.11]. In die tijd was ook duidelijk geworden, dat aandacht geschonken moest worden aan de kans van falen bij het openen van schuiven, zowel van willekeurige schuiven als van naast elkaar gelegen schuiven, omdat gebleken was dat onder bepaalde omstandigheden één of meer gesloten schuiven in een verder open sluitgat een geconcentreerde stromingsaanval op de bodembescherming kunnen veroorzaken.
De resultaten van genoemde faalkansanalyse zijn weergegeven in tabel 2.1.

In de analyse is aandacht geschonken aan de kans van falen van één of meer schuiven, al dan niet naast elkaar gelegen, zowel voor de situaties sluiten als openen. Indien de gelijkloopinstallatie tijdens de schuifbeweging moet ingrijpen, zijn hiervoor extra schakelhandelingen in het hydraulisch systeem nodig, waardoor de kans van falen tijdens de schuifbeweging groter is dan wanneer niet behoeft te worden ingegrepen. Het al dan niet werken van het conserveringssysteem voor de zuigerstangen is geen voorwaarde bij sluiten van de schuiven en beïnvloedt de faalkans daarom niet. Bij openen van de schuiven is de faalkans van het conserveringssysteem aanvankelijk wél meegenomen in de analyse. In de uiteindelijk gerealiseerde installatie is de koppeling echter niet meer aanwezig.

Uit de analyse zijn de volgende conclusies getrokken [12] :

- aan de eis dat de kans van falen van één of meer schuiven bij sluiten kleiner moet zijn dan $2x10^{-3}$ wordt door één enkele schuif niet, en door twee of meer schuiven wél voldaan;

Situatie	Sluiten excl. rechthouden	Sluiten incl. rechthouden	Openen excl. conserveren	Openen incl. conserveren
	Alle waarden x 10^{-2} (tenzij anders aangegeven met *)			
Eén schuif	3,2	8,7	3,1	19
Twee schuiven naastliggend	0,053	0,064	0,038	0,092
Twee schuiven niet naastliggend	0,047	0,37	0,046	1,7
Drie schuiven naastliggend	0,00005	0,00015	0,000035	0,00037
Drie schuiven niet naastliggend	0,0036	0,019	0,0026	0,12
Vier schuiven naastliggend	0,00028	0,00028	0,00028	0,00028
Vier schuiven niet naastliggend	0,000084	0,00076	0,000059	0,0067
Vijf schuiven naastliggend	0,00004	0,00004	0,00004	0,00004
Hammen *	1×10^{-12}	1×10^{-12}	1×10^{-12}	1×10^{-12}
Eén ringnet *	8×10^{-13}	8×10^{-13}	8×10^{-13}	8×10^{-13}
Alle schuiven	0,005	0,005	0,005	0,005

Tabel 2.1 Overzicht faalkansanalyses bewegingswerken

- de belangrijkste bijdrage aan de faalkans wordt geleverd door verstoppingen, de elektrisch bestuurde stuurschuif op de cilinder en de gestuurde terugslagklep die de cilinder aan zuigerstangzijde afdicht;
- *verbeteringen tot een faalkans van* 2×10^{-3} *zijn niet*, of slechts met grote (kosten)consequenties, mogelijk.

In [13] zijn de in de hydraulische installatie toegepaste componenten nader geanalyseerd, waarbij is geconstateerd dat door de speciale maatregelen die in het ontwerp zijn genomen, wellicht met wat kleinere faalkansen gerekend zou mogen worden dan tot dan toe was gedaan. Enige reductie in de faalkans is ook bereikt door uit te gaan van een testinterval van 2 weken i.p.v. 4 weken. Vervolgens is in de projectorganisatie nagegaan wat de consequenties zijn voor andere onderdelen van de kering, indien wordt uitgegaan van een kans van falen van één of meer schuiven ter grootte van 10^{-2} bij sluiten. Daarbij is gebleken dat 10^{-2} acceptabel zou zijn, voornamelijk als gevolg van een beter inzicht in de overschrijdingsfrequentie van vervallen over de kering onder stormvloedomstandigheden. Bij een faalkans van *een schuif van* 10^{-2} hoort een verval van 4,15 m [14]. Niettemin blijft het een feit dat falen van een schuif een zware wissel trekt op met name de veiligheid van de bodembescherming.

In [15] wordt aannemelijk gemaakt dat een faalkans van 10^{-2} haalbaar moet worden geacht. Hiervoor zijn geen extra investeringen *nodig geweest*. In de faalkansbeschouwing is rekening gehouden met:

- het effect van de hoge zuiverheidsgraad van de hydraulische olie;
- de bijzondere uitvoering van de meest kwetsbare componenten;
- de invloed van blikseminslag en brand;
- een testinterval van 2 weken;
- een zorgvuldige afstelling van de hydraulische componenten die de schuifsnelheid bepalen, waardoor de gelijkloopinstallatie zelden hoeft in te grijpen;
- de interactie met het besturingssysteem en de elektriciteitsopwekking en -distributie.

Aan de eisen voor een of meer weigerende schuiven bij openen (op een willekeurige locatie mogen onder alle omstandigheden één of twee naast elkaar gelegen schuiven gesloten blijven, terwijl de overige schuiven zijn geopend), alsmede voor het weigeren van meerdere al dan niet naast elkaar gelegen schuiven wordt voldaan. Zou in de toekomst blijken dat de faalkans van de hydraulische bewegingswerken beslist te groot is, dan zijn er, tegen aanzienlijke kosten, alsnog mogelijkheden de bedrijfszekerheid van de hydraulische installatie te verbeteren [15].

Ook onderhoud levert een bijdrage aan de faalkans. Preventief onderhoud kan echter worden uitgevoerd in een t.a.v. stormverwachting gunstig seizoen. Bovendien moet de onderhoudsprocedure zodanig zijn, dat de beschikbaarheid van de betreffende schuiven gewaarborgd blijft, desnoods met verloren gaan van de voor het onderhoud aangebrachte hulpconstructies. Op grond van dergelijke overwegingen is gesteld dat onderhoud, bij goed beheer, de kans op niet-beschikbaarheid van kering niet relevant beïnvloedt.

In de door KEMA uitgevoerde analyse is er van uitgegaan dat in de normale werktijd bemerkt falen altijd meteen gediagnosticeerd en gerepareerd wordt. Falen na einde werktijd wordt pas de volgende dag bemerkt. Er is dan ook gekeken naar de gevolgen van een responsietijd van resp. 5, 15 en 72 uur (weekend). De invloed daarvan op de toename van de faalkans blijkt eveneens gering (orde 1 %).

Met aangepast beheer is het verder mogelijk de gevolgen van falende schuiven te reduceren: in een laat stadium sluiten bij een stormvloedsluiting reduceert het verval over de kering en daarmee de kans op schade aan de bodembescherming.

Op basis van de uitgevoerde faalkansanalyses zijn globale inschattingen gemaakt van het te verwachten aantal storingen per jaar, omdat dit van belang zal zijn voor de onderhoudsbezetting op de kering. Opgemerkt zij dat lang niet alle storingen rechtstreeks bijdragen tot falen, bv. omdat er redundantie is ingebouwd of omdat de betreffende component niet in het hoofdbewegingssysteem zit (zie ook 6.1).

2.2.2 Levensduur

Qua levensduur is aan onvervangbare delen van de stormvloedkering een eis van 200 jaar gesteld. Hoewel het bewegingswerk niet als onvervangbaar hoeft te worden beschouwd, is de 200 jaar gebruikt als richtinggevend voor het te verwachten aantal belastingwisselingen voor de belangrijkste en kostbaarste op vermoeiing belaste delen (het betreft hier vnl. de staalconstructie van de cilinder inclusief zuigerstang). Het aantal wisselingen wordt daarbij bepaald door het aantal keren sluiten en openen gedurende de levensduur. Bij een verwachting van één stormvloedsluiting per jaar leidt dit tot 200 sluitingen. Vanuit de faalkanseisen neemt dit aantal sterk toe, omdat jaarlijks een aantal proefsluitingen nodig is. Overigens blijft het aantal sluitingen gedurende de levensduur nog altijd klein (orde van grootte 2500 à 5000).

Van een aantal onderdelen is de levensduur aanzienlijk korter dan 200 jaar, reden om een inspectie- en onderhoudsschema op te stellen. Met de huidige stand van de techniek moet worden gerekend op een levensduur van 10 tot 15 jaar voor verfsystemen en rubber afdichtingen die aan de buitenlucht of oplosmiddelen zijn blootgesteld. Voor hydraulische olie, zuiger- en stangafdichtingen, chroomlagen, etc. geldt een levensduur van 20 tot 25 jaar. Daarom is in het ontwerp rekening gehouden met de inspecteerbaarheid, onderhoudbaarheid en de mogelijkheid tot vervanging van onderdelen zonder bijvoorbeeld de hele cilinder van de kering te behoeven verwijderen. Onderdelen die in de toekomst door ontwikkelingen in de techniek wellicht nog verbeterd kunnen worden, zijn zodanig ingebouwd, dat een wijziging zonder al te ingrijpende maatregelen uitgevoerd kan worden. De pakkinghouders van de hoofdafdichtingen in zuiger en lantaarnstuk van de cilinders, bijvoorbeeld, kunnen worden verwijderd en vervangen door pakkinghouders die geschikt zijn voor een ander type afdichtingen.

2.3 Belastingen

De belastingen op de bewegingswerken kunnen in twee hoofdgroepen worden ingedeeld:
- belastingen die optreden bij 2-wekelijks sluiten en openen, aangeduid als "Testen"
- belastingen die optreden bij sluiten direct vóór of tijdens een stormvloed en openen na een stormvloed, aangeduid als "Karakteristieke belastingen".

Voor de beide hoofdgroepen kunnen er vier situaties worden onderscheiden:
1. schuif geopend
2. schuif tijdens sluiten
3. schuif gesloten en aangedrukt op onderaanslagen in de pijlers
4. schuif tijdens openen

Het achtereenvolgens doorlopen van de situaties 1-2-3-4-1 vormt één bewegingscyclus. Stormvloedsluitingen worden gemiddeld éénmaal per jaar verwacht. Een en ander is afhankelijk van het te kiezen sluitpeil; hoe hoger het sluitpeil, des te minder stormvloedsluitingen. Daarnaast betekent elke keer testen een volledige belastingcyclus. Als getest wordt door de schuif slechts gedeeltelijk te sluiten en aansluitend weer te openen, is de belastingamplitude aanzienlijk kleiner dan wanneer de schuif bij het testen geheel wordt gesloten en op de onderaanslag wordt aangedrukt. In het laatste geval is de belasting als karakteristiek te beschouwen.

De dimensionering van de cilinders heeft plaats gevonden op basis van een aantal wisselingen bepaald door gedurende 200 jaar één stormvloedsluiting per 4 jaar en 12 maal testen per jaar. In totaal dus 2450 maal in de levensduur. Daarbij zou elke schuif geheel gesloten worden (de karakteristieke belastingcyclus wordt dan geheel doorlopen). Later is de testfrequentie om faalkansredenen verdubbeld naar eenmaal per 2 weken. Omdat niet bij alle tests de schuiven geheel gesloten en op de onderaanslag gedrukt worden, wordt niet het volledige belastinggebied doorlopen. Dit is met name van belang voor de vermoeiingsbelasting op de cardanbalken. Ook de inwendige drukken in de cilinders bereiken niet steeds de maximale waarden.

De belastingen uit de schuiven op de bewegingswerken zijn gebaseerd op de extreme golf- en vervalbelastingen (zie deelnota 3). De kans van voorkomen van de extreme belasting bedraagt $2{,}5 \times 10^{-4}$. De extreme belasting treedt gedurende de levensduur een beperkt aantal malen op. De extreme belasting is beschouwd als een (quasi-)statische belasting voor de bewegingswerken. Bij de dimensionering van onderdelen op deze belasting is geen rekening gehouden met vermoeiing. De karakteristieke belasting is afgeleid van de extreme belasting volgens de relatie:
- $F_{kar} = F_{extreem} / 1{,}2$

De bewegingswerken zijn gedimensioneerd op deze zogenoemde karakteristieke belasting. De veiligheidsfactor voor de extreme belastingen bedraagt 1,25. De veiligheidsfactor voor de karakteristieke belastingen bedraagt 1,5.

2.3.1 Overzicht belastingen

De volgende belastingen zijn van invloed op de berekening van de hydraulische cilinders:
1. belastingen die door de cilinder moeten worden opgebracht om de schuif te bewegen
2. directe belastingen op/aan de cilinder
3. temperatuurbelastingen

Ad 1.
- eigen gewicht schuif
- wrijving op de schuifgeleidingen onder invloed van voorspanning (inclusief aangroeiing)
- extra wrijving door horizontale verval- en golfbelasting
- verticaal gerichte hydraulische belasting (opwaartse kracht, zuigkracht en verticale golfkrachten)
- massakrachten door schuifversnellingen/vertragingen bij het tegen de pijler stoten van de schuif
- invloed van stick-slip verschijnselen

Ad 2.
- eigen gewicht van de cilinderonderdelen en oliekolommen
- golfkrachten op de zuigerstang
- wrijving in oog zuigerstang en ophangpunten (μ=0,2)
- windbelastingen op cilinder
- oliedrukken in de cilinder

De windbelasting op de boven de kering uittorenende cilinders heeft verhoudingsgewijs weinig invloed op het totale krachtenspel en is derhalve verwaarloosd.

Ad 3.
- bij een zuiger die in de onderhoudstand tegen het deksel is gebracht, een uitzetting van de oliekolom door een temperatuurstijging van 30°C
- bij de cardanbalken een temperatuurverschil tussen staal en beton van 30°C
- tussen stalen delen onderling een temperatuurverschil van 20°C.

2.3.2 Grootte van de belastingen

De hydraulische belastingen op de schuiven tijdens sluiten, gesloten situatie en openen zijn bepaald door de Deltadienst, hoofdafdeling Waterloopkunde [17, 18, 19, 20]. De belastingen zijn gebaseerd op fysisch modelonderzoek en onderzoek met wiskundige modellen door het Waterloopkundig Laboratorium en gebaseerd op de plaatliggerschuif. Toen bleek dat de verticale golfbelastingen niet door de plaatliggers konden worden opgenomen, is besloten de plaatliggers te vervangen door een vakwerk opgebouwd uit ronde buisprofielen. Een globale schatting leerde dat de horizontale belastingen op de vakwerkschuiven nauwelijks zouden afwijken van de belastingen op de plaatliggerschuiven. De verticale krachten zouden echter wel een aanzienlijke verandering ondergaan. Daarom werd besloten de verticale belastingen opnieuw te bepalen. In de nota's DDWT 80.411, DDWT 80.433 en DDWT 80.489 [34, 35, 36] zijn de herziene verticale belastingen op de vakwerkschuiven gegeven. Voor de invloed van de veerstijfheid van de bewegingswerken op het trillingsgedrag van de schuiven tijdens sluiten wordt verwezen naar deelnota 2, hoofdstuk 3 en 6.

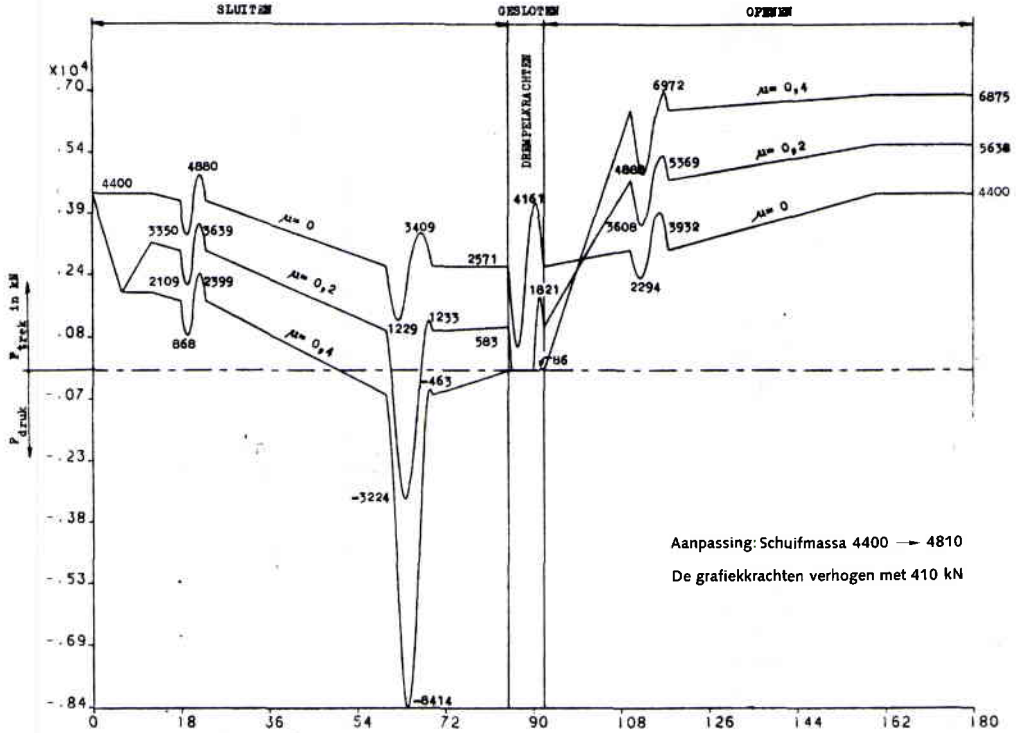
De belastingen en de variaties in de belastingen op de bewegingswerken van de schuiven worden in aanzienlijke mate bepaald door de wrijving van de schuifaanslagen op de schuifgeleidingen. Door TNO zijn uitgebreide proeven uitgevoerd ter bepaling van de wrijvingscoëfficiënt van diverse combinaties van materialen(zie deelnota 4). Daarbij is aandacht besteed aan:

- de statische wrijvingcoëfficiënt, de wrijving die optreedt voorafgaande aan het bewegen van de schuif
- de dynamische wrijvingscoëfficiënt, de wrijving tijdens bewegen

Naarmate beide wrijvingscoëfficiënten dichter bij elkaar liggen zal de schuif rustiger in beweging komen en zal het gevaar voor stick-slip kleiner zijn. In [21] zijn de resultaten van de beproevingen van de gekozen materiaalcombinatie aluminiumbrons en UHMPE vastgelegd, zie hiervoor ook figuur 41 uit deelnota 2 en figuur 7 uit deelnota 4. In het onderzoek bleek een aanzienlijke variatie in de statische wrijvingscoëfficiënt. Waarden van μ_{stat} tussen 0,5 en 0,2 kwamen voor, deels afhankelijk van de bewegingsrichting. In de dynamische wrijvingscoëfficiënt μ_{dyn} kwamen waarden voor tussen 0,2 en 0,3. De marges in de dynamische wrijvingscoëfficiënten ontstaan o.a. door resten van aangroei op de geleidingen en ook door het inbedden van aluminiumbrons-deeltjes in het aanslagmateriaal. Voor de wrijvingscoëfficiënt is uiteindelijk een maximale waarde van 0,4 aangenomen. De ongunstigste situatie wordt daarmee onvoldoende gedekt, maar in veel situaties is de waarde aan de conservatieve kant.

Omdat de wrijving van de schuif op de geleidingen zowel ten gunste, als ten ongunste van het bewegingswerk kan uitwerken, is voor de dimensionering van het machinewerk gezocht naar diverse combinaties van grootte van de voorspanning waarmee de schuif tussen de geleidingen zit geklemd bij diverse wrijvingscoëfficiënten. Berekeningen zijn uitgevoerd met een voorspanning in de geleidingen van 90, 140 en 200 kN/m[1] en met wrijvingscoëfficiënten μ=0,0 μ=0,2 en μ=0,4 (figuur 2.6).

Aanvankelijk is het ontwerp van de bewegingswerken gedimensioneerd op een voorspanning van 200 kN/m[1]. Dit komt ongeveer overeen met een verval van 2,0 m over de schuif. Bij grotere vervallen komt de geleiding aan de niet-belaste zijde los. Bij vervallen kleiner dan 2,0 m wordt de wrijvingskracht dus bepaald door de voorspanning, daarboven door de vervalbelasting. In een laat stadium van het ontwerp zijn de schuifaanslagconstructies nog gewijzigd. Als gevolg daarvan is de voorspanning van de schuif tussen de geleidingen afgenomen. Deze varieert nu tussen 70 en 110 kN/m[1]. Op de dimensionering van het bewegingswerk heeft deze wijziging geen invloed omdat de maatgevende belasting tijdens



Figuur 2.6 Krachten bewegingswerk

"Einde sluiten" optreedt en dan de wrijvingskrachten van een zeer groot verval moeten worden overwonnen. In de definitieve berekeningen is de lagere voorspanning verwerkt. Overigens moet daarbij worden opgemerkt dat, als gevolg van de lagere wrijvingskracht, de relatieve invloed van de (variërende) golfbelasting is toegenomen.

Eén volledige belastingcyclus op het bewegingswerk wordt doorlopen bij sluiten en openen van een schuif (figuur 2.6). De belastingsamplitude wordt daarbij bepaald door de drukkracht waarmee de schuif op de onderaanslag wordt gedrukt, en door de grootte van de trekkracht bij openen van de schuif. Deze trekkracht is het grootst, wanneer de grootste wrijvingscoëfficiënt ($\mu_{statisch}$=0,4) in rekening wordt gebracht. Uitgangspunt bij het ontwerp is geweest dat de schuif nog bij een vervalbelasting van 2,5 m geopend zou moeten kunnen worden.

De drukkracht waarmee de schuif op de onderaanslag wordt gedrukt, is gelijk aan de grootste tijdens sluiten uit te oefenen drukkracht waarop de cilinder gedimensioneerd is. Hiermee rekening houdend, kan gesteld worden dat de belasting gedurende één volledige cyclus is opgebouwd uit één volledige wisseling van de belasting en een vele malen voorkomende "rimpelbelasting" door de invloed van de golven.

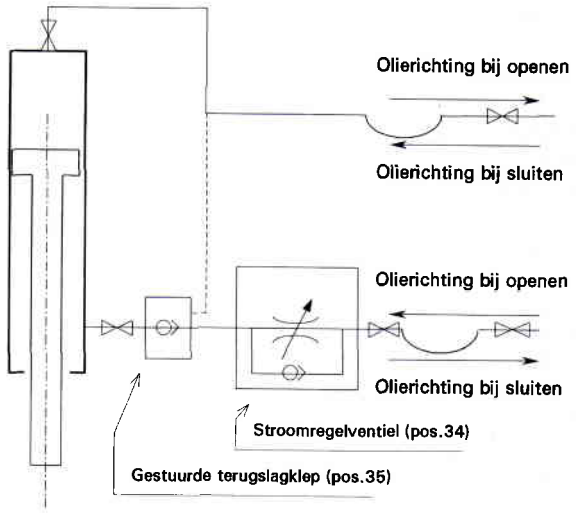
Invloed van stick-slip

Bij het afronden van de berekeningen van de bewegingswerken, op basis waarvan de onderdelen zijn gedimensioneerd, was het onderzoek naar de gevolgen van stick-slip nog gaande. Uiteindelijk bleek dat de spanningsfluctuaties door stick-slip onder de vermoeiingslijn voor oneindige levensduur vallen. Achteraf kan dus gesteld worden dat de consequenties van stick-slip zowel bij de oliedrukken als in de mechanische belasting van de hoofdcomponenten terecht in de berekeningen zijn verwaarloosd. Bij de dimensionering van onderdelen waarop de gevolgen van het stick-slip verschijnsel onbekend zijn, is stick-slip nadrukkelijk wel meegenomen. Dit betreft de eisen gesteld aan de zuiger- en stangpakkingen, en aan de kogelgewrichtslagers van het oog aan de zuigerstang en van de cardanbalk.

Zorg was er over de dynamische impact die stick-slip zou kunnen hebben op het hydraulische systeem. Als gevolg van stick-slip van de schuifbeweging zullen drukvariaties optreden in de olie van het hydraulische systeem. Daardoor zouden besturingscomponenten van de hydraulische installatie, die deels op druk reageren, een ongewenste reactie kunnen geven. Ook het schakelen van de kleppen en schuiven in het systeem veroorzaakt drukgolven in het hydraulische systeem, die eveneens de werking van sommige componenten in het systeem ongunstig kunnen beïnvloeden. Om een indruk te krijgen van de dynamische reacties in het hydraulisch systeem, is een dynamische analyse uitgevoerd, waarvan aanpak en resultaten zijn beschreven in paragraaf 3.4

Hydraulische systeem

In hoofdstuk 4 wordt een gedetailleerde beschrijving van het hydraulische aandrijfsysteem gegeven. Voor het goede begrip van de komende paragrafen is echter een korte omschrijving van het systeem nodig. Deze beschrijving wordt gegeven middels de functionele eisen die aan het bewegingssysteem zijn gesteld. Deze functies worden uitgeoefend met één cilinder per schuifuiteinde en een bij die cilinder behorend pompaggregaat dat via leidingen en hydraulische schakelcomponenten olie aan de cilinder kan toevoeren en van de cilinder kan afvoeren (figuur 2.7). Omdat de cilinderafmetingen zijn aangepast op de schuifafmetingen, zijn de drukken voor alle typen schuiven ongeveer gelijk.



Figuur 2.7 Schematisch overzicht hydraulisch systeem

De functies van het bewegingswerk zijn:
1. de schuif in geheven stand houden
2. de schuif sluiten
3. de gesloten schuif op de onderaanslag gedrukt houden
4. de schuif openen

Ad 1.

Bij geheven schuif zijn er geen acties. In de cilinder bevindt zich de zuiger, die één geheel vormt met de zuigerstang, waaraan het schuifuiteinde is bevestigd. In geheven positie bevindt de zuiger zich hoog bovenin de cilinder en hangt het schuifgewicht op de oliekolom onder de zuiger. De druk in die oliekolom wordt hoofdzakelijk bepaald door het schuifgewicht en bedraagt ca. 90 bar. De (gestuurde) terugslagklep onderaan de cilinder voorkomt dat de olie kan wegstromen uit de cilinder. Boven de zuiger wordt door een spanpompsysteem een kleine overdruk van 3 bar gehandhaafd.

Ad 2.

Bij sluiten wordt door het hydraulische aggregaat olie gepompt in de cilinder boven de zuiger. De druk waarmee die olie wordt toegevoerd drukt de gestuurde terugslagklep open, zodat onder de zuiger olie kan wegstromen. De snelheid waarmee dat gebeurt wordt geregeld door een stroomregelventiel. De instelling van dit stroomregelventiel is bepalend voor de sluitsnelheid van het betreffende schuifuiteinde. De door de schuif ondervonden weerstand (wrijvingskrachten bij sluiten onder verval) is bepalend voor de druk die bovenin de cilinder optreedt.

Ad 3.

Als de schuif op zijn aanslag onderin de pijler is aangekomen, houdt de druk bovenin de cilinder via de zuiger en de zuigerstang de schuif aangedrukt op zijn onderaanslag. Onder de zuiger is niet langer druk nodig en hier stelt zich dan ook de druk in die door de spanpomp wordt gegenereerd (3 bar).

Ad 4.

Bij openen wordt de druk boven de zuiger afgelaten en wordt olie onder druk toegevoerd onder de zuiger. Via de zuiger tilt de oliedruk het schuifuiteinde op. De daarvoor benodigde druk onder de zuiger wordt hoofdzakelijk bepaald door de cilinderafmetingen, het schuifgewicht en de optredende wrijving, terwijl de druk boven de zuiger wordt bepaald door de stromingsweerstand van de terugstromende olie.

2.3.3 Krachten onderoog zuigerstang

Via het onderoog worden door het bewegingswerk krachten uitgeoefend op de schuif, terwijl de belastingen uit de schuif via dit bevestigingspunt in het bewegingswerk worden geleid. Drukkrachten worden uitgeoefend tijdens sluiten van de schuif en variëren onder invloed van golven. De grootste drukkrachten worden uitgeoefend als de schuif in gesloten toestand op de onderaanslag wordt gedrukt. De grootte van de drukkracht wordt bepaald door de maximale druk aan dekselzijde in de cilinder (75 bar). Voor de bepaling van de kracht moet met het gewicht van de oliekolom, de zuigerstang en de druk van de spanpomp op de olie aan stangzijde rekening worden gehouden.

Bij "Begin openen" worden door de cilinders omhoog gerichte trekkrachten uitgeoefend op de schuif om deze in beweging te krijgen. In eerste instantie zijn het vooral de wrijvingskrachten in de schuifgeleidingen die overwonnen moeten worden. Het aandeel van de wrijving in de optredende trekkracht neemt echter bij het verder uit het water komen van de schuif af, terwijl het schijnbaar schuifgewicht toeneemt. De grootste trekkrachten treden op bij "Begin openen" of "Einde openen", afhankelijk van het type schuif. De trekkracht is begrensd door de maximale druk aan stangzijde in de cilinder (max. druk beveiliging afgesteld op nominaal 190 bar bij volle volumestroom door de klep). Rekening moet dan nog worden gehouden met het gewicht van de zuigerstang, de oliekolom en de druk aan dekselzijde. De trekkracht blijft aanwezig in de geopende stand van de schuif. Het wrijvingsaandeel zal langzaam verdwijnen door relaxatie of door wegzakken van de schuif. Aan dekselzijde stelt zich in geopende stand van de schuif een druk in die wordt bepaald door het spanpompsysteem.

Het onderoog is voorzien van een kogelgewrichtslager. Zelfs bij de kleinste hoekverdraaiingen treedt een moment op door de inwendige wrijving in het lager en door de weerstand van de afdichtingen. Een wrijvingscoëfficiënt van 0,2 is in rekening gebracht.

2.3.4 Golfbelastingen

Bij het vastleggen van de (grootste) belastingen op de cilinders is rekening gehouden met golven die, zowel in horizontale als in verticale zin, krachten op de schuiven uitoefenen. In extreme gevallen zullen de krachten zo groot zijn dat de schuifbeweging gedurende korte tijd wordt onderbroken. De schuif blijft dan even aan de schuifgeleidingen 'kleven'.

In het algemeen treden onder invloed van de golven variaties in de verticale belasting van de cilinders op. Deze variaties zijn bepalend voor de vermoeiingsberekening. Voor de schuiftypen 5900, 8900 en 11900 is daarom een belastingcollectief voor het totale belastinggebied opgesteld.

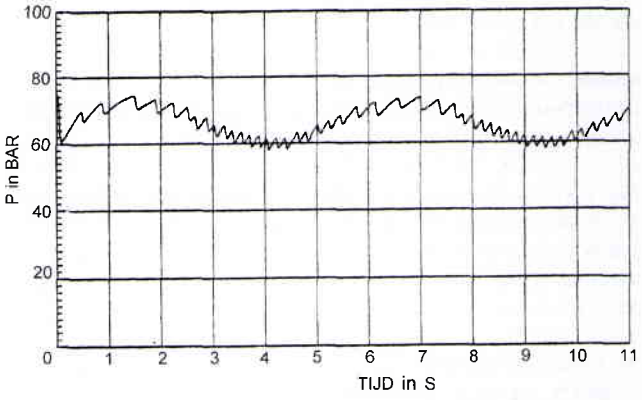
Daarnaast kan er direct op de zuigerstang horizontaal een quasi-statische golfbelasting werken t.g.v. overslaande golven. Hydraulisch onderzoek heeft aangegeven dat een dwarsbelasting van 75 kN voor elk cilindertype een redelijke aanname is. Deze belasting wordt via het onderoog en de schuif naar de schuifgeleidingen overgedragen en via de cardanische ophanging aan de hamerstukken. De hoogte van het aangrijppunt van deze belasting varieert per cilindertype.

2.3.5 Massakrachten werkend op de zuigerstangen

De vrijslag van de schuif in langsrichting van de kering is er de oorzaak van dat de schuif onder invloed van schuin inlopende golven met de kopse kant tegen de zijgeleidingen kan botsen. Dynamische berekeningen hebben aangegeven dat voor deze situatie een vertraging van 3 m/sec^2 ter plaatse van het onderoog in rekening moet worden gebracht. Bij de botsing wil de cilinder door de traagheidswerking roteren om de as door de lagerstoelen van de cardanbalken. De zuigerstang verhindert deze rotatie en wordt daardoor op buiging belast.

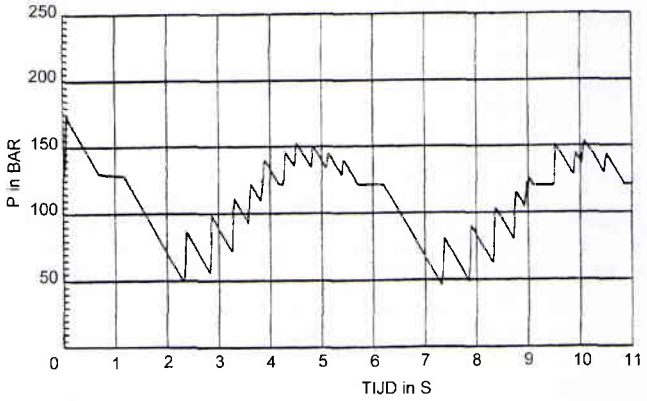
2.3.6 Optredende oliedrukken in de cilinders

Zoals in het voorgaande al is aangegeven, wordt de druk in de cilinder veelal bepaald door drukveiligheden in het systeem. Rekening moet echter worden gehouden met enkele dynamische effecten. De oliedruk aan dekselzijde (figuur 2.8) is zowel bij testen als bij sluiten ongeveer constant. De druk wordt bepaald door de instelling van een drukregelventiel (veiligheid), dat geheel geopend is bij een druk van 70 bar. Tijdens heffen wordt de druk bepaald door de weerstand die de wegstromende olie ondervindt. In geheven stand van de schuif is het systeem aan dekselzijde in rust en bedraagt de druk 2 à 3 bar. Deze druk wordt gegenereerd door het spanpompsysteem.



Figuur 2.8 Oliedruk aan dekselzijde bij sluiten

De bewegingssnelheid van de zuigerstang bij het sluiten van de schuif wordt bepaald door een debietregeling in de leiding met uitstromende olie. De oliedruk aan stangzijde (figuur 2.9) wordt bepaald door de belasting op het oog van de zuigerstang, het eigengewicht van de zuigerstang, de wrijvingsweerstand van de afdichtingen en door de oliedruk boven de zuiger. De grootste oliedruk treedt op bij scheefstandcorrectie, en wel aan de stangzijde van de cilinder van het schuifuiteinde dat niet gecorrigeerd wordt.



Figuur 2.9 Oliedruk aan stangzijde bij sluiten

Ook bij begin sluiten treden grote oliedrukken op aan stangzijde. De wrijvingskracht van de schuif op de geleidingen is dan nog klein, het volle schuifgewicht is aanwezig en boven de zuiger is de sluitingsdruk van 70 bar aangebracht. Door stick-slip kan de schuif wat schokkend in beweging komen. Dit geeft dynamische effecten, die leiden tot drukverhoging. In de dynamische analyse die van het bewegingswerk is opgesteld, is de drukverhoging door dynamische effecten berekend. Rekening wordt gehouden met een maximale druk van 220 bar aan stangzijde.

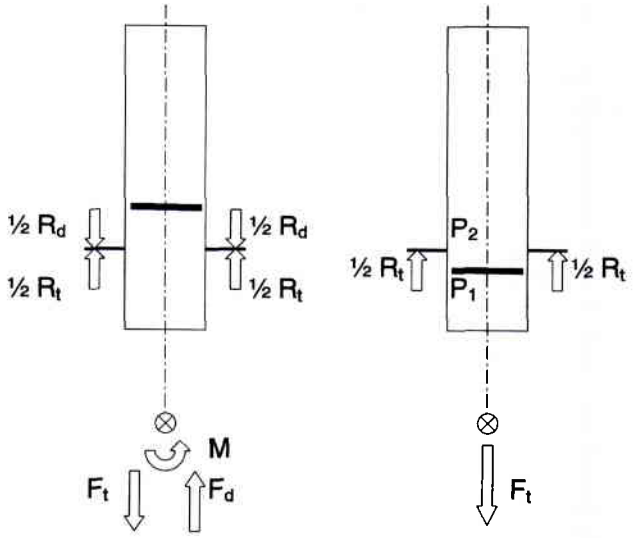
Bij de afname van de cilinders na fabricage zijn ze alle aan stangzijde op een inwendige druk van 270 bar gebracht door de druk aan dekselzijde op ca. 163 bar te brengen. Daarbij is gecontroleerd op lekkage. De cilinders lagen bij deze beproeving horizontaal.

2.3.7 Reactiekrachten cilinders en cardanbalken

De neerwaarts gerichte krachten op het ophangpunt van de cilinders kunnen worden afgeleid uit de krachten op het oog van de zuigerstang, vermeerderd met het gewicht van de complete cilinder. Op de lagerstoelen van de cardanbalken werken bovengenoemde krachten, vermeerderd met het gewicht van de cardanbalk. De opwaarts gerichte krachten op het ophangpunt van de cilinder zijn gelijk aan die op het onderoog, verminderd met het gewicht van de cilinder. Op de lagerstoelen van de cardanbalken werken dezelfde krachten, maar dan ook nog verminderd met het gewicht van de cardanbalken. Zie voor een overzicht van de reactiekrachten tabel 2.2 en figuur 2.10.

De spanningen die door de extreme belastingen (kolommen 8 en 9) optreden mogen de toelaatbare statische spanningen met 20% overschrijden. Voor de cilinders is dit belastingsgeval niet maatgevend; bij de cardanbalken kan het maatgevend zijn voor de stabiliteit.

Aangezien de lagers in het oog van de zuigerstang, in de cilindermantel en de cardanbalk niet wrijvingsloos zijn en bovendien zijn voorzien van afdichtingen, veroorzaakt elke rotatie wrijvingsmomenten. Afhankelijk van de richting vergroten of verkleinen deze momenten de lagerreacties. De lagers worden daarnaast axiaal



Figuur 2.10 Reactiekrachten cilinder en cardanbalk

belast wanneer ze door uitwendige belastingen axiaal moeten verplaatsen (temperatuursbelasting).

2.4 Sterkte toegepaste materialen

2.4.1 Inleiding

De onderdelen van het bewegingswerk van de schuiven zijn naast statische sterkte gedimensioneerd op vermoeiing, waarbij onderscheid gemaakt kan worden tussen wisselende belasting en sprongbelasting. Zowel de controle op de vermoeiingssterkte als de statische sterkte van de bewegingswerken is uitgevoerd met de methode van toelaatbare spanningen. Hierbij wordt de gebruiksbelasting getoetst aan de sterkte van het materiaal. De toelaatbare spanningen zijn afhankelijk van de materiaalsoort, de gemiddelde spanning en het spanningsinterval. In de vastgelegde toelaatbare spanning is uitgegaan van een kerffactor en de maat-

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hoogte schuif	**F_t** [kNm]	**F_d** [kNm]	**M** [kNm]	**R_t** [kN]	**R_d** [kN]	**EG cil** [kN]	**F_t** extreem	**R_t** extreem
11900	4325	4525	338	5370	3480	1045	5845	6890
10900	3940	4220	318	4845	3315	905	5580	6485
9900	3795	3890	297	4615	3070	820	5205	6025
8900	3385	3520	245	4085	2820	700	4815	5515
7900	3090	3275	231	3730	2635	640	4500	5140
6900	2690	2910	199	3225	2375	535	4025	4560
5900	2600	2560	179	3080	2080	480	3585	4065
Toelichting	Kolommen 2 t/m 7, maximum oliedruk :				Kolommen 8 en 9, extreme situatie :			
	Boven de zuiger 75 bar				Druk boven de zuiger 0 bar			
	Onder de zuiger 220 bar				Druk onder de zuiger 190 bar			

Tabel 2.2 Overzicht belastingen

Toelaatbare basisspanningen σ [N/mm^2]							
Smeedstaal				**Nodulair gietijzer**			
treksterkte σ_B	wissel-spanning	sprong-spanning	grens-waarde	treksterkte σ_B	wissel-spanning	sprong-spanning	grens-waarde
370	40,5	71,0	101,5	380	31,5	57,0	79,0
400	43,0	75,5	107,5	420	34,0	61,5	85,0
420	44,5	78,5	111,5	500	38,0	69,0	95,0
450	46,5	82,0	116,5	600	43,5	79,0	108,0
500	50,0	88,5	125,0	700	48,5	89,0	121,0
520	51,5	91,5	129,0	**Gietstaal**			
600	57,0	101,5	142,5	treksterkte	wisselsp.	sprongsp.	grensw.
700	63,5	114,0	159,0	380	32,5	58,0	80,5
800	70,5	126,0	175,5	450	36,5	66,0	91,0
900	78,0	140,0	194,5	520	40,0	73,0	100,5
1000	85,5	153,5	213,0	600	44,5	81,0	111,0

Tabel 2.3 Toelaatbare spanningen "oneindige levensduur"

gevende doorsnede. De berekeningsmethodiek is ontleend aan [doc.22], een richtlijn die later is opgenomen in de NEN 6786, Voorschriften voor het Ontwerpen van Beweegbare Bruggen (VOBB).

In de praktijk blijkt dat veel onderdelen in machinewerken óf wisselend worden belast, óf onderhevig zijn aan een sprongbelasting. Dit betekent dat veelal kan worden volstaan met het aangeven van een toelaatbare spanning voor een wisselende belasting en een toelaatbare spanning voor een sprongbelasting. Voorwaarde is dat de kerffactoren voor de maatgevende doorsneden een bepaalde waarde niet overschrijden. Deze methode leent zich goed voor onderdelen die een verspanende bewerking ondergaan. Aan bovenstaande voorwaarde kan daarbij worden voldaan door minimumwaarden voor de afrondingsstralen aan te geven. Zijn er desondanks nog kerftypen waarvan de kerffactor groter is dan de waarde die bij het vastleggen van de toelaatbare spanning in rekening is gebracht, bij voorbeeld een naaf op een as, dan kan dat in de berekening worden betrokken door gebruik te maken van fictieve kerffactoren. Het voordeel van deze methode is dat een onderdeel op zeer efficiënte wijze te dimensioneren is. Daarnaast wordt een vormgeving verkregen die, afgezien van het spanningsniveau, overeenkomt met de vormgeving van het onderdeel voor een statische belasting. Dat wil zeggen dat t.a.v. de statische sterkte zwakke doorsneden worden vermeden, hetgeen bij andere methoden niet het geval is.

2.4.2. Toelaatbare spanningen en kerffactoren

Toelaatbare spanningen voor een "oneindige levensduur" zijn gegeven in tabel 2.3. De gegeven spanningen gelden voor materiaaldikten of diameters tot ca. 200 mm. Tabel 2.3 geldt voor machinaal bewerkte onderdelen, waarvan de kerffactor $\beta \leq \beta_o$. De grenswaarde is de toelaatbare spanning die geldt voor de controle op statische sterkte.

In tabel 2.4 zijn de in rekening gebrachte kerffactoren en bewerkingsinvloeden gegeven voor matig gekerfde onderdelen. Met de waarden uit tabel 2.4 kunnen de toelaatbare wisselspanningen bepaald worden middels de formules:

- toelaatbare wisselspanning voor smeedstaal :
  $\sigma_w = 0{,}36\ \sigma_B\ .\ b\ /\ 1{,}3\beta_o\ \ (\chi = -1)$
- toelaatbare wisselspanning voor gietstaal :
  $\sigma_w = 0{,}281\sigma_B\ .\ b\ /\ 1{,}3\beta_o\ (\chi = -1)$

In tabel 2.5 zijn de fictieve kerffactoren gegeven voor assen ter plaatse van naven en wentellagers.

σ_B	370	400	420	450	500	520	600	700	800	900	1000	1100
β_o	2,27	2,32	2,35	2,38	2,44	2,46	2,54	2,62	2,68	2,72	2,76	2,79
b	0,90	0,90	0,90	0,89	0,88	0,88	0,87	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85
toelichting	σ_B : treksterkte [N/mm^2]			β_o : kerffactor			b : bewerkingsfactor					

Tabel 2.4 Kerffactor β_0 voor matig gekerfde onderdelen

Treksterkte σ_B [N/mm^2]	Fictieve kerffactor β_b -
400	1,14
500	1,22
600	1,31
700	1,40
800	1,51
900	1,61
1000	1,71
1100	1,82

Tabel 2.5 Fictieve kerffactor β_b.

2.4.3 Toelaatbare spanningen materialen cilinders

Bij de cilinders zijn diverse onderdelen te onderscheiden:
a. flenzen en deksels
b. het cardanstuk
c. het rechte gedeelte van de cilinder
d. de zuigerstang
e. het lantaarnstuk
f. het oog aan de zuigerstang
g. de schroefdraadverbinding tussen oog en zuigerstang
h. voorspanbouten
i. pennen van de ophangpunten

De onderdelen a, b, e, f en i kunnen worden beschouwd als onderdelen die 'matig gekerfd' zijn door o.a. boutgaten, ontluchtingsgaten en afrondingen. Met uitzondering van de pennen van de ophangpunten ter plaatse van de lagers en opleggingen, voldoen de kerffactoren van deze onderdelen, mede door de keuze van de afrondingsstralen, aan de voorwaarde: $\beta \leq \beta_o$ (β_o is de kerffactor volgens tabel 2.4). Als wordt uitgegaan van een oneindige levensduur, betekent dit dat bij een wisselspanning en een sprongspanning de toelaatbare spanningen van tabel 2.3 op deze onderdelen van toepassing zijn. Bij de pennen, waarvoor hierboven een uitzondering is gemaakt, is een fictieve kerffactor in rekening gebracht volgens tabel 2.5.

Het rechte deel van de cilinder (c) en de zuigerstang (d) kunnen als licht gekerfd worden beschouwd.
De afmetingen van de zuigerstang worden echter niet bepaald door toelaatbare spanningen, maar door stabiliteitsvoorwaarden en de afmetingen van de schroefdraad. Het rechte cilinderdeel (c) is samengesteld door lassen, waarin nog (kleine) lasfouten kunnen zitten, en is aan de buitenzijde ruw bewerkt. Daarom zijn voor het rechte cilinderdeel dezelfde toelaatbare spanningen in rekening gebracht als voor de flenzen.

Bij de dimensionering van de cilindermantel speelt daarnaast nog iets anders. De zuigerafdichtingen zijn in hun functioneren gevoelig voor vergroting van de cilinderdiameter ten gevolge van de inwendige drukken in de cilinders. Er is sprake van een maximum spleet die de afdichtingen nog kunnen overbruggen tussen cilindermantel en zuiger. Bij de toegepaste hydraulische drukken (maximaal 190 bar) bedraagt deze spleet ongeveer 1 mm. Aangezien de afdichtingen in dwarsdoorsnede niet meegroeien met de diameter, is deze waarde voor grote en kleine cilinders gelijk. Voor de cilinders met grote diameters is de diametervergroting t.g.v. inwendige druk bepalend voor de bepaling van de wanddikte en bij de kleinere cilinders zijn de optredende materiaalspanningen bepalend.

Voor de vermoeiingsgevoelige onderdelen van de bewegingswerken kunnen de toelaatbare spanningen worden verhoogd ten opzichte van die bij een oneindige levensduur, omdat het te verwachten aantal wisselingen sterk beperkt is. Voor drie verschillende schuiftypen (5900, 8900 en 11900) is het belastingcollectief beschouwd.
De bijdrage aan de vermoeiing bestaat tijdens een bewegingscyclus uit:
- de grootschalige belastingwisseling die optreedt bij het doorlopen van de cyclus "schuif sluiten, schuif aandrukken op onderaanslag, gevolgd door schuif openen" (ca. 2600 keer in 200 jaar)
- golfbelasting gedurende sluiten en openen (ca. 700 keer per cyclus)
- stick-slip verschijnsel tijdens bewegen (ca. 20.000 keer per cyclus)

De ontwerpberekeningen zijn gebaseerd op een aantal belastingswisselingen ter grootte van N=2450. Op basis van 2450 belastingwisselingen is de vergrotingsfactor t.o.v. de "oneindige levensduur" vastgesteld op γ=1,91. In een later stadium van het ontwerp bleek dat mogelijk 1 maal per jaar een stormsluiting zou kunnen plaatsvinden. Hierdoor zou het aantal grootschalige belastingwisselingen vergroot moeten worden tot N=2600. Voor N=2600 geldt een vergrotingsfactor γ=1,93. Het verschil in vergrotingsfactor (<1%) wordt, mede gezien hetgeen eerder over het optreden van de maximale belasting is gemeld, acceptabel geacht. De toelaatbare spanningen voor de onderdelen a, b, c, e, f en i zijn als volgt vastgelegd:

$$\sigma_N = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \sigma_W}{1 - \chi + (1 + \chi) \cdot 1{,}3 \cdot \gamma \cdot \sigma_W / \sigma_B}$$

Hierin in is χ=-1 voor wisselspanning en χ=0 voor sprongspanning. De factor 1,3 zorgt ervoor dat de cumulatieve schade, bepaald met de schaderegel van Palmgren-Miner, overal in de cilinders beperkt blijft tot ten hoogste 0,10. De toelaatbare spanningen zijn voor de karakteristieke belasting gegeven in tabel 2.6.

De hydraulisch voorgespannen bouten in de flensverbindingen zijn 60 % hoger voorgespannen dan de maximale werkbelastingen. Bij de dimensionering van de voorspanbouten in de flenzen en de pakkinghouders is het uitgangspunt geweest dat de maximale spanning t.g.v. de voorspanning, vermeerderd met de buigspanning t.g.v. de vervorming van de flenzen, alsmede de spanningsamplitude (zowel trek als buiging) niet hoger mag zijn dan 90% van de vloeigrens.

De toelaatbare spanningsamplitude in de schroefdraad in de verbinding van het oog aan de zuigerstang is vastgelegd op 70 N/mm^2. Daarbij is er rekening mee gehouden dat zodanig wordt voorgespannen dat bij belastingwisselingen de belasting in de schroefdraad niet van richting omkeert.

De stabiliteit van de cilinders is gecontroleerd aan de hand van de standaardberekeningsmethodiek "Knik en buiging van cilinders in de rekentoestand", zoals opgenomen in [doc.22]. De zo bepaalde momenten in de knikstaaf zijn maatgevend voor de zuigerstangdiameter.

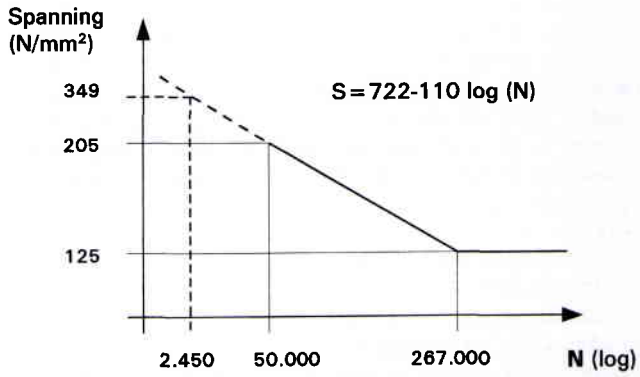
Onderdeel	Materiaal	Toelaatbare spanning [N/mm2]	
		wisselende belasting	sprongbelasting
Cilinders	Fe510	96	155
Deksels/lantaarnstukken	GGG-40	59	98
Zuigerstang	2C35	96	153
Pennen	2C45	109	195

Tabel 2.6 Toelaatbare spanningen materialen bewegingswerken

2.4.4 Toelaatbare spanningen cardanbalken.

De cardanbalken zijn relatief dunwandige, gelaste staalconstructies, gemaakt van Fe360. Bepalend is de berekening op vermoeiing, waarbij gebruik is gemaakt van de vermoeiingscurves van Gurney [37]. Deze curves zijn bepaald voor een minimum aantal wisselingen van N=50.000. Voor N=2450 is daarom geëxtrapoleerd, het bijbehorende spanningsinterval bedraagt S = 349 N/mm^2 (figuur 2.11).

De toelaatbare spanningsamplitude waarmee de cardanbalken zijn berekend op vermoeiing bedraagt 125 N/mm^2. De cumulatieve schade, bepaald met de schaderegel van Palmgren-Miner bedraagt 0,23. Dit is acceptabel t.o.v. de hydraulische cilinder, omdat de cardanbalk gemakkelijker te inspecteren en eventueel te repareren is.



Figuur 2.11 Vermoeiingslijn cardanbalken

3. Algemene beschrijving systeem

Als bewegingswerk is gekozen voor twee hydraulische cilinders per schuif, scharnierend verbonden aan de schuifuiteinden en met een cardanconstructie bevestigd op de hamerstukken van de pijlers (figuur 3.1). Elke cilinder wordt door een apart hydraulisch aggregaat aangedreven. Via hydraulische leidingen wordt vanaf de aggregaten olie onder druk naar de cilinders gevoerd, of van de cilinders afgevoerd. De twee hydraulische aggregaten voor twee cilinders op één pijler zijn in één container in de belendende verkeerskoker ten noorden van de pijler ondergebracht. De twee aggregaten in de container fungeren als elkaars reserve.

De twee cilinders van een schuif worden door één locale computer configuratie (LCC) bestuurd. Op elk schuifuiteinde wordt door de gelijkloopinstallatie continu een hoogtemeting uitgevoerd. Met de resultaten van de hoogtemeting kan de hoogtestand van elke schuifzijde, en daarmee de stand en gelijkloop van de hele schuif, beheerst worden. De LCC is in een elektro-container in de verkeerskoker van de betreffende schuifopening ondergebracht. De cilinders zijn vanuit de verkeerskoker bereikbaar via bordessen en trappen.

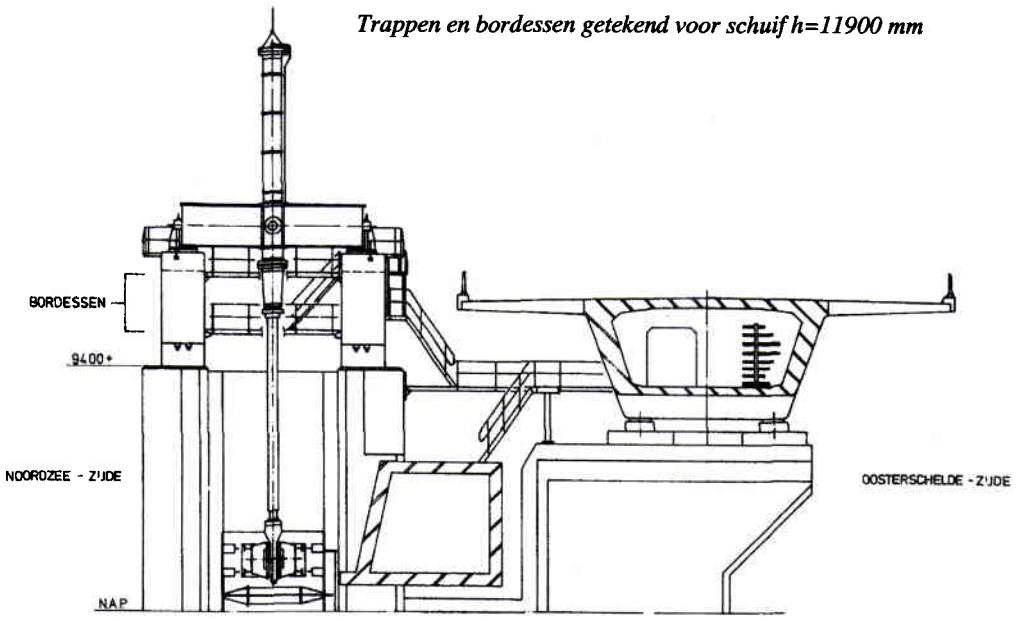
3.1 Overzicht en hoofdafmetingen

Het afsluitbare deel van de Stormvloedkering is verdeeld over drie sluitgaten in de stroomgeulen Hammen, Schaar van Roggenplaat en Roompot. Voor een beschrijving van de schuiven wordt verwezen naar voorgaande hoofdstukken.

Om de doorstroomopeningen voldoende af te dichten is er zowel aan de bovenzijde als aan de onderzijde een overlap van 0,20 m met respectievelijk de bovenbalk en de dorpelbalk. Hierdoor is de slaglengte van de schuif 0,40 m groter dan de hoogte van de doorstroomopening. De nominale slaglengte van de schuiven en bewegingswerken, nodig om de doorstroomopeningen te kunnen sluiten en openen, varieert van 5,9 m in stappen van één meter oplopend tot 11,9 m. Het is deze maat die ook als typenummer van de schuiven en bewegingswerken in de tabellen 3.1 t/m 3.3 is terug te vinden. Om de onderrand van de schuiven tot N.A.P.+2,5 m te kunnen optrekken is de slaglengte van de schuiven met 1,3 m naar boven vergroot. De totale slaglengte van de schuiven en bewegingswerken varieert daarmee van 7,2 m tot 13,2 m, oplopend in stappen van één meter.

3.2 Overzicht installatie-typen

In figuur 3.2 is de opstelling van de installaties voor een schuifopening getoond. De tabellen 3.4, 3.5 en 3.6 geven aan welke onderdelen zich in elk van de schuifopeningen bevinden. De schematische figuur naast de tabel toont het profiel van het sluitgat. De lijst bij tabel 3.4 geeft de betekenis aan van de codering voor de verschillende onderdelen. Bij elke cilinder hoort een eigen conserveringsinstallatie (codering KO) en een gelijkloopinstallatie (codering GL).



Figuur 3.1 Overzicht bewegingswerk

Schuiftype		5900	6900	7900	8900	9900	10900	11900
Niveau bovenbalk N.A.P.	a	+1,0	+1,0	+1,0	+1,0	+1,0	+1,0	+1,0
Niveau onderbalk N.A.P.	b	-4,5	-5,5	-6,5	-7,5	-8,5	-9,5	-10,5
Doorstroomopening	c=a-b	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5
Overlap onder/boven	d	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Nominale slag	e=c+d	5,9	6,9	7,9	8,9	9,9	10,9	11,9
Extra slag	f	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Totale slag	g=e+f	7,2	8,2	9,2	10,2	11,2	12,2	13,2

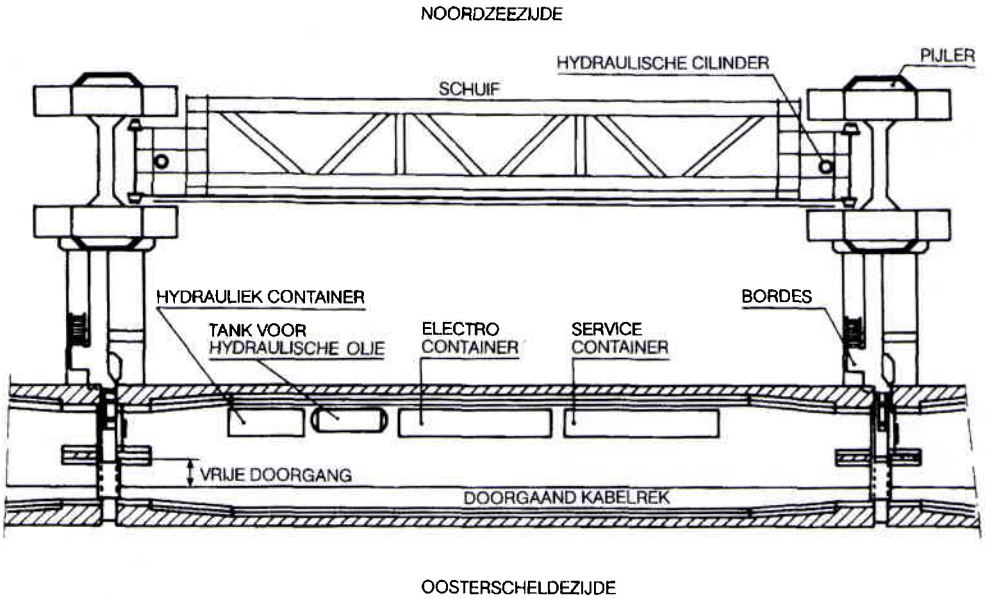
Tabel 3.1 Doorstroomopening en slaglengte

Sluitgat	Aantal schuiven	Aantal schuiven per type						
		5900	6900	7900	8900	9900	10900	11900
Hammen	15	6	2	2	2	3	-	-
Schaar van Roggenplaat	16	7	2	3	4	-	-	-
Roompot	31	2	2	3	3	3	11	7
totaal	62	15	6	8	9	6	11	7

Tabel 3.2 Schuiftypen per sluitgat

Sluitgat	Aantal cilinders	Aantal cilinders per type						
		5900	6900	7900	8900	9900	10900	11900
Hammen	30	10	4	4	4	8	-	-
Schaar van Roggenplaat	32	12	4	6	10	-	-	-
Roompot	62	2	4	6	6	6	22	16
totaal	124	24	12	16	20	14	22	16

Tabel 3.3 Cilindertypen per sluitgat



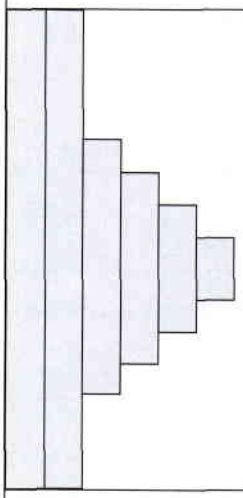
Figuur 3.2 Opstelling installaties

Schuifopening	SF	CI	HY	TA	EL	TR
Landhoofdkoker						
H16			5	A		
H15	5,9	5/5	5	B	*	
H14	5,9	5/5	5	B	*	
H13	5,9	5/5	5	B	*	*
H12	5,9	5/6	6	C	*	
H11	6,9	6/7	7	D	*	
H10	7,9	7/8	8	F	*	
H09	8,9	8/9	9	H	*	
H08	9,9	9/9	9	J	*	*
H07	9,9	9/9	9	J	*	
H06	9,9	9/9	9	H	*	
H05	8,9	9/8	8	F	*	
H04	7,9	8/7	7	D	*	
H03	6,9	7/6	6	C	*	*
H02	5,9	6/5	5	B	*	
H01	5,9	5/5	5	A	*	

Schuifopening	Overige installaties sluitgat Hammen
H09	Werkplaats en kantoorcontainer
H10	Was-, toilet- en schaftcontainer
Codering	
SF	Schuiftype
CI i/j	Cilindertype i=zijde Schouwen, j=zijde Noord-Beveland
HY	Type hydrauliekcontainer
TA	Type oliereservoir
EL	Elektrocontainer
TR	Trafocontainer

Profiel doorstroomopening

Zijde Schouwen-Duiveland



Zijde Noord-Beveland

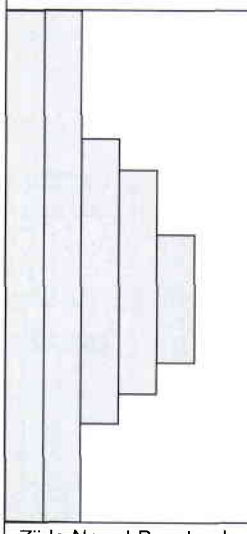
Tabel 3.4 Installaties sluitgat Hammen

Schuifopening	SF	CI	HY	TA	EL	TR
Landhoofdkoker S17			5	A		
S16	5,9	5/5	5	B	*	
S15	5,9	5/5	5	B	*	*
S14	5,9	5/5	5	B	*	
S13	5,9	5/6	6	C	*	
S12	6,9	6/7	7	D	*	
S11	7,9	7/7	7	E	*	*
S10	7,9	7/8	8	F	*	
S09	8,9	8/8	8	G	*	
S08	8,9	8/8	8	G	*	
S07	8,9	8/8	8	G	*	*
S06	8,9	8/8	8	F	*	
S05	7,9	8/7	6	D	*	
S04	6,9	7/6	6	C	*	
S03	5,9	6/5	5	B	*	*
S02	5,9	5/5	5	B	*	
S01	5,9	5/5	5	A	*	

Schuifopening	Overige installaties sluitgat Schaar van Roggenplaat
S02	Parkeerplaats elektrokar
S08	Conditiebewakingscontainer
S12	Was-, toilet- en schaftcontainer
S13	Waterloopkundig laboratorium
S13	Werkplaats en kantoorcontainer

Profiel doorstroomopening

Zijde Schouwen-Duiveland



Zijde Noord-Beveland

Tabel 3.5 Installaties sluitgat Schaar van Roggenplaat

Schuifopening	SF	CI	HY	TA	EL	TR	Profiel doorstroomopening
Landhoofdkoker							Zijde Schouwen-Duiveland
R32			5	A			
R31	5,9	5/6	6	C	*		
R30	6,9	6/7	7	D	*	*	
R29	7,9	7/8	8	F	*		
R28	8,9	8/8	8	G	*		
R27	8,9	8/9	9	H	*		
R26	9,9	9/9	9	J	*	*	
R25	9,9	9/10	10	K	*		
R24	10,9	10/10	10	L	*		
R23	10,9	10/10	10	L	*	*	
R22	10,9	10/10	10	L	*		
R21	10,9	10/10	10	L	*		
R20	10,9	10/10	10	L	*	*	
R19	10,9	10/10	10	L	*		
R18	10,9	10/10	10	L	*		
R17	10,9	10/11	11	M	*		
R16	11,9	11/11	11	N	*	*	
R15	11,9	11/11	11	N	*		
R14	11,9	11/11	11	N	*		
R13	11,9	11/11	11	N	*	*	
R12	11,9	11/11	11	N	*		
R11	11,9	11/11	11	N	*		
R10	11,9	11/11	11	M	*	*	
R09	10,9	11/10	10	L	*		
R08	10,9	10/10	10	L	*		
R07	10,9	10/10	10	K	*	*	
R06	9,9	10/9	9	H	*		
R05	8,9	9/8	8	F	*		
R04	7,9	8/7	7	E	*		
R03	7,9	7/7	7	D	*	*	
R02	6,9	7/6	6	C	*		
R01	5,9	5/5	5	A	*		
							Zijde Noord-Beveland

Schuifopening	Overige installaties sluitgat Roompot
R11,R24	Werkplaats en kantoorcontainer
R19,R31	Was-, toilet- en schaftcontainer
R21	Conditiebewakingscontainer
R21	Waterloopkundig laboratorium
R22	Milieu- en meetcontainer

Tabel 3.6 Installaties sluitgat Roompot

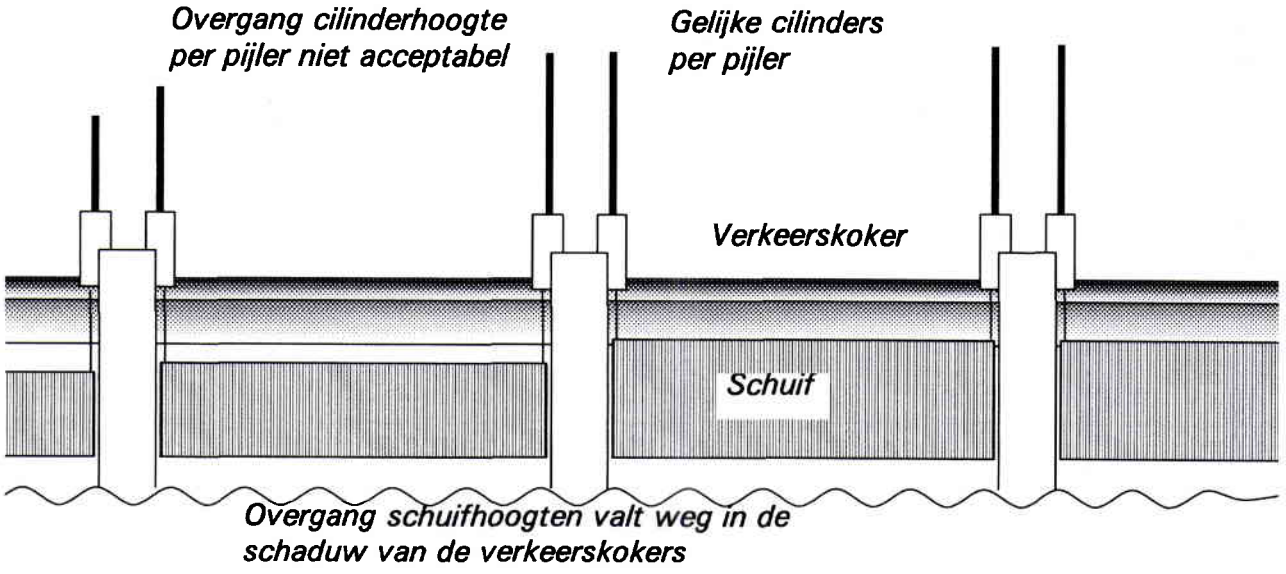
3.3 Verantwoording ontwerpkeuzen

3.3.1 Symmetrie pijleraanzicht

Wanneer men als toeschouwer op enige afstand naar een sluitgat kijkt, wordt het beeld bepaald door de hoogste elementen. Een pijler met de er bovenuit stekende cilinders wordt dan als een apart element ervaren. Tegelijk vormt een schuif, door zijn horizontale oriëntatie, geen verbindend element voor de beide eraan bevestigde cilinders, die verticaal georiënteerd zijn. Vanuit de bewegingsfunctie is het noodzakelijk dat elke schuiftype wordt aangedreven door bewegingswerken van hetzelfde type, vanuit de architectuur is deze noodzaak niet aanwezig.

De op de pijler geconcentreerde constructies (bordessen, cilinders) worden gezien als één geheel en worden beoordeeld op symmetrie en eenvoud van vormgeving. Vanuit architectonische overwegingen was er de sterke voorkeur per pijler cilinders van gelijke afmetingen toe te passen (figuur 3.3).

Bij pijlers met aan weerszijden gelijke schuiftypen is de symmetrie in het uiterlijk door de gelijke bewegingswerken van nature aanwezig; bij pijlers waar een overgang in schuiftypen plaatsvindt, treedt echter een asymmetrie op in het beeld. Voor de overgangspijlers is daarom gezocht naar opties om tot een verantwoorde vormgeving te komen. Dit probleem betreft 26 overgangspijlers (40% !) van de in totaal 65 pijlers. De onderzochte mogelijkheden zijn:



Figuur 3.3 Symmetrie uiterlijk cilinders en pijler

1. De 0-optie; asymmetrie van overgangspijler accepteren.
2. Constructie van pijler en cilinders afstemmen op de functie voor de schuif. De daaruit voortvloeiende asymmetrie van de overgangspijler met hulpconstructies uiterlijk zo aanpassen dat toch een symmetrisch beeld ontstaat.
3. Constructie van pijler en cilinders afstemmen op de functie voor de grootste van de belendende schuiven waarmee een symmetrische constructie ontstaat.

Ad 1.
Het accepteren van asymmetrie in de overgangspijlers is om visuele redenen niet wenselijk geacht.

Ad 2.
De afmetingen en aantallen van de benodigde hulpconstructies zouden groot zijn. Deze aan weer en wind blootgestelde onderdelen moeten stormcondities kunnen doorstaan en moeten bestand zijn tegen het agressieve zeemilieu. Het zijn relatief zware en, in aanschaf en onderhoud, dure ornamenten.

Ad 3.
Het totaal aantal cilinders blijft ongewijzigd, maar het aantal per type wijzigt wel. Om de gewenste symmetrie te bereiken moeten de overgangshamerstukken en installaties wat zwaarder uitgevoerd worden. Zes cilinders van het type 5900 vervallen en worden vervangen door twee van elk van de typen 8900, 9900 en 11900. Met de cilindertypen worden ook de hydraulische aggregaten aangepast en per pijler gelijk. De overige elementen van het bewegingswerk en de schuifgeleiding blijven afgestemd op het betreffende schuiftype.

Gekozen is, op grond van architectonische overwegingen, voor mogelijkheid 3. omdat de initiële kosten slechts beperkt hoger zijn dan die voor mogelijkheid 1. terwijl de onderhoudskosten niet relevant zullen verschillen. Mogelijkheid 2. zou naast hogere initiële kosten en kosten voor onderhoud hebben geleid tot een niet functionele vormgeving die mogelijk een beeld van namaak zou kunnen opleveren.

3.3.2 Hydraulisch versus mechanisch bewegingswerk

Van de overblijvende mogelijke lange-slag bewegingssystemen (zie hoofdstuk 1, figuren 1.7 en 1.8) zijn er twee uitgewerkt tot het niveau "basisontwerp", zodat een vergelijking qua prestatie en prijs mogelijk was. Voor beide systemen is door de hoofdaannemer ook een prijsaanbieding gemaakt. Het betrof een hydraulisch systeem gebaseerd op twee hydraulische lange-slag cilinders per schuif en een mechanisch bewegingswerk gebaseerd op twee tandheugels per schuif. Elke tandheugel werd daarbij bewogen door een aantal parallel aangedreven rondsels. Afhankelijk van de schuifgrootte kon het aantal rondsels per heugel variëren van 4 tot 8. In de besluitvorming rond de aandrijving van de schuiven heeft het mechanische bewegingswerk een zodanig belangrijke rol gespeeld, dat een beschrijving van het systeem in dit boek niet achterwege mag blijven, zie paragraaf 3.5.

Dat dit type mechanisch bewegingswerk, dat in vergelijking met traditionele uitvoering spectaculair is in uitvoering en dimensies, uiteindelijk niet is gekozen, had drie oorzaken:
1. Het bleek te leiden tot een duurdere aanbieding dan het hydraulische bewegingswerk.
2. Anders dan verwacht, bleek de faalkans in dezelfde orde van grootte te liggen als die van de hydraulische aandrijving. Dit was voornamelijk te wijten aan het enorme aantal lagers in de aandrijving, hoewel de faalkans van lagers laag is, bleek in dit geval door de grote aantallen toch een significante storingskans aanwezig.
3. Het bewaken van de bedrijfszekerheid van de aandrijving, door het signaleren van afwijkingen in de werking van de onderdelen, bleek moeilijker en kostbaarder dan die van de hydraulische aandrijving.

Bij de afweging tussen beide systemen is aandacht besteed aan de volgende aspecten:
- stand van het ontwerp en onzekerheden bij verdere uitwerking
- betrouwbaarheid, gebaseerd op een faalkansanalyse
- uitvoerbaarheid, gegeven de fabricagemogelijkheden in Europa
- te verwachten onderhoud en onderhoudskosten
- de haalbaarheid van de overall-planning van de kering
- bouwkosten
- esthetica

De keuze tussen de twee systemen was niet eenvoudig. Ten aanzien van veel aspecten scoorden ze ongeveer gelijk. Met name verrassend was dat de inschatting van de faalkans en van de te verwachten onderhoudskosten geen markante verschillen te zien gaf. Verwacht werd aanvankelijk dat een mechanisch bewegingswerk gunstiger zou uitvallen [6]. Uiteindelijk is gekozen voor het hydraulische systeem op grond van bouwkosten, esthetica en faalkans. De faalkans voor het hydraulische systeem is uiteindelijk gunstiger ingeschat dan voor het mechanische systeem, o.a. door de mogelijkheid van continue toestandsbewaking op afstand.

3.3.3 Wijze van montage

De bouwlocatie bevindt zich in stroomgeulen met een maritiem milieu. Om de montage zo veel mogelijk onafhankelijk van de weersomstandigheden te laten plaatsvinden is gekozen voor het beperken van de noodzakelijke verblijftijd van componenten op het water en in de open lucht. Dit is bereikt door het aantal te monteren componenten, en de noodzaak van het ter plekke pas maken en/of afstellen, tijdens montage te reduceren. Gekozen is voor het in de fabriek maken, assembleren en testen van grote delen. De volgende te monteren delen kunnen worden onderscheiden:

- cilinder met onderoog, cardanbalk en gelijkloopinstallatie
- hydrauliek-container met hydraulische eenheden
- oliereservoir voor hydraulische olie
- containers voor besturing (electro-container), trafo, werkplaats & kantoor, was- toilet- & schaftruimte, milieu-meetapparatuur, conditiebewaking en een meetopstelling voor waterloopkundig onderzoek.

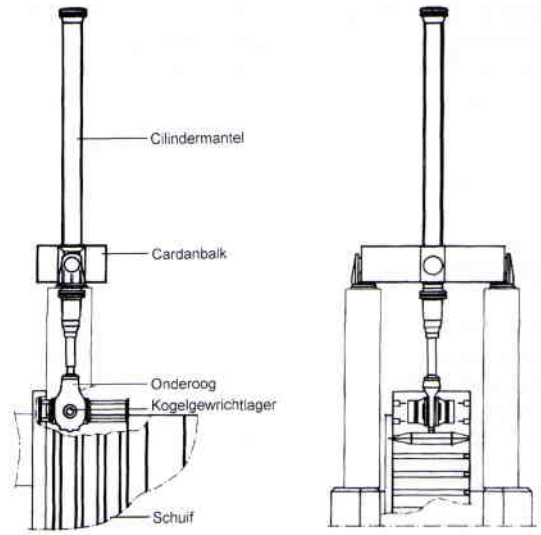
De definitieve locatie van de oliereservoirs en de containers is in de verkeerskokers. Aanvoer van deze grote componenten door de lange verkeerskoker op de kering zou moeilijk of onmogelijk zijn. Deze componenten zijn daarom op de bouwlocatie van de verkeerskokers te Kats reeds in de verkeerskoker-elementen aangebracht. De installaties zijn zo ontworpen dat een langdurige opstelling op een civiele bouwlocatie aan zee en een later functioneren in een weinig geconditioneerde verkeerskoker zonder problemen kunnen worden doorstaan. Verder zijn ook een aantal kleinere componenten geprefabriceerd, zoals:

- trappen en bordessen
- hydraulische leidingen en beugels voor de verbinding tussen de hydraulische pompunits in de verkeerskokers en de cilinders op de hamerstukken
- geleidingen voor kabels en contragewichten van de gelijkloopinstallatie
- kabelkokers voor de elektrische verbindingen tussen de verkeerskokers en de hamerstukken
- kasten met de conserveringsinstallaties voor de zuigerstangen, te monteren op de hamerstukken

De twee cilinders met cardanbalken van een pijler zijn met een drijvende bok in één keer op de betreffende pijler geplaatst. Bij de randpijlers werd telkens één cilinder met cardanbalk geplaatst. Het afmonteren op de hamerstukken en het bevestigen aan de schuiven kon daarna met relatief licht gereedschap en onafhankelijk van het getijde worden voltooid, zie ook hoofdstuk 5.

3.3.4 Toepassing cardanbalken

De cilinder is met lagers aan de bovenzijde aan de pijler en aan de onderzijde met een onderoog aan de schuif verbonden (figuur 3.4). De nauwkeurigheid van de uitlijning van de cilinders met de bevestigingspunten aan de pijler en aan de schuif is door de grote afmetingen en de aard van het werk vrij grof ten opzichte van de



Figuur 3.4 Scharnierende verbinding kogelgewrichtslager

afmetingen van een lager. Om de initiële afwijkingen en latere zettingen te kunnen accepteren moeten daarom kogelgewrichtslagers worden toegepast die in twee richtingen kunnen scharnieren.

Voor de verbinding tussen zuigerstang en schuif is dit opgelost door gebruik te maken van een kogelgewrichtslager. Voor de verbinding aan de bovenzijde was het ook mogelijk geweest de cilinder aan het cilinderdeksel op te hangen. Er is echter gekozen voor een zo kort mogelijke krachtweg van de schuif naar de pijler. Daarom vindt de krachtsoverdracht plaats van de cilindermantel naar de cardanbalken en van daar naar de pijler. De cardanbalken bevinden zich op ca. 1/3 van de hoogte van de cilindermantel. De pijlerhoogte en de kniklengte van de cilinder is hiermee verkort met ca. 2/3 van de lengte van de cilindermantel.

De cardanbalken zijn gelaste stalen frames die scharnierend aan de cilindermantel zijn bevestigd. De cardanbalken overspannen de schuifsponning en zijn met scharnierende lagerstoelen op de hamerstukken opgesteld. Doordat de draaiingsassen van de beide scharnierende verbindingen loodrecht op elkaar staan, zijn hoekverdraaiingen van de cilinders ten opzichte van de pijler in alle richtingen mogelijk.

3.3.5 Extra slag cilinders

Om in geopende stand te voldoen aan de functionele eisen van de kering is het voldoende als de onderrand van de schuif op een niveau N.A.P.+1,2 m wordt gepositioneerd. Op deze hoogte kan de schuif bij wat hogere waterstanden nog belast worden door golven. Onderhoud van de schuif vereist echter een droge werkplek, ook vanwege de veiligheid. Om tijdens onderhoud de kans op een droge schuif tot een aanvaardbaar peil te vergroten is gekozen de cilinders te verlengen om zo een onderhoudstand op N.A.P.+2,5 m (niveau onderrand schuif) te creëren. De slag van alle cilinders is daartoe vergroot met 1,30 m. Na ingebruikname van de kering is besloten dat de parkeerstand van de schuiven gelijk zou worden aan de onderhoudstand. Om deze reden worden de schuiven nu standaard tot ca 2,30 m geheven. De volle 2,50 m wordt niet benut om te voorkomen dat de zuiger steeds tegen het cilinderdeksel drukt. Bij uitzetten of krimpen van de oliekolom onder de zuiger ten gevolge van temperatuurvariaties, kan deze nu vrij omhoog of omlaag bewegen zonder oncontroleerbare krachten op het deksel uit te oefenen.

In de negentiger jaren is besloten de schuiven tijdens onderhoudswerkzaamheden nog eens 3,60 m hoger op te stellen. Dit kon alleen worden gerealiseerd door de bewegingswerken los te nemen van de hamerstukken en in hun geheel 3,60 m hoger op een tijdelijke ondersteuning te plaatsen. De schuiven blijven daarbij verbonden aan de zuigerstangen van de bewegingswerken, zie figuur 7.10 deelnota 3.

3.4 Stick-slip en dynamische analyse

In deelnota 2 "Hydraulisch onderzoek" is het onderzoek beschreven dat is uitgevoerd ter bepaling van de belastingen op schuiven en bewegingswerken. Dit onderzoek heeft deels plaatsgevonden in fysische modellen, deels ook was het mathematisch van aard. Tot deze laatste categorie behoort het onderzoek naar het dynamische gedrag van de schuiven bij het openen en sluiten van de kering.

Bij het bewegen van een schuif beweegt deze met zijn aanslagen over de geleidingen. Dit glijden gaat met wrijving gepaard. De wrijvingskracht wordt bepaald door de horizontale belasting op de schuif en de voorspanning van de schuif, en de wrijvingscoëfficiënt tussen aanslagen en geleidingen. De wrijving is altijd tegen de bewegingsrichting in gericht. De bewegingswerken zijn mede gedimensioneerd op het overwinnen van deze wrijvingskrachten.

De aanslagen zijn van kunststof (UHMPE) en de geleidingen van aluminiumbrons. UHMPE is gekozen vanwege zijn grote weerstand tegen slijtage in combinatie met een lage wrijvingscoëfficiënt. De wrijvingscoëfficiënt is niet constant. Niet alleen vertoont wrijving altijd al een behoorlijke spreiding, maar ook zijn er invloeden in de tijd, als gevolg van de oppervlaktetoestand van de glijdende delen en het al dan niet aanwezig zijn van aangroeiing. Daarnaast is er voor veel materialen een aanzienlijk verschil tussen het wrijvingsgedrag in stilstand en tijdens het bewegen. Zolang er nog geen sprake is van beweging, is de wrijvingscoëfficiënt groter dan tijdens bewegen (zie ook hoofdstuk 3.1 van deelnota 4 "Geleidingen"). Het is alsof de over elkaar glijdende delen even "losgetrokken" moeten worden. Zodra de beweging op gang is, daalt de wrijvingscoëfficiënt aanzienlijk. Fysisch geeft zo'n plotselinge verandering van eigenschappen in een verder elastisch systeem aanleiding tot trillingen en die treden dan ook op, met als gevolg een verschijnsel dat stick-slip wordt genoemd. Het systeem is elastisch, omdat zowel de schuif als de schuifophanging (de twee hydraulische cilinders) zich als veren gedragen.

Het hydraulisch bewegingswerk is erop gedimensioneerd krachten te leveren dan wel op te nemen, die afkomstig zijn uit de responsie van de schuif op de externe krachten:
- zwaartekracht
- wrijvingskrachten
- zuigkrachten / stromingskrachten
- golfbelasting

De bepaling van bovengenoemde responsie is geschied door middel van hydraulisch modelonderzoek, aangevuld met berekeningen. Hierbij is de combinatie schuif (met meebewegend water) en cilinders beschouwd als een massa-veersysteem met Coulombse wrijving (schuif tussen zijn geleidingen). Een en ander heeft geresulteerd in een aantal krachtdiagrammen, die bij verschillende wrijvingscoëfficiënten en voorspanningniveaus van de schuif tussen de geleidingen, voor de ontwerpbelasting (zowel karakteristiek als bij testen) de door de schuif gevraagde of geleverde krachten aangeven (zie als voorbeeld figuur 2.6).

Het bewegingswerk is op deze krachten gedimensioneerd en het hydraulisch werkingsschema houdt rekening met het optreden van dit krachtenverloop. Voor de sluitactie moet rekening worden gehouden met de mogelijkheid dat de richting van de krachten tijdens het bewegen omkeert. Daarom wordt tijdens het omlaag bewegen van de schuif gezorgd voor oliedruk aan beide zijden van de zuiger in de hydraulische cilinder. De zuiger is daardoor als het ware "ingespannen" tussen twee oliekolommen. Boven de zuiger wordt de oliedruk constant gehouden (75 bar), zodat belastingvariaties vanuit de schuif op de cilinder resulteren in een variërende druk onder de zuiger (aan stangzijde in de cilinder). Door deze ontwerpkeuze zal de schuif nooit onder invloed van golven vrij omhoog kunnen bewegen. Bij het openen overheerst de zwaartekracht en kan geen omkering van de krachtrichting optreden, zodat hierbij geen drukregeling is toegepast.

Als gevolg van de variërende uitwendige belasting op de schuif en het door de wrijving gegenereerde stick-slip-verschijnsel, is de beweging van de schuif niet eenparig. Door het Waterloopkundig Laboratorium zijn berekeningen uitgevoerd m.b.t. deze niet-eenparige beweging. Gewerkt is met een meervoudig massa-veersysteem met ingebouwde speling, waarbij de wrijvingscoëfficiënt als snelheidsafhankelijke variabele is ingevoerd. In het systeem waren verder meegenomen:
- de schuif met meebewegend water
- de eindkokerconstructie met demping en wrijving
- de hydraulische cilinders

In de berekeningen zijn, ten behoeve van de analyse van het dynamische gedrag van het bewegingswerk, in het bevestigingspunt van de schuif aan het bewegingswerk de kracht, verplaatsing, snelheid en versnelling bepaald als functie van de tijd. Er is, afhankelijk van de snelheid van verandering, gewerkt met een stapgrootte van 1 tot 10 milliseconde.

Dit door het WL berekende systeem hield geen rekening met het gedrag van de olie in de aansluitende leidingen. De gevonden resultaten zouden dus alleen juist zijn, indien het gedrag van de olie in de leidingen (en de rest van het systeem) verwaarloosd zou kunnen worden. Ook t.a.v. het gedrag van de olie in de cilinder werden aannamen gedaan die nader onderbouwd dienden te worden. Zo is voor de oliekolommen aangenomen dat ze zowel trek als druk zouden kunnen opnemen, hetgeen uitsluitend voor (zeer) kort durende verschijnselen bij benadering correct is.

De stick-slip berekeningen van het WL gaven aan dat de schuifbeweging een grote oneenparigheid vertoonde. Als gevolg daarvan is ook de beweging van de zuiger in de hydraulische cilinder sterk oneenparig, hetgeen resulteert in grote drukschommelingen in de cilinder; dit ondanks het gekozen systeem met voorspanning tijdens het sluiten. Bovendien was er bezorgdheid dat dergelijke drukvariaties de goede werking van de stuurcomponenten op de hydraulische cilinder ongunstig zouden kunnen beïnvloeden.
Het werd dan ook noodzakelijk geacht dit verschijnsel vooraf in een dynamische analyse, speciaal gericht op het hydraulische deel van de aandrijving, nader te onderzoeken.

Aan de TU Eindhoven, Laboratorium voor Aandrijftechniek, is aan de hand van vragen vanuit het ontwerp, een analyse uitgevoerd op basis waarvan voorspellingen van het gedrag van het hydraulische systeem mogelijk zijn. De gevraagde analyse is uitgevoerd langs twee verschillende wegen. Bij de ene is gebruik gemaakt van een benadering door middel van de Systeemleer en bij de andere van een benadering door middel van de Golftheorie. Beide wegen hebben geleid tot gelijke en onderling controleerbare antwoorden.

In beide benaderingen is gebruik gemaakt van een modelvorming volgens het model van figuur 40 van deelnota 2. Rekening is gehouden met de elasticiteit van de cilinderophanging, van de verbinding tussen schuif en cilinder, de schuif zelf en de olie in de cilinder, de demping van de schuif tussen de geleidingen en de demping van de schuif in het water, de bekende massa's van de verschillende onderdelen, de wrijving van de schuif tussen de geleidingen en de in het systeem aanwezige speling, met name ter plaatse van de draaipunten van de cilinder en de schuifophanging. In eerste instantie is de inwendige cilinderwrijving ter plaatse van de afdichtingen verwaarloosd. Later is deze in een fine tuning alsnog aangebracht. Er is een aantal simulatieruns uitgevoerd, waarbij de overstroomklep, de gestuurde terugslagklep en het stroomregelventiel op basis van leveranciersgegevens zijn gemodelleerd.

Het wrijvingsverloop bij de overgang van stilstand naar bewegen is gesimuleerd volgens figuur 41 van deelnota 2. In de simulatieruns is rekening gehouden met variaties in temperatuur, omdat deze het gedrag van de hydraulische olie beïnvloeden. Ook de compressibiliteit van de olie is in rekening gebracht. Daardoor lijkt de inhoud van de leidingen en de cilinder groter dan hij in werkelijkheid is (er kan bij hogere druk meer olie in).

De analyse heeft inzicht gegeven in het dynamisch gedrag van de cilinder en de componenten van het hydraulische systeem. De belangrijkste resultaten waren:

1. De drukvariaties boven en onder de zuiger t.g.v. stick slip van de schuif konden worden voorspeld (figuren 2.8 en 2.9). Extreme waarden treden niet op en bovendien hebben de kleppen en de zuigerafdichtingen nog een dempende invloed op de drukvariaties.
2. De zorg dat t.g.v. trillingen het veersysteem van de oliekolommen boven en onder de zuiger zou kunnen worden verbroken, is ongegrond: er blijft steeds een positieve druk bestaan, zodat de aanname over de veerstijfheid van de oliekolommen in de cilinders correct is geweest.
3. De drukvariaties in de toevoerleiding naar de cilinders bij sluiten volgen de drukvariaties in de cilinder, maar liggen alleen 1 á 2 bar hoger. De situatie is hiermee volledig beheersbaar.
4. Opslingeringseffecten doordat de gestuurde terugslagklep t.g.v. drukvariaties boven de zuiger bij sluiten gaat staan klapperen, treden niet op. Het drukniveau blijft steeds zo hoog, dat de klep tijdens dalen van de schuif altijd geopend zal blijven. De drukvariaties zijn zo gering dat mag worden aangenomen dat de dynamische karakteristiek van de gestuurde terugslagklep geen grote afwijkingen van de statische karakteristiek vertoont.
5. Bij de start van het bewegen heeft de schuif, t.g.v. een mogelijk langdurige stilstand, tijdelijk een te lage sluitsnelheid. Als dit inschakelverschijnsel even later uitgedempt is, dan wordt de nominale daalsnelheid bereikt. Er treedt geen significante vergroting van de sluitingstijd op door dit inschakelverschijnsel.
6. De drukvariaties in de cilinder boven de zuiger zijn nagenoeg onverminderd en zonder faseverschil terug te vinden t.p.v. de pomp. Een onderlinge beïnvloeding van cilinder en aggregaat zal daarmee onvermijdelijk zijn. Voor het optreden van drukgolven in het systeem, waardoor andere regelorganen hierop gaan reageren, hoeft evenwel niet gevreesd te worden.
7. Het systeem is in zijn werking niet gevoelig voor hoge of lage temperaturen. Temperatuurvariaties in geheven stand worden opgevangen door drukvariaties in de cilinder. In het meest extreme geval beweegt de zuiger en daarmee de schuif over kleine afstanden (orde 10 cm) mee. Omdat de zuiger nooit tegen het deksel wordt aangebracht in geheel geheven positie, zijn er verder geen consequenties.
8. De resultaten van de simulaties geven geen aanleiding te besluiten tot toepassing van een accumulator om het dynamische gedrag gunstig te beïnvloeden. De toepassing van accumulatoren blijft dus beperkt tot het op druk houden van de oliekolom boven de zuiger, wanneer de schuif tijdens sluiten wordt gestopt of wanneer de schuif op de onderaanslag gedrukt moet blijven.
9. Ondanks het feit dat de simulaties gestart zijn met een stapfunctie in de olieafvoer, treden geen instabiliteitverschijnselen of overmatige drukpieken op. De belangrijkste drukpiek wordt veroorzaakt door het voor de eerste maal "losschieten" van de schuif. De wijze van olieafvoer lijkt hierdoor niet kritisch. Het blijft echter aanbevelenswaardig de olieafvoer geleidelijk te openen. Dit is in het systeem gerealiseerd door een demping in het openen en sluiten van de hoofdschuif in te bouwen.

Op basis van de uitgevoerde dynamische analyse is geconcludeerd dat het systeem, mede door de grote afmetingen, in zijn werking niet wordt beïnvloed door stick-slipverschijnselen.

3.5 *Het mechanisch bewegingswerk*

Zoals gemeld in paragraaf 3.3.2 heeft het mechanische bewegingswerk in de besluitvorming rond de aandrijving van de schuiven een zodanig belangrijke rol gespeeld, dat het zinvol is een beknopte beschrijving van het systeem in dit boek op te nemen. Het ontwerp van het mechanisch bewegingswerk is niet gerealiseerd.

3.5.1 Ontwerp mechanisch bewegingswerk

Bij de mechanische schuifaandrijving is de hydraulische cilinder aan elk schuifuiteinde vervangen door een tandheugel die met meerdere rondsels wordt aangedreven. De toepassing van één rondsel per tandheugel is gebruikelijk en aandrijvingen met twee rondsels per tandheugel komen in incidentele gevallen voor. De maximale heugelkrachten overschrijden in het algemeen de 400 kN niet. Voor het aandrijven van de hoogste schuiven moet een heugelkracht van 6750 kN kunnen worden uitgeoefend. Daarom kan niet meer worden volstaan met aandrijvingen met 2 rondsels, maar is overgegaan op 8 rondsels per heugelstang voor de hoogste schuiven en 5 rondsels per heugelstang voor de laagste schuiven. Mechanische bewegingswerken met aandrijvingen met grotere aantallen rondsels komen voor bij offshore platforms, waar ze worden gebruikt voor het in hoogte verstellen van het platform ten opzichte van de onderbouw. Het betreft dan grove aandrijvingen die slechts een beperkt aantal malen in hun levensduur worden gebruikt en waarbij geen bijzondere eisen aan de faalkans en gebruiksomstandigheden gesteld worden.

Bij het aandrijven van een heugelstang door meerdere rondsels moet gezorgd worden voor een goede belastingverdeling, zodanig dat elk rondsel een gelijke bijdrage levert aan de totale heugelkracht. Over het algemeen wordt dat gedaan door de rondsels individueel via hydromotoren aan te drijven en de hydromotoren zelf met gelijke hydraulische druk te voeden. Afgezien van verschillen in inwendige weerstand in de afzonderlijke aandrijvingen, zijn aandrijvingen met hydromotoren goed in staat een gelijke belastingverdeling over alle aandrijvende elementen (rondsels) te realiseren.

Bij de mechanische aandrijving van de schuiven van de Oosterscheldekering is een andere weg bewandeld. Vanuit een centrale aandrijfunit, opgebouwd uit twee elektromotoren die zo nodig elkaars reserve zijn, gaan horizontale, elastisch gekoppelde assen

naar haakse tandwielkasten, van waaruit (via lastdrukremmen) cardan-assen naar de individuele rondselaandrijvingen lopen. De lastdrukremmen zijn automatisch gelicht als de rondsels vanuit de centrale aandrijving worden aangedreven. Wordt koppel uit de rondsels teruggeleverd, dan slaan de remmen aan en wordt geremd.

De belastingverdeling over de verschillende rondsels komt als volgt tot stand. Op elke rondselas zit een individuele reductiekast opgestoken. Via de cardan-assen worden alle reductiekasten met hetzelfde toerental aangedreven. Vanwege de benodigde ruimte is de heugelstang voorzien van twee tandheugels die diametraal op de kokervormige heugelstang zijn bevestigd. Alle rondsels die met de twee tandheugels op een heugelstang in ingrijping zijn, draaien even snel. Het meedraaien van de opgestoken tandwielkasten bij het doorleiden van het aandrijfkoppel wordt verhinderd door een veerpakket. De veerpakketten moeten gelijke karakteristieken hebben en worden eenmalig afgesteld op het doorleiden van gelijke aandrijfkoppels. Steekafwijkingen in de vertandingen van de tandheugels leiden tot variaties in de tandkrachten van de verschillende rondsels. Door de steekafwijkingen te tolereren op +/- 0,5 mm blijven de resulterende rimpelkrachten in de tanden van de rondsels beperkt tot +/- 60 kN. De geijkte veerpakketten worden voorzien van een aflezing voor de veerindrukking, waarmee een eenvoudige controle van de goede werking tijdens bedrijf mogelijk is. De rondsels zijn gedimensioneerd op een maximale tandkracht van 1000 kN. Zo'n tandkracht zou nodig zijn als één van de 5 tot 8 rondselaandrijvingen zou weigeren en de andere aandrijvingen de aandrijftaak van dat rondsel moeten overnemen.

Daar de individuele rondselaandrijvingen onderling wat verschillend kunnen bewegen, zijn in de cardan-assen schuifkoppelingen opgenomen. Individuele lengteveranderingen van de cardan-assen zijn daardoor zonder consequenties voor het door te leiden koppel op te nemen. Elk rondsel moet individueel ten opzichte van de tandheugel afgesteld kunnen worden, omdat het ondoenlijk is de heugelstang met de twee tandheugels binnen de nauwe tolerantiegrenzen te vervaardigen die een goede draagkrachtverdeling van de rondseltanden op de heugeltanden vereist. De lagerpotten van de rondsellagering zijn daarom instelbaar gemaakt. De rondsels kunnen daardoor zodanig worden afgesteld, dat de tanden over de volle breedte dragen.

De toerenreductie van de individuele aandrijvingen bedraagt ongeveer 2600. Een aanzienlijk deel daarvan wordt in een drietal overbrengingstrappen via open tandwielaandrijvingen tot stand gebracht. Het onderbrengen van deze reductie in geheel gesloten oliegesmeerde tandwielkasten zou het geheel wezenlijk duurder maken.

3.5.2 Samenstelling mechanisch bewegingswerk

Elke aandrijfunit van het mechanisch bewegingswerk wordt samengesteld uit de volgende onderdelen:

- heugelstang met tweezijdige vertanding, door middel van een kogelgewrichtslager aan de schuif bevestigd
- vijf tot acht rondsels (afhankelijk schuifgrootte) verdeeld over de beide vertandingen van de heugelstang
- een tandwielreductie voor elk rondsel, deels bestaande uit open overbrengingen, deels ondergebracht in gesloten tandwielkasten
- een aandrijving van de tandwielkasten die centraal vanuit twee elektromotoren en via tandwielkasten en drijfassen wordt uitgevoerd
- een staalconstructie waarin de rondsels, open overbrengingen en de geleidingen van de heugelstang zijn opgenomen; hiertoe behoort tevens de complete behuizing voor het bewegingswerk en een beschermkoker voor de heugelstang

Elke heugelstang bestaat voor het bovenste gedeelte uit een gelaste kokervormige constructie en is aan twee zijden voorzien van tandheugels met rechte tanden. De lengte van dit gedeelte wordt bepaald door de hefhoogte van de schuif en het aantal rondsels. Over dit gedeelte wordt de heugelstang in de staalconstructie geleid over glijvlakken van brons, maximale vlaktedruk 5 N/mm^2. Elke heugelstang is voorzien van een verlengstuk dat stijf is in een richting evenwijdig aan de as van de kering, en slap in de vervalrichting teneinde schuifverplaatsingen onder vervalbelasting te kunnen volgen.

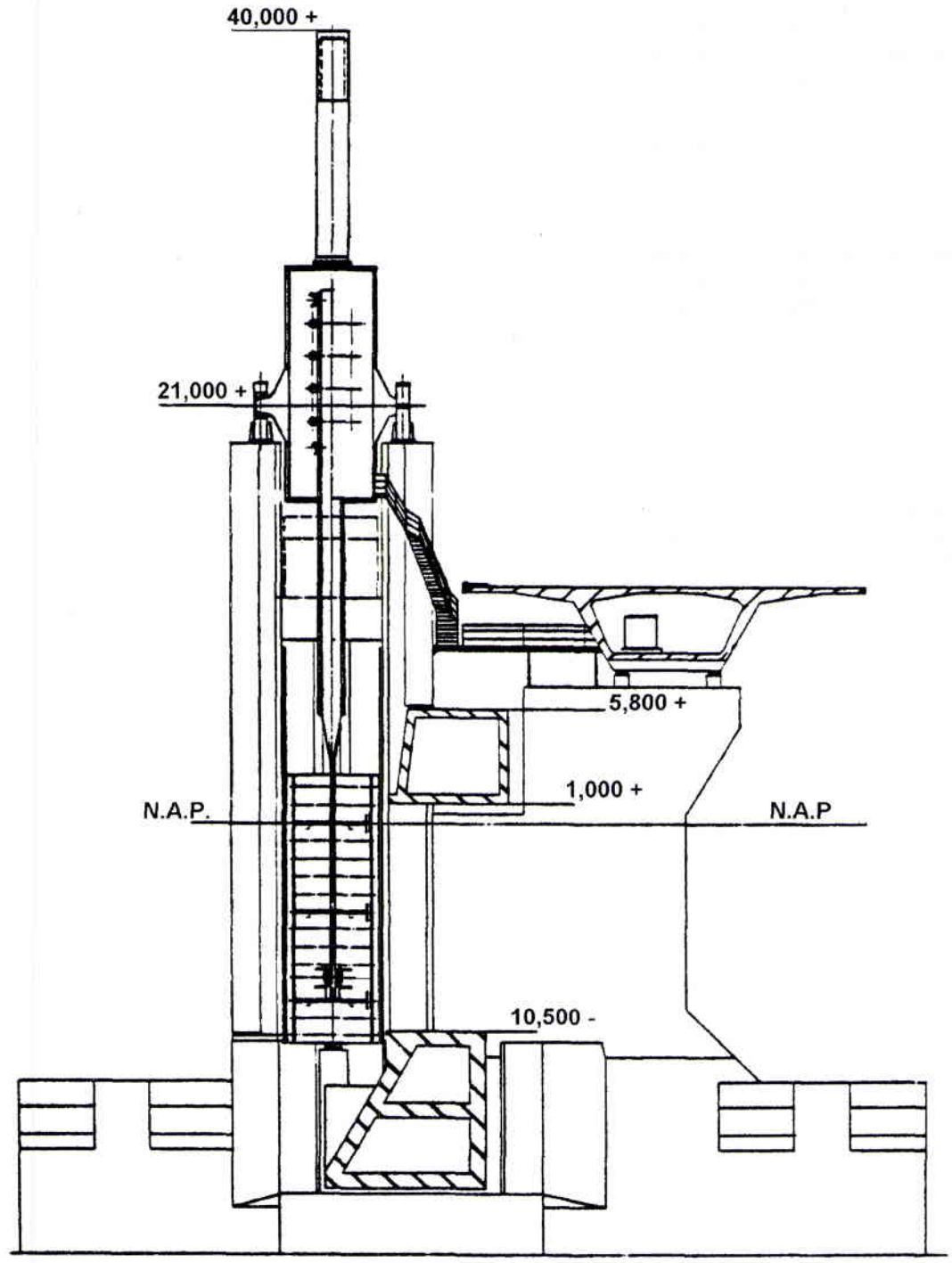
Per heugel zijn vijf tot acht rondsels met de tandheugels in aangrijping. De smeedstalen rondsels vormen één geheel met de rondselassen. Elke rondselas draait in twee gegoten lagerpotten, voorzien van tonlagers. De lagerpotten zijn enigszins excentrisch uitgevoerd teneinde de rondseltanden evenwijdig aan de heugeltanden te kunnen instellen.

Eén aseinde van elke rondselas is verlengd en draagt het wiel van de laatste open reductie; tevens is op deze as door middel van tonlagers de opsteekkast met de open overbrengingen draaibaar bevestigd. Deze opsteekkast is een gelaste staalconstructie waarvan het uiteinde met instelbare veerpakketten tegen meedraaien wordt geborgd en die voor het opvangen van vet en het weren van stof is voorzien van een plaatstalen omkasting. Om de instelling van de veerpakketten te kunnen aflezen zijn ze voorzien van een schaalverdeling en een standaanwijzer.

De smering van de heugelstanggeleidingen, tandwielen en rondsels geschiedt met een centraal opgesteld vetsmeerapparaat. De smering van alle lagers in de kast geschiedt via vetsmeerleidingen waarvan de smeernippels op één punt zijn samengebracht. Op de snelst draaiende as van de opsteekkast is via een flexibele koppeling een geheel gesloten, oliegesmeerde tandwielkast met dubbele haakse overbrenging en een reductie aangesloten. De ingaande as van deze tandwielkast is via een kruiskoppeling en lengtecompensator aangesloten op de verticale as van de centrale aandrijving.

De centrale aandrijvingen staan opgesteld in de laagste ruimten van de behuizingen en drijven de rondsels aan van één heugelstang. Samen met de verbindingsassen bestaat een unit uit de volgende onderdelen:

- Twee gekoppelde elektromotoren (sleepringanker ten behoeve van vorming elektrische as tussen de aandrijfunits van één schuif); het vermogen van de elektromotoren wordt bepaald door het aantal rondsels.
- Een verbindingsas tussen de beide motoren. Deze as is voorzien van twee flexibele koppelingen, een direct werkende blokkenrem die slechts in één richting werkt en twee lagerstoelen.
- Twee tandwielkasten aan weerszijden van de gekoppelde motoren; de ingaande as verlengd uitgevoerd en voorzien van een slingervierkant. De verbinding met de elektromotoren door middel van flexibele koppelingen. Twee tandwielkasten t.b.v. de bovenste horizontale koppelas.
- Vijf tot acht verticale verbindingsassen die de schakel vormen tussen de tandwielkasten van de centrale aandrijving en de tandwielkasten van de individuele heugelrondsel-aandrijvingen. Deze verticale verbindingsassen zijn samengesteld uit flensverbindingen, kruiskoppelingen, lengte-compensatoren en pijpstukken (de zgn. 'auto-assen').
- Drie verbindingsassen t.b.v. het aan de bovenzijde koppelen



Figuur 3.5 Mechanisch bewegingswerk

van de verticale assen. Deze auto-assen zijn lichter dan de voorgaande. Ze hebben tot taak bij uitval van één van de rondselaandrijvingen een deel van het ter compensatie benodigde koppel vanaf de andere zijde van de heugelstang toe te voeren.

- Twee lastdrukremmen, die bediend worden via de verplaatsingen van de onderste auto-assen; de lastdrukremmen zijn voorzien van een koelinstallatie, in hoofdzaak bestaande uit een radiator en een ventilator.
- Twee voorzieningen voor het bepalen van de schuifposities over de volle slaglengten.
- Voorzieningen voor het aanbrengen van schakelaars voor de signalering van de eindstanden en de beheersing van de krachten.

Uitgezonderd het aantal auto-assen, de vermogens van de motoren en de linkse en rechtse uitvoering, zijn de aandrijvingen van alle schuiven identiek.

De behuizing van het complete machinewerk is een geheel gelaste staalconstructie, opgebouwd uit een draagframe voor de rondselassen en een volledige buitenbeplating. De behuizing bevat de toegangsdeuren, hijsluiken, hijsbalken boven alle belangrijke machinedelen, vloeren en bordessen, ladders en trappen. De behuizing is voorzien van een luchtdroog- en ventilatie installatie. Het onderste gedeelte van de behuizing biedt naast de elektrische aandrijving ook plaats aan de apparatenkasten van de elektrische

installatie. Ter bescherming van de heugelstangen in geheven positie is de behuizing voorzien van een geheel gesloten koker, die bovenop de behuizing wordt bevestigd. Bovenop de behuizing zijn rails aangebracht waarop een gevelwerker kan rijden t.b.v. van onderhoud.

Aan de behuizing zijn draagarmen bevestigd, waarmee het geheel scharnierend op stoelen op de hamerstukken kan worden bevestigd. De stoelen bevatten rubberen oplegblokken, de onderstoel is in het beton ingestort en met voorspananker bevestigd. Teneinde de rubberblokken te kunnen verwisselen zijn voorzieningen aangebracht om de draagarmen van de behuizing ca. 20 cm te kunnen opvijzelen. In de rubberblokken is een hoekverdraaiing van ca 3% mogelijk. De bovenkappen van de stoelen zijn met ankers op de onderstoelen voorgespannen.

Voor het gelijklopen van de twee machinewerken van een schuif is op elk machinewerk een gelijkloopinstallatie aangesloten, waarmee de stand van de schuif kan worden gesignaleerd en gecorrigeerd. De begrenzing van de schuif in haar bovenste eindstand geschiedt door eindschakelaars op de heugel in combinatie met de gelijkloopinstallatie. De onderste eindstand, waarbij de schuif op de onderaanslag moet worden gedrukt, wordt gesignaleerd door eindschakelaars op de veerpakketten van de opgestoken individuele rondselaandrijvingen in combinatie met eindschakelaars op de heugelstang. De gelijkloopinstallatie bestaat uit een drievoudig uitgevoerde codewalsset, aangedreven door het centrale machinewerk.

Dat dit type mechanisch bewegingswerk, dat in vergelijking met traditionele uitvoering spectaculair is in uitvoering en dimensies, uiteindelijk niet is gekozen, had drie oorzaken:

1. Het bleek te leiden tot een duurdere aanbieding dan het hydraulische bewegingswerk. Met name de fabricage van de heugelstang werd vanwege de grote afmetingen en geëiste nauwkeurigheden problematisch geacht.
2. Anders dan verwacht, bleek de faalkans in dezelfde orde van grootte te liggen als die van de hydraulische aandrijving. Dit was voornamelijk te wijten aan het enorme aantal lagers in de aandrijving, hoewel de faalkans van lagers laag is, bleek in dit geval door de grote aantallen toch een significante storingskans aanwezig.
3. Het bewaken van de bedrijfszekerheid van de aandrijving, door het signaleren van afwijkingen in de werking van de onderdelen, bleek moeilijker en kostbaarder dan bij de hydraulische aandrijving.

4. Beschrijving onderdelen

In de bewegingswerken kunnen de hoofdonderdelen onderscheiden worden zoals aangegeven in figuur 3.1. De bewegingswerken bestaan uit de mechanische onderdelen die zich tussen de schuif en de hamerstukken van de pijler bevinden, en de hydraulische voorzieningen op de pijler en in de verkeerskoker. Bij de navolgende beschrijving van de onderdelen van het bewegingswerk zijn ook de secundaire voorzieningen als trappen/bordessen, gelijkloopinstallatie en bliksembeveiliging meegenomen. Voor een beschrijving van het elektrisch systeem en de besturing wordt verwezen naar deelnota 6.

De navolgende hoofdstukken bevatten naast de functionele beschrijving van de hoofdonderdelen ook die zaken die van specifiek belang geweest zijn bij het ontwerp, alsmede uitvoeringstechnische overwegingen.

4.1 Cilinder

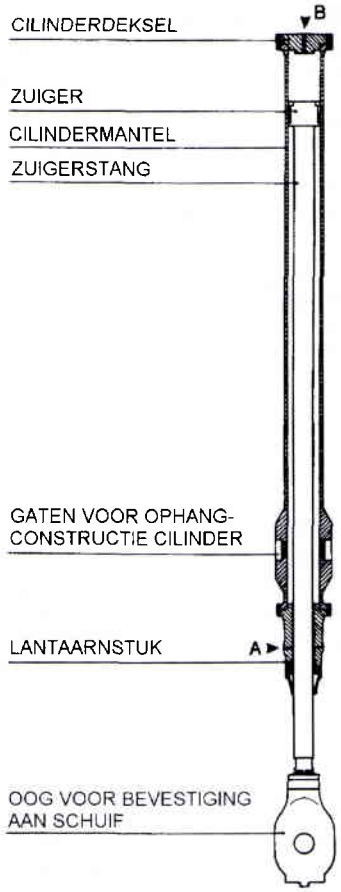
De cilinders van de Oosterscheldekering zijn opgebouwd uit de volgende onderdelen:
- Cilindermantel en cilinderdeksel
- Lantaarnstuk
- Zuiger en zuigerstang
- Onderoog
- Afdichtingen

4.1.1 Cilindermantel en cilinderdeksel

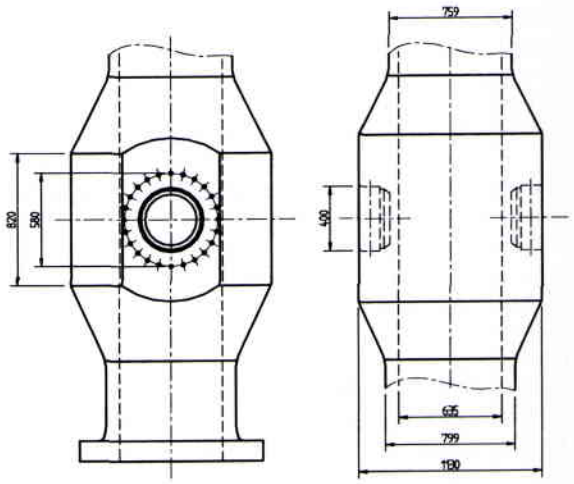
De cilindermantel is een grote buis die inwendig nauwkeurig is bewerkt ten behoeve van de geleiding en afdichting van de zuiger, met flenzen aan de uiteinden voor de bevestiging van een cilinderdeksel en een lantaarnstuk. De keuze van de cardanische ophanging van de cilinder met een laaggelegen scharnierpunt maakte de introductie van een cardanstuk in de cilindermantel op 1/3 van de hoogte zinvol (figuur 4.2).

De constructiewijze met een cardanstuk leidt tot aanzienlijk kleinere momenten in de cilinderwand dan bij toepassing van aan de cilindermantel bevestigde tappen. Beide constructievormen zijn onderzocht, waarbij de uitvoering met tappen uiteindelijk om constructieve redenen is verworpen.

Voor het materiaal van de cilindermantel bestond er de mogelijkheid van een uitvoering in gietstaal of in smeedstaal. Onderzocht is de mogelijkheid om de cilindermantel samen te stellen uit centrifugaal gegoten stalen pijpdelen. Voordeel van de gietmethode is dat de tappen aan de cilindermantel meteen in de cilindermantel kunnen worden meegegoten. Toen van een constructie met tappen werd afgezien verviel daarmee het belangrijkste voordeel van een gegoten cilinder. Nadeel van de toepassing van gietstaal is dat de uitvoering nog stéeds het samenbouwen van onderdelen bevat. Het leggen van betrouwbare rondnaadverbindingen tussen de



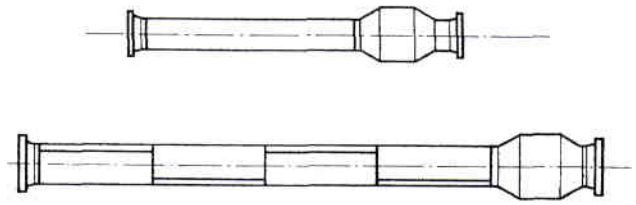
Figuur 4.1 Onderdelen cilinder



Figuur 4.2 Cardanstuk

samenstellende gegoten delen werd als bezwaarlijk ervaren. Ook bestond twijfel over de mogelijkheid over de vereiste grote lengte een foutloos fijn bewerkt inwendig oppervlak (ruwheid 0,3 à 0,4 μm Ra) van het gietstaal te realiseren. Omdat er daarnaast geen grote kostenvoordelen aan gietstaal verbonden waren, is gekozen voor een uitvoering van de cilindermantel in gewalst staal.

De keuze van gewalst staal voor de cilindermantel en het cardanstuk leidt tot een evenwichtig ontwerp. Er is gestreefd het inwendig te bewerken cilindrische gedeelte zo kort mogelijk te houden. Om die reden is er ook voor een apart lantaarnstuk gekozen (zie 4.1.2) als drager van de stanggeleiding en de stangafdichtingen. Uitgangspunt voor de cilindermantels was de toepassing van een dikwandige pijp (St.52.3) in zo groot mogelijke lengten, teneinde het aantal lasnaadverbindingen tussen de pijpdelen te beperken. Na overleg met leveranciers bleken de leverbare pijplengten zó groot, dat de 2 kleinste typen cilinders zelfs uit één pijplengte zouden kunnen worden vervaardigd (figuur 4.3). Voor de grotere typen waren meer stukken nodig en voor de grootste typen bleken geen geschikte pijpen in de leveringsprogramma's aanwezig.

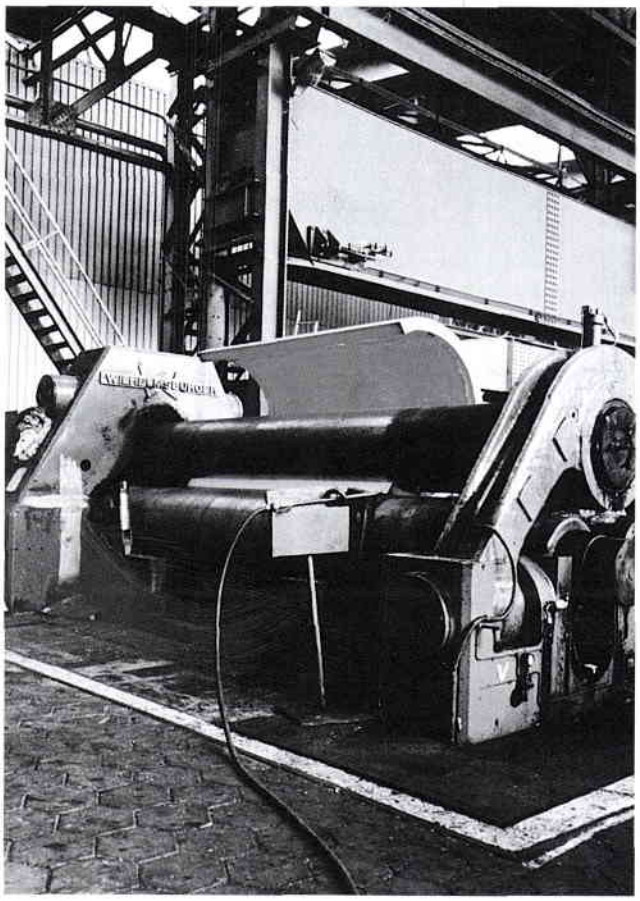


Figuur 4.3 Onderdelen cilindermantels

Door de fabrikant van de cilindermantels is er, op basis van zijn ervaring, voor gepleit om een constructiewijze toe te passen waarbij rompdelen van de cilindermantels zouden worden vervaardigd door het rondwalsen van dikwandige plaat, waarna de langsnaad door een elektroslakverbinding zou worden gesloten. Op basis van enige proeven is uiteindelijk voor dit systeem gekozen. Aandachtspunten bij deze constructiewijze zijn de langsnaad, de diameter-/wanddikte relatie bij het walsen en de rondnaden, waarvan het aantal relatief groot is vanwege beperkingen in de te walsen plaatbreedten. Toen de keuze eenmaal op het rondwals- en elektroslakprocédé was bepaald, is besloten rompdelen voor de 5 grootste cilindertypen volgens dit procédé te vervaardigen.

In kort bestek kan de fabricage en de beproeving van de cilindermantels als volgt worden beschreven:

- Het uitgangsmateriaal bestaat uit gewalste plaat Fe510D van voldoende dikte.
- De plaat wordt opgewarmd in een gasoven tot walstemperatuur.
- De plaat wordt uit de oven via een rollenbaan naar de wals getransporteerd. De maximale te walsen plaatbreedte was 3400 mm.
- De plaat wordt dan voorgebogen langs de toekomstige axiale naad. Daarbij blijft de aanbuiglengte als ongebogen stuk over.
- De aanbuiglengte wordt afgesneden; de ontwikkelde lengte van de cilinder is daarbij zo bepaald, dat bij de laatste walsdoorgang de plaateinden juist tegen elkaar zullen komen.
- De plaat wordt opnieuw opgewarmd en vervolgens gewalst tot cilindervorm (figuur 4.4).
- Er is nu een cilindrisch rompdeel met een langsnaad tot stand gebracht. Deze naad is gelast met het elektroslakprocédé. Dit is een soort gietproces, waarvoor dus een bekisting nodig is, alsmede een uitloop.Ter plaatse van de uiteinden van de naad zijn een proefplaat en een uitloop voor het lasproces aan het rompdeel gelast; deze zijn bij de verdere bewerking van de rompdelen weer verwijderd. De proefplaat is gebruikt voor de latere controle van het lasproces.
- Het elektroslaklassen is in verticale positie uitgevoerd.
- Als gevolg van dit proces is in de laszone een grove korrelstructuur aanwezig. Deze is verfijnd door normaliserend gloeien, gevolgd door afschrikken in olie (figuur 4.5). Bij afschrikken in water zou de temperatuur van de cilindermantel te snel dalen en het materiaal te hard worden.
- De rompdelen werden vervolgens in- en uitwendig voorbewerkt en voorzien van laskanten voor het leggen van de rondnaden.
- De langsnaad van de rompdelen is ultrasoon onderzocht op lasfouten. Slechts een hoogst enkele keer is een indicatie gevonden die herstel nodig maakte.
- De rompdelen zijn opgesteld op een rollenbank en de rondnaden tussen twee rompdelen zijn onder poederdek met zeer nauwe U-vorm gelast. Deze naad heeft een geringe lasinhoud teneinde eventuele vervormingen tijdens het lassen zo klein mogelijk te houden. Er was geen tegenlas nodig, omdat later bij de mechanische bewerking nog een aanzienlijke materiaaldikte werd verwijderd, waarbij eventuele onvolledig doorgelaste plekken eveneens werden verwijderd.
- Op dezelfde manier zijn het cardanstuk en de dekselflens aan de cilindermantel gelast.
- De compleet afgelaste cilindermantels zijn spanningsarm gegloeid en afgekoeld in een grote oven, waarbij aandacht is besteed aan de juiste ondersteuning van de cilinders.
- De gelegde lassen zijn 100 % ultrasoon en 10 % radiografisch onderzocht.



Figuur 4.4 Rondwalsen plaat tot pijpstuk



Figuur 4.5 Afschrikken in olie

Het cardanstuk van de cilindermantel is een apart vervaardigd smeedstuk, materiaal Fe510D. Het is extra robuust gemaakt om de kogelgewrichtslagers voor de bevestiging aan de cardanbalk te kunnen dragen. De gekozen constructie is voor de belasting van de cilinderwand gunstig omdat voornamelijk krachten in langsrichting van de cilinder en slechts kleine momenten in de wand worden geïntroduceerd. Een constructie met tappen, bevestigd aan de cilindermantel zou aanzienlijk grotere momenten in de wand veroorzaakt hebben.

Het was de bedoeling dat de verjonging tussen het verdikte cardanstukgedeelte en de onderflens voor de bevestiging van het lantaarnstuk door uitsmeden op een zadel zou worden gevormd. Dit is gunstig voor de materiaalstructuur. Het gedeelte is relatief hoog belast omdat een groot moment moet kunnen worden doorgeleid. De verjonging is echter tot stand gekomen door materiaal op de draaibank te verwijderen. De al enigszins uitgesmede materiaalstructuur is op deze wijze doorbroken. Deze wijze van bewerken en het hoge door te voeren moment leiden ertoe dat de lokale wanddikte groter moet zijn dan de wanddikte van het cilindergedeelte (zie verschil in buitendiameter, bij gelijke boring, in figuur 4.2).

De bovenflens van de cilindermantel is vervaardigd uit smeedstaal Fe 510D en is voorbewerkt geleverd. Het wanddikteverloop tussen flens en cilinderdeel is voldoende voor een goede introductie van de momenten uit de dekselbevestiging naar het cilindrische deel.

Na het samenstellen en het niet-destructief onderzoek van de cilindermantel kon het bewerken worden gestart. De bewerkingen zijn, gebruikmakend van verschillende hulpgereedschappen op één bank uitgevoerd. De bewerking van de cilinderboring is het belangrijkst. In grote lijnen zijn de volgende drie bewerkingsstappen uitgevoerd:

- diepboren, max. 2,5 mm per snede wordt weggenomen
- schillen, max. 1 mm per snede wordt weggenomen
- honen

De eisen die gesteld zijn aan de inwendige bewerking zijn:

1. Afwijking rechtheid 0,6 mm over de hele lengte
2. Afwijking rechtheid 0,03 mm per 500 mm
3. Tolerantie op de diameter H8 (bijvoorbeeld D = 830 H8 (0/+ 0,140) mm voor de grootste cilinders)
4. De ruwheidseis van het gehoonde oppervlak 0,4 μm Ra, gemeten op meetlengte 8 mm

Ad 1. en 2.
Deze rechtheidseisen zijn gebruikelijk voor cilinders. Voor de zeer grote cilinders van de Oosterscheldekering zijn deze eisen overeengekomen in overleg met de fabrikant.

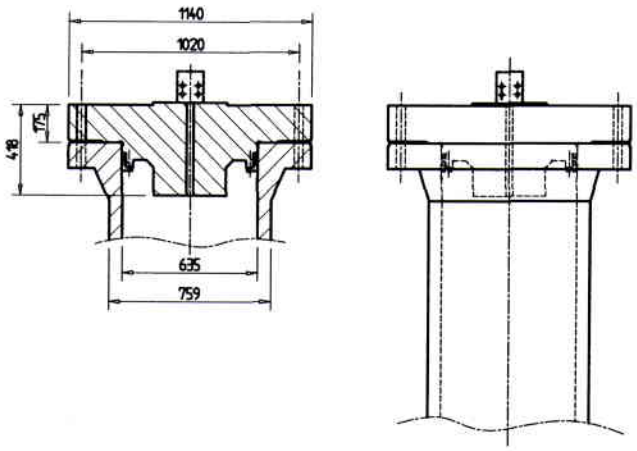
Ad 4.
Deze ruwheid is zodanig gekozen, dat slijtage van de hogedrukafdichtingen wordt voorkomen, terwijl toch wat olie wordt vastgehouden t.b.v. smering van de afdichtingen. Doel daarvan is het voorkomen van stick-slip van de afdichtingen.

De bewerking van de buitenzijde van de cilindermantel moet qua maatvoering gezien worden in relatie met de boring. Doel is dat buitenkant en boring zodanig concentrisch zijn dat de minimum benodigde wanddikte nergens wordt onderschreden. Daartoe is de buitenkant eerst op een aantal plaatsen rondom gladgedraaid, zodat hier de brilondersteuningen op konden lopen. De boring is vervolgens concentrisch met deze ringen aangebracht. De eindbewerking van de buitenkant van de cilinder dient in principe slechts om te voorkomen dat ter plaatse van de lasnaden sprongsgewijze wanddikteveranderingen optreden. Een ruwe snede (500 μm RA) is dan ook acceptabel. Door het regelmatige patroon speelt de kerfwerking van de naast elkaar gelegen sneden een ondergeschikte rol. Bij de bewerking van de cilindermantel zijn meteen de flenzen op maat gemaakt.

De belangrijkste maten van de cilindermantel zijn de binnendiameter en de wanddikte. Hierbij spelen de maximaal toelaatbare spanningen bij het opnemen van de oliedrukken een ondergeschikte rol ten opzichte van de vervormingen. Met name de diametervergroting als gevolg van oliedrukken is de bepalende factor in het gedrag van de zuigerafdichtingen. Op basis van overleg met potentiële leveranciers van afdichtingen zijn de diametervergrotingen van de cilindermantel die door de zuigerafdichtingen nog betrouwbaar kunnen worden opgenomen, uitgangspunt geweest voor de wanddiktebepaling. Als criterium is aangehouden dat de door de zuigerafdichting te overbruggen spleet, rekening houdend met de maximale werkdruk (220 bar), éénzijdig aanliggen van de zuiger tegen de cilindermantel en de te verwachten scheefstelling van de zuiger bij doorbuiging van de stang samen met de aanwezige tolerantie, niet groter is dan ca. 1 mm. De wanddikte heeft een corrosietoeslag van 2 mm.

Het cilinderdeksel sluit de cilinders aan de bovenzijde af. Het deksel draagt daartoe een statische pakkingset van het type dakmanchet, waarmee een goede afdichting van de cilindermantel wordt bereikt. De manchetten zijn voorgespannen met behulp van een

ring waarvan de bevestiging zich aan de onderzijde van het deksel bevindt, zodat het voorspannen hiervan moet geschieden vóór de montage van het deksel op de flens van de cilindermantel. De maatvoering van de afdichtingen is aangepast aan de ruimere cilinderdiameter ter plaatse van deze sets. Het cilinderdeksel is voorzien van mogelijkheden tot ontluchten van de cilinder in verticale stand. Bovendien bevat het deksel een aansluiting voor de toe- en afvoer van hydraulische olie naar de dekselzijde van de cilinder. Deze olie wordt toegevoerd via een dikwandige hogedrukleiding die met klembanden aan de cilinder is bevestigd. De onderzijde van het deksel, dat in de cilinder steekt, is zodanig gedimensioneerd en getolereerd dat, als de zuiger incidenteel met volle kracht tegen het deksel drukt, de kracht centrisch wordt ingeleid.



Figuur 4.6 Cilinderdeksel en afdichtingen

De bevestiging van het deksel op de bovenflens van de cilinder geschiedt d.m.v. doorgaande voorgespannen draadeinden. Om het bezwaar van vermoeiing van de relatief stijve draadeinden te ondervangen zijn dekselrand en cilinderflens als elastische elementen uitgevoerd. Dit stelt eisen aan een goede en gelijkmatige voorspanning in de draadeinden. Het was aanvankelijk de bedoeling de draadeinden hydraulisch aan te spannen. Dit bleek moeilijk te verwezenlijken, waardoor uiteindelijk is besloten de draadeinden voor te spannen met de momentsleutel.

Het deksel rust met een relatief smalle oplegrand ter plaatse van de binnendiameter op de bovenflens van de cilinder. Verder is er tussen dekselrand en cilinderflens een spleet die in verband met de gewenste elasticiteit open moet blijven. Om te voorkomen dat deze spleet een bron van corrosie wordt, is ze gevuld met een op Rustban gebaseerde vette mastiek. Deze is opgesloten door een rubber afdichtingsprofiel, dat zelf met roestvaststalen klembanden om de flenzen van deksel en cilinderflens is geklemd.

Aanvankelijk was het de bedoeling het cilinderdeksel in verband met sterkte- en stijfheideisen uit te voeren in gietstaal. Om het aantal potentiële leveranciers te vergroten is besloten een uitvoering in nodulair ferritisch gietijzer (GGG-40) voor deksel en lantaarnstuk te kiezen. De dimensionering van de onderdelen is daarop aangepast. Een bezwaar tegen nodulair gietijzer was vooral de geringere rek ten opzichte van gietstaal. Prijstechnisch was de toepassing van nodulair gietijzer echter aantrekkelijk. Als gevolg van deze materiaalkeuze is de flens van het nodulair gietijzeren deksel dikker dan de cilinderflens, die van smeedstaal is vervaardigd.

4.1.2 Lantaarnstuk

Het lantaarnstuk onderaan de cilindermantel is ontstaan omdat er zorg bestond over de maximaal inwendig te bewerken cilinderlengte. Deze lengte is, gegeven de vereiste hefhoogte van de schuif, minimaal gehouden. Als gevolg daarvan bevindt de zuiger zich bij een gesloten schuif geheel onderin de cilindermantel. Deze positie ligt aanzienlijk onder de scharnierende verbinding van de cilinder met de cardanbalk. In deze positie moet nog altijd een behoorlijk moment van de stang naar de cilindermantel kunnen worden overgebracht in verband met:

- stabiliteit bij neerdrukken van de schuif
- opnemen kantelbelasting cilindermantel t.g.v. horizontale bewegingen van de schuif
- golfbelasting op de stang

Dit moment moet worden overgebracht door reactiekrachten ter plaatse van de zuigergeleiding en de stanggeleiding. Gegeven het moment wordt de grootte van de reactiekrachten bepaald door de kleinste afstand tussen zuiger- en stanggeleiding. Met behulp van de zuigerstanggeleiding onder in het lantaarnstuk wordt, onafhankelijk van de cilindergrootte, een momentarm van ca. 1,6 m gecreëerd. Het lantaarnstuk is vervaardigd uit nodulair ferritisch gietijzer (GGG-40).

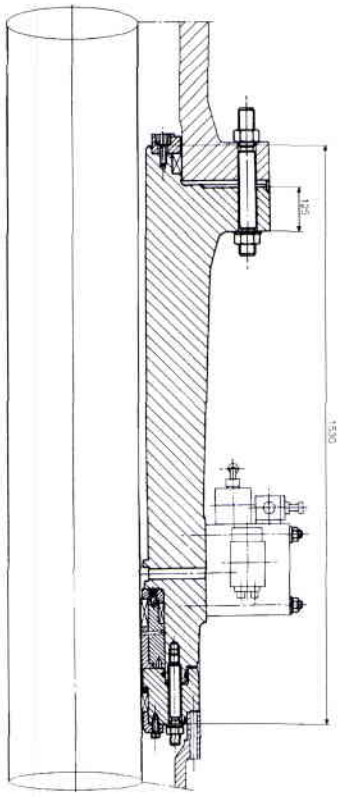
Bij het ontwerp van het lantaarnstuk zijn de volgende eisen gesteld:

- Oliedichtheid bij drukken tot ca. 270 bar. Doorgaande poriën zijn ontoelaatbaar, de dikte van het materiaal (200 tot 300 mm) biedt hiervoor op zich al een redelijke garantie.
- Overdracht reactiekracht van de zuigerstanggeleiding naar de flensverbinding met de cilinder.
- Minimale bewerking:
  - buitenzijde moet onbewerkt kunnen blijven;
  - alleen flenzen, boutgaten, dichtingsvlakken bewerken;
  - grootste deel van het inwendige van het lantaarnstuk ook onbewerkt laten; dit deel in verband met contact met hydraulische olie wel zeer grondig stralen, zodat alle loszittende deeltjes gegarandeerd verwijderd zijn;
- alle schroefbevestigingen zijn ofwel met doorgaande bouten of met tapeinden gemaakt; tapbouten zijn zoveel mogelijk vermeden.

De kritische zone voor de belastingen zit in de overgang van de mantel naar de flens van het lantaarnstuk. Aan een prototype heeft in verband hiermee destructief onderzoek plaatsgevonden. Het doel daarvan was tweeledig:

- controle op materiaaldichtheid en structuur bij de voorgestelde fabricagemethode
- controle of met NDO-tests een goed beeld van defecten kon worden verkregen in relatie tot de acceptatiecriteria

Het lantaarnstuk bevat de aansluiting op het hydraulische systeem. Ter plaatse van de hoofdprent onderin is de doorboring gemaakt. Op de prent is met een boutverbinding het hoofdblok bevestigd met in eerste instantie een afsluiter, alsmede een gestuurde terugslagklep en een stroomregelventiel. Aangezien het bezwijken van de verbinding van het hoofdblok op het lantaarnstuk het falen van de cilinder tot gevolg zou hebben, zijn de toelaatbare spanningen in de boutverbinding beperkt. De uitmonding van de toe- en afvoer van de hydraulische olie is gesitueerd onderin de smalle ringvormige ruimte die tussen de binnenwand van het lantaarnstuk en de zuigerstang bestaat, dicht boven de zuigerstanggeleiding en de zuigerstangafdichting. Hiermee kan neerslag van eventueel aanwezig vuil tussen stang en geleiding worden weggespoeld en kan



Figuur 4.7 Lantaarnstuk

voorkomen worden dat deze neerslag tot beschadigingen (krassen) leidt. Onderin de ringvormige ruimte in het lantaarnstuk is nog een rand aangebracht, waarop eventueel grover vuil kan neerslaan.

Het lantaarnstuk bevat ook de stangafdichtingen. De afdichtingen en de bronzen geleidebus (GCuSn 12) zijn gemonteerd in een cassette. Doel daarvan is om, indien gewenst, in de toekomst nieuw ontwikkelde afdichtingen te kunnen toepassen zonder dat het lantaarnstuk zelf daarvoor zou moeten worden aangepast. De bronzen bus heeft een verlopende binnendiameter gekregen (inwendige welving) teneinde te voorkomen dat bij doorbuiging van de zuigerstang deze op het uiteinde van de bus gaat dragen.

4.1.3 Zuiger en zuigerstang

De zuiger en de zuigerstang vormen constructief één geheel, en zijn ook uit één smeedstuk vervaardigd. Als onderdeel van de hydraulische cilinder heeft de zuigerstang een beweging- en krachtoverbrengende functie. Bepalend voor het ontwerp van de zuigerstang zijn met name de volgende aspecten:

- stabiliteit van de stang bij het sluiten van de schuif
- corrosie van het stangoppervlak

Daarnaast is rekening gehouden met de volgende aspecten:

- fabricage en montage in de cilinder; cilinder en stang liggen dan horizontaal, doorbuiging door eigen gewicht
- aansluiting onderoog; vermoeiing van de schroefdraad

Ontwerpcriterium voor de zuigerstangdiameter is de knik in uitgeschoven positie, wanneer de volle sluitdruk op de bovenkant van de zuiger staat. Deze situatie komt voor bij elke volledige sluiting (schuif op onderaanslag gedrukt). De veiligheid tegen knik bedraagt 2,5. De zuigerstangdiameters zijn gekozen volgens de ISO-reeks [ISO/R3]. De zuigerstanglengte is bepaald op grond van de slag die de schuif moet kunnen maken, de benodigde afmetingen voor geleiding, afdichting, etc. en enkele centimeters reserve. Mede in verband met knikken zijn eisen gesteld aan de rechtheid van de zuigerstang: 0,3 mm afwijking op de totale lengte en 0,03 mm per meter.

De zuigerstang wordt ter plaatse van het lantaarnstuk geleid en door afdichtingen gevoerd. Daarom worden ook eisen gesteld aan gladheid en hardheid van het zuigerstangoppervlak. Omdat het zuigerstangoppervlak in uitgeschoven positie (schuif gesloten) in contact staat met het zoute milieu, zijn bovendien eisen gesteld aan de corrosiebestendigheid van het oppervlak. De volgende materiaalcombinatie is gekozen:

- stang materiaal 2C35 met bijzondere eisen aan de reinheid van het materiaal vanwege de aan te brengen NiCr-bedekking
- elektrolytisch neergeslagen tussenlaag nikkel, dikte tenminste 100 μm
- elektrolytisch neergeslagen oppervlaktelaag chroom, dikte tenminste 50 μm en ten hoogste 100 μm

Nikkel-chroom bedekking zuigerstangen

Na uitgebreid onderzoek naar de corrosiebestendigheid van diverse typen stangbedekkingen is voor bovenstaande, klassieke, bedekking gekozen. Nikkel kan als een dichte laag goed op het basismateriaal 2C35 aangebracht worden en is daarmee de primaire conservering voor de stang. Nikkel is echter relatief zacht en heeft slechte loopeigenschappen. De toplaag van chroom is hard en slijtvast en zorgt voor de vereiste, goede loopeigenschappen. De elektrolytisch neergeslagen laag chroom is evenwel poreus en functioneert daardoor slechts als een secundaire conservering. Door onderzoek was het mogelijk de acceptatiecriteria van de nikkel- en chroomlagen zorgvuldiger dan voorheen te formuleren. Dit betrof o.a. eisen m.b.t. hardheid, chemische samenstelling, laagdiktemetingen en de diameter en het aantal van toelaatbare poriën. De chroomlaag heeft een hardheid van ca. 950 HV. Het oppervlak is door bandschuren op een ruwheid van 0,4 μm gebracht.

Onderzoek Nikkel-chroom bedekking

Aan de keuze voor een nikkel-chroom bedekking voor de zuigerstangen is veel onderzoek voorafgegaan. De ervaringen met chroomlagen op zuigerstangen in maritiem milieu waren zeker niet altijd positief. Eind jaren '70 waren problemen opgetreden met hardchroomlagen op smeedstalen zuigerstangen van de inlaatsluis in het Volkerak. Hieruit was duidelijk geworden dat de ondergrond belangrijk was, maar vooral ook het feit dat chroomlagen sterk worden aangetast in een zeewatermilieu vanwege de gevoeligheid van chroom voor chloriden. De chroomlaag bevat poriën, waardoor corrosieve aantasting van het onderliggende staal kan optreden. Daarom is een aantal alternatieve stangbedekkingen bekeken. Deze zijn aangebracht op sets proefstaven die langdurig op een proefrek in de Oosterschelde zowel onder als boven water zijn geëxposeerd.

Gelijke proefstaven zijn in het laboratorium aan zoutsproeitests onderworpen teneinde in korte tijd een indruk te krijgen van de corrosieweerstand van de verschillende bedekkingen en een relatie met de resultaten van de Oosterscheldeproeven te kunnen leggen. De zoutsproeitesten zijn een middel om een indruk te krijgen van de weerstand van de betreffende chroomlaag tegen chloride-aantasting. Bij een verzwaarde test wordt de te sproeien zoutoplossing aangezuurd met azijnzuur, waardoor het effect op het chroom nog ongunstiger is. Eisen stellen meestal dat een chroomlaag een dergelijke sproeitest, liefst bij verhoogde temperatuur, gedurende 1000 uur moet kunnen doorstaan zonder zichtbare aantasting. Met

dergelijke eisen zijn proefstukken, zowel van beperkte afmetingen, als met een diameter van 400 mm en een lengte van 6500 mm door de fabrikant van de nikkel- en chroomlagen vervaardigd. Ook was er een proefstuk bij met een diameter van 120 mm en een lengte van 6500 mm; deze afmetingen waren gekozen, omdat een dergelijke staaf, bij oplegging t.p.v. de uiteinden, een zelfde doorbuigingsvorm aanneemt als de grootste te behandelen zuigerstangen. De proefstukken hebben de tests goed doorstaan. Tevens is gebruik gemaakt van de mogelijkheid het effect van reparaties aan nikkel- en chroomlagen te onderzoeken.

Naast corrosieweerstand zijn uitvoerbaarheid en kosten van de verschillende stangbedekkingen bekeken. Dit leidde tot de volgende conclusies:

- Oplassen met hoogwaardig roestvast materiaal;
  voordeel: zeer corrosievast, robuust
  nadeel: duur en kans op kromtrekken van de stang tijdens lassen of bij latere bewerking
- Alleen roestvast staal toepassen:
  voordeel: snelle productie
  nadeel: kostbaar door de grote stangafmetingen en het stangoppervlak is te zacht
- Hardchroom op smeedstalen as;
  voordeel: goedkoop
  nadeel: onvoldoende garantie voor een dichte chroomlaag, ook al wordt het hardchroom in twee lagen aangebracht
- Hardchroom op roestvast stalen as;
  nadeel: duur vanwege de grote stangafmetingen
- Nikkel- en chroomlaag op smeedstalen as;
  voordeel: redelijk in kosten
  nadeel: productie erg goed bewaken, want het elektrolyseproces is kritisch

Gekozen is voor een elektrolytisch aangebrachte nikkel- en chroomlaag, waarbij chroom de buitenlaag vormt.

Fabricage zuigerstang met Nikkel-chroomlaag

Het vernikkelen en verchromen van de zuigerstangen kon niet in Nederland worden uitgevoerd, maar heeft plaatsgevonden bij een gespecialiseerd bedrijf in het zuiden van Frankrijk. Na fabricage van de stangen in Nederland zijn de stangen zorgvuldig en tegen corrosie beschermd ingepakt en over de weg naar Zuid-Frankrijk vervoerd. I.v.m. de afmetingen en gewichten (tot 17,5 meter lang en gewicht tot 35 ton) moest een aantal van de ritten als bijzonder transport worden uitgevoerd. Punt van zorg daarbij was het rechtblijven van de stangen tijdens transport. Ondersteunen hielp niet veel, omdat de stangen veelal stijver waren dan het voertuig waarop ze werden vervoerd. Na behandeling in Frankrijk werden de stangen op dezelfde wijze terug naar Nederland vervoerd. Voor en na elk transport is gecontroleerd op diameters en rondheid, rechtheid en beschadigingen. De productie van het vernikkelen en verchromen bedroeg, na enige aanloop, ca. 5 stangen per maand.

Op de smeedstalen zuigerstangen is eerst een nikkellaag aangebracht en vervolgens een chroomlaag. De taak van het nikkel is een goed afsluitende laag op het staal te vormen, zodat het onderliggende staal in principe niet kan worden aangetast door corrosie. Het chroom vormt een harde, slijtvaste laag, die echter gevoelig is voor aantasting door de chloriden uit het zeewater. Deze aantasting krijgt geen kans, indien de stang regelmatig wordt in- en uitgeschoven. Het is dan net alsof er regelmatig een vette lap overheen wordt gehaald. De schuiven bewegen echter weinig, terwijl anderzijds de zoutconcentratie op de stangen hoog kan oplopen doordat het water dat op de stang terecht komt, verdampt en het zout achterblijft.

De nikkel- en chroomlagen zijn niet nodig, zelfs ongewenst, op de zuiger en op het stanggedeelte waarop de platte klemvlakken en de schroefdraad zijn aangebracht. Tijdens het vernikkelen en verchromen zijn deze delen dan ook afgeplakt. Dat wil zeggen dat ergens op de stang de nikkel- en chroomlagen ophouden. Er is voor gezorgd dat de gedeelten waarop geen nikkel- en chroomlaag aanwezig is, nooit de afdichtingen van de cilinder behoeven te passeren. Aan zuigerzijde blijft het gedeelte zonder nikkel en chroom altijd binnen de cilinder en aan stangzijde altijd erbuiten.

Daarnaast is er een stanggedeelte van 1100 mm dat zich bij de cilinders vrijwel altijd ter plaatse van de cilinder- en conserveringskamerafdichtingen zal bevinden. Dit gedeelte is daardoor extra kwetsbaar, terwijl er hoge eisen aan worden gesteld, want falen van de nikkel- en chroomlaag op die plaats betekent al snel lekkage van hydraulische- of conserveringsvloeistof. Aan alle zuigerstangen zijn daarom extra eisen gesteld m.b.t. de toelaatbaarheid van poriën in dit gedeelte van het zuigerstangoppervlak.

Het vernikkelen en verchromen vindt plaats in verschillende baden. Aanvangshandeling is dat de stangen goed moeten worden ontvet. Na handmatig verwijderen van de Rustban die t.b.v. het transport op de stangen was aangebracht, werden de stangen geslepen. Dit was de laatste bewerking waarbij de vorm van de stang (binnen beperkte grenzen) nog kon worden gecorrigeerd. Vervolgens werden de stangen ontvet en gebeitst, waarna het nikkelproces werd gestart. Na het vernikkelen werden de stangen met het blote oog gecontroleerd op onregelmatigheden. Vervolgens werden ze gepolijst als voorbereiding op het verchromen. Na het polijsten vond een nauwkeurige oppervlakte-inspectie plaats en werden eventuele poriën gerepareerd en met de hand gepolijst. De stangen waren dan klaar om te worden verchroomd. Voorafgaand aan het verchromen werden de stangen opnieuw ontvet, aansluitend vond het verchromen plaats.

De nikkel- en chroomlagen op de zuigerstangen groeien in de verschillende baden met de tijd. De kwaliteit van de lagen is afhankelijk van de zuiverheid van de baden (tanks van zo'n 15 meter lengte), de stroomdichtheid, de badsamenstelling, de pH en de temperatuur. Op basis van proefstukken is vooraf bepaald welke instelling van de bovengenoemde parameters moeten worden gekozen voor een goed resultaat. Daaruit is ook duidelijk geworden hoe lang een stang in het bad aanwezig moet zijn om voldoende laagdikte te doen groeien. Voor de nikkellaag is de geëiste dikte minimaal 100 micron. De aangebrachte laagdikte kan pas worden bepaald als de stang uit het bad is gehaald, door de nieuwe diameter op een aantal plaatsen te vergelijken met de diameter van de stang voordat deze in het bad ging. Bovenop de 100 micron moest een overdikte zijn aangebracht, omdat de stangen na het vernikkelen werden fijngeslepen of gepolijst. Dit is nodig om de juiste ruwheid voor het verchromen te realiseren. Bovendien is de stang hiermee op de juiste diameter gebracht. Tot slot had de bewerking een heel praktisch doel: de mechanische belasting op de nikkellaag is tijdens de bewerking zo groot dat dit de best denkbare test is voor het vaststellen of de nikkellaag voldoende hecht aan de ondergrond. Na het polijsten moet er dan overal minimaal 100 micron nikkel aanwezig zijn. Soms waren de lagen aanzienlijk dikker (tot 500 micron toe), wanneer een te dun uitgevallen stang op de juiste diameter moest worden gebracht.

Het verchromen is op soortgelijke wijze in een elektrolytisch bad verlopen. Als de verchroomde stangen uit het bad komen, wordt het oppervlak op de gewenste ruwheid gebracht door bandschuren. Hierbij verdwijnt ook materiaal, maar de vorm van het oppervlak kan bij deze bewerking niet meer worden gecorrigeerd.

De dikten van de nikkel- en chroomlaag die zijn aangebracht, zijn gemeten door op een aantal vooraf vastgelegde plaatsen van de stang de diameter voor en na de oppervlaktebehandeling te meten en de gevonden waarden van elkaar af te trekken. Door op de betreffende plaatsen in twee onderling loodrechte richtingen te meten wordt een redelijke informatie over de laagdikte verkregen, terwijl er tevens een controle is of de lagen al dan niet excentrisch zijn aangebracht, waardoor lokaal de geëiste laagdikte zou kunnen worden onderschreden. Verder zijn de laagdikten zo gering dat de temperatuur van de stangen bij de diameterbepaling een rol speelt. Er zijn dan ook eisen gesteld aan gelijkmatigheid van de temperatuurverdeling in de stang en alle afmetingen zijn steeds teruggerekend naar een temperatuur van 20°C.

De controles hebben bestaan uit:
- Elke 500 mm twee loodrecht op elkaar staande diameters meten voor en na de behandeling.
- Elke 500 mm de ruwheid meten.
- Temperatuur meten; controleren of de temperatuurverdeling in de stang voldoende gelijkmatig was (marge 4°C); alle meetresultaten terugrekenen naar de referentietemperatuur van 20±2°C.

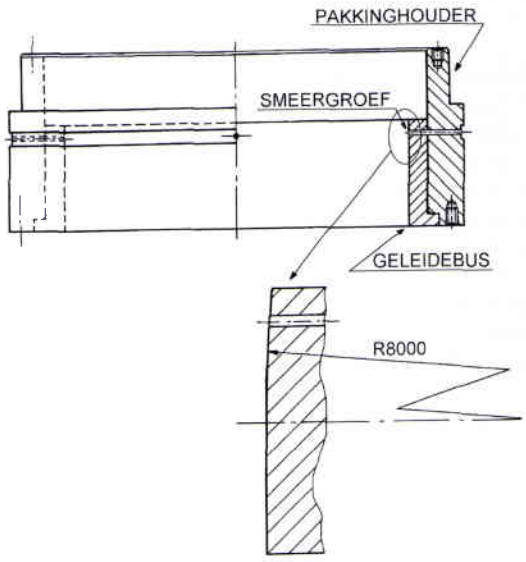
De grote zorg bij het aanbrengen van de nikkel- en chroomlagen was dat er poriën zouden ontstaan, waardoor de corrosieve omgeving toegang zou krijgen tot het staaloppervlak, met als gevolg de kans dat de corrosieproducten de nikkel-chroomlagen zouden losdrukken van het staaloppervlak. Ondanks de zuiverheid van de werkstukken en de elektrolysebaden is gebleken dat er nog altijd poriën kunnen optreden gedurende het elektrolyseproces. Daarom is uitgebreid aandacht besteed aan methoden ter voorkoming van poriën en aan de reparatie van poriën die onverhoopt zouden optreden. Uitgangspunt is dat alle aangetroffen poriën in de nikkellaag, voor zover groter dan 0,05 mm diameter, kunnen worden gevonden en dan worden gerepareerd door "dotwelding" (puntlassen met nikkel). Op deze wijze bestaat de garantie dat het basismateriaal (smeedstaal) geheel is beschermd door nikkel.

Bleek bij inspectie dat het aantal waargenomen poriën groter was dan voorgeschreven (maximaal 5 per meter stanglengte), dan moest de gehele nikkellaag worden verwijderd en opnieuw worden aangebracht. De inspecties bestonden uit drie gedeelten (figuur 4.8):
- De gehele zuigerstang werd met het blote oog geïnspecteerd; bij goede belichting en rustige, zorgvuldige controle worden de meeste onregelmatigheden in het oppervlak dan reeds ontdekt.
- Een nauwkeuriger inspectie van kleine, vooraf gedefinieerde gedeelten van het zuigerstangoppervlak ter grootte van 150 bij 150 mm met behulp van een vergrootglas in elke meter stanglengte, waarbij de vierkantjes steeds 90° t.o.v. elkaar waren verdraaid.
- Een nauwkeurige inspectie met behulp van een vergrootglas van het gedeelte ter plaatse van de cilinder- en conserveringskamerafdichtingen (1100 mm) en geheel rondom.

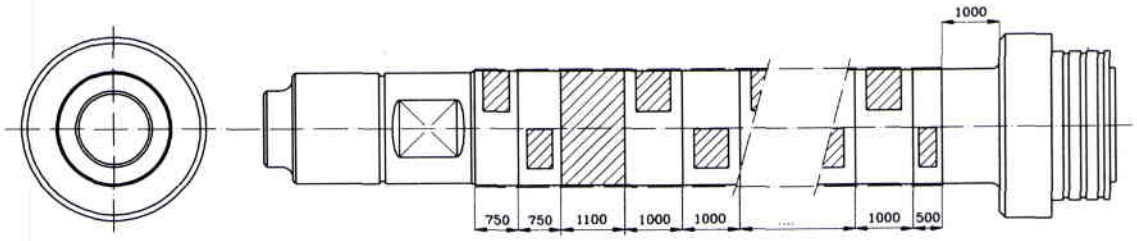
Bij de inspectie op poriën in de chroomlaag is een soortgelijke procedure gevolgd. Daarbij moest het begrip porie nader worden gedefinieerd: er zijn doorgaande poriën (tot op het staal), niet doorgaande poriën (tot op het nikkel) en oppervlakkige aantastingen (putjes die in de chroomlaag zelf eindigen). Op basis van deze definities zijn goed- en afkeurcriteria en reparatiemethoden aangegeven:
- goede hechting van de laag op de ondergrond (nergens los of bobbels)
- in het stanggedeelte van 1100 mm geen enkele doorgaande porie en geen reparaties
- maximaal 2 doorgaande poriën per meter stanglengte, mits gerepareerd d.m.v. "dotwelding" met nikkel en diameter van de reparatieplek niet groter dan 3 mm
- maximaal 5 niet-doorgaande poriën per meter stanglengte die d.m.v. dotwelding met nikkel moeten zijn gerepareerd, tenzij hun diameter kleiner is dan 0,5 mm
- maximaal 25 oppervlakkige aantastingen per meter stanglengte, mits beperkt in omvang overeenkomstig de eisen; deze zijn niet gerepareerd

Geleiding en afdichting zuiger

De zuiger draagt de benodigde afdichtingen en een bronzen geleidebus (GCuSn 12) voor de geleiding van de zuiger in de cilindermantel (figuur 4.9). Aan weerszijden van de bronzen bus zijn de afdichtingen aangebracht voor de dekselzijde en de stangzijde. De bus is gewelfd uitgevoerd teneinde te voorkomen dat bij doorbuiging van de zuigerstang (vooral tijdens horizontale beproeving en transport) dragen op de kanten optreedt. De geleidebus heeft een



Figuur 4.9 Geleidebus met smeergroef



Figuur 4.8 Inspectieoppervlakken zuigerstang

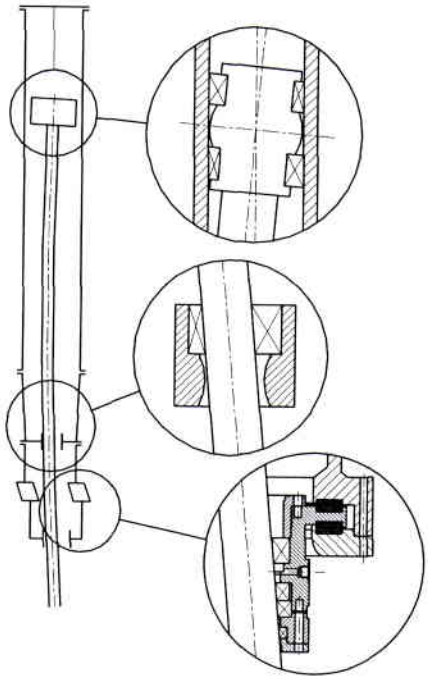
smeergroef ten behoeve van de smering door de hydraulische olie en als drukontlasting bij eventuele olielekkage langs de afdichtingen.

De afdichtingen en de bronzen bus zijn samen gemonteerd op een pakkingcassette. Indien in de toekomst ooit een ander type afdichting of bus wenselijk wordt geacht, zijn geen aanpassingen aan de zuiger, doch uitsluitend aan de cassette noodzakelijk. Een dergelijke ombouw zou in principe op de kering kunnen plaatsvinden zonder de cilinders te verwijderen.

De beide sets afdichtingen zijn met axiale speling gemonteerd. Ze zijn ongedeeld en kunnen ook later door ongedeelde sets worden vervangen. De afdichtende werking komt tot stand onder invloed van de oliedruk. Ten behoeve van het opnemen van de axiale krachten is de pakkingcassette axiaal opgesloten met een op de zuigerkop voorgespannen ring. Om de kans op stick-slip te verminderen zijn de pakkingsets aan loopvlakzijde voorzien van een tefloncoating.

Statische afdichtingen (O-ringen) verhinderen eventuele olielekkage achter de cassette om. Een belangrijk punt van zorg bij het ontwerp is geweest het overbruggen van de spleet tussen zuiger en cilindermantel. Deze spleet is het gevolg van de noodzakelijke speling tussen zuiger en cilindermantel, waarbij toleranties in dimensionering en vormgeving (onrondheid) van de pakkingcassette en de cilindermantel in beschouwing moeten worden genomen (figuur 4.10). Daarnaast kan de zuiger zich enigszins scheef instellen bij doorbuigen van de zuigerstang, waarbij de door de afdichtingen te overbruggen spleet aan de ene zijde toeneemt en aan de andere zijde afneemt (figuur 4.11). Door drukverhoging in de cilinder treedt bovendien een niet-verwaarloosbare diametervergroting van de cilindermantel op. Hiermee is rekening gehouden bij het ontwerp van de afdichtingen, zie 4.1.5.

Bij de stangafdichtingen is een soortgelijke benadering gevolgd als bij de zuigerafdichtingen. Ook hier is de (enkelwerkende) afdichting ondergebracht in een cassette, die later, indien een ander type wenselijk wordt geacht als gevolg van technische ontwikkelingen, kan worden vervangen door een exemplaar dat geschikt is voor het dragen van een nieuw type afdichtingen. Ook de stangafdichtingen zijn weer gecombineerd met de bronzen bus voor de stanggeleiding en ook deze bus is aan de uiteinden afgerond om bij doorbuiging van de stang het dragen op de hoeken te voorkomen.

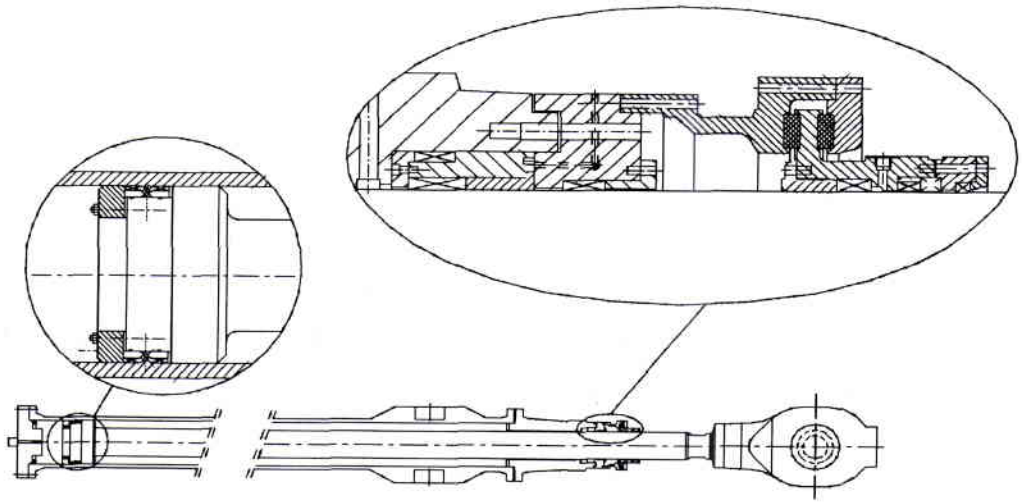


Figuur 4.11 Vervorming zuigerstang

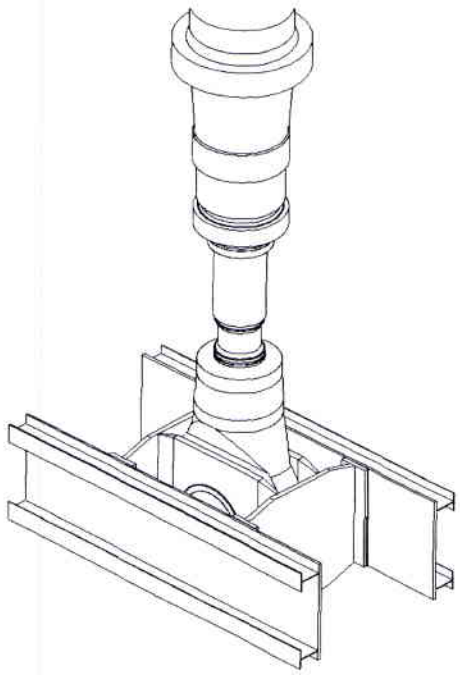
4.1.4 Bevestiging onderoog aan zuigerstang

Het onderoog is de verbinding van de schuif met de zuigerstang, zie figuur 4.12. Het is daartoe vastgeschroefd op de zuigerstang en via een pen en kogelgewrichtslager scharnierend verbonden aan de staalconstructie van de eindkoker en daarmee aan de schuif. Aan deze scharnierende verbinding worden de volgende eisen gesteld:

- goed gecentreerde krachtinleiding in de zuigerstang; van belang voor de stabiliteit van de stang bij sluiten van de schuif
- scharnieren moet enigszins mogelijk zijn om de as van de pen en loodrecht daarop vanwege mogelijke scheefstand van de schuif, indrukking en speling in de schuifaanslagen en pijlerzettingen
- laag wrijvingsmoment van het scharnierpunt teneinde het buigend moment in de zuigerstang te beperken



Figuur 4.10 Zuigergeleiding en afdichtingen



Figuur 4.12 Samenstelling onderoog

Voor de bevestiging van het onderoog aan de zuigerstang is deze laatste voorzien van schroefdraad. Bepalend voor de dimensionering van dit gedeelte van de zuigerstang zijn de wisselende trek- en drukbelastingen (bij elke volledige schuifbeweging wordt de cyclus trek-druk-trek doorlopen), alsmede de buigspanningen die optreden bij rotaties in het kogelgewrichtslager van het onderoog en waarvan de grootte wordt bepaald door de trek- en drukkrachten in de zuigerstang en de wrijvingscoëfficiënt in het kogelgewrichtslager.

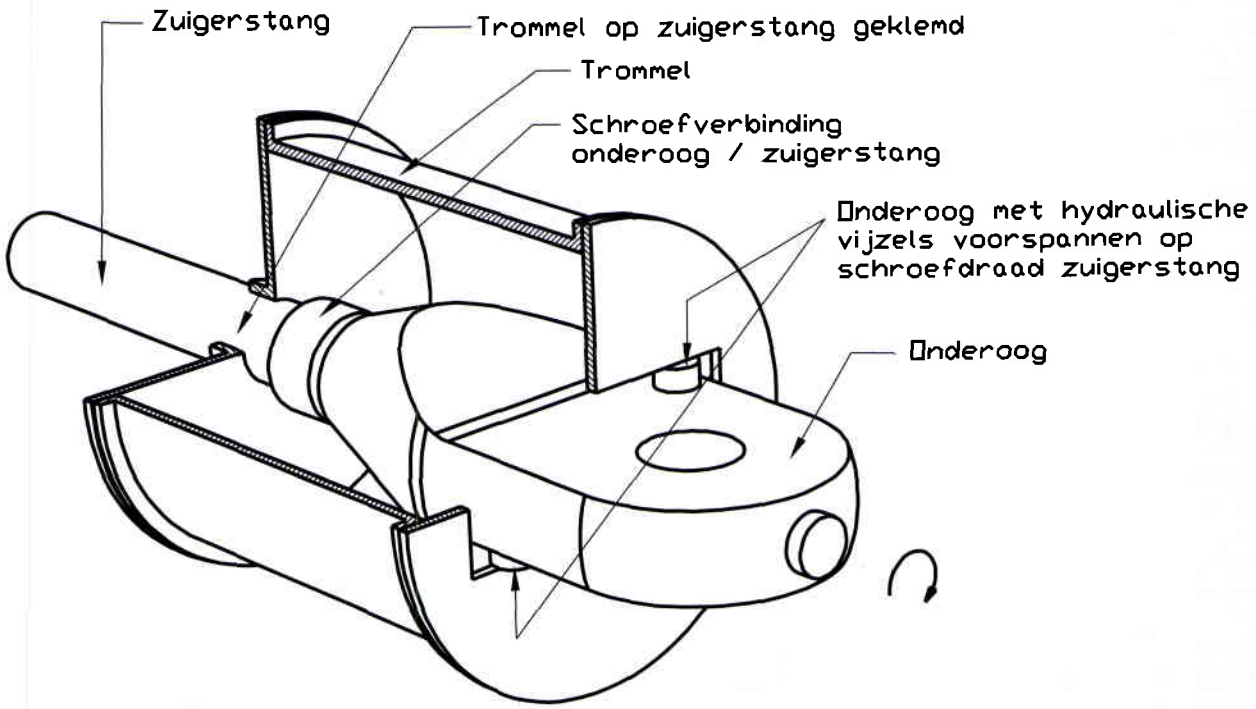
De grootte van de vermoeiingsbelasting maakte het noodzakelijk het oog met voorspanning op de stang te monteren en te streven naar een zo groot mogelijke schroefdraaddiameter. Het uitstekende stanggedeelte is gebruikt t.b.v. fabricagedoeleinden, o.a. als opspanvlak voor het slijpen en referentievlak voor metingen tijdens vernikkelen en verchromen. Daarnaast levert het een (geringe) bijdrage in de gewenste elasticiteit bij het voorspannen van het oog op de stang, terwijl de kopse zijde een goed gedefinieerd aanslagvlak onder in het schroefdraadgat in het oog vormt. De haaksheid van dit aanslagvlak is dan ook getolereerd ten opzichte van de as van de zuigerstang.

Als materiaal voor het onderoog is gekozen gietstaal GSt52 volgens NEN 6007 en niet voor nodulair gietijzer zoals voor de overige gegoten onderdelen. Overwegingen voor deze keuze waren:

- sterkte, elasticiteitsmodulus en kerfslagwaarde van gietstaal zijn hoger dan van nodulair gietijzer, waardoor de constructieve afmetingen beperkt blijven
- gietstaal is beter inspecteerbaar dan gietijzer
- in gietstaal kan een hoger te belasten schroefdraad worden gesneden dan in nodulair gietijzer

Aan de eis van goed gecentreerde krachtinleiding in de zuigerstang is voldaan door de ligging van de schroefdraad in de hals van het onderoog te tolereren ten opzichte van de as van de lagerboring. De keuze van een kogelgewrichtslager van hoogwaardige kwaliteit levert eveneens een bijdrage aan de centrische krachtinleiding. De verbinding moet zijn voorgespannen ter beperking van de vermoeiingsbelasting, daarmee de levensduur van de schroefdraadverbinding verlengend.

Het onderoog is op de zuigerstang voorgespannen met behulp van een speciaal ontwikkeld opspan-apparaat, (figuur 4.13), dat in staat was het gewenste moment voor het opspannen te leveren. Het apparaat kon het hele oog opnemen, het vastklemmen en het



Figuur 4.13 Onderoog en zuigerstang met opspan-apparaat

in één lijn brengen met de horizontaal opgestelde zuigerstang. Bij het aanspannen is het belangrijk goed in één lijn te werken, te zorgen voor goede smering en aanbrengen van het juiste aanhaalmoment. Na afloop van het aanspannen rust de tap aan de zuigerstang tegen de goed getolereerde vlakke bodem onderin het schroefdraadgat in de hals van het onderoog. Het voor het opschroeven en voorspannen van het oog op de zuigerstang benodigde aanhaalmoment wordt in de zuigerstang gebracht ter plaatse van de twee platte vlakken. Deze zijn zó gedimensioneerd, dat bij het grootste uit te oefenen koppel juist geen vloeien van het materiaal op de hoeken van de klemvlakken optreedt.

Omdat bij het aanspannen een groot deel van het aanhaalmoment in wrijving verloren gaat, is goede smering van belang. Smering vermindert bovendien de spreiding in de optredende wrijvingscoëfficiënt. In een proefopstelling is het hele aanspanproces met behulp van een dummy zuigerstang uitvoerig getest en doorgemeten. Belangrijk daarbij was de relatie te vinden tussen benodigd aanhaalmoment en de in de schroefverbinding uiteindelijk overblijvende voorspankracht. Als controle hoort daarbij een meting van de hoekverdraaiing tijdens het aanspannen (dus nadat de tap aan de zuigerstang tegen de bodem van het gat in de hals van het onderoog was komen aan te liggen). Het uit deze proefopstelling gevonden aanhaalmoment en bijbehorende hoekverdraaiing zijn gebruikt bij de montage van het onderoog op de zuigerstang. Als smeermiddel is gekozen voor Molykote 1000. Aangezien een smeermiddel ook het losdraaien weer zou kunnen bevorderen, hetgeen niet de bedoeling is, is ook gecontroleerd op het minimum losdraaimoment. Maximaal aanhaalmoment, voorspankracht, hoekverdraaiing tijdens aanhalen en minimaal losdraaimoment zijn voor alle cilindertypen vastgelegd in een procedure.

De spleet die aanwezig is op de plaats waar de zuigerstang uit de hals van het onderoog steekt, is een potentiële bron van corrosie. Aandacht is besteed aan toepassing van een goed elastisch blijvende kit ter afdichting van deze spleet.

Ten behoeven van het scharnieren is in het onderoog een kogelgewrichtslager opgenomen, waarvan de binnenring rechtstreeks op de scharnierpen voor de verbinding met de staalconstructie onderoog is gemonteerd. Zie voor een uitgebreide beschrijving van het scharnierpunt van het onderoog 4.2.3.

4.1.5 Afdichtingen

De afdichtingen kunnen worden onderscheiden in statische afdichtingen (hoofdzakelijk O-ringen) en translerende afdichtingen (figuur 4.14). Onderscheid wordt verder gemaakt tussen afdichtingen voor de hydraulische olie en afdichtingen voor de conserveringsolie. In de cilinders worden aldus vier typen afdichtingen gebruikt: statische en dynamische afdichtingen voor de hydraulische olie, en statische en dynamische afdichtingen voor de conserveringsolie.

T.b.v. de hydraulische olie zijn in de cilinder de volgende afdichtingen in gebruik:
- statische afdichtingen t.p.v. cilinderdeksel en lantaarnstuk
- statische afdichtingen pakkingcassette in de zuiger
- twee translerende afdichtingen in de zuiger
- statische afdichtingen pakkingcassette in het lantaarnstuk
- translerende stangafdichting

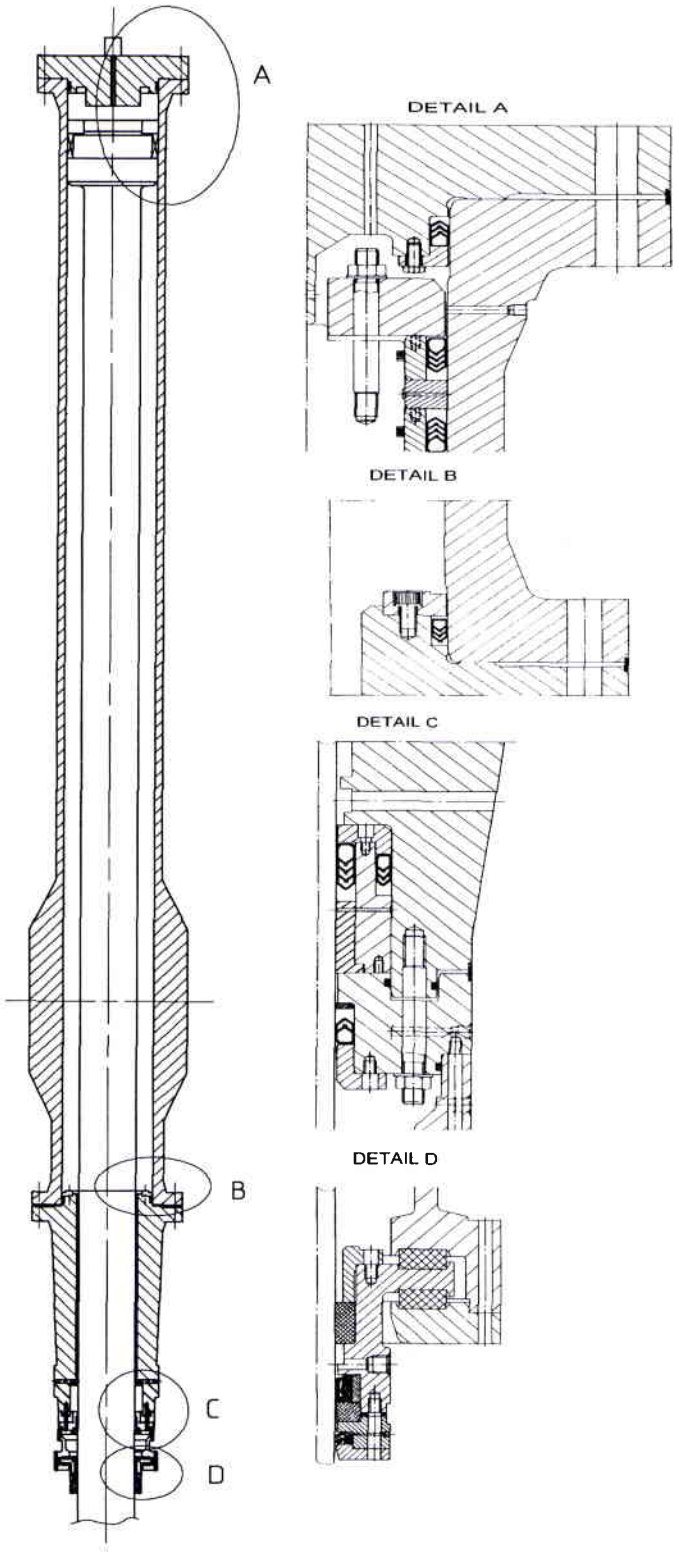
De statische afdichting tussen cilindermantel en cilinderdeksel (figuur 4.14 detail A) en die tussen cilindermantel en lantaarnstuk (figuur 4.14 detail B) zijn gelijk. De afdichting aan dekselzijde kan zowel bij nieuwbouw als bij latere vervanging in ongedeelde uitvoering zijn. De afdichting bij het lantaarnstuk mag bij nieuwbouw in ongedeelde uitvoering zijn, maar het concept moet zodanig zijn, dat bij vervanging een afdichting in gedeelde uitvoering kan worden gemonteerd. De oliedichtheid van deze afdichting moet, zowel in ongedeelde als in gedeelde uitvoering, volledig zijn. De constructie van cilindermantel, deksel en lantaarnstuk is zo stijf in relatie tot de elasticiteit van de afdichtingen, dat niet met vervormingen van deze constructies rekening behoeft te worden gehouden.

De afdichtingen voor de cilinder zijn geschikt voor de toegepaste hydraulische olie, een normaal in de handel verkrijgbare minerale soort, die tamelijk dun vloeibaar is (ISO-klasse 15). De kinematische viscositeit van de olie bedraagt in het werkgebied van de cilinders 10 tot 230 cSt. De afdichtingen kunnen temperaturen doorstaan tussen -20°C en +50°C.

Randvoorwaarden voor de afdichtingen zijn:
- drukken en drukvariaties
- oliedichtheidseis; controlemogelijkheid
- het dichten van de zuigerspleet t.g.v. zwelling van de cilindermantel onder druk
- levensduur tenminste 25 jaar
- vervanging in de toekomst

De afdichtingen zijn opgebouwd uit zogenoemde dakvormmanchetten. In de zuiger zijn twee sets afdichtingen aangebracht en in het lantaarnstuk één set. Elk van de zuigersets bestaat uit een topring, drie dakmanchetten en een steunring (figuur 4.14 detail A). De afdichtingsset in het lantaarnstuk voor de zuigerstang is op dezelfde wijze opgebouwd, maar bevat 4 dakmanchetten om zekerheid te bieden dat aan de eis m.b.t. oliedichtheid na het op locatie vervangen door gedeelde ringen nog wordt voldaan (figuur 4.14 detail C). Gebruik is gemaakt van vezelversterkt nitrilrubber voor de steunring en de dakvormmanchetten en van ongewapend nitrilrubber voor de topring. Teneinde de wrijving van de rubber afdichtingen op de zuigerstang en de cilindermantel te beperken, hebben de afdichtingsets aan de loopvlakzijde een tefloncoating gekregen. De gedachte daarachter is dat de teflon weliswaar reeds snel na ingebruikname slijt, maar dat de teflondeeltjes in de ruwheid van de cilinderwand en op de zuigerstang blijven hangen en zo de wrijvingscoëfficiënt helpen beperken. Bedoeling is dat hierdoor stick-slip verschijnselen van de zuigerbeweging worden onderdrukt.

Als uitgangspunt is gehanteerd dat de translerende afdichtingen in de zuiger en het lantaarnstuk een levensduur hebben van 25 jaar. Aangezien de levensduur van andere onderdelen van de cilinder aanzienlijk langer wordt ingeschat, moet vervanging van de afdichtingen mogelijk zijn zonder de cilinder geheel te demonteren. Voor het vervangen van de zuigerafdichtingen moet het cilinderdeksel worden verwijderd en moet de schuif, met daaraan de zuigerstang, worden opgevijzeld, totdat de zuiger boven de bovenflens van de cilinder uitsteekt. Aan de stangzijde is er dan geen druk behoudens de statische druk van de in de cilinder aanwezige oliekolom. Voor het vervangen van de stangafdichtingen in het lantaarnstuk moet het lantaarnstuk worden losgemaakt van de cilindermantel. Dit kan alleen in een situatie als de schuif is ondersteund, zodat geen oliedruk aan stangzijde in de cilinder wordt gegenereerd. Alleen gedeelde ringen zullen in zo'n vervangingssituatie kunnen worden aangebracht. De afdichtende werking van de gedeelde ringen zal geringer zijn dan die van ongedeelde ringen. Daarmee is in het ontwerp al rekening gehouden door één extra ring in de pakkingset toe te passen. Omdat de ongedeelde uitvoering van de afdichtingsringen van de zuigerstang is toegepast in een concept dat eigenlijk is bedoeld als gedeelde uitvoe-



Figuur 4.14 Afdichtingen cilinder en zuiger

ring, dichten de translerende afdichtingen beter af dan de bedoeling is. Met name de 4e ring bleef daardoor de eerste jaren te droog en is vermoedelijk de oorzaak van de optredende stick-slip verschijnselen in de cilinders geweest.

De translerende afdichtingen zijn ingebouwd in aparte bussen. Voor deze kostbare oplossing is gekozen om het in de toekomst niet onmogelijk te maken over te gaan op een heel ander type afdichting. Op het moment dat het vervangen van de afdichtingen samenvalt met een complete revisie en demontage van de cilinder (mogelijk na 50 of 100 jaar), zou ook het wijzigen van het afdichtingconcept wenselijk kunnen zijn, wanneer dan geheel andere typen afdichtingen op de markt zijn verschenen. Het ontwerp voorziet erin op zo'n moment een andere pakkingbus te monteren, waarin een nieuw type afdichting is ondergebracht.
Teneinde lekkages van het hoge naar het lagedruk gedeelte te voorkomen, zijn de pakkingbussen voorzien van statische afdichtingen t.o.v. de zuiger, respectievelijk het lantaarnstuk.

Voor de dimensionering van de translerende afdichtingen zijn de optredende drukken en het drukverloop van belang. Het drukverloop in de cilinders kan als volgt worden omschreven. Druk aan dekselzijde (figuur 2.7):

- Bij het deksel heerst bij geopende schuif een druk van 3 bar, bepaald door de spanpomp; indien de spanpomp uitvalt, kan t.g.v. het grote hoogteverschil tussen dekselzijde en pomp geen nazuigen plaatsvinden, zodat onderdruk optreedt.
- Tijdens sluiten van de schuif wordt de druk boven de zuiger beperkt door een overstortventiel dat op 70 bar is afgesteld. Door drukvariaties t.g.v. het niet-stationair bewegen van de schuif kan de druk tot 75 bar oplopen.
- Bij gesloten schuif wordt een druk van 60 bar gehandhaafd door de werking van de drukschakelaars. Door inwendige lekkage van het hydraulische systeem kan de druk zakken tot 30 bar in een tijdsverloop van een half uur of langer, waarna weer wordt bijgepompt tot 60 bar
- Tijdens openen van de schuif wordt de druk aan dekselzijde bepaald door de benodigde retourdruk, deze kan variëren van 3 tot 10 bar. Wordt tijdens openen gestopt, dan zal de druk wegzakken tot de druk die wordt bepaald door de spanpomp.

Druk aan stangzijde (figuur 2.8):

- Bij geopende schuif is aan stangzijde voortdurend een relatief hoge druk aanwezig (75 bar) die t.g.v. temperatuurvariaties kan variëren tot ongeveer de dubbele waarde.
- Bij sluiten van de schuif treden sterke drukvariaties op. De hoogste drukpieken kunnen 220 bar bedragen, ook als tijdens sluiten wordt gestopt, terwijl de laagste drukken enkele tientallen bar kunnen bedragen.
- In gesloten toestand van de schuif valt de druk onder de zuiger min of meer weg. T.g.v. nazuigen bij temperatuurdaling kan zelfs onderdruk ontstaan. Deze onderdruk wordt weer gecompenseerd zodra de druk boven de zuiger wordt verhoogd van 30 tot 60 bar.
- Bij openen treden hoge drukken op (100 tot 150 bar) die t.g.v. stick-slip van de schuif op zijn geleidingen een dynamisch karakter hebben. De maximum druk bedraagt 190 bar, de drukvariaties zijn kleiner dan bij sluiten.

Voor de afdichtingen is verder nog de beproeving van de cilinders van belang. Na samenbouwen in de fabriek zijn de complete cilinders in horizontale stand getest op goede werking en dichtheid van de afdichtingen. Testdruk aan stangzijde 270 bar en aan dekselzijde 165 bar. Bij deze beproeving mocht de druk niet meer zakken dan 2% in 8 uur, waarbij was bepaald dat na 1 uur mocht worden bijgepompt tot de oorspronkelijke druk; bedoeling daarvan is te compenseren voor vrijkomende lucht. Er is niet geëist de translerende afdichtingen 100% dichtend af te stellen. Teneinde enige smerende werking te behouden is het wenselijk geacht dat bij een drukniveau van 150 bar een lek van 1 druppel (0,01 cc) per dag optreedt.

Ten behoeve van de kamer met conserveringsolie zijn de volgende afdichtingen in gebruik:

- Stangafdichting aan de zijde van de conserveringsolie (figuur 4.14 detail C). Deze afdichting moet de conserveringsolie scheiden van de hydraulische olie en staat dus kerend in de richting van de conserveringsolie. De ruimte tussen de stangafdichting van de conserveringsolie en van de hydraulische olie is drukloos en gevuld met hydraulische olie, waardoor een soort slot voor de conserveringsolie ontstaat. De ruimte wordt gevuld gehouden met een klein olietankje, gevuld met hydraulische olie. Aangezien het tankje is voorzien van een peilglas, kunnen eventuele lekkages gemakkelijk worden waargenomen.
- Aan de onderzijde is de conserveringskamer voorzien van olieverdeelringen. Deze hebben tot taak de conserveringsolie gelijkmatig over het zuigerstangoppervlak te verdelen, wanneer de stang naar buiten schuift tijdens het sluiten van de schuif. De vormgeving van deze ringen is experimenteel bepaald (figuur 4.14 detail D).

4.1.6 Assemblage cilinders

Voor de assemblage van de cilinders uit de afzonderlijke onderdelen zijn vier assemblage-opstellingen gerealiseerd, twee bij de Rotterdamsche Droogdok Maatschappij in Rotterdam en twee bij Stork Services in Hengelo. Bij de assemblage van de cilinders uit losse onderdelen vragen twee aspecten bijzondere aandacht:

- De zorgvuldigheid waarmee moet worden gewerkt om het hydraulische systeem zo schoon mogelijk te maken en te houden.
- Het grote gewicht van de in horizontale toestand samen te bouwen delen, omdat in horizontale toestand niet te verwaarlozen vervormingen optreden.

Gezien de grote afmetingen van de samen te stellen delen, kon niet onder laboratorium-omstandigheden worden gewerkt. De onderdelen bleven dan ook zo lang mogelijk in hun verpakking en werden pas kort vóór assemblage gereinigd. Het inwendig reinigen van de cilindermantels geschiedde in verschillende fasen met oplosmiddelen en doeken en met gebruikmaking van een enorme, apart ontwikkelde "pijpenrager". Daarnaast zijn reinheidseisen gesteld aan de toe te leveren hydraulische olie (Esso Nuto H15), gedefinieerd als NAS klasse 7.

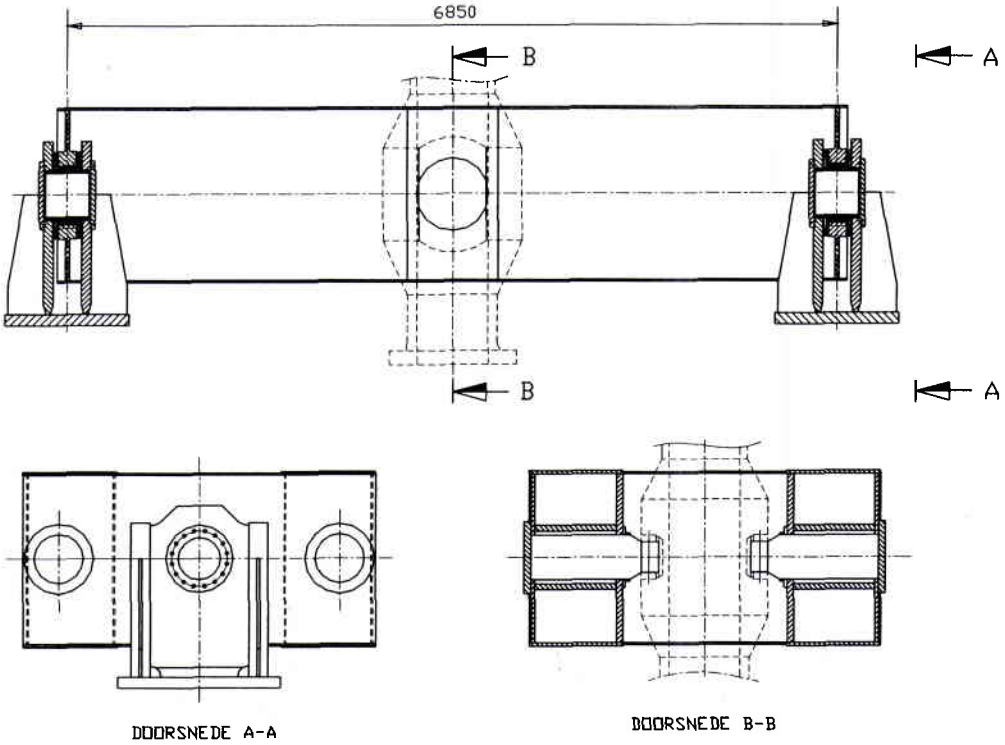
T.b.v. de assemblage van de zuigerstang in de cilinder werd deze laatste goed uitgelijnd gefixeerd t.o.v. een speciale werkvloer met een vlakke rolbaan, waarop transportwagens de zuigerstang zuiver in de aslijn van de cilinder konden bewegen. Het lantaarnstuk met de stangafdichtingen was al op de zuigerstang geschoven. Om te voorkomen dat de doorbuigende stang ging dragen op de kanten van de bronzen bussen van zuiger- en stanggeleiding, zijn deze, overeenkomstig de berekende doorbuiging, gewelfd uitgevoerd.

4.2 Cardanbalk en staalconstructie onderoog

Zettingen van de pijlers, bouwtoleranties van de pijlers en schuiven en de functionele speling van onderdelen maken dat een starre bevestiging van de cilinder aan de pijler en de schuif niet gewenst is. De oplossing die zowel initiële afwijkingen als bewegingen van de onderdelen ten opzichte van elkaar toelaat, is een constructie die rotatie om twee horizontale assen aan pijler en schuif mogelijk maakt. Voor de bevestiging van de cilinder aan de pijler is dit bereikt met een cardanbalk, voor de bevestiging van de cilinder aan de schuif is dit bereikt met een kogelgewrichtslager. De cardanbalk en het onderoog vormen derhalve samen de bevestigingen van de cilinder aan de schuif en aan de pijler. De aanwezigheid van lagers in beide onderdelen is de reden voor hun gemeenschappelijke behandeling in dit hoofdstuk.

4.2.1 Cardanbalk

De cardanbalk verzorgt de scharnierende verbinding van de cilinder op de hamerstukken. De uitvoering van de cardanbalk is zo-



Figuur 4.15 Cardanbalk

danig dat deze scharnierend met de cilindermantel is verbonden (rotatie om de lengte-as van de kering) en dat de cardanbalk met de cardanstoelen scharnierend bevestigd is op de hamerstukken (rotatie haaks op de lengte-as). De cardanbalk heeft voor alle cilindertypen een overspanning van 6,850 m en overbrugt daarmee de schuifsponning. Omdat beide scharnierassen elkaar loodrecht snijden, zijn alle rotatiebewegingen rond het snijpunt mogelijk. De optredende rotaties zijn niet groter dan enkele graden, maar verhinderen van de bewegingen zou leiden tot grote reactiekrachten. Met de keuze van een cardanbalk als scharnierend element wordt het bewegingswerk in hoge mate ongevoelig voor zowel scheefloop van de schuif, als voor toekomstige pijlerzettingen.

De cardanbalk is een samenstel van twee parallelle kokerbalken, die elk aan hun uiteinden onderling verbonden zijn door een schot (figuur 4.15). De toepassing van kokerbalken is nodig in verband met de optredende torsie door de excentrische krachtsinleiding vanuit de cilinder. De krachtsoverdracht van de eindschotten naar de cardanstoelen is centrisch, zodat daar met een enkele, verstijfde plaat kan worden volstaan. De cardanbalk is een geheel gelaste constructie, opgebouwd uit platen van verschillende dikten, ringen en pijpstukken. Gestreefd is naar een grote seriematigheid. In totaal waren voor 7 typen bewegingswerken slechts 4 typen cardanbalken nodig.

Ten behoeve van een gemakkelijke montage en demontage van de scharnierpennen voor de bevestigingen van de cilinder aan de cardanbalk is een niet te krappe passing gekozen (H8/j7). Dit is acceptabel omdat het aantal keren dat de belasting volledig van richting omkeert, beperkt is. Het deksel aan de buitenzijde van de cardanbalk borgt de scharnierpen in axiale richting. De deksels zijn gedimensioneerd op axiale kruipkrachten ter grootte van 70% van de grootste radiale belasting. Ter plaatse van het deksel is voor de vormvastheid van de koker een schot ingelast. Door de aanwezigheid van de scharnierpen is het schot bij de pen onderbroken door een in de koker gelaste buis. Het voordeel hiervan is dat een groot deel van de koker luchtdicht kan worden afgelast, terwijl het deel bij de scharnierpen tot de assemblage van de cardanbalk met de cilinder open kan blijven. De kokers van de cardanbalken zijn inwendig niet geconserveerd; VPI-poeder is toegepast als vochtvanger.

De beide eindschotten vormen het, in constructieve zin gezien, moeilijkste deel van de cardanbalk. Enerzijds moeten ze voldoende sterk en stijf zijn voor het overdragen van de dwarskracht uit de lagering van de cardanstoel op de pijler naar de kokerligger, anderzijds moeten ze nog zó slap zijn dat bij axiale uitzetting van de kokerliggers geen ontoelaatbare spanningen ontstaan. Er mag niet op worden gerekend dat axiale verschuiving van het lager over de lagerpen in de cardanstoel zal plaatsvinden. De hoogst belaste delen zijn dan ook de verstijvingsflenzen van het eindschot. Gerekend is met een temperatuurvariatie van 30°C in de cardanbalk, de uitzetting bedraagt dan ca. 2 mm. Een opgelegde verplaatsing van het hart van het eindschot over 2 mm vraagt met de gekozen constructiewijze minder kracht dan nodig is om het lager bij de ontwerpbelasting (schuif aangedrukt op onderaanslag) axiaal te doen verplaatsen (wrijvingscoëfficiënt 0,10). Beide lagers zijn dan ook als vast lager uitgevoerd.

Voor het bevestigen van het kogelgewrichtslager in het eindschot is een smeedstalen ring van voldoende stijfheid nodig. Teneinde krimpproblemen bij het lassen van deze ring in het eindschot te voorkomen is de ring in radiale zin verjongd tot ongeveer de dikte van het eindschot. Bij het ontwerp is veel aandacht besteed aan de plaats en bereikbaarheid van de lassen. Restspanningen zijn zoveel mogelijk vermeden. Teneinde aan vermoeiingseisen te voldoen, moeten de lassen op de meeste plaatsen volledig zijn aangesloten, waarbij ernaar is gestreefd tweezijdig lassen mogelijk te maken. Door het relatief lage spanningsniveau in de verbinding tussen eindschot en kokers kan daar volstaan worden met een éénzijdig aangebrachte lasverbinding. In de kokers zijn bij het eindschot doorvoeringen aangebracht voor permanente hijspunten, geschikt om de cardanbalk én de cilinder overhoeks te dragen (montage situatie). De hijspunten, uitgevoerd als dikwandige pijp dragen, behalve in het eindschot, ook belasting af aan een hiertoe in de kokers aangebracht tussenschot.

Voor de dimensionering van platen en lasverbindingen in de cardanbalk is vermoeiing maatgevend. Omdat de vermoeiingssterkte van Fe360 gelijk is aan die van Fe510, is gekozen voor Fe360. De grootste bijdrage in de beperking van de levensduur is afkomstig van de cyclus "schuif aandrukken op de onderaanslag - schuif heffen" (beide onder het ontwerpverval). Het hierbij optredende spanningsinterval wordt volgens de oorspronkelijke uitgangspunten in de levensduur ca. 2450 maal doorlopen en deze (hoofd)wisselbelasting is dan ook als uitgangspunt genomen voor de dimensionering op vermoeiing (low cycle fatique berekening). In hoofdstuk 2 is reeds aangegeven dat de latere inzichten (vaker proefsluitingen, maar niet steeds aandrukken van de schuif op de onderaanslag) de situatie, sterktetechnisch gezien, niet hebben verslechterd.

4.2.2 Cardanstoel

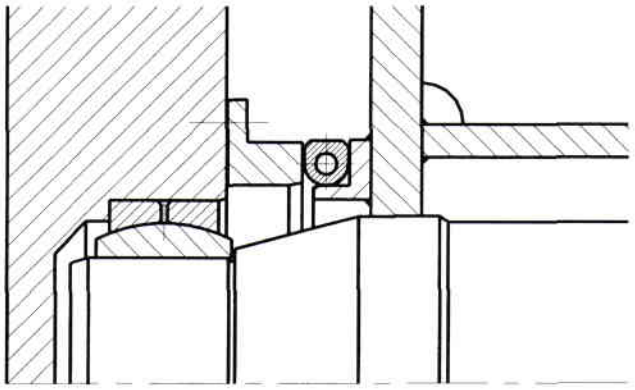
De cardanstoelen verzorgen de scharnierende bevestiging van de cardanbalk op de pijler. De scharnierende verbinding wordt gerealiseerd door de kogelgewrichtslagers (voor initiële afwijkingen en/of vervormingen) in de eindschotten van de cardanbalk. De scharnierpen rust met bronzen bussen in de lijfplaten van de stoel en wordt axiaal opgesloten met een deksel. De deksels zijn, evenals bij de cardanbalk, gedimensioneerd op axiale kruipkrachten ter grootte van 70% van de grootste radiale belasting. Gestreefd is naar een directe krachtsafdracht, waardoor de stoelen relatief licht konden blijven.

Als dwarskracht op de stoelen is rekening gehouden met de axiale uitzettingskrachten van de cardanbalk. Vanwege de wisselende belastingen (trek en druk) vanuit de cardanbalk zijn de stoelen op de hamerstukken voorgespannen. Hiervoor is gebruik gemaakt van ankerstangen die door de gehele lengte van de armen van de hamerstukken lopen. Beide uiteinden van de ankerstangen zijn voorzien van schroefdraad. De in de hamerstukken uitgespaarde spankanalen zijn zó gedimensioneerd dat de ankerstangen, bij de getolereerde scheefstanden voor pijler en hamerstukken, nooit de wand van de spankanalen raken. De stangen zijn thermisch verzinkt. Aan corrosiebescherming is veel aandacht gegeven: de stangen zijn licht gestraald, verwarmd op ca 180°C, waarna een gesinterde epoxycoating van 40 à 70 micron is aangebracht. Vervolgens is een hechtlaag van polyethyleen hechtpoeder aangebracht, waarna de stangen zijn voorzien van een geëxtrudeerde mantel van lage druk PE in een laagdikte van 2 mm. Het uitstekende schroefdraadgedeelte is met vet verpakt en met een kap afgedekt. Het vet onder de kap kan indien nodig via een smeernippel worden nagevuld.

Voor een snelle montage op de kering zijn de cardanstoelen rechtstreeks op te voren afgestelde en ondersabelde platen op de hamerstukken gemonteerd. In de hoogte van de ondersabeling is de laatste correctie op de stand van de hamerstukken aangebracht. Doel daarvan is een verticale cilinderstand in de geopende schuifpositie te realiseren. De staven zijn hydraulisch voorgespannen.

Aan de onderzijde is tussen de moer en het hamerstuk een zware smeedstalen ring aangebracht die rechtstreeks op het beton rust.

De lagering van de cardanbalk en de cardanstoelen moet blijvend beschermd worden tegen indringen van vocht terwijl toch enige rotatie mogelijk moet zijn. Daartoe zijn er drie voorzieningen ter bescherming aangebracht. De kogelgewrichtslagers zelf zijn volledig gevuld met een door de fabrikant geadviseerd barium-zeepvet. Daarnaast is er een relatief lichte, eigen afdichting van het lager aanwezig. Tot slot is er een aparte, fors uitgevoerde, rubberen afdichting ontwikkeld (figuur 4.16). Deze laatste afdichting moet de door de belastingen variërende spleetgrootte tussen cardanbalk en cilinder, en tussen cardanbalk en cardanstoel overbruggen, alsmede enige rotatie toestaan.



Figuur 4.16 Lagerafdichting cardanbalk - cilinder

Voor de lagerafdichting is gekozen voor een hol, rubber profiel, voorzien van een aantal extra afdichtribbels dat de scharnierverbinding geheel omsluit. Teneinde de montage en een latere vervanging te vereenvoudigen is de afdichting, hoewel in ronde vorm gefabriceerd, gedeeld uitgevoerd. Het wordt om de lagering heen geslagen, op maat afgesneden, aan de einden gelijmd en met een trekband gespannen. Vanwege relaxatie moet de trekband na een aantal maanden nagespannen worden. De ruimte binnen de afdichting wordt eveneens gevuld met barium-zeepvet. Bij de scharnierpen tussen cardanbalk en cilinder wordt ook de ruimte rond de pen met vet gevuld. Navullen via de afsluitdeksels is mogelijk. Voor de rubber afdichtingen is gerekend op een levensduur van ca. 10 jaar.

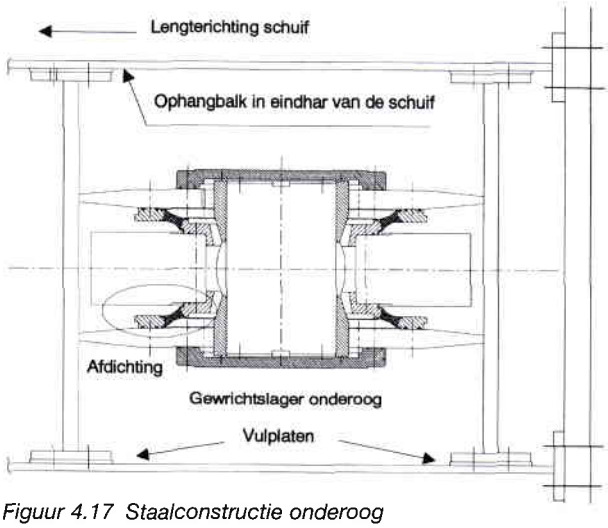
4.2.3 Bevestiging onderoog aan schuif

Voor de verbinding van de zuigerstang aan de schuif is een aparte overgangsconstructie ontworpen. Gekozen is voor de uitvoering van de verbinding met een oog aan de zuigerstang dat, scharnierend om een pen, aan een staalconstructie met wangplaten is verbonden. De zuigerstang is daartoe voorzien van schroefdraad, waarop het onderoog is geschroefd (zie ook 4.1.4.). Ter beperking van de vermoeiingsbelasting van de schroefdraad op de zuigerstang moet de wrijving in de scharnierende verbinding gering zijn, dit is de voornaamste reden om een lager toe te passen. Gekozen is voor een zelfde type lagering als overal in de grote scharnierpunten toegepast, n.l. een kogelgewrichtslager. Ten opzichte van de lagers van de bevestiging van de cilinder aan de cardanbalk en van de cardanbalk op de pijler is het lager van het onderoog groter, aangezien een ongeveer tweemaal zo grote belasting moet worden overgebracht.

Reeds in een vroeg stadium is aandacht geschonken aan de manier waarop, en het tijdstip wanneer, de zuigerstang aan de schuif zou moeten worden verbonden. Overwogen is de schuif te vervoeren met daaraan bevestigde cilinders, neergelegd op de schuif. Montage van de cilinders aan de schuif zou dan in de fabriek kunnen plaatsvinden. Vanwege het extra te hijsen gewicht (voor de hoogste schuif ruim 250 ton extra) is van deze montagemethode afgezien. Er is voor gekozen de schuif eerst met tijdelijke ophanghaken in de kering te plaatsen en daarna de cilinders en cardanbalken aan de hamerstukken en de schuif te monteren. Aan de passing van de pen in de te verbinden delen worden, i.v.m. de dynamische belasting die door deze verbinding wordt geleid, bijzondere eisen gesteld. Een ruime passing zou bij stick-slip van de schuif of onder invloed van wisselende (golf)belastingen tot hoge dynamische belastingen kunnen leiden. Een krappe passing zou tot problemen bij de montage kunnen leiden. Uit het oogpunt van reinheidseisen, conservering en montage werd het derhalve niet verstandig geacht deze verbinding in de ongunstige omstandigheden op de kering uit te voeren.

Daarom is ervoor gekozen een overgangsconstructie te ontwerpen tussen schuif en onderoog en deze reeds bij de assemblage van de cilinder aan het onderoog (onder gunstige fabricagecondities) te monteren. Aangezien deze verbindende staalconstructie door de leverancier van de cilinder wordt bewerkt, kan voor de verbinding aan het onderoog met de gewenste werktuigbouwkundige precisie worden gewerkt en de juiste passing worden verkregen. Bovendien kan bij de montage in de werkplaats reeds de volledige waterdichte afdichting van de lagerconstructie worden gerealiseerd.

De staalconstructie voor de verbinding van het onderoog aan de schuif (figuren 4.12 en 4.17) bestaat uit twee dikke wangplaten die de penverbinding dragen. Ze zijn gelast aan twee platen die in vervalrichting van de kering lopen. Deze platen zijn voorzien van flenzen voor de bevestiging aan de ophangbalken in de eindkoker van de schuif door middel van een boutverbinding. Zie voor een beschrijving van deze bevestiging ook deelnota 3.



Figuur 4.17 Staalconstructie onderoog

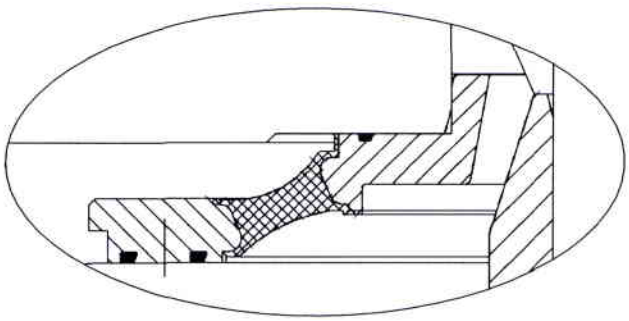
De wangplaten zijn pas bewerkt na het lassen en gloeien van de hele constructie. Het kotteren van de gaten die de smeedstalen bussen voor de penverbinding dragen, heeft in één bewerkingsgang plaatsgevonden. Gezien de lengte/breedte verhouding van het wangplaatgedeelte tussen de bevestigingsplaten was vlakkotteren van de twee naar elkaar gerichte vlakken niet mogelijk.

Alternatief voor vlakkotteren zou een (kostbare) schaaf- of freesbewerking geweest zijn. Het enige doel van de bewerking was echter een oplegvlak te creëren voor de flenzen van de afdichtingsringen. In verband met montage van de afdichtingen moet dit vlak uitsteken boven het omringende wangplaatgedeelte. De oplossing is gevonden door het inlijmen van een ring. De ring is met enkele pennen schuifvast bevestigd en vervolgens als onderdeel van de wangplaat meebewerkt. Vanwege de voorspanning waarmee de afdichtingsringen van het lager op de wangplaten worden bevestigd, komen er in principe slechts drukkrachten op de lijmverbinding. Er is in feite alleen een eis dat de afdichting in stand blijft. Daartoe zijn verouderingsproeven met de lijm uitgevoerd. Ook is de sterkte van de lijmverbinding in verband met de mechanische bewerking beproefd.

De staalconstructie van het onderoog is in de kering met voorspaninjectiebouten bevestigd aan de ophangbalken in de eindkoker van de schuif. Voor de precieze passing zijn vulplaten toegepast. Tussen de flenzen van de wangplaten zijn de ophangbalken loodrecht op hun lengterichting zó slap dat ze ten behoeve van de montage van de vulplaten gemakkelijk iets uit elkaar gedrukt kunnen worden. De gaten in vulplaten en flenzen zijn geboord met een mal die rechtstreeks is afgeleid van de mal waarmee de gaten in de ophangbalken zijn geboord.

Het in het onderoog toegepaste kogelgewrichtslager is van het type met kunststof glijschijven. Er is naar gestreefd de inhoud van de ruimte van het lager zo gering mogelijk te houden, teneinde "ademen" tot een minimum te beperken. Ten gevolge van temperatuurstijging zal de aanwezige lucht willen uitzetten, uit het lager verdwijnen om vervolgens bij temperatuurdaling weer terug te komen en vocht te introduceren. Daarom is de lagerruimte zo goed mogelijk gevuld met vet. De vetvulling (een barium-zeepvet) is gekozen in overleg met de lagerleverancier (SKF). De lagers zelf zijn van een z.g. zelfsmerende constructie; ze behoeven niet te worden nagesmeerd. Het vet dient dan ook uitsluitend als corrosiebescherming van het hardverchroomde kogeloppervlak van het lager en om water buiten te houden.

Bij een gesloten schuif wordt de lagerconstructie in het zeewater ondergedompeld. Gezocht is derhalve naar een water- en luchtdichte afdichting van het kogelgewrichtslager. Deze afdichting is bereikt doordat aan beide zijden van het oog twee nodulair gietijzeren (GGG40) ringen zijn aangebracht, die onderling door aangevulkaniseerd rubber zijn verbonden. Van zo'n paar is de ene ring met voorspanning bevestigd aan het onderoog en de andere aan de wangplaat van de overgangsconstructie (figuur 4.18). De bevestiging zelf is dicht door de toepassing van O-ringen. De O-ringgroeven hebben een binnendiameter die als zwaluwstaart is uitgevoerd, zodat de daarin met enige voorspanning aangebrachte O-ring tijdens montage wordt gefixeerd. Daarbij is tevens aandacht besteed aan de afdichting van de boutverbindingen. De boutverbinding bevindt zich buiten de afgesloten ruimte met het lager. Het rubber tussen de gietijzeren ringen zorgt voor voldoende flexibiliteit om de te verwachten hoekverdraaiingen van dit scharnierpunt te volgen. Smeedstalen bussen in de wangplaten dragen de scharnierpen. Axiaal is de hele constructie geborgd en afgedicht met twee nodulair gietijzeren deksels op de buitenzijde van de wangplaten, waarbij O-ringen voor de waterdichte afdichting zorgen.



Figuur 4.18 Lagerafdichting in het onderoog

4.2.4 Lagers

Per bewegingswerk zijn vijf lagers nodig op de volgende posities:
- Een in het onderoog aan de zuigerstang voor de verbinding van het bewegingswerk met de schuif (A)
- Twee in de cilindermantel t.p.v. de cardanring voor de verbinding tussen cilinder en cardanbalk (B)
- Twee in de cardanbalk voor de verbinding met de cardanstoelen op het hamerstuk (C).

Omdat de belastingen van de lagers B en C weinig verschillen, zijn hiervoor gelijke afmetingen gekozen.
Gekozen is voor kogelgewrichtslagers, waarna de lagerafmetingen zijn bepaald. De voornaamste redenen om voor kogelgewrichtslagers te kiezen zijn:
- de roterende bewegingen van cilinder, cardanbalk en zuigerstang in diverse richtingen zijn weliswaar klein, maar toch te groot voor toepassing van (cilindrische) lagerbussen
- bewegingen in één hoofddraairichting kunnen optreden zonder rotatie van het lager in andere richtingen; hiervoor is de toepassing van zelfinstellende tonlagers minder geschikt
- kogelgewrichtslagers zijn zeer compact, hetgeen besparend werkt op de afmetingen van de behuizingen waarin de lagers worden ondergebracht

Voor de lagers is een uitgebreid programma van eisen geschreven [doc.24]. Reeds in een vroeg stadium van het ontwerp zijn verschillende uitvoeringen van kogelgewrichtslagers vergeleken. Belangrijke keuzecriteria waren:
- minimaal onderhoud
- lange levensduur
- statische wrijvingscoëfficiënt maximaal $\mu = 0{,}15$
- verschil tussen statische en dynamische wrijvingscoëfficiënt niet groter dan 0,05 (ter vermindering van de kans op stick-slip-verschijnselen in het lager)
- kosten

Van de aangeboden typen kogelgewrichtslagers zijn de volgende uitvoeringen vergeleken:
1) Staal op staal; hierbij lopen gehard stalen vlakken op elkaar. Een lage wrijvingscoëfficiënt wordt bereikt door toepassing van een op het oppervlak "gebakken" glijlak van zeer geringe dikte. Dit type lager moet geregeld worden nagesmeerd (onderhoud!), terwijl de glijlak als kwetsbaar element moet worden beschouwd.
2) Brons op staal. Het brons is al dan niet geïmpregneerd met een smeermiddel, maar ook hier is nasmeren nodig. Er bestaat bovendien zorg over oplopen van de wrijvingscoëfficiënt bij verdwijnen van het smeermiddel.
3) Folielager; tussen de buiten- en de binnenring is een dunne glijschaal aangebracht. Deze bestaat uit een glasvezelweefsel of een bronzen gaas waarop een dunne teflonlaag is aangebracht. De glijschaal is geplakt in de buitenring, en het teflon loopt op de hardverchroomde binnenring. De wrijvingscoëfficiënt is zeer laag (0,10), en het lager hoeft niet te worden nagesmeerd. De dunne glijschaal met de teflonvoering is een kwetsbaar element.

Als de teflonlaag is verdwenen (de bewegingen vinden slechts in een klein gebied plaats), is er contact chroom/brons met een veel hogere wrijvingscoëfficiënt en de mogelijkheid op vreten.

4) Kogelgewrichtlager met glijschijven van met glasvezel versterkt polyamide, waaraan PTFE is toegevoegd. De glijschijven zijn inwendig bovendien gewapend met een stalen plaat. Ze zijn opgesloten in een kooi die d.m.v. schroeven en spanhulzen vast met de buitenring van het lager is verbonden. Het loopvlak van de binnenring is hardverchroomd en gepolijst.

Het lagertype 4) is gekozen om de volgende redenen:
- het is een onderhoudsarm lager; smeren met vet is niet nodig
- de wrijvingscoëfficiënt is, mede dankzij de teflon toevoeging, kleiner dan 0,15
- het lager is weinig gevoelig voor slijtage door de robuuste afmetingen van de glijschijven

De lagers zijn van fabriekswege gevuld met een barium-zeepvet. Dit vet beschermt het lager behalve tegen corrosie van de loopvlakken, ook tegen veroudering van de kunststofschijven. Ook de rest van de lagerbehuizing is volgezet met dit vet, teneinde zo weinig mogelijk ruimte over te laten voor zich mogelijk verzamelend condenswater.

Het gedrag onder pulserende belasting, zoals die mag worden verwacht vanuit het stick-slip verschijnsel van de schuif op zijn geleidingen, is apart onderzocht omdat hierover langs rekenkundige weg geen informatie was te verkrijgen. In een proefopstelling bij de fabrikant (SKF, Schweinfurt) zijn enkele schijven onderworpen aan ca. $18x10^6$ belastingwisselingen. Daaruit is gebleken dat de schijven langs de omtrek goed ondersteund moeten zijn, anders bestaat gevaar voor microscheurvorming en het uitbreken van kleine brokjes materiaal. De gekozen kooiconstructie komt aan deze eis tegemoet. Bij inlijmen in de rondom ondersteunde rand is zelfs bij $18x10^6$ belastingwisselingen volgens een onrealistisch zwaar spectrum geen enkele beschadiging langs de omtrek zichtbaar.

Voor de dimensionering van de lagers is de specifieke vlaktedruk in het lager bepalend. De specifieke vlaktedruk is bepaald door de maximale belasting te delen door het geprojecteerde dragend oppervlak van het lager. De vlaktedruk is echter niet gelijkmatig verdeeld en dus moet er ook worden gecontroleerd op de maximaal optredende vlaktedruk. Deze berekening is uitgevoerd volgens de benaderingsmethode, zoals aangegeven in SKF's Kugellager Zeitschrift, nrs. 209 en 211. Daarbij maakt het verschil of de lagers zonder of met speling worden gemonteerd. Hoe groter de speling, des te hoger de maximum vlaktedruk. Voor toekomstig demontage- en montagegemak zijn de lagers met enige speling gemonteerd (H7/g6). Hiermee is bij de berekening van de maximale vlaktedruk rekening gehouden. De veiligheid t.o.v. de van fabriekswege bepaalde toelaatbare referentiewaarde bedraagt 1,5 à 1,6. In tabel 4.1 zijn de aantallen en afmetingen van de lagers weergegeven.

De maximale lagerbelasting en de daaruit voortvloeiende specifieke vlaktedruk, uitgaande van het geprojecteerde oppervlak, zijn op de navolgende wijze berekend en gecombineerd:

Onderooglagers [A]
Verbinding tussen de schuif en de zuigerstang. Lagertype GEC..FSA.
Tijdens sluiten onder stormvloedcondities treedt de maximale belasting op.
F_z = trek/drukkracht per cilinder
$F_w = 0,3 \times F_z$ = additionele belasting door stick-slip in de schuifgeleiding
Factor voor overbelasting 1,2

$F_{max} = (F_z + F_w) \times 1,2$ = maximum lagerbelasting

Vanwege de constructie van het lager kunnen de axiale component F_x en de radiale componenten F_y buiten beschouwing worden gelaten (indien het lager geschikt is voor F_z, is het automatisch geschikt voor de andere componenten; deze worden bepaald door de inwendige wrijving in het lager). In tabel 4.2 zijn de krachten aangegeven voor de verschillende lagertypen in de onderogen.

Cardanlagers [B]
Verbinding tussen de cilindermantel en de cardanbalk Lagertype GEC...FSA.
Tijdens openen na de storm treedt de maximale belasting op.
F_z = trek/drukkracht per cilinder
$F_w = 0,2 \times F_z$
Factor voor overbelasting 1,2

$F_{max} = (F_z/2 + 0,2 \times F_z/2) \times 1,2$ = maximum lagerbelasting
In tabel 4.3 zijn de krachten aangegeven per schuiftype per lager (er zijn twee lagers [B] aanwezig in de verbinding cilindermantel-cardanbalk). De lagers [B] dragen naast het schuifgewicht ook het gewicht van de cilinder. De radiale componenten F_x en de axiale componenten F_y in het lager zijn buiten beschouwing gelaten.

Cardanlagers [C]
Verbinding tussen de cardanbalk en de cardanstoelen. Lagertype GEC...FSA. Tijdens openen na de stormtop treedt de maximale belasting op. Voor de cardanlagers [C] zijn dezelfde lagers toegepast als voor de cardanlagers B, aangezien de belastingen nauwelijks verschillen.

Schuif-type	onderoog [A]		cilinder/cardan [B]		cardan/hamerstuk [C]	
	d x D x B/C	aantal	d x D x B/C	aantal	d x D x B/C	aantal
5900	380 x 520 x 190/160	24	280 x 400 x 155/120	48	280 x 400 x 155/120	48
6900	380 x 520 x 190/160	12	280 x 400 x 155/120	24	280 x 400 x 155/120	24
7900	400 x 540 x 190/160	16	320 x 440 x 160/135	32	320 x 440 x 160/135	32
8900	400 x 540 x 190/160	20	320 x 440 x 160/135	40	320 x 440 x 160/135	40
9900	440 x 600 x 218/185	14	360 x 480 x 160/135	28	360 x 480 x 160/135	28
10900	440 x 600 x 218/185	22	360 x 480 x 160/135	44	360 x 480 x 160/135	44
11900	440 x 600 x 218/185	16	380 x 520 x 190/160	32	380 x 520 x 190/160	32
	Verklaring symbolen	d	Lagerboring [mm]	B	Inbouwbreedte [mm]	
		D	Asdiameter [mm]	C	Breedte op as [mm]	

Tabel 4.1 Lagerafmetingen en -aantal per schuiftype

Schuiftype	F_z (kN)	F_w (kN)	F_{max} (kN)	dynamisch draaggetal C*	specifieke vlakte-druk p (N/mm^2)
5900	2385	716	3721	4150	72
6900	2780	834	4337	4150	84
7900	3115	935	4860	4300	90
8900	3175	953	4954	4300	92
9900	3540	1062	5522	5400	82
10900	3805	1142	5936	5400	88
11900	4085	1226	6373	5400	94

Tabel 4.2 Lagerbelastingen en vlaktedruk voor onderooglagers [A]

Schuiftype	F_z (kN)	F_w (kN)	F_{max} (kN)	dynamisch draaggetal C*	specifieke vlakte-druk p (N/mm^2)
5900	2385	716	3721	4150	72
6900	2780	834	4337	4150	84
7900	3115	935	4860	4300	90
8900	3175	953	4954	4300	92
9900	3540	1062	5522	5400	82
10900	3805	1142	5936	5400	88
11900	4085	1226	6373	5400	94

Tabel 4.3 Lagerbelastingen en vlaktedruk voor cardanlagers [B]

4.3 Hydraulisch systeem

Voor het openen, sluiten, het geopend en gesloten houden van de schuiven wordt gebruik gemaakt van twee hydraulische cilinders per schuif. Voor het bewegen wordt olie onder druk in de cilinders gepompt. Bij het heffen (openen) van de schuiven wordt olie aan de stangzijde toegevoerd en wordt olie aan dekselzijde afgevoerd. Bij het dalen (sluiten) van de schuiven wordt olie aan dekselzijde toegevoerd terwijl tegelijk aan de stangzijde olie gecontroleerd wordt afgevoerd. Voor het geheven houden van de schuiven genereert het schuifgewicht + zuigerstanggewicht (verminderd met de wrijvingskracht) de oliedruk aan stangzijde. Het oliecircuit is dan afgesloten met een terugslagklep. Bij het gesloten houden van de schuif op de onderaanslag zorgt de pompdruk aan dekselzijde voor voldoende oliedruk om de benodigde aandrukkracht te genereren.

De hef- en daalsnelheid van de schuiven wordt gedicteerd vanuit de eisen aan het hydraulisch gedrag van de sluitende en openende kering met betrekking tot het waterstandsverloop op het Oosterscheldebekken. De hoogste schuiven van de kering mogen niet sneller dan in ca. 1 uur gesloten worden. Zijn de schuiven tot de hoogste stand opgetrokken, dan doen ze er ca. 5 kwartier over. Op deze randvoorwaarde zijn de hydraulische bewegingswerken uitgelegd. Een lagere bewegingssnelheid dan de nu gerealiseerde 3 mm/s zou onherroepelijk leiden tot stick-slip verschijnselen in de zuigerstangbeweging.

Voor het sluiten onder de meest ongunstige condities (alarmpeilsluiting) is een oliedruk van 70 bar aan dekselzijde beschikbaar. Deze druk staat ook aan dekselzijde op het moment dat de schuiven gesloten zijn.
In de gesloten stand van de schuiven zal de druk langzaam dalen door inwendige lekkages. Een drukregeling zorgt er dan voor dat de druk aan dekselzijde tussen een waarde van 60 en 30 bar gehandhaafd blijft. De schuiven kunnen daardoor, zelfs bij de meest ongunstige condities, niet onder invloed van verticaal werkende golfbelasting en golfklappen omhoog komen. Een oliedruk van maximaal 190 bar is beschikbaar, indien de schuiven onder verval worden geheven. Het maximale verval waaronder de schuiven nog kunnen worden geheven, bedraagt ca. 2,5 m.

Onderdeel van de ontwerpfilosofie is steeds geweest het beperken van de faalkans van de bewegingswerken. Daarbij is voor het hydraulische systeem de volgende benadering gevolgd:
- extra schakelhandelingen vergroten de faalkans van het systeem
- dubbel uitvoeren van essentiële onderdelen (redundancy) reduceert de faalkans
- betrouwbaar sluiten van de kering is belangrijker dan betrouwbaar openen
- als uiterste maatregel kan nog altijd met de hand worden geschakeld

In het ontwerp is met deze benadering als volgt rekening gehouden:
- Zoveel mogelijk componenten staan bij een geopende schuif in rust in een zodanige stand dat ze niet behoeven te schakelen bij het in gang zetten van de sluitbeweging van de schuif.
- Op elke pijler kan de hydraulische installatie voor het bedienen van een cilinder worden omgeschakeld naar de andere cilinder op die pijler. Elke cilinder beschikt zodoende over twee hydraulische aandrijfunits. Op de zes landhoofdpijlers, waar slechts één cilinder is opgesteld, is als back-up een tweede hydraulische aandrijfunit opgesteld.
- De slangen voor de olietoevoer voor het sluiten van de schuif zijn dubbel uitgevoerd, die voor de olietoevoer voor het openen slechts enkelvoudig.
- Enkele essentiële componenten van het hydraulische systeem kunnen bij storing met de hand worden geschakeld. De toestand van deze essentiële componenten wordt daartoe continu bewaakt, afwijkingen worden gemeld in het centraal bedieningsgebouw.

In navolgende hoofdstukken worden de belangrijkste componenten van het hydraulisch systeem, de hydraulische olie en het hydraulisch schema behandeld. De vereenvoudigde figuren 4.19 en 4.21 geven het hydraulisch systeem weer.

4.3.1 Componenten hydraulisch systeem

Dit hoofdstuk behandelt de belangrijkste componenten van het hydraulisch systeem. Het betreft de aggregaten, de pompen, de kleppen en schuiven, de accumulatoren, de filters, het leidingwerk, de oliereservoirs en de hydraulische olie. In hoofdstuk 4.3.3 zijn in de behandeling van het hydraulisch schema ook enige ondergeschikte componenten opgenomen. In figuur 4.19 zijn de belangrijkste componenten van het hydraulisch systeem aangegeven. De pos.nummering van een aantal componenten die in de tekst is overgenomen, verwijst naar figuur 4.21.

Aggregaten

Voor de werking van het hydraulische systeem zijn aggregaten noodzakelijk. Voor elke cilinder afzonderlijk is daarom een aggregaat opgesteld. Een aggregaat bestaat in hoofdzaak uit een pomp, accumulatoren, kleppen, schuiven, filters en drukschakelaars. Deze componenten zijn zoveel mogelijk in blokmontage uitgevoerd. Verder is er het aansluitend leidingwerk naar de olietank en zijn in de leidingen afsluiters en driewegkranen geplaatst (zie 4.3.3). De aggregaten voor de twee cilinders op een pijler zijn in één container in de verkeerskoker ondergebracht. Hierdoor ontstond de mogelijkheid de aggregaten als elkaars reserve te gebruiken. Voor de enkele cilinders op de zes eindpijlers zijn het aggregaat en zijn reserve samen in één container ondergebracht.

Hoofdpomp en spanpomp

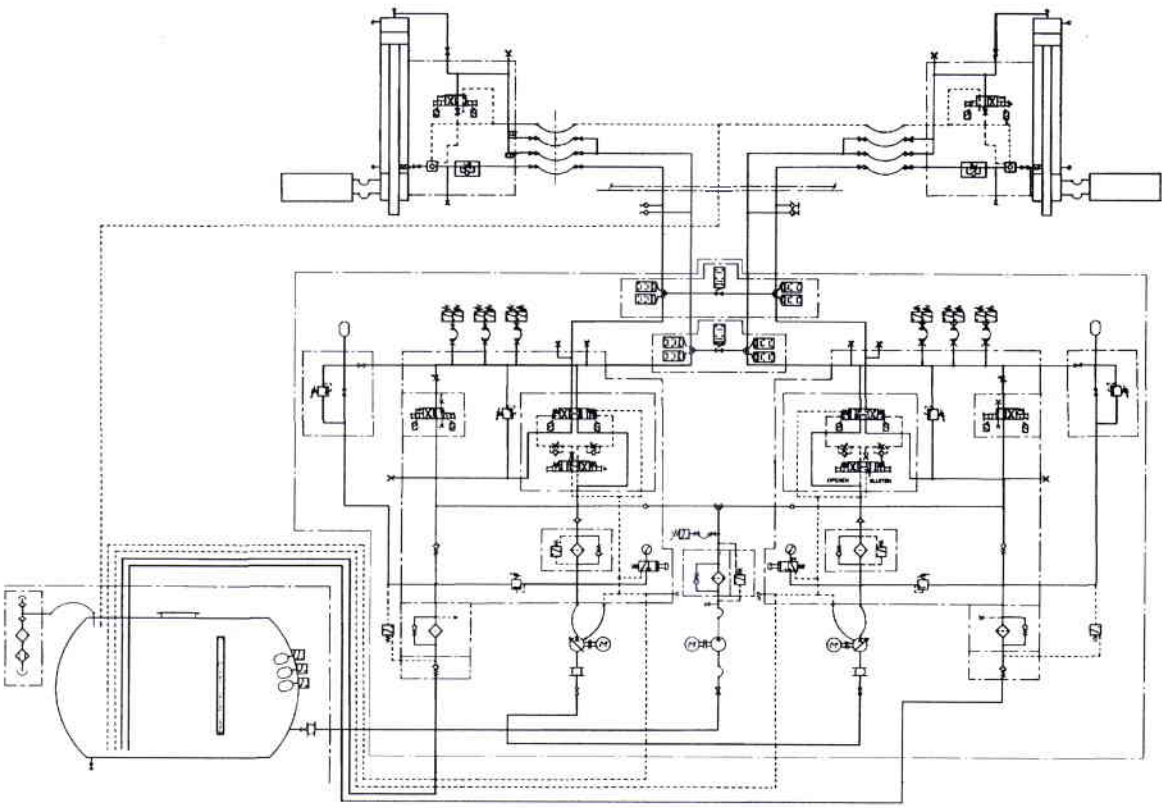
Er is één hoofdpomp per schuifuiteinde (cilinder). Deze kan draaien op 1500 omw/min (schuif sluiten) en op 750 omw/min (schuif openen). De pomp wordt daartoe aangedreven door een twee-toeren-elektromotor. Vanwege het verschil in zuiger- en ringoppervlak van de cilinders resulteert door het verschil in toeren toch een ongeveer gelijke hef- en daalsnelheid van de schuif.

De pompen zijn uitgevoerd als plunjerpompen met vast instelbare opbrengst en geschikt voor een druk van 350 bar (35 MPa). Alle componenten in het hydraulische circuit zijn dan ook minimaal op deze (werk)druk uitgelegd. Dit geldt overigens niet voor de filterbehuizing; deze is uitgelegd op 210 bar.
Er is één spanpomp, ook wel houdpomp genoemd, per pijler. Die spanpomp bedient dus twee cilinders. De spanpomp draait continu op 1500 omw/min en levert daarbij een debiet van 4,5 l/min. De spanpomp onderhoudt permanent een druk van 5 bar in het systeem.

Kleppen en schuiven

De oliestromen worden gestuurd met behulp van kleppen en schuiven. Het merendeel daarvan maakt deel uit van de hydraulische units en is in de hydrauliekcontainer in de verkeerskoker ondergebracht. Slechts de stuurschuif pos.38, het stroomregelventiel pos.34 en de gestuurde terugslagklep pos.35 zijn op de cilinder aangebracht.

Het gewicht van de schuif hangt via de oliekolom onder de zuiger in feite op de gestuurde terugslagklep pos.35. Wordt deze tégen de druk van de oliekolom in opengestuurd, dan passeert olie de klep en daalt de schuif. De snelheid waarmee dat gebeurt, wordt bepaald door de instelling van het stroomregelventiel pos.34, dat alleen bij dalen van de schuif werkzaam is. Bij heffen van de schuif stroomt de olie via een by-pass naar de cilinder. Het opensturen van de gestuurde terugslagklep pos.35 kan slechts plaatsvinden als de stuurschuif pos.38 olie doorlaat, dus geopend is. De stuurschuif pos.38 wordt daarom gesloten als de schuif op een tussen-



Figuur 4.19 Overzicht hydraulisch systeem

stand wordt gestopt. Er is dan zowel boven als onder de zuiger in de cilinder oliedruk aanwezig, zodat de schuif niet onder invloed van golven ongecontroleerd kan bewegen. De stuurschuif pos.38 wordt elektrisch open- of dichtgestuurd en de stand van de schuif wordt door drievoudig uitgevoerde codegevers van de schuifstandbewaking gesignaleerd. De stuurschuif pos.38 kan, als het nodig is, met de hand in de gewenste positie worden gezet.

Centraal in het systeem staat de hoofdstuurschuif pos.15, die de olie van de pomp stopt of doorlaat, en in dit laatste geval ofwel naar dekselzijde, of naar de stangzijde van de cilinder doorlaat. De hoofdstuurschuif heeft dus drie standen, die door drievoudig uitgevoerde standopnemers worden gecontroleerd. De hoofdstuurschuif pos.15 beweegt zo zwaar dat deze zelf hydraulisch moet worden bewogen, waartoe een aparte stuurschuif op de hoofdschuif is gemonteerd. Stroomregelventielen tussen stuurschuif en hoofdschuif zorgen ervoor dat het omschakelen van de hoofdschuif beheerst plaatsvindt.

De stuurschuif pos.17 is normaal open en wordt slechts gesloten als de schuif moet sluiten of gesloten is. Op dat moment zorgt de stuurschuif pos.17 ervoor dat aan dekselzijde een druk van max. 70 bar aanwezig is. De druk van 70 bar wordt gehandhaafd door het overstorten van de olie in de retourleiding over de drukregelklep pos.16. Is stuurschuif pos.17 geopend, dan wordt de druk in de retourleiding bepaald door de voorspandruk van het spanpompsysteem (5 bar), vermeerderd met de drukval over het filtersysteem (max. 4 bar) en over een veerbelaste terugslagklep. De stuurschuif pos.17 wordt elektrisch bediend. In geval van weigering kan de stuurschuif pos.17 met de hand worden bediend.

De maximum druk in het systeem van elke cilinder wordt bewaakt door de instelling van de veiligheidsklep pos.12, die is afgesteld op 190 bar. Aanvullend zijn in het systeem terugslagkleppen (eenrichtingventielen) aangebracht om ervoor te zorgen dat de olie altijd in de gewenste richting stroomt, ongeacht de aanwezige drukken.

De goede werking van nagenoeg alle componenten in het systeem wordt bewaakt door controle op de stand van de componenten. Daardoor is op elk moment na te gaan hoe de stand van de componenten (schuiven, kleppen, veiligheden) is. Ook als hoogste of laagste oliestanden in de oliereservoirs worden bereikt of filters zijn vervuild, wordt dit gesignaleerd. Deze informatie is in het centraal bedieningsgebouw opvraagbaar. In geval van een storing kan dan ook heel gericht informatie worden gegeven welke component in welke installatie het betreft.

Accumulatoren

In het hydraulisch systeem van de installaties is een accumulator (pos.20) opgenomen, behalve bij de grootste cilindertypen; hierbij is de accumulator afwezig. De accumulator zorgt voor een langere standtijd van de voorspandruk wanneer de schuif op de drempel staat. Door inwendige lekkage in de stuurschuiven loopt de oliedruk in het systeem op den duur terug. De pomp moet dan weer worden ingeschakeld om het systeem opnieuw op druk te brengen. Door de afstelling van de drukschakelaars pos.25, 26 en 27 kan de druk afnemen van 60 bar tot 30 bar voordat de pomp moet worden gestart. De accumulatoren zijn uitgerust met een gasgevulde balg, waarvan de druk bij volumeverandering (inwendige olielekkage) veel minder snel afneemt dan die van olie.

De grootte van de accumulator hangt af van de grootte van de cilinder. Hierbij geldt: hoe groter de cilinder, des te kleiner de accumulator. Door de samendrukbaarheid van de olie werkt ook de totale cilinderinhoud namelijk als accumulator. Door de accumulatoren verschillende afmetingen te geven wordt bereikt dat, bij gelijk uitgevoerde installaties, de standtijd van de druk voor alle cilindertypen ongeveer gelijk is. De standtijd is afgeleid van die van de grootste cilinders.

Filters

Teneinde de olie schoon te houden is het systeem voorzien van persfilters. Vervuilingsindicatoren op de filters moeten vervuiling van de filters tijdig signaleren, zodat vervanging van de filterelementen kan plaatsvinden. Door de aanwezigheid van een by-pass bij de filters betekent een dichtgeslagen filter niet dat de werking van het systeem wordt geblokkeerd. Wel wordt in dat geval vervuiling in het systeem gedistribueerd. Doordat de spanpomp 24 uur per dag draait, wordt steeds olie door de filters geperst, waardoor de reinheidsgraad van de olie hoog blijft en zelfs verbetert. Bij het passeren van filters treedt enige drukval op. De filterhuizen vormen in feite de zwakste schakels in het hydraulisch circuit: de maximum werkdruk van de filterhuizen bedraagt 210 bar.

Leidingen

Vijf hydraulische leidingen in de verkeerskokers verbinden de twee hydraulische aggregaten in een hydrauliekcontainer met de twee cilinders op de pijler. Voor elke cilinder een toe- en een afvoerleiding en voor de twee cilinders een gecombineerde lekleiding. Verder zijn er verbindingsleidingen tussen de hydrauliekcontainer en het oliereservoir voor de aan- en afvoer van olie. Bij de zes randpijlers zijn er slechts drie leidingen tussen aggregaat en cilinder: een toevoerleiding, een afvoerleiding en een lekleiding.

In de verkeerskoker is uit het oogpunt van kostenbesparing het leidingwerk uitgevoerd in koolstofstaal en buiten de verkeerskoker in roestvast staal. Alle leidingen zijn geconserveerd. De materiaalovergang ligt binnen de verkeerskoker. Het potentiaalverschil tussen de verschillende materialen veroorzaakt op deze droge plaats geen corrosie. De verkeerskokers zijn voorzien van een doorvoerconstructie voor het leidingwerk ter plaatse van de deur naar de loopbordessen naar de pijlers. Het heeft onderhoudstechnisch grote voordelen dat de hydraulische units in de verkeerskoker zijn ondergebracht. De units zijn goed beschermd en kunnen ook onder slechte weersomstandigheden worden bereikt. Tijdens de bouw van de stormvloedkering was het bovendien gunstig dat het plaatsen van de hydraulische units niet op de toch al overvolle pijler hoefde plaats te vinden. Een gevolg van deze keuze is wel dat er lange leidingen nodig zijn tussen de hydraulische units en de cilinders. Dit leidingwerk ligt grotendeels in de open lucht, reden om een corrosiebestendig materiaal te kiezen (AISI 316 L). Teneinde de kans op lekkage op de verbindingen van het leidingwerk te beperken is dit uitgevoerd met flensverbindingen.

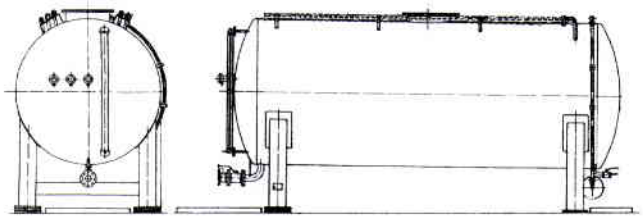
Het vaste leidingwerk garandeert een hoog betrouwbaarheidsniveau. Alleen waar van de vaste leidingen naar de scharnierend opgestelde cilinders wordt overgegaan, zijn slangverbindingen toegepast. De uitgevoerde betrouwbaarheidsanalyse toonde aan dat de slangen een aanzienlijke bijdrage in de storingskans leveren. Om die reden zijn de slangen die bij het sluiten onder hoge druk staan (slangen aan de dekselzijde cilinder), dubbel uitgevoerd. De slangen zijn niet van een slangbreukbeveiliging voorzien, omdat deze juist weer een extra bijdrage levert aan de faalkans van de slangverbinding.

Bij het aanbrengen van het leidingwerk is er rekening mee gehouden dat nog na het gereedkomen van het leidingwerk de bovenbalken geplaatst moesten worden als een van de laatste handelingen in de afbouw van de stormvloedkering. De beschikbare ruimte bij het plaatsen van de bovenbalken maakte het nodig het verbin-

dende leidingwerk tussen de cilinders op de pijlerkoppen en de aggregaten in de verkeerskokers in een smalle band te concentreren. Gekozen is voor een combinatie van dit leidingwerk met de leuningen van de verbindende bordessen tussen pijlerkoppen en verkeerskoker. Door deze keuze was het mogelijk het veel tijd vergende aanbrengen, spoelen en beproeven van het leidingwerk onafhankelijk te maken van het plaatsen van de bovenbalken.

Oliereservoirs

Per twee cilinders op een pijler is één oliereservoir (of tank) opgesteld in de verkeerskoker (figuur 4.20). De inhoud van de tanks is zodanig gekozen dat, terwijl de ene cilinder in de bovenste stand staat, de inhoud van de andere cilinder in de tank kan worden opgenomen. Dit kan van belang zijn bij een onderhoudssituatie. Bij grotere cilinders behoren derhalve grotere tanks. Bij elk van de zes landhoofdpijlers is een kleine tank voor één cilinder geplaatst. Het vullen en ledigen van de olietanks geschiedt met slangen vanaf de parallelweg op de verkeerskoker. De oliestand in de tank kan met peilglazen op de tanks afgelezen worden. De tanks zijn voorzien van vlotterschakelaars voor het signaleren van minimum en maximum olieniveaus.



Figuur 4.20 Oliereservoir

Als de schuiven worden gesloten daalt het olieniveau in de tanks sterk. In de ruimte boven de olie stroomt dan lucht toe. Ook bij temperatuurdaling van de lucht in de tank kan lucht worden aangezogen. De zo aangezogen lucht wordt gedroogd met silicagel luchtdrogers. Daardoor wordt voorkomen dat zich op de duur water in de tank ophoopt en de kwaliteit van de olie achteruit gaat. De silicagelfilters veranderen van kleur als ze verzadigd raken met vocht. Dit moet ter plaatse worden geconstateerd. De filterelementen moeten dan worden uitgewisseld om te worden geregenereerd.

De tanks zijn van roestvast staal (AISI 304). Ze zijn inwendig voorzien van schotten teneinde te bewerkstelligen dat eventueel met de olie meegevoerd vuil kan bezinken en niet wordt meegezogen in de aanzuigleiding naar het aggregaat. De tanks zijn, zoals gebruikelijk, van een aftap voorzien om eventueel aanwezig water te kunnen afvoeren. Het materiaal is aan de buitenzijde gepassiveerd.

4.3.2 Hydraulische olie

Een van de belangrijkste componenten van het hydraulisch systeem is de hydraulische olie. De werking en betrouwbaarheid is mede afhankelijk van het soort olie dat toegepast wordt, alhoewel dit niet is gekwantificeerd is in de faalkansanalyses. Belangrijke eigenschappen voor de keuring van de hydraulische olie zijn:

- viscositeit en viscositeitsindex, ook bij lage temperaturen
- (on)gevoeligheid voor water en kleine hoeveelheden conserveringsolie
- corrosiebescherming en invloed op slangen en afdichtingen
- smerende werking
- filtreerbaarheid en reinheid
- levensduur en bestendigheid tegen veroudering

Er is bij het ontwerp van het hydraulisch systeem van de Oosterscheldekering geen rekening gehouden met bijzondere milieueisen. Bekend was dat minerale hydraulische vloeistoffen niet in het milieu terecht moeten komen i.v.m. moeilijke afbreekbaarheid en toxiciteit van de additieven. Goede milieuvriendelijke alternatieven, waarmee ook voldoende ervaring bestond ten aanzien van bovengenoemde eisen, waren op het moment dat de keuze gemaakt moest worden (1982) nog niet beschikbaar. Er is gekozen voor een hydraulische vloeistof op basis van minerale olie (Esso Nuto H15). Bij deze keuze hebben, naast de prijs, het gedrag bij lage temperatuur van deze olie en de jarenlange ervaringen in andere grote hydraulische systemen (o.a. Haringvlietsluizen) een doorslaggevende rol gespeeld. Om zoveel mogelijk zeker te stellen dat de hydraulische olie niet in het milieu terecht kan komen zijn de volgende maatregelen getroffen:

- het oliereservoir is in de verkeerskoker ondergebracht;
- het leidingwerk is gekoppeld door flensverbindingen;
- op relevante plaatsen zijn lekbakken aangebracht;
- de zuigerstangafdichting is van een extra ring voorzien; bovendien wordt bij de zuigerstangafdichting gecontroleerd op lekkage;

Daarbij geldt dat de toegepaste olie relatief dun is, zodat bij lekkage snel een aanzienlijk deel door verdamping uit het milieu verdwijnt en dat controle op (grote) lekkages mogelijk is door de continue bewaking van het gelijkloopsysteem.

Bij de keuze van de hydraulische olie zijn de eisen waaraan deze dient te voldoen, als volgt gekwantificeerd:

1) Viscositeit:
   m.b.t. de pompen: viscositeit ≥ 20 cSt (bij +30°C, 1 bar)
   m.b.t. de weerstand in het systeem: viscositeit 230 cSt (bij -10°C, 150 bar)
2) Stolpunt:
   Vanwege de buitenopstelling lager dan -25°C
3) Smerend vermogen:
   Rekening te houden met toepassing in axiale plunjerpompen en hydraulische stuurorganen, welke alle van een gebruikelijke constructie zijn, en toepassing in de hydraulische cilinder met een zuiger van GCuSn12 tegen Fe510D en een stang GCuSn12 tegen hardchroom.
   De grootste contactspanningen treden op bij de bronzen geleidebussen bij de horizontale montage en beproeving van de zuigerstangen. De Hertze contactspanning bedraagt dan 120 N/mm2. De anti-slijtage eigenschappen van de hydraulische olie moeten tenminste voldoen aan de eisen gesteld bij de FZG tandwielproef volgens DIN 51534, waarbij druktrap 10 moet worden doorstaan.
4) Corrosiebescherming:
   In verband met de gewenste levensduur van de hydraulische installatie, en met name de hydraulische cilinder, moet de hydraulische olie goede corrosiewerende eigenschappen hebben. Voor het aantonen van de corrosiewerende eigenschappen zijn de koperstriptest volgens ASTM D130 (3 uur bij 130°C) en de roest-ventieltest volgens ASTM D665 (procedure A en B) van toepassing verklaard. Deze eis is extra van belang, omdat er leidingen in het systeem voorkomen die, net als het oliereservoir, niet altijd geheel met olie gevuld zullen zijn. Deze leidingen zijn deels in koolstofstaal, deels in roestvaststaal (AISI 316L) uitgevoerd.
5) Oxidatie-bestendigheid:
   Teneinde een lange levensduur te bereiken is geëist dat de olie in hoge mate ongevoelig is voor oxidatie onder invloed van de aanwezige materialen. De oxidatiebestendigheid is gedefinieerd als in ASTM D943 (min.1000 uur voor toename met

2,0 mg KOH/g). Het betreft de materialen:
- gietbrons GCuSn12
- koolstofstaal Fe510D, nodulair gietijzer GGG40
- roestvaststaal AISI 316 L en AISI 304 L
- hardchroom
- afdichtingen van NBR, Perbunan en Viton
- conserveringsolie

6) Lucht afscheidend vermogen:
In verband met de gewenste hoge compressiemodulus moet het luchtafscheidend vermogen goed zijn. Testeisen volgens ASTM D3427 (bij 50°C max. 2 minuten).
7) Demulgerende eigenschappen:
De olie moet goed demulgeren, zowel met zoet als met zout water. Voorgeschreven is de emulsietest volgens ASTM D1401. De proef wordt uitgevoerd met max. 3 cc gedestilleerd water en max. 3 cc 1% zoutoplossing.
8) Schuimonderdrukkend vermogen:
De olie moet een geringe neiging tot het vormen van schuim hebben en eventueel gevormd schuim moet snel verdwijnen. Voorgeschreven is de schuimtest volgens ASTM D892 (testen op 24°C, op 93,5°C en weer op 24°C). In alle gevallen tendency/stability max. 65/0.
9) Watergehalte:
Bij aflevering moet het watergehalte lager zijn dan 0,01%. Vervolgens moet het watergehalte tijdens bedrijf laag blijven. Dit wordt o.a. nagestreefd door toepassing van een luchtdroger op de tankbeluchting.
10) Aantasting materiaal afdichtingen en slangen:
I.v.m. de gewenste levensduur van de afdichtingen en slangen moet de hydraulische olie een minimale invloed hebben op de gebruikelijke afdichtingsmaterialen (NBR en FPM). Toetsing met de eisen uit DIN 51524.
11) Filtreerbaarheid:
In het hydraulische systeem worden 10 μ-filters toegepast met β=75. De hydraulische olie mag, ook bij herhaald rondpompen door deze filters, zijn eigenschappen niet verliezen.
12) Reinheid:
Bij aflevering moet de olie helder en doorzichtig zijn en mag geen zichtbaar vuil bevatten. De olie moet verder voldoen aan reinheidsklasse 7 volgens NAS 1638.

De olie is afgeleverd in een schone, speciaal voor dit transport ingerichte tankauto, dan wel in nieuwe en schone vaten. Dit geldt zowel voor de leveringen bij de fabrikanten van de hydraulische cilinders en hydraulische aggregaten, als voor de leveringen op de stormvloedkering. De totale levering van hydraulische olie bedroeg ca. 600 m^3.

4.3.3 Hydraulisch schema

Het hydraulisch schema voor de schuifbeweging weerspiegelt de eisen die aan de schuifbeweging worden gesteld. Het schema is opgesteld voor de twee cilinders die zich op één pijler bevinden. In principe heeft elke cilinder een eigen hydraulisch aandrijfsysteem, maar ter vergroting van de betrouwbaarheid zijn de systemen per pijler gekoppeld, zodat bij falen van een systeem aan de ene kant van de pijler, overgeschakeld kan worden op het systeem dat hoort bij de cilinder aan de andere kant van de pijler. Daartoe zijn onderlinge koppelingen via handbedienbare kogelkranen aangebracht tussen de beide systemen op een pijler. Ook maken de beide systemen op een pijler gebruik van een gezamenlijke olietank. De hydrauliek is dus duidelijk per pijler gearrangeerd en niet per schuif.

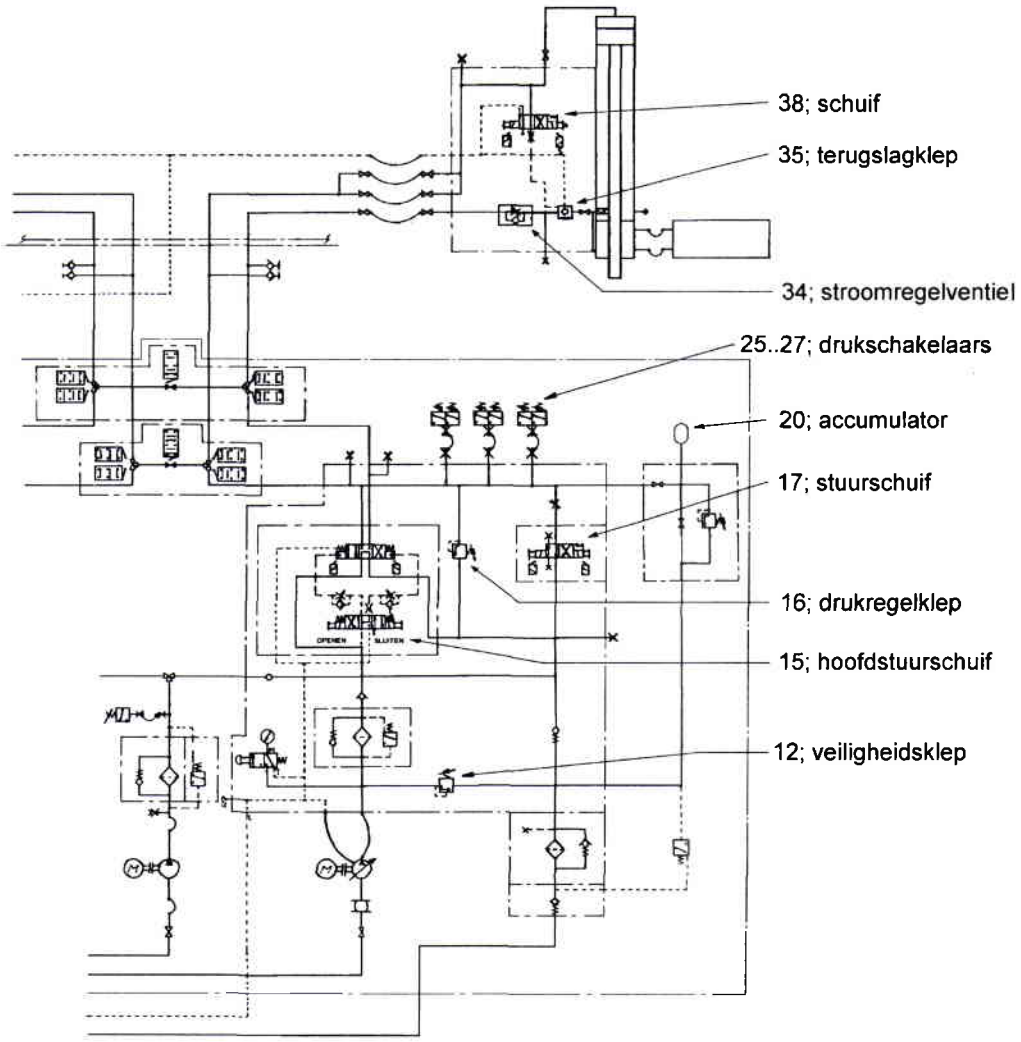
Het hydraulisch schema ligt vast in de tekeningen (figuur 4.19 en 4.21) voor de verschillende cilindertypen. Uit het voorgaande blijkt al dat er een grote interactie en afhankelijkheid bestaat tussen het hydraulisch systeem en de schuifbediening (het besturingssysteem). Hierbij is een grote rol weggelegd voor de gelijkloopinstallatie (zie hoofdstuk 4.4). In de beschrijving van de werking van het hydraulisch systeem worden de volgende situaties onderscheiden:
1. ruststand geopend
2. schuif sluiten
3. schuif gesloten
4. schuif openen
5. omschakelen op de andere unit (sluiten, openen en bij landhoofden)
6. scheefstand tijdens sluiten of openen
7. stoppen tijdens sluiten en openen

Ad 1) Ruststand geopend
De "ruststand geopend" komt gedurende het grootste deel van de tijd voor. In de ruststand worden continu filters, schuiven, drukschakelaars, niveauschakelaars en de stand van de kogelkranen gecontroleerd. Afwijkingen worden uitgeschreven, zodat ze bij het dagelijks onderhoud kunnen worden verholpen.
De drie meetwaardengevers van de gelijkloopinstallatie meten continu en de lokale computerconfiguratie (LCC) vergelijkt continu de hoogte van beide uiteinden van de schuif. In deze situatie is de stand van de stuurschuiven als volgt:
- Pos.15 staat in de middenstand.
- Pos.17 en 38 staan in de stand "geopend". Pos. 38 moet geopend zijn om de schuif te kunnen sluiten, daarom wordt deze schuif ook in de ruststand geopend gehouden. Er is geen aparte schakelhandeling voor dit belangrijke element nodig als de schuif moet zakken. Dit vermindert de faalkans van het systeem.
- Drukschakelaars pos.25, 26 en 27 zijn uitgeschakeld

In de ruststand geopend controleert de LCC de scheefstand en de hoogte van de schuif. Als een correctie nodig is, wordt het commando "schuif heffen" aan het laagste schuifuiteinde gegeven. De procedure is dan:
- Elektromotor wordt bekrachtigd, toerental 750 omw/min.
- Elektromotor van de conserveringsinstallatie wordt bekrachtigd.
- Wanneer na 3 seconden de elektromotor is aangelopen, kan van schuif pos.15 de spoel Y051/Y041 bekrachtigd worden in de stand "openen". De olie stroomt nu naar de stangzijde van de cilinder.
- Tegelijk stroomt van de dekselzijde van de cilinder de olie naar de tank.

Is de schuif weer horizontaal gekomen, dan zullen de meetwaardengevers van de gelijkloopinstallatie een afschakelsignaal geven. De schuif pos.15 wordt dan weer in de middenstand gebracht en de conserveringsinstallatie wordt gestopt. Bij deze correctie vindt bij weigering van de conserveringsinstallatie geen blokkering van de schuifbeweging plaats.

Wordt in rust een scheefstand gemeld en wordt daarvoor de pompinstallatie gestart, dan moet deze scheefstand na 1 minuut ongedaan zijn gemaakt. Is dat niet het geval, dan wordt dit door het besturingssysteem uitgelegd als een scheefstand die door olie toe te voeren niet kan worden gecorrigeerd. In dat geval zal het lage schuifuiteinde gestopt worden en het andere schuifuiteinde bewust naar beneden worden gebracht tot de schuif weer horizontaal hangt. Indien bij lekkage van een cilinder een schuifeinde continu wegzakt zal het andere schuifeinde sprongsgewijs, corrigerend meezakken. Dit is nodig om te voorkomen dat de schuif door een te grote scheefstand klem komt te zitten tussen de pijlers.



Figuur 4.21 Componenten hydraulisch systeem

Bij bewegingen van de zuiger in de cilinder door temperatuurvariaties in de ruststand kan het systeem niet zelf nazuigen vanwege het grote hoogteverschil tussen de olie in de cilinder en in de tank. Daarom wordt door de spanpomp in de leidingen permanent een druk van 5 bar gehandhaafd (d.i. ca. 3 bar bij het cilinderdeksel). Ook tijdens stilstand kan dan nergens in het systeem onderdruk optreden. De spanpomp draait continu en heeft een opbrengst van 4,5 liter/min. De spanpomp wordt aangedreven door de elektromotor met een toerental van 1500 omw/min.

Op deze wijze wordt in de leiding van de pomp tot aan de schuif pos.15 de druk op 5 bar gehouden. Hierdoor wordt voorkomen dat door (inwendige) lekkage over de schuif pos.15 onderdruk ontstaat in de leiding tussen de dekselzijde van de cilinder en de schuif pos.15. In de praktijk heeft het rondpompen van de olie met het spanpompsysteem als bijkomend voordeel dat de olie goed wordt gefilterd. De bewaking van de filters geeft bij het overschrijden van de vervuilinggrens een signaal, maar het blijkt dat de olie na een aantal jaren gebruik veel schoner is geworden dan ze was meteen na het in gebruik stellen van het systeem.

Ad 2) Schuif sluiten

Als de stormvloedkering moet sluiten, wordt ervoor gezorgd dat de motoren van alle hydraulische installaties niet precies gelijk starten maar met korte tijdsintervallen, zodat een grote piekbelasting wordt voorkomen. Vanuit de geopende ruststand verloopt het sluiten van een schuif als volgt (de handelingen zijn voor beide schuifuiteinden identiek):

- Met een geluidssignaal wordt gewaarschuwd voor het inzetten van de beweging.
- Van schuif pos.17 zijn gedurende het sluiten, en met de schuif op de drempel, de poorten P-A gesloten.
- Elektromotor wordt bekrachtigd; het toerental bedraagt 1500 omw/min. Tegelijk wordt ook de elektromotor van de conserveringsinstallatie gestart.
- Olie stroomt over een filter, een terugslagklep, poort P-T van schuif pos.15, een veerbelaste terugslagklep, een filter en veerbelaste terugslagklep terug naar de tank.
- Wanneer na 3 seconden de elektromotoren zijn aangelopen, kan de schuif pos.15 met spoel Y052/042 worden bekrachtigd naar de stand "sluiten".
- Olie stroomt over een filter, een terugslagklep, poorten P-A van schuif pos.15, driewegkogelkraan pos.22 en kogelkranen naar de dekselzijde van de cilinder.
- Olie kan onder druk over de poorten P-A van de schuif pos.38 stromen naar de gestuurde terugslagklep pos.35 waardoor deze geopend wordt. De smoring in de poort P zorgt voor demping bij het opensturen van terugslagklep pos.35.
- Olie stroomt over de gestuurde terugslagklep pos.35, stroomregelklep pos.34, kogelkranen pos.31 en 28, driewegkogelkraan pos.21, poorten B-T van schuif pos.15 terug naar de tank.

Tijdens de neerwaartse beweging ontstaat er een voorspandruk aan de dekselzijde van de cilinder doordat de pomp meer debiet levert dan de stroomregelklep pos.34 aan de stangzijde van de cilinder door kan laten. De druk aan dekselzijde wordt dan bepaald door de drukregelklep pos.16. Wanneer de schuif door een uitwendige kracht korte tijd wordt tegengehouden, kan het volledige debiet van de pomp overstorten over pos.16 zonder overschrijding van de 70 bar omdat de instelling van pos.16 is ingesteld op het volledige pompdebiet. De bewaking op de filters geeft bij het overschrijden van de vervuilinggrens een signaal; er kan echter geen blokkering van de oliestroom optreden dankzij de aangebrachte by-pass. De spanpomp functioneert ook tijdens het sluiten van de schuif. Er is een tegendruk in de retourleiding vanaf de stangzijde van de cilinder als gevolg van weerstanden in het leidingsysteem en t.g.v. een veerbelaste terugslagklep, een filterunit en een tweede veerbelaste terugslagklep, die moeten worden gepasseerd. Er is één spanpomp voor de twee cilinders en bijbehorende hydraulische units op een pijler. Waar slechts één cilinder aanwezig is (bij de zes pijlers aan de randen van de sluitgaten), bedient de spanpomp één cilinder. Uit faalkansoverwegingen zijn de slangverbindingen naar de cilinder dubbel uitgevoerd. Bepalend daarbij waren overwegingen t.a.v. de kans op verstopping, alsmede slangbreuk.

Niveauschakelaars signaleren alleen in de geopende ruststand het olieniveau in de tank. Bij het sluiten zal het olieniveau in de tank namelijk dalen en er dient vooraf zekerheid te zijn dat de volledige sluitbeweging van de schuif kan worden afgemaakt. Mocht de oliestand te laag zijn, dan is er in de rusttoestand alle tijd om voor aanvulling van de oliehoeveelheid te zorgen. Gezien het belang van voldoende olie, is de signalering van de oliestand drievoudig uitgevoerd. Tijdens de sluitbeweging zijn de olieniveaus in de tank alleen ter plaatse te controleren op het peilglas.

De stroomregelklep pos.34 is zodanig afgesteld dat de schuifsnelheid bij dalen ca. 3 mm/s bedraagt. Wanneer tijdens het bewegen een scheefstand van meer dan 15 cm tussen beide schuifuiteinden optreedt, wordt dit gesignaleerd door de meetwaardengevers van de gelijkloopinstallatie. De elektrische installatie zorgt er dan voor dat de cilinder die vóórloopt, stopt. De andere cilinder blijft doorgaan totdat de schuif weer horizontaal is gekomen.

De meetwaardengevers signaleren op grond van de afgelegde weg wanneer het schuifuiteinde de onderaanslag heeft bereikt. Als van beide sets meetwaardengevers op de schuif het signaal "schuif gesloten" is ontvangen, blijven de betreffende units de cilinders nog 30 seconden voeden. Vervolgens wordt schuif pos.15 in de middenstand gebracht. Als voorwaarde voor afschakelen geldt dat de drukschakelaars pos.25, 26 en 27 door de gewenste voorspandruk van 60 bar zijn aangesproken. In het algemeen zal de druk eerst nog 70 bar zijn, maar nadat het systeem tot rust is gekomen, zakt deze druk door inwendige lekkages geleidelijk naar lagere waarden.

Bij normaal bedrijf staan de driewegkogelkranen pos.21 en 22 in een zodanige stand, dat alleen olie voor de betreffende cilinder wordt doorgelaten; de kogelkranen pos.40 en 41 zijn daarbij gesloten.

Ad 3) Schuif gesloten

Tijdens de stand "schuif gesloten" is de stand van de stuurschuiven, kleppen en kogelkranen als volgt:

- schuif pos.15 staat in de middenstand
- schuif pos.17 staat in de stand "gesloten"
- schuif pos.38 staat in de stand "geopend"

In gesloten stand van de schuif rust deze op onderaanslagen op de pijlers. Door verticale golfbelasting op de horizontale liggers van de schuif zou deze van de onderaanslagen los kunnen komen. Om dit te verhinderen wordt er met het bewegingswerk gezorgd voor een verticale aandrukkracht op de onderaanslagen. In de cilinders wordt daartoe een maximum druk van 60 bar aan dekselzijde gehandhaafd. Als gevolg van inwendige lekkages loopt de druk langzaam terug. De druk mag niet dalen onder 30 bar teneinde voldoende voorspankracht te behouden.

In gesloten stand van de schuif controleren de drukschakelaars pos.25, 26 en 27 de druk. Bij het onderschrijden van de minimum druk van 30 bar worden de elektromotoren bekrachtigd en van de schuiven pos.15 wordt Y052/Y042 bekrachtigd in de stand "sluiten". Hierdoor wordt de druk aan de dekselzijde van de cilinder weer op 60 bar gebracht. De drukschakelaars pos.25, 26, en 27 schakelen, bij het overschrijden van de maximum druk van 60 bar, de schuiven pos.15 eerst in de middenstand en daarna worden de elektromotoren afgeschakeld. De accumulatoren pos.20 zorgen voor een langere standtijd van de voorspandruk wanneer de schuif op de drempel staat.

Ad 4) Schuif openen

Beginstand voor het openen van een schuif is de situatie "schuif gesloten". De stand van de stuurschuiven, kleppen en kogelkranen is dan:

- schuif pos.15 staat in de middenstand
- schuif pos.17 staat in de stand "gesloten"
- schuif pos.38 staat in de stand "geopend"

In deze stand hebben de meetwaardengevers de beweging afgeschakeld. De drukschakelaars pos.25, 26 en 27 werken in deze stand. Signalen van afwijkingen worden continu uitgeschreven t.b.v. informatie voor het dagelijks onderhoud. Vanuit de gesloten stand geschiedt het openen van de schuif als volgt:

- Met een geluidssignaal wordt gewaarschuwd voor het inzetten van de beweging.
- Na het geven van het commando "openen" wordt Y053/Y043 van de schuif pos.17 bekrachtigd in de stand "openen".
- De voorspanning van max. 60 bar die aan de dekselzijde van de cilinder aanwezig is, wordt gecontroleerd afgelaten over een smoorklep, poorten P-A, een veerbelaste terugslagklep en een filter.
- Geven de drukschakelaars pos.25, 26 en 27 aan dat de druk is gezakt onder 30 bar, dan wordt, na een nominaal tijdsinterval van 10 seconden, de elektromotor bekrachtigd.

Bij het openen is een groot vermogen nodig. Teneinde de totale aanloopstroom te beperken worden de pompmotoren van de verschillende schuiven met een kort tijdsinterval gestart. De werking is als volgt:

- Na het inschakelen van de elektromotor stroomt de olie over een filter, een terugslagklep, poort P-T van schuif pos.15, een veerbelaste terugslagklep (afgesteld op 5 bar), een filter en een veerbelaste terugslagklep (afgesteld op 0,5 bar) terug naar de tank.
- Wanneer na 3 seconden de elektromotor is aangelopen, kan Y051/Y041 van schuif pos.15 worden bekrachtigd in de stand "openen".
- De olie stroomt nu naar de stangzijde van de cilinder over een filter, een terugslagklep, poort P-B van schuif pos.15, stroomregelklep pos.34 en gestuurde terugslagklep pos.35.
- Tegelijk stroomt olie van de dekselzijde van de cilinder terug naar de tank over poort A-T van schuif pos.15.

Ook tijdens het openen werkt de spanpomp. De spanpomp genereert een druk van 5 bar en staat in verbinding met de leiding tussen de tank en de dekselzijde van de cilinder. Hierdoor is het mogelijk om bij het cilinderdeksel een spandruk van 2 à 3 bar te houden. Ook aan de stangzijde van de cilinder kan geen onderdruk ontstaan doordat (inwendige) lek over de schuif pos.15 verhinderd wordt door de tegendruk van de steeds aanwezige spandruk van 5 bar vóór de schuif pos.15. Bij het openen zorgt de veiligheidsklep pos.12 voor de begrenzing van de druk. Deze druk is voor alle cilinders 190 bar.

De schuifbeweging wordt gestopt door de schuif pos. 15 in de middenstand te brengen. Wanneer tijdens het openen van de schuif een scheefstand optreedt van meer dan 15 cm, stopt de cilinder die voorloopt. De andere cilinder zet de beweging voort totdat de schuif weer horizontaal is gekomen. Vanaf dat moment beweegt ook de stilgezette cilinder weer verder.

Ad 5) Omschakelen op de andere hydraulische unit

Een van de maatregelen om de gewenste beperking van de faalkans van de bewegingswerken te bereiken is de mogelijkheid, in geval van weigeren van een aandrijving van een cilinder, om te schakelen naar de hydraulische unit van de naastgelegen cilinder. Dit is mogelijk doordat de hydraulische units van de cilinders aan weerszijden van een pijler in één ruimte zijn ondergebracht. De installaties zijn fysiek gescheiden (behalve wat het gemeenschappelijk gebruik van de spanpomp betreft), maar kunnen door het handmatig bedienen van kogelkranen op elkaar worden aangesloten. Zie figuur 4.22.

De kogelkranen zijn inwendig zodanig gebalanceerd dat ze, ook wanneer ze onder volle druk staan, nog met de hand kunnen worden omgezet. Van alle kogelkranen is de stand aan de buitenzijde zichtbaar (van belang bij handbedrijf); daarnaast wordt de stand ook elektrisch gesignaleerd.

Weigeren van een hydraulische unit zal gesignaleerd worden door de gelijkloopinstallatie. De weigerende unit moet eerst worden afgesloten van zijn cilinder, én de beweging van de naastgelegen cilinder moet eerst worden afgemaakt, voordat tot omschakelen kan worden overgegaan. De belendende schuif moet dus eerst naar de vooraf ingestelde stand gebracht worden; bij een neerwaartse beweging zal dit in het algemeen de geheel gesloten stand zijn. Daarna kan het omschakelen (figuur 4.22 afbeelding 2) middels de volgende stappen uitgevoerd worden:

- Driewegkogelkraan pos.21 wordt zo geplaatst dat de aansluiting van de falende unit naar de stangzijde van de cilinder wordt geblokkeerd.
- Driewegkogelkraan pos.22 wordt zo geplaatst dat olie van de naastgelegen unit naar de weigerende cilinder kan stromen. Daartoe moet de driewegkogelkraan zo geplaatst worden dat zowel de naastgelegen cilinder als de falende cilinder aan de dekselzijde onder de gewenste druk kan worden gebracht.
- Kogelkraan pos.21 zo plaatsen, dat de naastgelegen (en reeds bewogen) cilinder aangesloten blijft.
- De bij normaal bedrijf gesloten kogelkranen pos.40 en 41 moeten worden geopend.

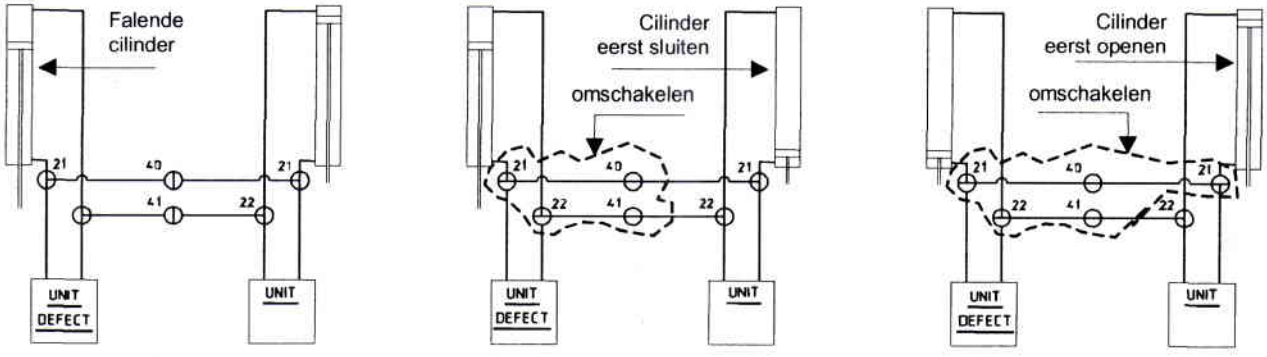
Op de kogelkranen pos.21, 22, 40 en 41 zijn schakelaars aangebracht voor de standsignalering. De kogelkranen moeten met de hand worden bediend. Bij deze instelling krijgen dus beide cilinders de voorgeschreven voorspandruk van 60 bar. Deze situatie wordt ook gehandhaafd tijdens de gesloten stand van de schuiven. Ondertussen zal reparatie van de falende unit moeten plaatsvinden.

De vervangende hydraulische unit reageert op aansturing door de elektrische installatie en de gelijkloopinstallatie van de te bewegen schuif. De conserveringsinstallatie blijft reageren op de bij de betreffende cilinder behorende elektrische installatie.

In geval van weigeren van een unit bij openen, moet eerst de weigerende unit handmatig worden afgesloten van de cilinder die bij die unit hoort. De beweging van de naastliggende schuif moet eerst worden afgemaakt. De betreffende schuif wordt naar de vooraf ingestelde stand gebracht. In het algemeen zal dat de volledig geopende stand zijn. De olietoevoer naar de stangzijde van de reeds geheven cilinder wordt dan geblokkeerd. De dekselzijde behoudt wel de open verbinding met het systeem (5 bar voorspandruk). Daarna kan het omschakelen (figuur 4.23 afbeelding 3) middels de volgende stappen uitgevoerd worden:

- Driewegkogelkranen pos.21 en 22 van de falende unit blokkeren en de verbinding met de naastgelegen cilinder via pos.40 en 41 openen.
- Driewegkogelkraan pos.21 van de naastgelegen unit staat zo geschakeld dat de olie wel naar de cilinder van de falende unit kan stromen, maar niet naar de eigen cilinder.
- De driewegkraan pos.22 van de vervangende unit blijft in de oorspronkelijke stand staan.

De landhoofdpijlers, waar slechts één schuifuiteinde en één cilinder aanwezig is, zijn voorzien van een complete reserve voor de daar aanwezige pompunit. Wanneer de in bedrijf zijnde unit weigert, kan door middel van driewegkogelkranen de reserve unit handmatig worden aangesloten. Gelijktijdig wordt de unit die faalt van de cilinder afgesloten.



1) Normaal bedrijf 2) Sluiten met defecte unit 3) Openen met defecte unit

Figuur 4.22 Omschakelen hydraulische eenheid

Ad 6) Scheefstand tijdens sluiten of openen
Bij een scheefstand van meer dan 15 cm tijdens sluiten wordt de beweging van de voorlopende cilinder gestopt door het sluiten van pos.38. Als gevolg daarvan is er geen stuurdruk meer om de drukgestuurde terugslagklep pos.35 open te houden, waardoor de olieafvoer uit de cilinder aan stangzijde wordt geblokkeerd. Bij het stoppen tijdens sluiten is het van belang dat er voorspanning aan dekselzijde blijft. De verticale golfbelastingen tijdens sluiten kunnen groot zijn. De achtergebleven cilinder loopt ondertussen door. Is de achtergebleven cilinder weer gelijkgekomen met de andere cilinder, dan schakelen de codegevers van de gestopte cilinder de betreffende aandrijfunit weer in door het weer opensturen van pos.38.

Bij een scheefstand van meer dan 15 cm tijdens openen wordt de beweging van de voorlopende cilinder gestopt door schuif pos.15 in de middenstand te plaatsen. Is de achtergebleven cilinder weer gelijkgekomen met de andere cilinder, dan schakelen de codegevers van de gestopte cilinder de betreffende aandrijfunit weer in.

Er is een controle op de tijd die verloopt voor het opheffen van de scheefstand van de schuif. Indien hiervoor meer dan 1 minuut nodig is, kan dit betekenen dat de unit van het achtergebleven schuifuiteinde weigert. Mogelijke oorzaken kunnen zijn:
- elektromotor wordt niet bekrachtigd
- schuif pos.15 staat niet, of niet meer, in de stand "sluiten" of "openen"
- stuurschuif pos.17 is niet gesloten
- schuif pos.38 is gesloten, waardoor pos.35 niet opengestuurd kan worden (dit alleen bij sluiten)

Voornoemde situaties worden elektrisch gesignaleerd en zijn op afstand controleerbaar. Blijkt geen van de oorzaken zich voor te doen, dan wordt geconcludeerd tot slangbreuk. Dit moet ter plaatse worden geverifieerd. De pomp wordt gestopt om verder geen olie verloren te laten gaan. Omzetten van de aandrijving op de andere hydraulische unit is nu niet zinvol; er is sprake van een "weigerende schuif" situatie.

Ad 7) Stoppen tijdens sluiten en openen
Als tijdens sluiten voor korte tijd gestopt moet worden, wordt Y055/Y045 van pos.38 bekrachtigd, waardoor deze sluit. Hierdoor wordt de stuurdruk, die nodig is voor het opensturen van de gestuurde terugslagklep pos.35, weggenomen. De voorspandruk van maximaal 70 bar blijft dan ook bij stilstand aanwezig. Wordt tijdens sluiten voor langere tijd gestopt, dan wordt pos.15 naar de middenstand gestuurd en de pomp uitgeschakeld. De voorspandruk aan dekselzijde wordt dan bewaakt door de drukschakelaars 25, 26 en 27 en blijft daarmee tussen 60 en 30 bar. Pos. 38 blijft open.

Als tijdens openen voor kortere of langere tijd gestopt moet worden, wordt schuif pos.15 in de middenstand gebracht. Hierdoor komt de olietoevoer naar de cilinders tot stilstand, waardoor de beweging "openen" stopt. Om daarna de beweging "openen" weer te vervolgen, moet opnieuw gestart worden.

4.3.4 Beproeving hydraulisch systeem

Van meet af aan is er aandacht besteed aan het dynamisch gedrag van de hydraulische installaties onder invloed van golfbelastingen. De elasticiteit van de lange oliekolommen in de cilinders zou mogelijk sterke drukvariaties in het systeem genereren die een ongewenste beïnvloeding van de stuurelementen (terugslagkleppen) zouden kunnen veroorzaken. Om hierover meer zekerheid te krijgen is een dynamische analyse uitgevoerd waarin de (halve) schuif, de cilinder en het hydraulisch systeem als een meervoudig massa-veer-systeem zijn gemodelleerd. Deze dynamische analyse gaf aan dat geen beïnvloeding zou optreden. Toch is daarnaast een praktijkproef uitgevoerd. Daartoe zijn enkele hydraulische units beproefd in een opstelling met een tandemcilinder: twee cilinders werden met de stangen aan elkaar verbonden, waarbij de ene cilinder werd aangedreven met het te beproeven aggregaat, terwijl de andere cilinder vanuit een extern systeem krachten op de eerste cilinder uitoefende, die vergelijkbaar zijn met de externe belastingen die optreden als een schuif wordt gesloten. Bij deze beproevingen is vastgesteld dat de genoemde beïnvloeding niet optrad.

Fabrieksmatig is elke hydraulische unit na samenbouwen, en voorafgaand aan de montage in de containers, beproefd. Daarbij is met name gelet op de goede werking van alle pompen, motoren en stuurorganen, warmte-ontwikkeling, geluidsniveau, trillingen, lekkages en de samenwerking met de elektrische besturing. Ook het gedrag bij maximum druk en de instelling van de drukschakelaars en drukbeveiligingen daarbij is gecontroleerd. Een meetmotor met een constant en tevoren geijkt slagvolume is gebruikt voor het instellen van de juiste capaciteit van de pompen.

De eerder genoemde proefopstelling met de tandemcilinders is ook gebruikt voor het beproeven van twee compleet geïnstalleerde hydrauliekcontainers en een elektrocontainer. Dit was nodig omdat in de kering de elektrocontainers per sluitgat en de hydrauliekcontainers per pijler zijn geïnstalleerd. Om een beweging van een schuif te simuleren zijn dus de twee containers van de aangrenzende pijlers en de betreffende elektrocontainer van het sluitgat nodig. Bij deze beproeving zijn, naast de normale goede werking, een groot aantal calamiteiten gesimuleerd: variaties in schuifsnelheid, wegzakken van een schuifuiteinde, slangbreuk, maximum scheefstand, etc. Naar aanleiding van de beproevingen hebben nog kleine aanpassingen aan de software van de schuifbesturing plaatsgevonden.

Verdere beproevingen van de hydrauliekcontainers zijn volgens een standaardprotocol afgewerkt. Daarbij zijn steeds twee hydrauliekcontainers beproefd, aangesloten op steeds dezelfde elektrocontainer. Elke container is daarbij volledig beproefd en de componenten zijn op de juiste waarden afgesteld. De elektrocontainers zijn apart en zonder aansluiting op een hydrauliekcontainer beproefd. De samenwerking tussen de 62 elektrocontainers en de 64 hydrauliekcontainers, kon pas op de kering worden gecontroleerd, nadat alle verbindingen waren gelegd.

Na gereedkomen zijn de hydrauliekcontainers (evenals de elektrocontainers), al dan niet via een tussenopslag, vervoerd naar de bouwplaats van de verkeerskokers in Kats, alwaar de containers zijn gemonteerd in de juiste verkeerskoker.

Nadat het leidingwerk op de kering was aangebracht, is het gedeelte tussen de hydrauliekunits en de cilinders zorgvuldig gespoeld met de toe te passen hydraulische olie. Deze olie mocht na het spoelen niet in het systeem worden gelaten. Vervolgens zijn alle aansluitingen van het leidingwerk op de units en de cilinders gerealiseerd, waarna de installaties vanuit tankauto's bovenop de kering zijn gevuld. Bij het vullen is de olie via een aparte filterunit toegevoerd teneinde aan de gestelde reinheidseisen te kunnen voldoen. Nadat ook alle elektrische verbindingen waren aangebracht is elke schuifbeweging beproefd, waarbij met name aandacht is besteed aan de afstelling van de schuifsnelheid en de initiële gelijkloop. Als gevolg van de nauwkeurige afstelling hoeft het gelijkloopsysteem zelden of nooit de schuifbewegingen te corrigeren.

4.4 Gelijkloopinstallatie

De koppeling tussen de beide uiteinden van een schuif bestaat uit de gelijkloopinstallatie. Dit systeem zorgt dat de positie van de zuigerstang van de cilinders aan beide schuifuiteinden binnen bepaalde, vrij nauwe, grenzen op elkaar afgestemd blijft. De gelijkloopinstallatie meet de hoogte van beide schuifuiteinden en vergelijkt de meetresultaten. Als hoogte-afwijking tussen hijspunten wordt bij hefdeuren veelal een waarde kleiner dan 1% van de overspanning aangehouden. Vanwege de grote overspanning van de schuiven van de Oosterscheldekering is de uiterste scheefloop op 0,5% gesteld. Dit in verband met onzekerheden in het ontwerp (plaatsingsnauwkeurigheid pijlers, scheefstand pijlers, benodigde ruimte voor het opnemen van eventuele latere zettingen). Want ondanks het feit dat een vrij brede schuifgeleiding is gekozen, is er weinig reserve aanwezig om scheefloop van de schuiven te kunnen opvangen. Tijdens normaal bedrijf mag de scheefstand, afhankelijk van het schuiftype, niet meer bedragen dan 0,2% à 0,35% van de overspanning (hoogteverschil 9 à 15 cm). Bij grotere optredende scheefstanden moet de stand van de schuif gecorrigeerd worden. Dit gebeurt door bij sluiten de afvoer en bij openen de toevoer naar de cilinder van het voorlopende schuifuiteinde te stoppen.

Deze eisen zijn evenwel zo krap, dat overschrijding niet onder alle omstandigheden te vermijden is. Grotere scheefstanden kunnen ertoe leiden dat de schuif met zijn kunststof aanslagen over de boutgaten van de bevestiging van de aluminiumbronzen geleiding gaat lopen, hetgeen kan leiden tot beschadiging van de aanslagen. Bij nog grotere scheefstanden loopt een deel van de schuifaanslag van de bronzen geleiding af, waardoor de contactdrukken in het resterende deel groter worden. Uiteindelijk zal elk schuiftype (behoudens het laagste) met de boven- respectievelijk de onderkant van de eindkokers de pijlers kunnen raken bij een scheefstand die, afhankelijk van het schuiftype, oploopt van één tot enkele meters. Alleen het laagste schuiftype kan niet op deze wijze vastlopen tussen de pijlers.

4.4.1 Keuze type gelijkloopinstallatie

In de ontwerpfase van de bewegingswerken is de beslissing genomen geen gelijkloopinstallatie te bouwen die werkt middels een fysieke koppeling van beide schuifuiteinden. Een fysieke koppeling, o.a. mogelijk met kabels, zou onder de extreme stormvloedcondities de faalkans van de bewegingswerken vergroten. Daarom is bij de keuze van de gelijkloopregeling slechts onderscheid gemaakt tussen twee methoden die beide op afstand werken, zijnde:

- waterpasmeting van de schuif
- afzonderlijke meting van de schuifuiteinden

De methode van waterpasmeting wordt toegepast bij een aantal grote hefdeuren van schutsluizen. Gewerkt wordt met een stel elektronische waterpassen die op de hefdeur zijn gemonteerd. Wanneer een zekere scheefstand wordt overschreden, wordt een contact gemaakt of verbroken. Dit signaal wordt via een elektrische kabel naar één van de heftorens overgebracht. Afhankelijk van de richting van de scheefstand wordt het veld van de voorlopende (gelijkstroom)aandrijving verzwakt, waardoor het toerental afneemt, totdat weer een horizontale stand van de deur wordt bereikt. De nauwkeurigheid bedraagt circa 0,4% en werkt bij hefdeuren van schutsluizen in het algemeen tot tevredenheid. Uit het signaal kan niet de hefhoogte van de hefdeur worden afgeleid. Daarvoor is een aanvullende meting nodig. Voor de schuiven van de Oosterscheldekering is van waterpasmeting afgezien om de volgende redenen:

- nauwkeurigheid waarschijnlijk onvoldoende
- signaaloverdracht via een elektrische kabel bezwaarlijk
- geen indicatie over de hefhoogte van de schuif
- geen combinatie met hoogteregeling mogelijk

Vanwege de bezwaren die kleven aan waterpasmeting is gekozen is voor een methode waarbij de stand van de schuifuiteinden afzonderlijk gemeten en onderling vergeleken wordt. Bij deze methode is dus zowel informatie over de hefhoogte van de schuif als over scheefloop beschikbaar. Ten tijde van de keuze voor afzonderlijke meting van de schuifuiteinden was nog niet bekend of de bewegingswerken mechanisch, dan wel hydraulisch uitgevoerd zouden worden. De wezenlijk verschillende eigenschappen van een mechanisch en een hydraulisch bewegingswerk maakt dat de uitvoering van de gelijkloopinstallatie hiervoor ook zal verschillen.

Bij een mechanisch bewegingswerk met tandheugels is de heugel vrijwel spelingsloos verbonden aan de schuif. Door de stand van de heugel te meten (b.v. tanden tellen), is de stand van het betreffende schuifuiteinde bekend. Regeling vindt plaats door in te grijpen in de elektrische aandrijving wanneer het verschil in hefhoogte van de beide schuifuiteinden een vooraf ingestelde waarde overschrijdt. Omdat de heugel een vast element vormt tussen schuif en aandrijving, kan voor de gelijkloop ook gebruik gemaakt worden van het principe van de elektrische as tussen de aandrijvingen van de beide schuifuiteinden. Wel moet voor de meting van de hefhoogte nog een aparte voorziening worden getroffen. De aandrijving van de schuifuiteinden wordt dan via een overbrenging op een codegever aangesloten, die de schuifstand meteen digitaliseert ten behoeve van verwerking in het besturingssysteem.

Bij een hydraulisch bewegingswerk bestaat er geen vaste verbinding tussen schuif- en cilinderophanging (pijler), aangezien zich tussen zuigerstang (verbonden aan de schuif) en de cilinder (verbonden aan de pijler) altijd nog een oliekolom bevindt. Voor een goede schuifstandmeting moet dan ook rechtstreeks de positie van het schuifuiteinde óf van de zuigerstang worden genomen. Overwogen is aan elke schuifuiteinde een heugel te bevestigen en deze langs de cilinder te geleiden. De heugelstand geeft dan de schuifstand aan en de meting kan plaatsvinden door tanden te tellen of (bij voorkeur) door de aandrijving van een of meer codegevers, die via een rondsel met de heugel in contact staan. De heugel wordt vooral bij de hoge schuiven erg lang en tamelijk kwetsbaar voor vervuiling en corrosie. Maatregelen ter verbetering leiden tot omvangrijke en kostbare constructies.

Een meer conventionele wijze om schuifstanden te meten is met een op een trommel gewikkelde staalkabel die met de schuif verbonden is en strak wordt gehouden. Verplaatsing van de schuif wordt zodoende omgezet in rotatie van de trommel waarop de kabel is gewikkeld. De roterende trommel drijft één of meer codegevers aan die meteen een digitaal signaal voor verdere verwerking afgeven. Een beschermde ligging van de staalkabel in de pijlersponning is gunstig om de gevoeligheid voor wind en golven te beperken. Er zijn berekeningen uitgevoerd met betrekking tot de gevoeligheid voor windbelasting en gevolgen van kabeluitwijkingen op de nauwkeurigheid van de meting [25].

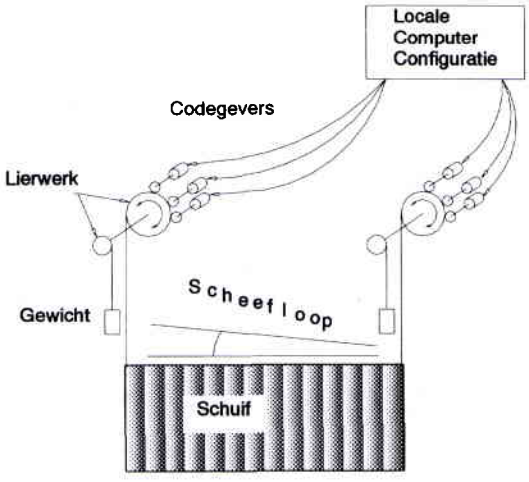
Als alternatieve meetmethode voor een hydraulisch bewegingswerk is nagegaan of het mogelijk is de zuigerstand op te nemen door een echometing in de cilinder tussen cilinderdeksel en zuiger. In het cilinderdeksel is daartoe een microfoon geïnstalleerd die een akoestisch signaal uitzendt. De zuiger kaatst dit signaal terug en de tijd die verloopt tussen zenden en ontvangen is een maat voor de zuigerstand. De methode is goedkoop en door het ontbreken

van beweegbare delen weinig kwetsbaar. De onnauwkeurigheid van deze meting is echter 1% van de afstand (bij de hoge schuiven oplopend tot 13,2 cm), hetgeen onvoldoende is. Bovendien is de looptijd van een geluidsgolf in de cilinder afhankelijk van de oliedruk die op dat moment heerst en dient daar dus nog voor gecorrigeerd te worden. De methode van echometing is dan ook niet verder uitgewerkt.

4.4.2 Beschrijving gelijkloopinstallatie

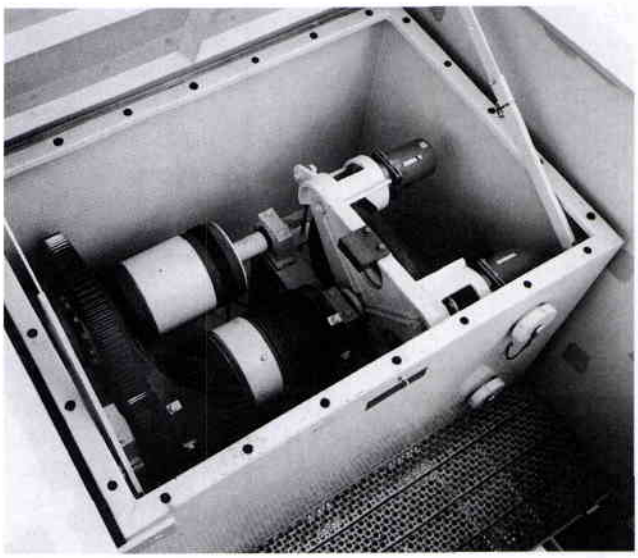
Het principe van de gelijkloopinstallatie is getoond in figuur 4.23, de uitvoering ervan in de figuur 4.24. Aan een uithouder aan de eindkoker van de schuif zijn onderin de schuif twee staalkabels Ø8 mm bevestigd. Het mechanisme van de gelijkloopinstallatie, de trommel en de codegevers, is in een corrosievast stalen kast (materiaal AISI 316L) ondergebracht. De kast is bevestigd op enkele steunen binnen de langsliggers van de cardanbalk aan de Noordzeezijde van de cilinder.

De kabels zijn op één trommel gewikkeld en zijn elkaars reserve, zodat bij onverhoopt breken van één van de kabels de andere nog blijft zorgen voor de schuifstandsignalering. Op een tweede trommel zijn twee identieke kabels gewikkeld, deze zijn aan een contragewicht bevestigd. De twee trommels zijn via een tandwielverbrenging gekoppeld. Het contragewicht spant op deze wijze de kabels die aan de schuif zijn bevestigd. Bij een volledige slag van de schuif behoort een gereduceerde slag van het contragewicht. De kabels lopen vanaf de gelijkloopinstallatie via omloopschijven onder het onderste bordes omlaag het water in naar de uithouder onderin de schuif. Hoewel ze zoveel mogelijk in de pijlersponning zijn aangebracht, kunnen ze beïnvloed worden door de stroming in het water en door golven, hetgeen kan leiden tot aanzienlijke uitwijkingen van de kabels, waardoor mogelijk een verkeerd signaal naar de gelijkloopinstallatie wordt afgegeven. Daarom zijn over dit gedeelte open kunststof pijpen rond de kabels aangebracht.



Figuur 4.23 Gelijkloopinstallatie principe

Omdat corrosie van de onderdelen van de gelijkloopinstallatie de meest waarschijnlijke oorzaak van falen zal zijn, is gezocht naar weinig corrosiegevoelige materialen. Alle lagerpunten zijn voorzien van kunststof lagerbussen, de astappen zijn vernikkeld, de tandwielen zijn uitgevoerd in kunststof (hardweefsel vlgs BS 2572-1976 F2/1 zonder grafiet) en de rondsels in brons (materiaal GCuSn12 vlgs NEN6025).



Figuur 4.24 Gelijkloopinstallatie uitvoering

De rotatie van de trommelas wordt gebruikt voor de aandrijving van de codegevers. Uit bedrijfszekerheids-overwegingen zijn er drie codegevers in elke gelijkloopinstallatie toegepast. De codegevers zetten de rotatie om in een digitaal signaal dat via kabels naar de LCC wordt gevoerd ter verdere verwerking. Zie voor een verdere beschrijving deelnota 6.

4.5 Conserveringssysteem zuigerstangen

De zuigerstangen hebben een bedekking van elektrolytisch aangebracht nikkel en een toplaag van elektrolytisch aangebracht chroom. Ervaring bij andere waterstaatswerken heeft geleerd dat een chroomlaag van een zuigerstang die zich in een zilte omgeving bevindt, en vaak langdurig stilstaat, door de chloriden uit het milieu wordt aangetast. Er is dan ook voor gekozen de zuigerstangen, wanneer ze in uitgeschoven toestand zijn, aanvullend tegen de chloride-aantasting te beschermen. Naast het hydraulische systeem voor de schuifbeweging, is er daarom een speciaal conserveringssysteem voor de zuigerstang ontwikkeld.

Daarbij stond een systeem voor ogen zoals reeds was toegepast bij de plunjers van de bewegingswerken van de Haringvlietsluizen. Daar wordt een paraffinehoudend aardolieproduct, tezamen met een oplosmiddel, bij het uitbewegen op het oppervlak van de plunjers gesproeid. Door verdamping van het oplosmiddel ontstaat al snel een goed hechtende, dunne waslaag op de plunjers. Voor het Haringvliet is dit een afdoende oplossing gebleken als bescherming tegen corrosie. Door de opstelling in een machineruimte zijn de omstandigheden daar echter veel gunstiger dan bij de Oosterscheldekering.

Daarnaast is van het Haringvliet geleerd dat het toegepaste oplosmiddel in staat is nitrilrubber van afdichtingen aan te tasten. Als het rubber (lokaal) uit de afdichtingen verdwijnt, ontstaan in het vezelmateriaal van de afdichtingen corrosieve bijproducten die op den duur blijken te leiden tot aantasting van het plunjeroppervlak ter plaatse van de afdichtingen. Ook kan het vezelmateriaal gemakkelijk zout uit de omgeving opnemen. De zoutconcentratie op het stangoppervlak is dan vele malen groter dan die in zeewater.

4.5.1 Ontwerpuitgangspunten en conserveringsmiddel

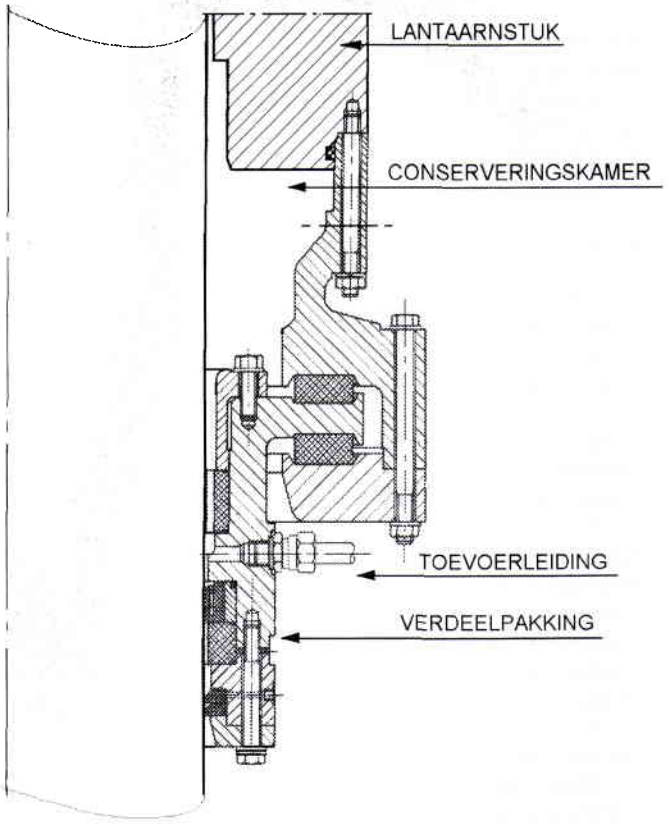
De ontwerpuitgangspunten voor het conserveringssysteem kunnen als volgt worden omschreven:

- Bij de uitgaande slag van de zuigerstang brengt het systeem een laag conserveringsmiddel aan, die niet dikker is dan strikt nodig voor de corrosiewerende bescherming. De laag moet binnen 20 minuten een zodanig mechanische sterkte bereiken dat ze niet kan worden weggespoeld door langsstromend water en golven.
- De laag moet bij de ingaande slag van de zuigerstang weer geheel verwijderd worden alvorens het betreffende stanggedeelte in contact komt met de hydraulische olie in de cilinder.

Als conserveringsmiddel voor de Oosterscheldekering is aanvankelijk gekozen voor een beschermlaag bestaande uit Esso Rust-Ban 397. Dit middel wordt gebruikt om stalen onderdelen tijdelijk tegen corrosie te beschermen. Rust-Ban is *vochtverdringend* en hecht zich uitstekend op metalen oppervlakken. De corrosiewerende eigenschappen zijn beproefd op proefstaven uit koolstofstaal (2C35) met een oppervlakteruwheid gelijk aan die van de verchroomde zuigerstangen. Aan wind en water blootgesteld in een proefopstelling in de Oosterschelde vertoonden de proefstaven pas na 100 dagen expositie de eerste minuscule roestplekjes.

4.5.2 Werking en onderdelen conserveringsinstallatie

De conserveringsvloeistof bevindt zich in een onder het lantaarnstuk rond de zuigerstang gemonteerde conserveringskamer (figuur 4.25). De Rustban werd daarin gebracht en rondgepompt vanuit een aparte conserveringsinstallatie, die in een roestvaststalen kast ter hoogte van het lantaarnstuk op het hamerstuk is aangebracht en die met leidingen en slangen met de kamer is verbonden. De installatie bestaat in hoofdzaak uit een tandradpomp, die met een druk van 3 bar de vloeistof door de kamer rondpompt en een filter om het vuil uit de vloeistof te halen. Als onderdeel van de installatie is een tank met vloeistof aanwezig. De inhoud van tank plus kamer bedraagt, afhankelijk van het cilindertype, 90 tot 185 liter. Het pompdebiet is voor alle installaties gelijk, n.l. 4,8 liter/minuut.



Figuur 4.25 Conserveringsinstallatie

Rubberen doseerpakkingen en verdeelringen onderin de conserveringskamer moesten bij het uitschuiven van de zuigerstang zorgen voor een laag Rustban van een juiste en gelijkmatige dikte. Schoof de zuigerstang weer naar binnen bij het heffen van de schuif, dan werd de ingedroogde Rustban in de kamer omspoeld door daarin aanwezige dunne Rustban en ging weer in oplossing. Alle rubberringen in de kamer die met Rust-Ban in aanraking komen, zijn uitgevoerd in Viton, *dat niet* wordt aangetast door het oplosmiddel in de Rust-Ban 397. Deze afdichtingsringen bevatten ook geen weefsel, zodat opeenhoping van chloride niet kan optreden.

Voor het aanbrengen van een gelijkmatige laag Rust-Ban op de zuigerstang is het nodig dat deze gecentreerd blijft t.o.v. de doseerpakking en de verdeelring. Dit is niet zonder meer het geval, de zuigerstang wordt in het lantaarnstuk op een zodanige wijze geleid dat doorbuiging van de stang niet wordt verhinderd. De doseerpakking en de verdeelring bevinden zich ca. 0,75 m onder dit geleidingspunt. Dat betekent dat er onder invloed van de doorbuiging van de stang een hoekverdraaiing bij de stanggeleiding aanwezig is, die resulteert in een zijdelingse verplaatsing van de doseerpakking van 0,5 cm. Dit is meer dan deze pakking en ring kunnen volgen. Om deze reden bestaat de conserveringskamer uit twee delen, het bovenste deel is met een voorspanboutverbinding star bevestigd aan het lantaarnstuk, terwijl het onderste deel verschuifbaar aan het bovenste deel is bevestigd. Het onderste deel wordt met een eigen bronzen bus geleid t.o.v. de zuigerstang en draagt de doseerpakking en verdeelring. Door de geringe afstand tussen deze pakkingen en de geleidingsbus is ook bij doorbuiging van de zuigerstang, de optredende excentriciteit van de pakkingen t.o.v. de stang gering.

Tijdens de montagefase van de cilinders op de kering zijn, afwijkend van de ontwerpuitgangspunten, situaties opgetreden waarbij de conserveringskamers langdurig zonder Rust-Ban aan weer en wind hebben blootgestaan, terwijl de zuigerstangen ook niet regelmatig bewogen konden worden. Onder deze omstandigheden kon zich water in de conserveringskamers verzamelen, dat bovendien hoge zoutconcentraties vertoonde (Cl^--ionen). Daarbij is gebleken dat als gevolg van potentiaalverschillen tussen verchroomde zuigerstangen en bronzen bussen in de conserveringskamers ter plaatse van de *contactpunten* aantasting van het zuigeroppervlak optrad. Nadat dit was ontdekt, is besloten de bronzen bussen te vervangen door kunststofbussen (materiaal UHMPE). Door deze beslissing is het systeem ook voor de toekomst minder gevoelig gemaakt voor situaties, waarin zich water en chloride-ionen in de conserveringskamers zouden verzamelen.

Er is gestreefd naar een zeer zorgvuldige scheiding tussen de conserveringsvloeistof en de hydraulische olie van het bewegingswerken. De reden voor de scheiding is de zorg dat:

- harde restjes Rust-Ban in de hydraulische olie een verstoppingsgevaar voor kleppen en schuiven vormen
- het oplosmiddel van de Rust-Ban tast de nitrilrubber-afdichtingen in het hydraulische circuit aan.

Om deze reden is er een "slot" aangebracht tussen de conserveringskamer en de cilinder, bestaande uit een met hydraulische olie gevulde ruimte rond de zuigerstang. De druk in deze ruimte is nagenoeg atmosferisch. Een standtankje, buiten de cilinder aangebracht, houdt deze ruimte gevuld. Eventueel door de stangafdichting lekkende hydraulische olie kan er langs dit "slot" ontwijken en opgevangen worden. Een dergelijke lekkage kan worden afgelezen van de peilschaal op het tankje. De olie smeert tevens de stanggeleiding en de pakking bij ingaande zuigerslag teneinde stick-slip zoveel mogelijk te voorkomen. Eventueel lekkende Rust-Ban kan zich ook in dit tankje verzamelen, dat trouwens zo nodig gemakkelijk kan worden gespoeld bij een onderhoudsbeurt.

4.5.3 Pompsysteem conserveringsinstallatie

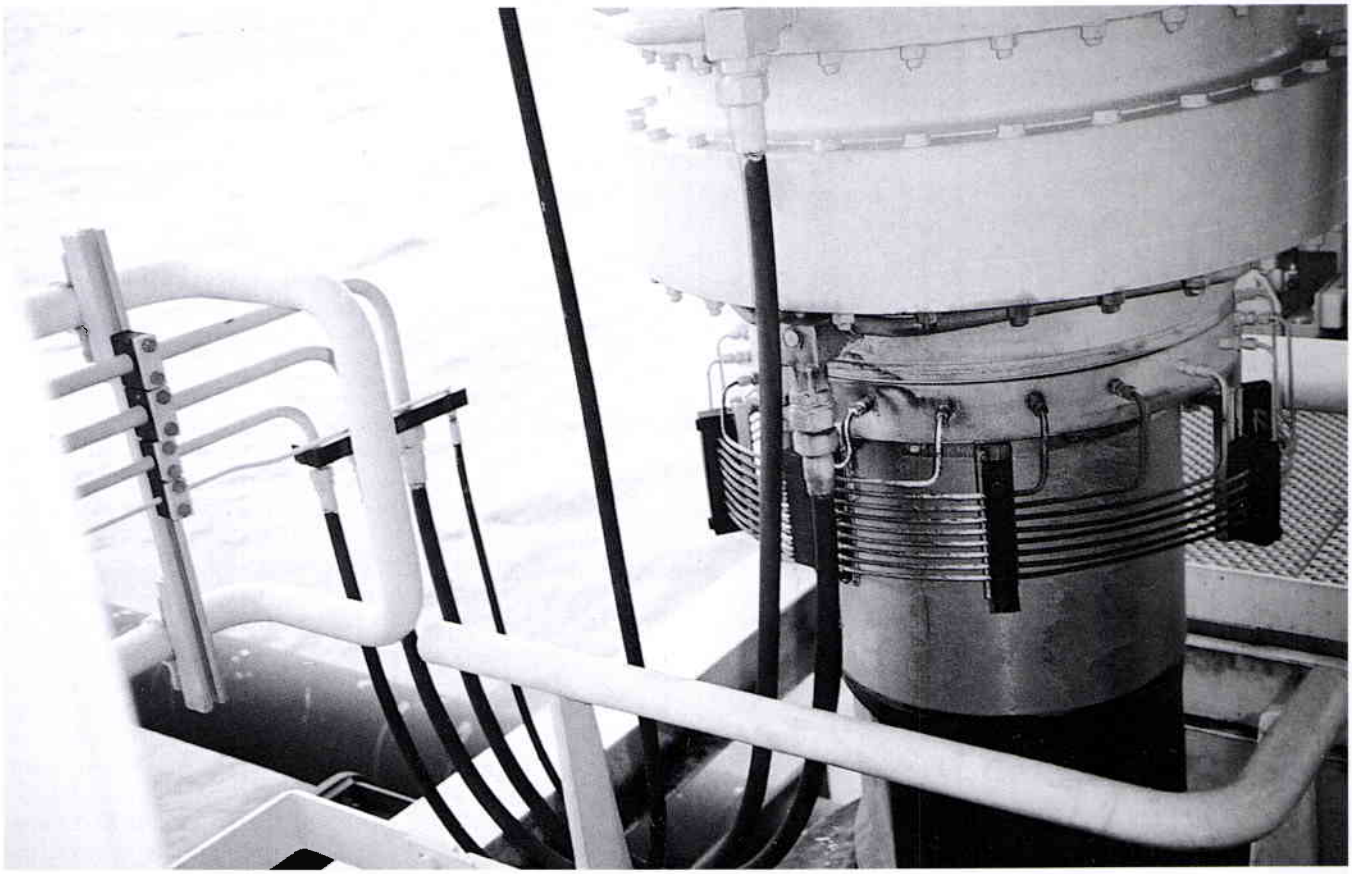
De pomp van de conserveringsinstallatie wordt gestart bij het starten van de pompmotoren van de hydraulische installatie. Van dit hoofdsysteem is het doseersysteem afgetakt. De rondgepompte conserveringsolie drijft zelf het doseersysteem aan dat gemonteerd is op de conserveringskamer. De doseereenheid verdeelt via een aparte leidingen de benodigde conserveringsolie gelijkelijk over de verschillende compartimenten van de doseerpakking. De conserveringsinstallatie wordt gecontroleerd door bewaking op het draaien van de aandrijfmotor van de pomp, het drukniveau en de doorstroming.

Ten behoeve van de afstandsbewaking wordt één signaal naar het centraal bedieningsgebouw doorgegeven van de lokale computerconfiguratie (LCC). In geval van storing moet de storingsoorzaak in de LCC worden opgespoord. Een storing in de conserveringsinstallatie leidt niet tot onderbreken van de schuifbeweging. De installatie heeft daardoor geen invloed op de faalkans van de bewegingswerken.

4.5.4 Modificaties conserveringsinstallatie

Ten tijde van de principekeuze voor Rust-Ban was van het rheologisch gedrag en van de temperatuurgevoeligheid niets bekend, ook niet bij de fabrikant. Uiteindelijk heeft dit rheologisch gedrag tot problemen geleid. Een goede verdeling van het conserveringsmiddel op de zuigerstang bleek herhaaldelijk problemen te geven, met name door verdamping van het oplosmiddel. De dosering via de doseerpakking, die door druk in de conserveringskamer wordt gestuurd, bleek niet goed te functioneren. Het debiet was niet goed en werd niet goed verdeeld. Er ontstonden na drogen van de Rust-Ban harde oneffenheden, die weer aanleiding gaven tot lekkage van de Rustban langs de zuigerstangen. De doseerpakking is daarom vervangen door een normale afdichting. De doseerfunctie wordt nu vervuld door verdringerpompjes die de conserveringsvloeistof op een aantal plaatsen aan de omtrek direct op een verdeelring toevoeren (figuur 4.26).

De oplossing van het lekkageprobleem werd gevonden door Rust-Ban 397 te vervangen door Rust-Ban 335, een vloeibaar blijvende minerale olie waaraan een waterverdringende stof is toegevoegd. Het lekkageprobleem was nu opgelost, maar vervolgens bleek zich na een aantal maanden een groot aantal zeer kleine corrosieplekken te ontwikkelen. Onderzoek toonde aan dat de waterverdringer in de Rust-Ban 335 minuscule volumes elektroliet in contact met de zuigerstang kon inkapselen waardoor de zuigerstang werd aangetast. Daarop is de Rust-Ban 335 vervangen door Esso EHL 486, een minerale olie zonder vochtverdringer.



Figuur 4.26 Gemodificeerde conserveringsinstallatie

De conservering van de zuigerstang kent twee gedeelten. Aangezien er 26 cilinders zijn waarvan de zuigerstang een meter te lang is a.g.v. de keuze voor gelijke cilinderhoogten op de pijlers, komt bij deze cilinders een meter van de stang, vermeerderd met een aantal decimeters reserve, nooit in de cilinder. Dit deel wordt geregeld, met de hand, voorzien van een laag smeervet ter voorkoming van corrosie.

4.6 Containers

De verkeerskoker van de Oosterscheldekering dient als machineruimte van de bewegingswerken. Het gebruik als machineruimte is mogelijk door de keuze van hydraulische cilinders voor de schuifaandrijving. Hierdoor kunnen de hydraulische pompeenheden en elektrische schakelkasten ruimtelijk gescheiden van de cilinders worden opgesteld. Tevens dient het inwendige van de doorgaande verkeerskoker voor doorvoer van elektrische leidingen en andere verbindingen en als behuizing van diverse containers. Zie voor een beschrijving van de containers ook deelnota 6.

Er is evenwel vastgesteld dat het inwendige van de verkeerskoker niet zonder meer als machineruimte is te gebruiken, maar dat aparte afsluitbare ruimten in de verkeerskoker nodig zijn [doc.26]. Zowel de krappe (af)bouwplanning van de verkeerskokers, als technische eisen m.b.t. de hydraulische en elektrische installaties, hebben geleid tot de beslissing alle in de verkeerskoker onder te brengen apparatuur te installeren in containers die reeds op de bouwplaats van de verkeerskokers (Kats) in de verkeerskokers zijn gemonteerd.

4.6.1 Toepassing van containers

De toepassing van containers in de verkeerskoker heeft de volgende voordelen:

- De apparatuur wordt afdoende beschermd tegen beschadiging en vervuiling bij transport en inbouwen in de verkeerskokers, alsmede bij afbouwwerkzaamheden van de verkeerskokers op de kering.
- De containers vergroten de beschikbare hoeveelheid wandlengte voor het plaatsen van kasten en apparatuur.
- Het monteren en onderling verbinden van de hydraulische en elektrische installaties is een tijdrovend proces. Door deze installaties geheel te prefabriceren en in de containers onder te brengen, wordt het productie- en montageproces van de verkeerskokers ontkoppeld van de montage van de elektrische en hydraulische installaties, hetgeen het kritische tijdschema van de afbouw van de kering ten goede komt.
- Eenmaal aangebrachte en geteste verbindingen tussen onderdelen hoeven niet meer losgenomen te worden bij inbouw in de verkeerskokers. Latere (af)montage wordt daardoor in omvang verkleind, terwijl er ook een gunstige invloed op de kans op storingen mag worden verwacht.
- De containers hebben in de bedrijfsfase van de kering een blijvende functie als machineruimte, waarin een redelijke bescherming tegen omgevingsinvloeden (klimaat) en beschadiging wordt geboden.
- De geluidsproductie in de hydraulische containers wordt wat afgeschermd en bij de elektrische installaties kan aan de veiligheidseis van afsluitbaarheid worden voldaan.

Naast gebruik als machineruimte worden containers ook toegepast om een aantal afsluitbare werk- en bedrijfsruimten in de verkeerskokers te vormen. In de verkeerskokers van de drie sluitgaten zijn in totaal de volgende aantallen containers ondergebracht (zie voor de locaties tabellen 3.4, 3.5 en 3.6):

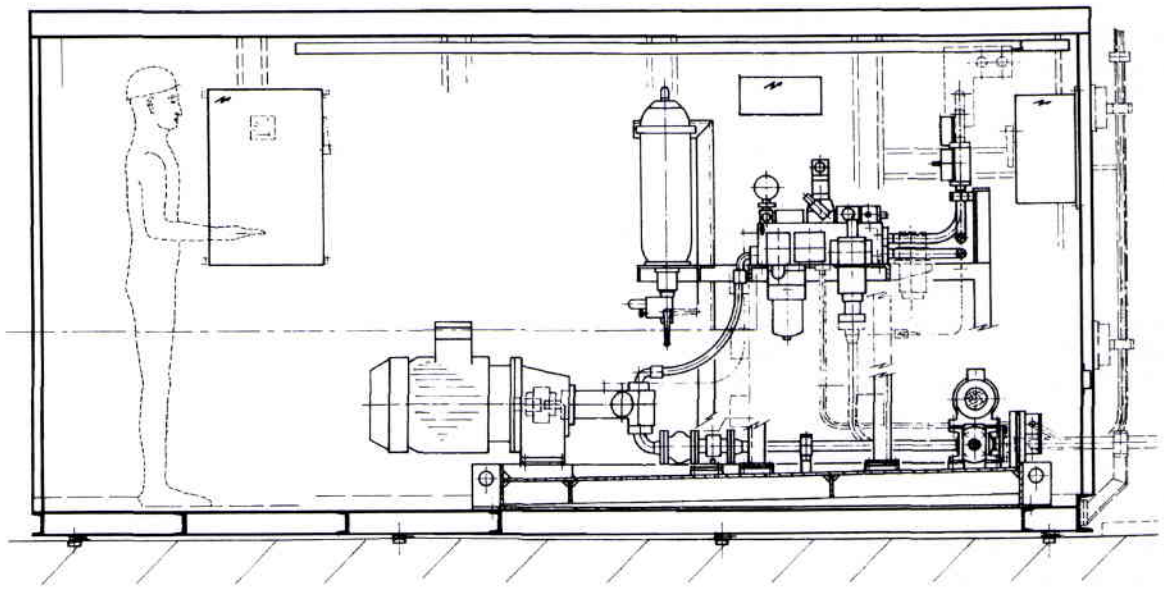
- 65 hydrauliekcontainers; met de hydraulische pompeenheden voor de cilinders op één pijler. Op de eindpijlers van een stroomgat waar slechts één cilinder op een pijler aanwezig is, zijn uit faalkansoverwegingen toch 2 units ondergebracht in de betreffende container.
- 62 elektrocontainers; met de elektrische installaties voor besturing en bewaking van één schuif.
- 16 trafocontainers; met behalve een 10 KV/380 V trafo, een hoogspanning- en een laagspanningschakelinstallatie.
- 4 werkplaats- en kantoorcontainers; met 2 ruimtes gescheiden door een tussenwand met deur, waarvan een is ingericht als werkplaatsje en de ander als kantoor.
- 4 was-, toilet- en schaftcontainers; met een keukenruimte en een toiletruimte.
- 1 milieu- en meetcontainer; met vier kantoor- en laboratoriumruimten.
- 2 conditiebewakingcontainers; met laboratorium- en meetruimten.

4.6.2 Constructie van de containers

Het profiel van vrije ruimte in de doorgangen bij de opleggingen van de verkeerskokers is om constructieve redenen zó klein dat een standaard zeecontainer langs deze opening niet in de verkeerskoker gebracht kan worden. Daarom is voor dit project een speciale, kleinere container ontworpen die aan de toepassing is aangepast, maar waarin tevens een grote mate van standaardisering is nagestreefd. Alle containers hebben dezelfde breedte en hoogte, maar verschillen, al naar gelang de toepassing, in lengte (figuur 4.27). Behalve met de vrije ruimte in de doorgangen bij de opleggingen, moest er bij de bepaling van de breedte van de containers ook rekening mee worden gehouden dat in de verkeerskokers tussen containers en kabelrekken voldoende ruimte vrij bleef voor het passeren van een elektrokar, bedoeld voor transport van personen en materialen in de verkeerskokers. Buitenbeplating en kleur zijn voor alle containers gelijk gehouden: geprofileerde verzinkte plaat, éénzijdig voorzien van een laag plasticol bekleding. Al het in de containers toegepaste hout heeft een brandvertragende behandeling ondergaan. Daarnaast is elke container voorzien van één of meer brandblussers. Dit is voldoende geoordeeld, omdat veruit de grootste kans op brand aanwezig is als gevolg van menselijk handelen. Om deze reden is afgezien van een automatische sprinklerinstallatie en zelfs van een brandmeldsysteem op de kering [27].

De constructie van de containers bestaat in hoofdzaak uit:

- Een gelast stalen grondframe. Geheel geïnstalleerd kunnen de containers aan de vier hoekpunten worden opgepakt. Bovendien is de onderzijde zodanig ingericht dat de containers met eenvoudige hulpmiddelen kunnen worden verrold. Hiertoe zijn vijzelpunten aangebracht. De onderzijde van de container is voorzien van een gesloten beplating.
- Wanden en dak zijn opgebouwd uit standaard profielen die met boutverbindingen zijn verbonden. Op deze wijze is eventueel later vervanging van delen van de containers mogelijk.
- De wanden zijn voorzien van een binnen- en buitenbeplating met daarin toegangsdeuren, afsluitbare ventilatie-openingen en kabel- en leidingdoorvoeren. Uitzondering zijn de hydrauliek- en elektrocontainer in verkeerskoker Schaar1 die voor de publieksvoorlichting voorzien zijn van dubbelgelaagde glazen ruiten.
- Afhankelijk van de toepassing zijn vloeren, wanden en dak thermisch geïsoleerd. Vanwege de geluidsproductie in de hydrauliekcontainers is daar bovendien geluidsisolatie aangebracht.



Figuur 4.27 Hydrauliekcontainer

4.6.3 Fabricage en montage containers

De pompen en kleppenblokken van de hydraulische aandrijving zijn zoveel mogelijk op één frame gemonteerd. De pompunits zijn reeds op het fabrieksterrein van de hydrauliekleverancier in de containers geplaatst. Daar zijn ook de bijbehorende elektrische installaties gemonteerd en de verbindingen tot stand gebracht. Deze werkwijze resulteerde erin dat de installatie onder gecontroleerde omstandigheden kon plaatsvinden. Al het uitgaande leidingwerk is daarna degelijk en schoon afgesloten. De hydrauliek- en elektrocontainers waren toen klaar voor montage in de verkeerskokers.

Omdat de containers zo licht mogelijk zijn geconstrueerd, moesten ze met enige voorzichtigheid worden opgepakt en getransporteerd, mede omdat de belastingverdeling in het inwendige van de container niet optimaal is. De onderdelen zijn zodanig geplaatst, dat optimale bereikbaarheid wordt bereikt voor inspectie en onderhoud gedurende de levensduur van de installaties. De containers zijn aangevoerd op de bouwplaats van de verkeerskokers te Kats in een zodanig tempo, dat ze steeds meteen in een gereedstaande verkeerskoker konden worden gemonteerd.

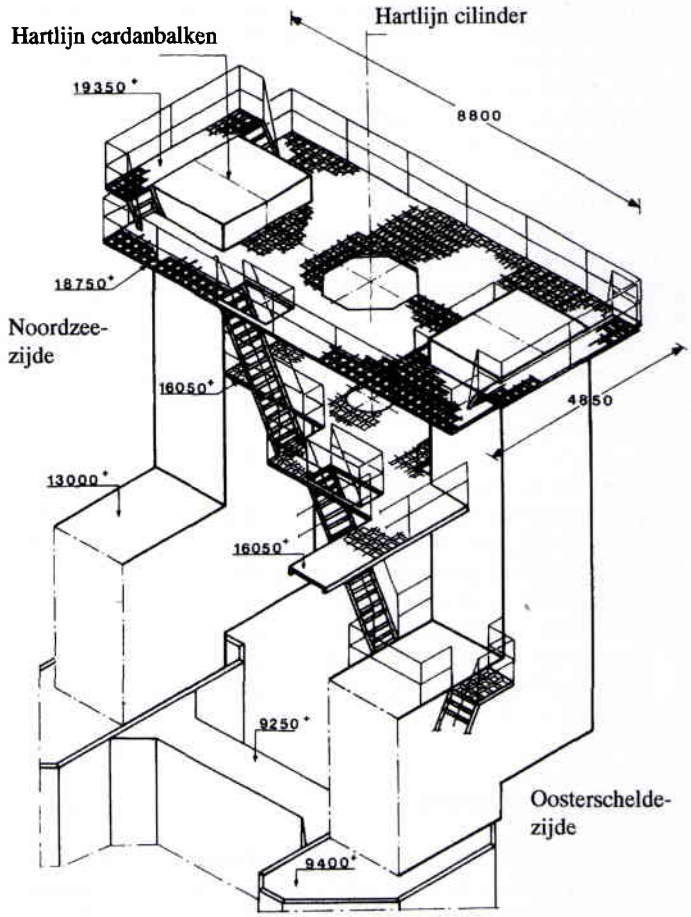
4.7 Trappen en bordessen

De bewegingswerken zijn op elke pijler via een aparte toegang vanuit het inwendige van de verkeerskoker bereikbaar via een stelsel van trappen en bordessen. Bewust is ervoor gezorgd dat bereikbaarheid vanaf de (openbare) weg op de verkeerskoker niet mogelijk is.

Op elke pijler bestaan de trappen en bordessen uit de volgende hoofdonderdelen:

1. een loopbrug tussen de verkeerskoker en de pijlerkop
2. een toegangstrap van de loopbrug naar de hamerstukken
3. bordessen op verschillende niveaus tussen de hamerstukken
4. trappen tussen de bordessen
5. een trap van de loopbrug naar de onderliggende bovenbalk

Alle bruggen, bordessen en trappen zijn voorzien van leuningwerk. Het ontwerp van de trappen en bordessen is beïnvloed door de uiteenlopende wensen met betrekking tot de bereikbaarheid in de bouwfase en in de gebruiksfase van de kering (figuur 4.28). Sommige bordessen en trappen konden meteen op de definitieve locatie worden aangebracht, andere moesten tijdens de afbouw van de kering tijdelijk worden verwijderd. Tevens werden in dit soort onderdelen de bouwtoleranties van de kering duidelijk. In de trappen en bordessen zijn mogelijkheden ingebouwd om lengte- en hoogteverschillen te compenseren.



Figuur 4.28 Trappen en bordessen

De loopbrug tussen de verkeerskoker en de pijlerkop bestaat uit een draagconstructie met roostervloeren en leuningwerk. De roostervloeren zijn gedimensioneerd op een gelijkmatig verdeelde belasting van 2 kN/m^2 en een puntlast van 3 kN op een oppervlak van 0,5x0,5 m^2. Het loopvlak is van staalplaat met doorgedrukte perforaties vanwege de goede anti-slip eigenschappen. De loopbrug is afgesteund op de verkeerskoker en de pijler. Bij dit laatste punt is veel aandacht besteed aan onderhoud van de ondersabeling en de voetplaat i.v.m. aantasting door overslaand zeewater. Het leuningwerk bestaat uit stijlen met een rechthoekige doorsnede en leuningregels met een ronde doorsnede. De leuning aan één zijde van de loopbrug wordt tevens benut voor de bevestiging van de hydraulische leidingen en de kabelkokers tussen de schuifbewegingswerken op de hamerstukken en de installaties in de verkeerskokers.

Aangezien in een zeer laat stadium van de afbouw van de kering de bovenbalken zouden worden geplaatst, en deze bij plaatsing de loopbrug van verkeerskoker naar pijlerkop niet zouden kunnen passeren, is het loopgedeelte van de brug demontabel gemaakt. Zo kon het leuningwerk aan één zijde van de loopbrug, waaraan ten tijde van de plaatsing van de bovenbalken de hydraulische en elektrische leidingen reeds waren gemonteerd, tijdens plaatsing van de bovenbalken gehandhaafd blijven terwijl het loopgedeelte tijdelijk verwijderd was. Hierdoor werd het afmonteren en beproeven van de bewegingswerken in hoge mate onafhankelijk gemaakt van de montage van de bovenbalken.

Vanaf de loopbrug is tegen een hamerstuk een trap gemonteerd waarlangs de hamerstukken zijn te bereiken. Een tweede trap voert van het aansluitpunt van de loopbrug aan de verkeerskoker omlaag naar de bovenbalk. Tussen de hamerstukken zijn op twee niveaus bordessen gemonteerd op consoles, die aan de hamerstukken zijn bevestigd met ingestorte ankers. Voor het bereiken van de draaipunten van de cardanbalken zijn aan de buitenzijde van de hamerstukken soortgelijke bordessen aangebracht. De bordessen zijn via trappen met elkaar verbonden.

Voor een goede bereikbaarheid van de gelijkloopinstallaties in de cardanbalken is in aanvullende trapjes en kleine bordessen voorzien. Alle trappen, leuningen en bordesconstructies zijn samengesteld uit thermisch verzinkt materiaal, dat voorzien is van een dubbele laag polyester poedercoating. De roosters van de trappen en bordessen zijn alleen thermisch verzinkt. De leidingen, trappen, bordessen en leuningen zijn zorgvuldig onderling elektrisch doorverbonden en geaard tegen dezelfde aarde als de cilinders met cardanbalken.

Geen van de trappen en bordessen op de pijlers is toegankelijk voor het publiek, met uitzondering van pijler Schaar1, die in het kader van de publieksvoorlichting is opengesteld. De bordessen en trappen op deze pijler, alsmede de bovenzijde van de bovenbalk tussen de pijlers Schaar1 en Schaar2, zijn voorzien van extra hoog leuningwerk met kleinere spijlafstanden, terwijl ook de toegangstrappen van hogere leuningen zijn voorzien. De leidingloop op deze pijler is zodanig aangepast dat deze onbereikbaar is voor het publiek.

4.8 Bliksembeveiliging

Blikseminslag in een constructie is een belastinggeval waarop zelden al in de ontwerpfase gedimensioneerd wordt, maar dat een grotere kans van voorkomen heeft dan een maatgevende storm of waterstand. Veronachtzaming van dit belastinggeval komt voort uit het feit dat constructies zelden falen/bezwijken ten gevolge van een blikseminslag. Statistisch is bekend dat er in het gebied van de Zeeuwse eilanden zo'n dertig keer per jaar onweer optreedt. Gerelateerd aan de grootte (lengte) zal de Oosterscheldekering 1 keer per jaar getroffen worden door blikseminslag. Omdat de Oosterscheldekering een hoog element vormt in open water kan er eventueel met een verhoogd inslagrisico gerekend worden (de literatuur is hier niet eenduidig in), wat zou resulteren in 2 inslagen per jaar. Omdat het optreden van onweer en bliksem niet is te voorkomen dient de Oosterscheldekering, en met name de bewegingswerken, ertegen beschermd te worden. Voor het ontwerp is uitgegaan van één blikseminslag per jaar. De aanname voor de ontlaadstroom bedraagt 25 kiloAmpère en voor de fronttijd is 1,2 microseconde gerekend [30].

4.8.1 Ontwerpoverwegingen bliksembeveiliging

Omdat een inslaande bliksem als ontlading altijd de kortste overslaglengte zoekt naar de aarde, zijn de hoogste elementen van een constructie de natuurlijke inslagpunten. De cilinders van de schuiven steken dermate hoog boven de overige constructies uit dat het aannemelijk is dat bij onweer de bliksem hier in zal slaan. Voor bliksembeveiliging van de Oosterscheldekering zijn twee mogelijkheden bekeken. De eerste mogelijkheid is de volledige kering van afvangdraden te voorzien die zodanig hoog zijn dat de kans op inslag in de cilinders verwaarloosbaar is. De tweede mogelijkheid is de cilinders als bliksemgeleiders te laten fungeren en de volledige bewegingswerken tegen de negatieve effecten van een blikseminslag te beveiligen.

Het grote bezwaar van een bliksembeveiliging met afvangdraden is de geringe bescherming van delen van de bewegingswerken op en aan de pijlers. De afvangdraden beschermen wel de cilinders maar niet de cardanbalken en schuifgeleidingen, daarvoor zou een volledige kooi van Faraday rond de hamerstukken en pijleropbouw noodzakelijk zijn. De kosten die dit met zich mee zou brengen zijn de reden geweest dat deze mogelijkheid van bliksembeveiliging is verworpen. Daarnaast werd ook een oplossing met afvangdraden tussen hoge masten esthetisch niet gewaardeerd.

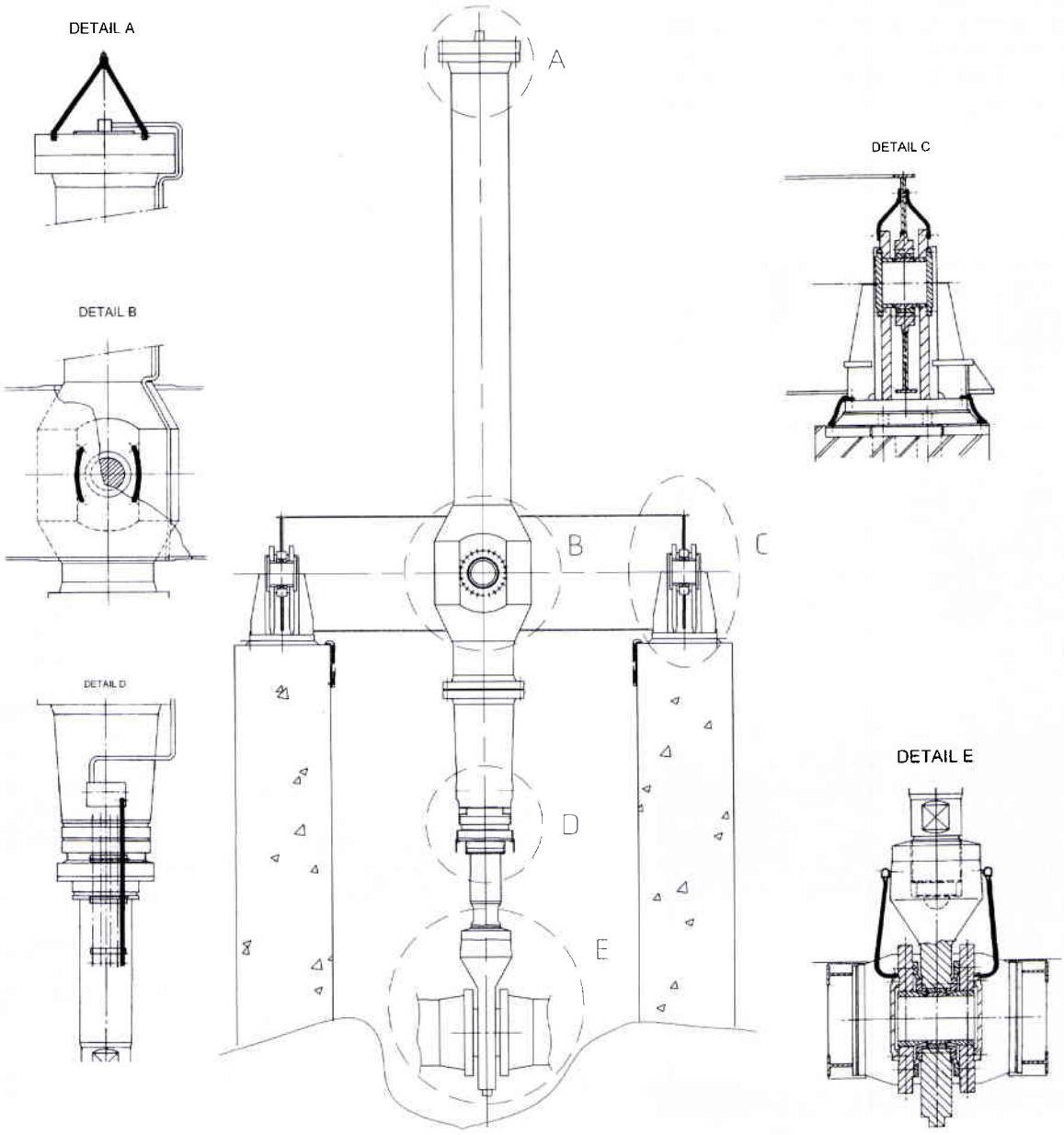
Doordat de uitvoering van de bliksembeveiliging met afvangdraden is verworpen zijn de volledige bewegingswerken zodanig uitgevoerd dat een blikseminslag zonder schade naar de aarde afgevoerd kan worden. De gebruikelijke afweging tussen aanlegkosten van een bliksembeveiliging en de te verwachten schades en risico's bij het achterwege laten ervan, is voor de Oosterscheldekering uitgebreid met het aspect 'beschikbaarheid van de kering'. Omdat de beschikbaarheideis van groter belang is dan het voorkomen van schade is het schade-aspect niet bepalend geweest.

De meeste delen van de bewegingswerken zijn ten opzichte van elkaar geïsoleerd ter voorkoming van contactcorrosie. Bij het aanbrengen van bliksembeveiliging moet in die gevallen voorkomen worden dat een overbrugging ontstaat. Elektrische en hydraulische leidingen naar de verkeerskoker zijn vanwege de aarding van de verkeerskoker voorzien van overspanningsafleiders. Complicatie bij de uitvoering van de bliksembeveiliging is dat bij enkele onderdelen isolatie en overbrugging strijdige belangen dienen. Dit is het geval bij de pakking tussen de cilindermantel en de zuigerstang, en bij de aanslagen op de schuif en de glijplaten in de sponning. Dit betekent dat ter plaatse van de isolerende lagen doorslag kan optreden. Eventuele inbrandeffecten en andere beschadigingen worden hier geaccepteerd omdat ze de beschikbaarheid van de kering bij stormvloed niet beperken.

4.8.2 Voorzieningen bliksembeveiliging

Uitgangspunt is dat de cilinders als opvangpunt voor bliksemontlading dienen [31]. De volgende maatregelen zijn doorgevoerd bij de bewegingswerken (figuur 4.29):

a) De stalen constructies en wapeningsnetten, die onderling geïsoleerd moeten blijven, zijn doorgekoppeld m.b.v. gasgevulde overspanningsafleiders, zodanig dat geen overslag zal plaatsvinden op willekeurige, niet controleerbare plaatsen. Deze koppeling wordt aangebracht tussen de geïsoleerd opgestelde stoel van de cardanbalk en een aan het wapeningsstaal van het hamerstuk gelaste aardstek, alsmede tussen het bevestigingspunt van de spanstaven aan de onderzijde van het hamerstuk en de wapening.
b) Opdat het deel van de ontlaadstroom dat zal afvloeien via de zuiger zo klein mogelijk wordt, om beschadiging van de afdichtende manchet te voorkomen, dient de impedantie van de afleiding via het wapeningsstaal zoveel mogelijk verlaagd te worden. Daartoe is de wapening in het hamerstuk volledig doorgelast en zijn extra aardstek-verbindingen tussen pijler en hamerstuk aangebracht. Naarmate deze verbindingen beter zijn, zal ook minder stroom afvloeien over de voorspankabels in de betonconstructie van de hamerstukken.
c) Bovenop de cilinders is een kroon gemonteerd, die als opvangpunt voor de bliksem dient, zodat geen schade aan de bouten van het cilinderdeksel kan optreden (detail A).
d) M.b.v. Litze-draad is een laag-ohmige overbrugging van de lagers van het cardan en van het onderoog van de zuigerstang gemaakt (detail B,C,E).
e) Alle elektrische apparatuur die bij de cardanbalk is opgesteld, wordt van overspanningsafleiders voorzien. Bovendien zijn alle elektrische en hydraulische leidingen die vanaf de pijlers de verkeerskokers binnenkomen van overspanningsafleiders voorzien.
f) Aan de schuiven zijn stalen pijpen en een ketting gemonteerd die tot in het water reiken, voor een snelle afleiding van de ontlaadstroom naar het water bij inslag op de schuif.



Figuur 4.29 Voorzieningen bliksembeveiliging

5. Uitvoeringsaspecten

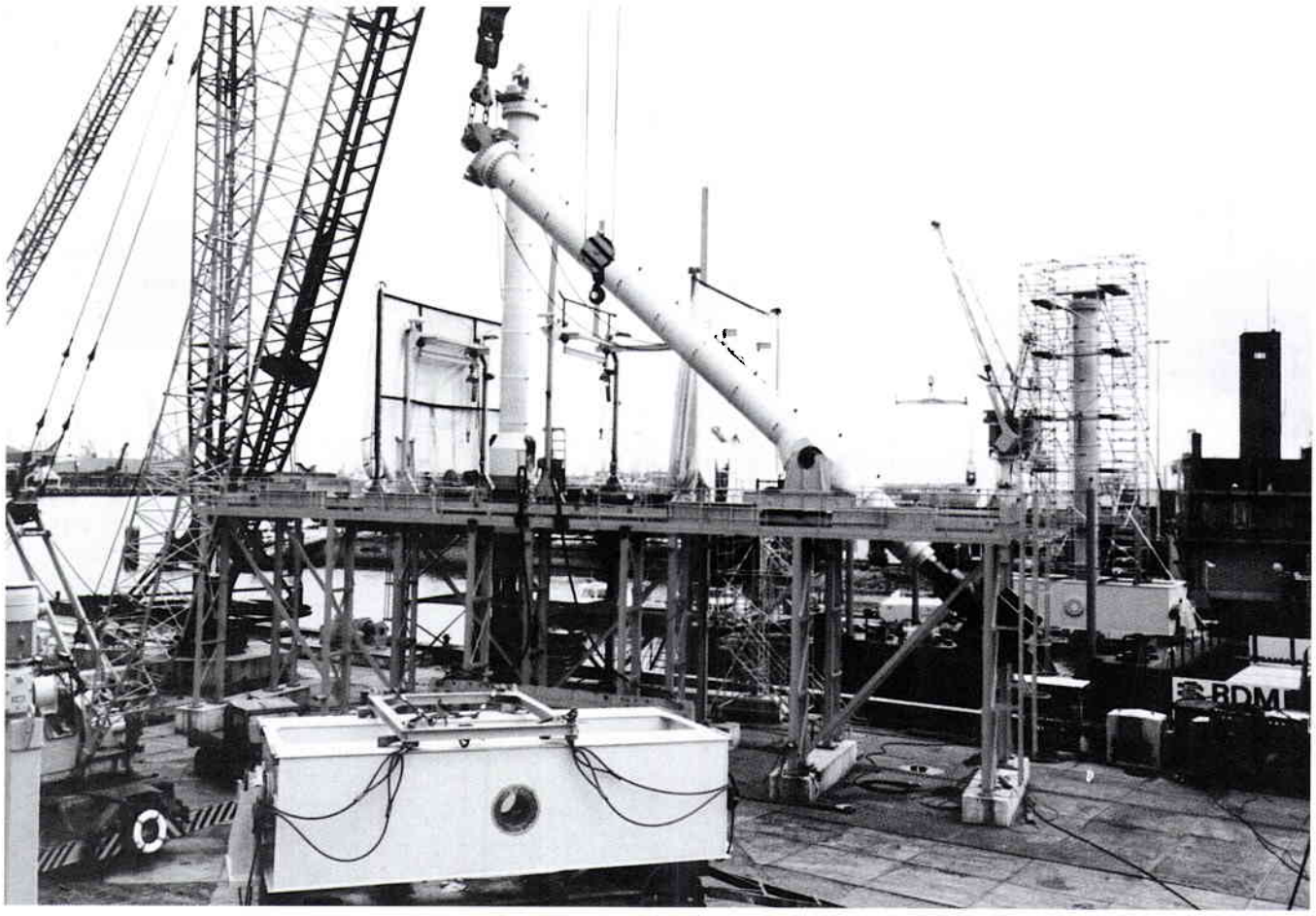
5.1 Risico-onderzoek

Door TNO en KEMA is risico-onderzoek uitgevoerd m.b.t. uitvoeringsaspecten, zoals het fabriceren en plaatsen van schuiven en bewegingswerken. Het naar aanleiding daarvan opgestelde rapport "Plaatsen schuiven en bewegingsinrichtingen" [28] geeft een beschrijving van de in deze fase uit te voeren activiteiten en mogelijke ongewenste gebeurtenissen. Beschreven zijn de verschillende handelingen die moeten worden verricht om op de fabricageplaats opgestelde bewegingswerken op pontons te laden, te vervoeren, 'aan te slaan' op de pontons voor het plaatsen op de pijlers en het losnemen van de hijsvoorzieningen. De beschrijvingen bevatten de ongewenste gebeurtenissen, de gevolgen (uitgedrukt in tijd, kwaliteit, geld), de kans erop en mogelijke preventieve en/of responsieve acties. Dit gaf een goede voorbereiding voor de ingewikkelde en risicovolle handelingen.

5.2 Assemblage en montage

5.2.1 Samenbouw cilinder met cardanbalk

De samenbouw van de cilinders met de cardanbalken heeft vanwege de grote afmetingen van deze onderdelen in de buitenlucht moeten plaatsvinden. Voor de samenbouw met de cardanbalken zijn de cilinders horizontaal vanuit de opslag aangevoerd. Aan het deksel van elke cilinder is tijdelijk een hijsoog gemonteerd, alsmede twee tuidraden.Aan het cardanstuk zijn (eveneens tijdelijk) twee tappen gemonteerd.
De cilinders zijn in verticale stand samengebouwd met de cardanbalken. Om ze in die stand te krijgen, moesten ze worden gekanteld (figuur 5.1). Daartoe is een kantelframe gebouwd, dat voor alle cilinders kon worden gebruikt. Het kantelframe was voorzien van een kantelwagen en een oplegwagen. De cilinder is vervolgens horizontaal op de kantelwagen en de oplegwagen geplaatst, waarbij



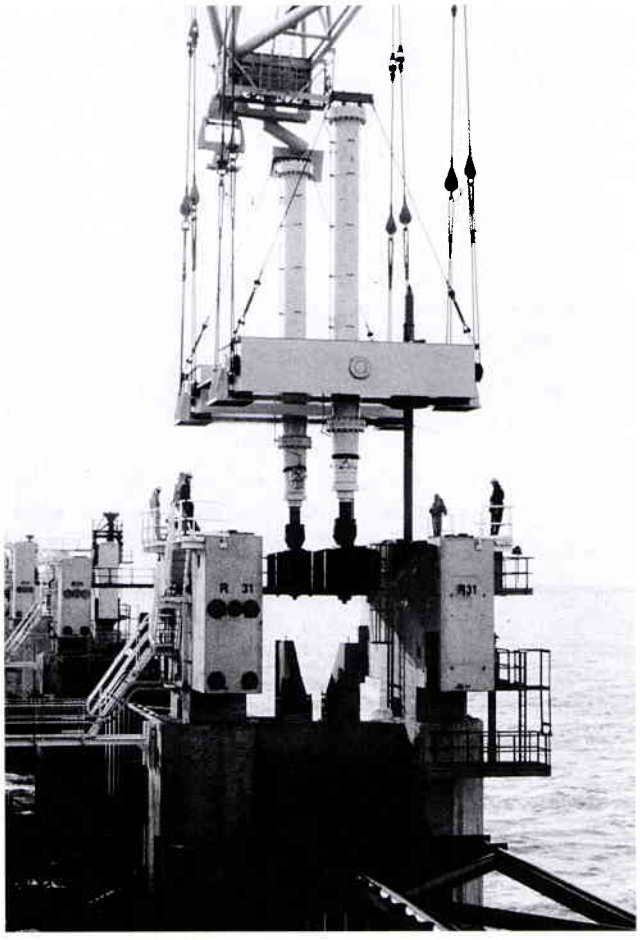
Figuur 5.1 Kantelen cilinder

de tijdelijke tappen op de kantelwagen kwamen te rusten. Met een derrick, voorzien van een hijsjuk, is de cilinder m.b.v. de meerijdende kantelwagen overeind gezet en in een montageframe geplaatst, waarbij het onderoog op een centreerstoel kwam te steunen. De cilinder is vervolgens verticaal iets opgevijzeld en gefixeerd met tuien, waarna de tijdelijke tappen konden worden verwijderd en de derrick kon worden losgemaakt.

De samenbouw van de cilinder met de cardanbalk heeft bestaan uit:

- aanbrengen van de kogelgewrichtslagers in de boringen in het cardanstuk
- aanbrengen van het juiste conserveringsvet
- plaatsen van de cardanbalk over de cilinder heen op ondersteuningen waarmee gevijzeld kon worden voor een precieze positionering
- doorsteken van de scharnierpennen door de cardanbalk tot in de kogelgewrichtslagers

Voor de samenbouw waren, i.v.m. het grote gewicht van de onderdelen waarmee gewerkt moest worden, een aantal hulpmiddelen gemaakt. Nadat de scharnierpennen waren doorgestoken zijn deze vervolgens met vulplaten van de juiste dikte gepositioneerd. Hierna konden de deksels aan de buitenkant van de cardanbalken worden gesloten. De ruimte tussen cardanstuk en cardanbalk, goed gedefinieerd door speciaal aangebrachte ringen, is volgezet met conserveringsvet en afgesloten met een rubberen afdichtprofiel, dat op de juiste maat was gemaakt en vervolgens is vastgezet met klembeugels. De standzekerheid van de cilinder was verzekerd door tuidraden van het deksel naar de cardanbalken.



Figuur 5.2 Plaatsen cilinders

5.2.2 Transport naar de kering

De cilinder, compleet met cardanbalk, is geplaatst op een transportponton, waarop plaats was voor in totaal 8 cilinders. Op de transportponton zijn de cilinders twee aan twee met koppelstangen aan elkaar verbonden. Deze koppelstangen waren van zodanige afmetingen, dat de cilinders op de juiste afstand van elkaar stonden om rechtstreeks op de hamerstukken van een pijler geplaatst te worden.
Op de transportponton zijn de cilinders naar de Oosterschelde vervoerd.

5.2.3 Montage op de kering

De cilinders zijn twee aan twee op de hamerstukken geplaatst met dezelfde bok als waarmee de schuiven zijn geplaatst. De bok was daartoe van een hijsframe voorzien dat, behalve voor de schuiven, ook geschikt was voor het plaatsen van de cilinders. De bok lag aan Oosterscheldezijde van de kering en tilde de cilinders over de kering heen. Op de pijlers waar twee cilinders zijn geplaatst, zijn deze aan elkaar gekoppeld gemonteerd. De cardanbalken werden daartoe met stangen op de juiste onderlinge afstand gehouden.
Net als bij de schuiven, is gebruik gemaakt van potloden voor een juiste positionering van de twee cilinders op de hamerstukken (figuur 5.2). Bij de 6 eindpijlers is steeds één cilinder met cardanbalk geplaatst.

Met behulp van een mobiele kraan op de verkeerskoker zijn de ankerstangen met de bovenste moeren en onderlegringen voor de bevestiging van de cardanstoelen (M48 voor de kleinere cilinders en M56 voor de grotere cilinders) door de cardanstoelen en de hamerstukken heen neergelaten, waarna de onderste ringen en moeren op de ankerstangen zijn aangebracht. Vervolgens zijn de ankerstangen hydraulisch aangespannen. De uitstekende draadeinden zijn met vet ingepakt en van een afdichtingskap voorzien.
De koppelstangen tussen de cardanbalken zijn verwijderd.

Nadat cilinder met de hogedruk slangen was aangesloten op het hydraulische systeem, kon de zuigerstang met de daaraan bevestigde staalconstructie bij het onderoog omhoog en omlaag worden bewogen ten behoeve van het aanbrengen van de bevestiging aan de schuif. De staalconstructie van het onderoog is tussen de ophangbalken van de schuiven gemonteerd. De ophangbalken in de schuiven zijn daartoe iets uit elkaar gedrukt met behulp van vijzels. De tussenafstand van de ophangbalken is vooraf ingemeten zodat vulplaten van passende dikte gemaakt konden worden. Vervolgens is de staalconstructie van het onderoog bevestigd tussen de ophangbalken met behulp van voorspaninjectiebouten. De standzekerheid van de cilinder was toen verzekerd, zodat de tuidraden konden worden verwijderd.

De afwerking heeft bestaan uit het aanbrengen van de bliksemvanger bovenop de cilinder voor het opvangen van blikseminslagen, het monteren van de Litze draden voor de overbrugging van de lagerpunten en het aansluiten op de bliksemafvoerleidingen en de aarding. Vervolgens zijn de opgetreden beschadigingen geconserveerd. De schuif kon vanaf dat moment met de cilinders worden bewogen, zodat de ophanghaken van de schuiven konden worden verwijderd.

6. Onderhoudsaspecten

6.1 Inleiding onderhoud

Onderhoud van de stormvloedkering heeft tot doel de bij aanleg gerealiseerde kwaliteit met een bepaalde faalkans en beschikbaarheid te handhaven (boek 1, deelnota 1.5). Daarbij is de gerealiseerde kwaliteit dus uitgangspunt voor het te definiëren onderhoud. Een andere benadering van de doelstelling van onderhoud luidt: Het binnen een bepaalde faalkans voorkomen van een zodanige kwaliteitsvermindering van het object dat aan de gewenste functievervulling niet meer wordt voldaan.

Hierbij is het voldoende functioneren van de stormvloedkering dus richtpunt van de onderhoudinspanning. Deze twee onderhoudsbenaderingen suggereren dat er sprake zou kunnen zijn van een zekere marge tussen de gerealiseerde kwaliteit van de stormvloedkering en de minimaal vereiste kwaliteit. Dat bij de sluitingsmiddelen van een dergelijke marge sprake is, is evident. Er worden nieuwe onderdelen en materialen gebruikt die, i.v.m. te verwachten slijtage, ruimer worden bemeten dan nodig is om aan de eisen te voldoen. Na verloop van tijd verouderen materialen en nemen maatgevende eigenschappen af tot de ondergrens wordt onderschreden. Het onderhoud is er in grote mate op gericht de gevolgen hiervan te voorkomen.

Veelgebruikte definities voor onderhoud zijn:
- GebruiksAfhankelijk Onderhoud (GAO), uit te voeren na een bepaalde hoeveelheid bedrijfsbelasting, uitgedrukt in uren, meters afgelegde weg, etc.
- ToestandsAfhankelijk Onderhoud (TAO); uit te voeren afhankelijk van de toestand in relatie tot toelaatbare afwijkingen van nominale vorm, ruwheid, materiaaleigenschappen, etc.
- StoringsAfhankelijk Onderhoud (SAO); uit te voeren op grond van niet voldoen aan functie-eisen

GAO en TAO zijn beide vormen van preventief onderhoud, en hebben tot doel te voorkomen dat de functie-eis wordt onderschreden. SAO is correctief onderhoud dat wordt uitgevoerd nadat de functie-eis is onderschreden. Onderhoud wordt verder in dit stuk onderscheiden in incidenteel en planmatig onderhoud, elk nog verder onder te verdelen in klein en groot onderhoud. Van klein onderhoud is sprake indien geen of weinig niet-beschikbaarheid van de sluitingsmiddelen zal optreden. Indien de periode van niet beschikbaarheid in de orde van een week of langer is, wordt gesproken van groot onderhoud. Uitgangspunten voor groot onderhoud zijn:
- In het stormseizoen (oktober t/m april) geen planmatig groot onderhoud.
- Buiten het stormseizoen (mei t/m september) mogen ca. 8 schuiven tegelijkertijd op enig moment "niet beschikbaar" zijn [doc.33]; hiervan is ca. de helft beschikbaar voor het conserveren van de schuiven tijdens de inhaalslag voor herstel van de corrosieproblemen van de schuiven. De overige vier "niet beschikbare" schuiven kunnen worden gebruikt voor groot onderhoud aan andere onderdelen van de kering. Er zijn voorwaarden gesteld aan de verdeling van de schuiven over de kering (bv. niet alle in één sluitgat; niet 2 naast elkaar, etc).

Incidenteel klein onderhoud zal meestal voortvloeien uit een bij inspectie waargenomen ongewenste toestand. Omdat bij incidenteel klein onderhoud sprake is van geen of weinig niet-beschikbaarheid van de sluitingsmiddelen kan het door de beheerder naar behoefte vrij worden ingepland. Het zal hier daarom niet verder worden behandeld. Incidenteel groot onderhoud van de bewegingswerken doet zich voor indien een reparatie niet inpasbaar is in het planmatig groot onderhoud. Het betreft met name het op locatie vervangen van zuigerafdichtingen, geleidingsbussen en afdichtingen zuigerstang, lager onderoog en lagers draaipunten. In principe wordt er naar gestreefd geen incidenteel groot onderhoud voor te laten komen.

Op enkele onderdelen na, de spanpompen draaien continu, wordt het bewegingswerk buiten een tweewekelijkse testbeweging slechts enkele malen per jaar in werking gesteld. Slijtage van de bewegingswerken is dan ook nauwelijks afhankelijk van het actieve gebruik. De gegevens, gebruikt voor de faalkansanalyse, zijn ook gebruikt om enige voorspellingen te doen over de beschikbaarheid van de stormvloedkering en de te verwachten aantallen storingen. Deze voorspellingen geven antwoord op de vraag: "Hoe vaak moet er een reparatie plaatsvinden?"
Dit is van belang voor:
- de omvang van de onderhoudsploeg/storingswachtdienst
- een onderhoudsploeg met of zonder weekenddienst
- het reserveonderdelen beleid
- de reservering van budgetten

De volgende systemen zijn bekeken op storingen [doc.16]:
- hydraulisch bewegingswerken
- elektrische voeding
- conserveringssysteem t.b.v. de zuigerstangen
- elektronische regelsysteem bij de schuiven (dus niet de centrale bediening, besturing en bewaking)

In de hydraulische bewegingssystemen werden gemiddeld ca. 50 storingen per jaar verwacht, waarvan ca. 20 aan pompen (hoofdzakelijk de continu draaiende spanpompen), 9 aan hogedrukslangen, en 21 aan een groot aantal andere onderdelen. In de elektrische voeding werden gemiddeld ca. 10 storingen per jaar verwacht, en in de conserveringssystemen ca. 16. Het aantal storingen in de elektronica bleek niet goed te bepalen. Op grond van ervaring werd een aantal van ca. 75 per jaar als niet onredelijk gevonden.
Het aantal te verwachten storingen, en het al dan niet beschikken over een reparatieploeg met weekenddienst, heeft invloed op de beschikbaarheid van de stormvloedkering.

De beschikbaarheideis wordt bepaald door de toelaatbare faalkans: 1×10^{-2} per jaar falen één of meer schuiven. De uitgevoerde

analyse geeft aan dat het niet zonder meer acceptabel is om uit te gaan van een reparatieploeg zonder weekenddienst, omdat het tijdstip van de stormvloedsluiting niet bekend is. Het tijdig oproepen van de reparatieploeg in geval van een voorgenomen stormvloedsluiting zal de beschikbaarheid van de kering verhogen.

6.2 Planmatig onderhoud

6.2.1 Planmatig klein onderhoud

Inspectie of "conditiebewaking" heeft tot doel te signaleren, en liever nog te voorspellen, wanneer een eis aan maatgevende eigenschappen wordt onderschreden, ofwel om (dreigend) falen te bemerken. Er worden grofweg drie inspectiemethoden toegepast:

- Een aantal kritieke onderdelen van de sluitingsmiddelen wordt continu elektronisch bewaakt door een opnemer die disfunctioneren meldt aan de locale besturing (LCC) bij de schuif en de centrale besturing (CCC) in het centrale bedieningsgebouw.
- Een aantal kritieke onderdelen dat niet elektronisch kan worden bewaakt, en dus onbemerkt kan falen, wordt periodiek geïnspecteerd met een functioneringstest of testbeweging.
- Waar bewaking of een functioneringstest geen praktische mogelijkheid is, of waar het onderdeel geen sterk verband met het falen van de kering heeft, wordt volgens een bepaald schema een andere inspectiemethode toegepast, zoals visuele- en meet-inspecties.

Met bovengenoemde inspecties en periodiek bewegen neemt de betrouwbaarheid globaal toe naarmate falen eerder bemerkt kan worden. Uitgangspunt is dat bemerkt falen direct wordt gerepareerd. In de sluitingsmiddelen zijn onderdelen aanwezig die meer te lijden hebben van stilstand dan van gebruik. Voor deze onderdelen is de zeer lage gebruiksfrequentie van de stormvloedkering geen voordeel. Ook om die reden is ervoor gekozen de schuiven van de stormvloedkering periodiek te bewegen. Dat gestreefd moet worden naar een optimum tussen inspectie-inspanning enerzijds en zekerheid anderzijds, zal duidelijk zijn. Uiteindelijk is gekozen voor een testbeweging van elke schuif over enkele meters met een frequentie van éénmaal per 14 dagen.

Cilinders en hydraulische installatie moeten worden geïnspecteerd op interne en externe lekkage. Door het verloop van de aanwijzing van de hoogtemeting (gelijkloopinstallatie) in de tijd te vergelijken met de ingestelde waarde, en door analyse van de verschillen, kan worden geconstateerd of er lekkage aanwezig is. Externe lekkage is waar te nemen als oliesporen of excessieve standverhoging van het niveau van het olietankje bij de zuigerstangafdichting. In alle andere gevallen betreft het inwendige lekkage.

Door deels nog te ontwikkelen inspectiemethoden en -criteria voor de toelaatbare mate van lekkage, spelingen en corrosie zal het in de toekomst, met uitzondering van calamiteiten, goed mogelijk kunnen zijn een voorspelling te doen over het tijdstip waarop een onderdeel, bijvoorbeeld een afdichting of lager, vervangen moet worden. Het risico van falen en incidenteel groot onderhoud in het stormseizoen wordt daarmee beperkt tot een aanvaardbaar niveau. Minimale kosten (netto contante waarde) worden bereikt door, binnen de eisen van faalkans en beschikbaarheid, zo laat mogelijk te beginnen met vervangen.

6.2.2 Planmatig groot onderhoud

Gebruik van de kering is in hoge mate gericht op het beschikbaar zijn voor de verwachte stormvloed met een frequentie van een tot drie maal per stormseizoen. Omdat het bewegingswerk vrijwel altijd in rust is moet de oorzaak van functieverlies meer worden gezocht in aantasting door tijdafhankelijke afbraakprocessen bij stilstand, dan in materiaalafname in relatie met beweging. Bij het ontwerp en de fabricage is veel aandacht gegeven aan het voorkomen van deze afbraakprocessen op kritieke onderdelen zoals afdichtingen en lagers.

Planmatig groot onderhoud van de bewegingswerken is onderverdeeld in de groepen:

1. cilindersamenstellingen
2. zuigerpakkingen
3. hydraulische aggregaten/leidingen

Ad 1. cilindersamenstellingen

De cilindersamenstellingen, inclusief de cardanbalken, zijn te karakteriseren als een groot aantal zware onderdelen waar bij (de)-montage en transport bokken en vervoer over water nodig zijn. Na het opleveren van de installaties is een analyse gemaakt om te bepalen hoe groot onderhoud aan de cilinders verantwoord kan worden aangepakt. Het optimale vervangingsscenario streeft naar minimale kosten bij acceptabele faalkans en beschikbaarheid. Op grond van een probabilistische benadering is bepaald na hoeveel bedrijfsjaren planmatig groot onderhoud moet beginnen en hoe het vervangingsscenario er dan uit moet zien. Uitgangspunt is een, op grond van onderzoek en waarnemingen in de praktijk bij inspecties, geschatte levensduur van de afdichtingen, zuigerstangbedekking en lagers van 50 jaar +/-25 jaar. Door de toestand van de cilinders te monitoren en die met de slechtste conditie prioriteit te geven wordt het vervangingsscenario geoptimaliseerd met betrekking tot kosten en faalkans. Inspectie op de mate van lekkage is een goede mogelijkheid een voorspelling te doen over het tijdstip waarop een cilinder aan vervanging toe is. Voor de eerste 50 bedrijfsjaren (van 1986 tot ca. 2040) is het optimale vervangingsscenario bepaald. Het blijkt dat met ingang van 2014 kan worden volstaan met het vervangen van 4 cilinders per jaar. Het risico dat in enig jaar incidenteel een extra cilinder moet worden vervangen, of niet kan worden voldaan aan de eis met betrekking tot beschikbaarheid is dan gering.

Bij groot onderhoud wordt de cilindersamenstelling inclusief cardanbalk compleet gedemonteerd, naar een werkplaats gebracht en daar gereviseerd. Hierbij worden afdichtingen en lagers vervangen en een zuigerstang met vernieuwde bedekking gemonteerd. Omdat de toelaatbare periode van niet-beschikbaarheid kort is wordt de afkomende cilinder direct vervangen door een reserve cilinder. Revisie van de afkomende complete cilinder kan voor het volgende niet-stormseizoen worden afgerond indien er een reserve zuigerstang beschikbaar is. De afkomende cilinder wordt na revisie als reserve in voorraad genomen voor vervanging van een cilinder in het volgende jaar. Voor de vervanging moet naar behoefte een voorraad reserve cilindersamenstellingen en zuigerstangen worden aangelegd. Na een inloopperiode wordt uiteindelijk een stabiele voorraad van twee reserve cilindersamenstellingen en twee zuigerstangen per type bereikt (*zie 6.3 reservedelen*). Om de reserve voorraad cilindersamenstellingen en zuigerstangen in stand te houden moeten de gereviseerde, afkomende cilinders en zuigerstangen binnen een jaar weer als reserve beschikbaar zijn.

Ad 2. zuigerpakkingen

Moet er onderhoud worden gepleegd aan de zuigerpakking, dan is het nodig het deksel van de cilinder te verwijderen, de zuigerstang van de schuif los te nemen en de zuigerstang extra op te vijzelen totdat de zuiger boven de flens van de cilinder uitsteekt. Daartoe is de volgende procedure bedacht:

- de schuif met de bewegingswerken in de onderhoudsstand brengen; de zuiger komt dan in aanslag met het deksel;
- visueel vaststellen dat de hoogste stand is bereikt; hierna zeer kort het commando "sluiten" geven; hierdoor wordt het deksel ontlast;
- schuif op de ophanghaken plaatsen;
- de cardanbalken onderstoppen;
- de cilindermantel afsteunen op de cardanbalk
- deksel losnemen
- stang losnemen van de schuif
- stang met trekvijzel verder omhoog brengen totdat zowel de bovenste als de onderste zuigerpakking geheel uit de cilindermantel steekt.

Ad 3. hydraulische aggregaten/leidingen
De hydraulische aggregaten en leidingen zijn te karakteriseren als een groot aantal installaties met kleine onderdelen waar bij (de)-montage met klein materieel en transport via de verkeerskoker en de weg mogelijk is. Planmatig groot onderhoud van de hydraulische aggregaten en leidingen zal op dezelfde manier als bij de cilinders moeten worden aangepakt. Ook hier moet een optimaal vervangingsscenario worden bepaald zodat onderhoud van het grote aantal installaties gefaseerd, en binnen de eisen met betrekking tot faalkans en beschikbaarheid, kan worden uitgevoerd.

6.3 Reservedelen

Om de doorlooptijd van onderhoud binnen acceptabele grenzen te houden moet een voorraad reserve-onderdelen worden aangelegd. De voorraad, en met name de grote en kostbare onderdelen, kan gefaseerd worden aangeschaft op grond van de geplande behoefte voor groot onderhoud tot en met het volgende niet-stormseizoen. De zuigerstangen kunnen als voorbewerkt smeedstuk worden aangeschaft en daarna naar behoefte worden voorzien van een nader te bepalen bedekking van het stangoppervlak en de eindbewerking. Andere grote enkelvoudige onderdelen die later nodig blijken te zijn kunnen ook als voorbewerkt smeedstuk of gietstuk in de voorraad reservedelen worden opgenomen.

Een overzicht van de gewenste reservedelen is opgenomen in tabel 6.1. In de toekomst zal deze tabel op grond van ervaring moeten worden bijgesteld. Waar verschillende cilindertypen gebruik maken van identieke onderdelen kan het mogelijk zijn de omvang van de voorraad te beperken tot de behoefte tot en met het volgende niet-stormseizoen.

Omschrijving	**Aantal per cilindertype**							**aantal totaal**
	5900	**6900**	**7900**	**8900**	**9900**	**10900**	**11900**	
Cilindersamenstelling c.a.	2	2	2	2	2	2	2	14
Cardanbalksamenstelling	2	2	2	2	2	2	2	14
Zuigerstang	2	2	2	2	2	2	2	14
Dynamische en statische afdichtingen	2	2	2	2	2	2	2	14
Bevestigingsartikelen	2	2	2	2	2	2	2	14
Lagers voor cardanbalk en onderoog	2	2	2	2	2	2	2	14
Materiaal voor pennen cardan/onderoog	2	2	2	2	2	2	2	14
Materiaal voor bussen van onderoog	2	2	2	2	2	2	2	14
Onderdelen voor aggregaten	2	2	2	2	2	2	2	14

Tabel 6.1 Overzicht reservedelen bewegingswerken

7. Documentatie

[1] Totaalontwerp — Ontwerpnota SVKO, boek 1
[2] Waterbouwkundige werken — Ontwerpnota SVKO, boek 2
[3] Betonwerken — Ontwerpnota SVKO, boek 3
[4] Sluitingsmiddelen — Ontwerpnota SVKO, boek 4
[5] Hulpsystemen en -werktuigen — Ontwerpnota SVKO, boek 5
[6] — Notitie 64 BEWO-N-80023
[7] Faalkans-analyse SVKO — Rapport DDWT80, TNO-IBBC rapport B-80-62/62.3.2002

[8] Faalkansanalyse bewegingssysteem schuiven — TNO rapport 78-049891 (6PROBU-79312)
[9] Analyse bewegingswerken schuiven SVKO — KEMA rapport 2614-80
[10] Analyse falen tandheugelsysteem SVKO — TNO rapport 80-07271
[11] Beschikbaarheidanalyse bewegingswerken — KEMA rapport WSK/30125-1
[12] Herziening faalkansanalyse schuif — RWS notitie 6PROBU-M-84080
[13] Faalkansanalyse schuifbewegingswerken — RWS notitie 6PROBU-M84133
[14] — Notitie PEGESS-M-85040
[15] Faalkans en niet-beschikbaarheid schuiven — Notitie 6PROBU-M-85039
[16] Beschikbaarheid SVKO — KEMA rapport WSK/85-58 RvO/CCL
[17] Belasting op schuif tijdens sluiten — Rapport DDWT-79.368
[18] Belasting op schuiven gesloten situatie — Rapport DDWT-79.406
[19] Belasting op schuiven — Rapport DDWT-79.415
[20] *Belastingen vakwerkschuiven tijdens openen* — Rapport DDWT-80.276
[21] Zie deelnota 4 Hoofdstuk 9 documentatie [3.1] t/m [3.8]
[22] Richtlijn berekenen machine-onderdelen van beweegbare bruggen en aanverwante bewegingswerken; — Uitgave RWS
[23] *Belastingen en toelaatbare spanningen* — RWS Hoofdafdeling Elektromechanica, 1981
[24] Aanvraag kogelgewrichtslagers SVKO — Notitie 6PROBU-M-82108
[25] Invloed golfbelasting op meetnauwkeurigheid gelijkloop-installatie — Notitie 6PROBU-M-85143
[26] — *Notitie 6PROBU-M-82093*
[27] Brandbestrijding in verkeerskokers SVKO — Rapport 6PROBU-M-83012
[28] Plaatsen schuiven en bewegingsinrichtingen — Rapport SVKO-UMGEFO-R-82.115
[29] BARCON-rapporten; Rand Corporation:
- Summary report — R-2121/1-NETH Volume I, december 1977
- Assessment of security from flooding — R-2121/2-NETH Volume II, april 1977
- Summary report — R-2444/1-NETH Volume I, september 1979
- Sensitivity analysis — R-2444/2-NETH Volume II, september 1979
- Predicting North Sea water levels — R-2444/3-NETH Volume III, september 1979
- Basin response to North Sea water levels; the Barcon SIMPLIC model — R-2444/4-NETH Volume IV, september 1979

[30] Bliksembeveiliging — Notitie 6PROBU-M-83095
[31] Bliksembeveiliging — Notitie 6PROBU-M-83118
[32] Bliksembeveiliging — Notitie 6PROBU-M-84004
[33] Aantal gelijktijdig te conserveren schuiven — Directie Zeeland; BNW-M-96022
[34] RWS rapport DDWT-80411 — Belasting vakwerkschuiven gesloten situatie
[35] RWS rapport DDWT-80433 — Belasting vakwerkschuiven maandelijks bewegen
[36] RWS rapport DDWT-80489 — A: Verticale belasting vakwerkschuiven tijdens sluiten B: Verticale belasting vakwerkschuiven tijdens openen

[37] *Fatigue design rules for welded steel joints* — Welding Institute Research Bulletin, Vol. 17, 1976

Deelnota 6: Elektrische installatie

Inhoud

1. Inleiding pagina **226**
1.1 Ontwerpfilosofie
1.1.1 Algemene beschouwing
1.1.2 Keuze energievoorziening
1.1.3 Systeemopbouw energievoorziening
1.1.4 Keuze besturings-, bedienings- en bewakingssysteem
1.1.5 Opbouw besturings-, bedienings- en bewakingssysteem

2. Uitgangspunten ontwerp en uitvoering **232**
2.1 Levensduur
2.2 Betrouwbaarheid en beschikbaarheid
2.2.1 Faalkansanalyses
2.2.2 Ontwerpmaatregelen
2.3 Uitgangspunten en eisen aan de totale energie-voorziening
2.3.1 Vermogensberekening installaties
2.3.2 Betrouwbaarheid energievoorziening
2.4 Besturings-, bedienings- en bewakingssysteem
2.4.1 Algemene aspecten besturings- bedienings- en bewakingssysteem
2.4.2 Eisen besturings-, bedienings- en bewakingssysteem
2.4.3 Ontwerp- en uitvoeringsrichtlijnen

3. Energielevering, -opwekking en -distributie **240**
3.1 Algemene aspecten energievoorziening
3.2 Energielevering door PZEM
3.2.1 10 kV-scheidingsstations
3.2.2 Scheidingstransformator
3.2.3 Aardfoutdetectie
3.3 Dieselcentrales A en B
3.3.1 Ventilatie- en koelsysteem
3.3.2 Dieselgeneratorset
3.3.3 10 kV-schakelstation
3.3.4 Ballastweerstanden
3.3.5 Eigen bedrijf en hulpinstallaties
3.3.6 Wandcontrolepaneel dieselcentrales
3.3.7 Brandbestrijding
3.4 Energiedistributie
3.4.1 10 kV-verdeelstation dieselcentrale A en B
3.4.2 10 kV-ringleidingen
3.4.3 Laagspanningsverdeling CBG
3.5 Energielevering bijzondere voedingen
3.5.1 Omvormervoeding CBG
3.5.2 Omvormervoeding PMS
3.5.3 Het 24 V=-deelnet CBG
3.5.4 Het 24 V=-deelnet dieselcentrale
3.6 Lokale Elektrische Installatie
3.6.1 24 V=-deelnet
3.6.2 Veiligheidsaarde
3.6.3 Bliksemafleiding en overspanningbeveiliging
3.6.4 Kathodische bescherming

4. Centrale besturing, bediening en bewaking **260**
4.1 Centraal besturingssysteem
4.2 Computerconfiguratie
4.3 Bedieningsvormen en bedieningsmiddelen
4.3.1 Veilige bediening
4.3.2 Alternatieve bediening
4.3.3 Geen bediening
4.3.4 Bedieningslessenaar
4.3.5 Wandcontrolepaneel
4.3.6 Beeldschermbediening

5. Lokale besturing, bediening en bewaking **266**
5.1 Hefhoogtemeting/scheefstandmeting
5.2 Hydraulische installatie
5.3 De Lokale ComputerConfiguratie
5.3.1 I/O-computers
5.3.2 De display-computer
5.3.3 De primaire besturingscomputer
5.3.4 De back-up besturingscomputer
5.3.5 De interne databus
5.3.6 De 2-uit-3 logica
5.3.7 Hydrauliek omschakel- en drukknoppenkast
5.3.8 Het lokale bedieningspaneel
5.4 Procesbesturing

6. Netwerkverbindingen voor besturing, bediening en bewaking **278**
6.1 Veilige verbinding
6.2 Alternatieve verbinding

7. Noodsluitsysteem **281**
7.1 Peilmeetstations
7.2 Communicatie en verbindingen
7.3 NSS-computersysteem
7.4 Startautomaat

8. Uitvoeringsaspecten **285**
8.1 Productieproces
8.2 Ontwerp
8.3 Fabricage
8.3.1 Hardwaremodellen
8.3.2 Softwaremodellen
8.4 Beproeving
8.4.1 Omgevingsbeproeving
8.4.2 Mechanische beproeving
8.5 Acceptatie
8.6 Assemblage en montage

9. Beheer en onderhoud **290**
9.1 Beheer van de stormvloedkering
9.2 Onderhoud van de stormvloedkering
9.2.1 Het onderhoudsinformatiesysteem
9.2.2 Het onderhoudshandboek
9.2.3 Verschillende typen onderhoud
9.3 Communicatiemiddelen beheer en onderhoud
9.3.1 Telefoon middenspanningsinstallatie
9.3.2 Werkspreekverbinding
9.3.3 Automatische telefoondoorkiezer
9.3.4 Geluidsinstallatie

10. Documentatie **296**

1. Inleiding

De schuiven van de stormvloedkering Oosterschelde worden geopend en gesloten met behulp van hydraulische bewegingswerken, die alleen functioneren als ze zijn voorzien van een elektrische installatie. Van belang hierbij is een gewaarborgde energielevering en een goed functionerende besturing en bediening, met daarbij een continue bewaking van alle processen. De elektrische installatie en de in deelnota 5 omschreven bewegingswerken hebben derhalve een groot raakvlak en zijn beide van essentieel belang voor het functioneren van de beweegbare kering.

De elektrische installatie van de stormvloedkering Oosterschelde kan worden opgesplitst in een drietal hoofdgroepen:
1. Installaties die betrokken zijn bij de voeding, besturing, bediening en bewaking van onderdelen van de beweegbare kering, zoals de schuiven en de bewegingswerken, en bij de procesbeheersing vanuit het centraal bedieningsgebouw;
2. Facilitaire installaties voor onder andere communicatie, beveiliging, bescherming en objectbewaking;
3. Algemene installaties voor objecten die niet verbonden zijn met de kerende functie, zoals gebouwen, wegen en terreinen.

Deze deelnota beschrijft dat deel van de elektrische installatie dat betrekking heeft op de voeding, de bediening, het beheer en het onderhoud van de beweegbare kering. De volgende installatiedelen komen aan de orde:
- de energielevering, -opwekking en -distributie;
- het centraal besturingssysteem (CCC);
- het lokaal besturingssysteem (LCC);
- het automatisch noodsluitsysteem (NSS);
- de communicatiemiddelen ten behoeve van beheer en onderhoud.

Omdat veelvuldig gebruik gemaakt zal worden van afkortingen zijn in tabel 1.1 de meest voorkomende afkortingen gegeven.

1.1 Ontwerpfilosofie

De elektrische installatie is op te splitsen in deelsystemen met elk een min of meer afzonderlijke functie. In relatie tot de sluitingsmiddelen is de functie van de elektrische installatie tweeledig, namelijk het verzorgen van de energievoorziening en het verzorgen van de procesbeheersing. Deze tweedeling is zichtbaar in de opzet van de elektrische installatie met enerzijds het systeem voor de totale energievoorziening en anderzijds het systeem voor de besturing, bediening en bewaking.
Aan beide systemen zijn respectievelijk de volgende taken gebonden:
- Het op een betrouwbare wijze voorzien in de energiebehoefte van de gehele stormvloedkering;
- Het op een betrouwbare wijze uitvoeren, beheersen en bewaken van de gewenste activiteiten aan de hand van gegeven opdrachten.

ATD	**A**utomatische telefoon**d**oorkiezer
BSS	**B**eslis- en **s**imulatie**s**ysteem
CBG	**C**entraal **b**edienings**g**ebouw
CBS	**C**entraal **b**edienings**s**ysteem
CCC	**C**entrale **c**omputer**c**onfiguratie
CDR	**C**ritical **D**esign **R**eview
DCA	**D**iesel**c**entrale **A**
DCB	**D**iesel**c**entrale **B**
DNM	**D**igitale **n**iveau**m**eting
Hx	**H**ammen (x = 1 t/m 15), schuifaanduiding
I/O	**I**nput / **O**utput
IWL	**I**nner **W**ater **L**evel
KB	**K**athodische **b**escherming
LBS	**L**okaal **b**edienings**s**yteem
LCC	**L**okale **c**omputer**c**onfiguratie
LEI	**L**okale **e**lektrische **i**nstallatie
LS(V)	**L**aag**s**panning(**s**voorziening)
MMC	**M**an **M**achine **C**ommunication
MS	**M**idden**s**panning
NSS	**N**oods**l**uit**s**ysteem
OIS	**O**nderhouds-**i**nformatie**s**ysteem
OWL	**O**uter **W**ater **L**evel
PC	**P**roces**c**omputer
PDR	**P**reliminary **d**esign **r**eview
PMS	**P**eil**m**eet**s**tation
PMS Bi	**P**eil**m**eet**s**tation **Bi**nnenhaven
PMS Bu	**P**eil**m**eet**s**tation **Bu**itenhaven
PROM	**P**rogrammable **R**ead **O**nly **M**emory
PZEM	**P**rovinciale **Z**eeuwse **E**nergie **M**aatschappij (nu: Delta Nuts Bedrijf)
RPS	**R**oom**p**ot**s**luis
RWS	**R**ijks**w**ater**s**taat
Rx	**R**oompot (x = 1 t/m 31), schuifaanduiding
SVKO	**S**tormvloed**k**ering **O**osterschelde
Sx	**S**chaar (x = 1 t/m 16), schuifaanduiding
WED	**W**erktuigkundige en **E**lektrotechnische **D**ienst

Tabel 1.1 Afkortingen elektrische installatie

De samenhang tussen beide systemen is dat het bedienings- en besturingssysteem wordt gevoed door de energievoorziening, terwijl de centraal bediende energievoorziening alleen kan functioneren dankzij het besturingssysteem.

1.1.1 Algemene beschouwing

Voor de stormvloedkering kunnen de volgende drie functies worden onderscheiden, te weten een doorlaatfunctie, een keerfunctie en een transformatiefunctie (zie deelnota 1)

Ingeval van de doorlaatfunctie en de keerfunctie zijn de schuiven van de kering in een eindstand gepositioneerd, respectievelijk 'op' of 'neer'. De hydraulische cilinders bewegen niet en de kering is in rust. Deze toestand wordt aangeduid als sluimertoestand. In de transformatiefunctie worden de schuiven met behulp van de bewegingswerken bewogen. De kering is dan in bedrijf. Deze toestand wordt de bedrijfstoestand genoemd.
Het geheel van schuiven, bewegingswerken en de bijbehorende elektrische installatie vormt het actieve deel van de kering. Men zou kunnen stellen dat de schuiven en de bewegingswerken de uitvoerende organen zijn van de transformatiefunctie.

De elektrische installatie is vooral van belang voor de transformatiefunctie. Deze installatie zorgt immers zowel voor de energievoorziening van de bewegingswerken, als voor de procesbesturing en bediening van die transformatiefunctie.

De totale energievoorziening kent een drietal onderdelen:
1. de energielevering van de kering in rust (sluimertoestand) door het energieleverend bedrijf;
2. de energielevering van de kering in bedrijf (bedrijfstoestand) door eigen energieopwekking;
3. de distributie van de energie.

De functie van het bedienings- en besturingssysteem is:
1. de bediening en bewaking van de energievoorziening;
2. de centrale bediening en bewaking van de bewegingswerken (de CCC) inclusief het noodsluitsysteem;
3. de lokale bediening en bewaking van de bewegingswerken (de LCC).

1.1.2 Keuze energievoorziening

Voor de totale energievoorziening zijn zowel het economische aspect als het betrouwbaarheidsaspect zeer belangrijk. De energievoorziening moet altijd gewaarborgd zijn, het liefst tegen zo laag mogelijke kosten.

Voor de energielevering is een keuze mogelijk uit drie alternatieven:
1. levering uit het openbare distributienet van de PZEM;
2. levering uit eigen opwekking met dieselgeneratoren;
3. een combinatie van beide.

Bij de bouw van de kering is voor de bronbemaling van de bouwputten gebruik gemaakt van een eigen energieopwekking met behulp van vijftien dieselgeneratorsets. Hiervoor is gekozen op grond van een kosten-batenanalyse, waaruit naar voren kwam dat energielevering uit een eigen centrale financieel aantrekkelijker was, en betere waarborgen gaf voor een continue stroomlevering, dan voeding vanuit het energieleverend bedrijf. Een aantal van deze dieselgeneratorsets zou bovendien na een revisie opnieuw gebruikt kunnen worden, bijvoorbeeld voor de eigen energieopwekking van de stormvloedkering. De investering in de dieselgeneratorsets voor de bronbemaling kan dan ook als een voor-investering voor de eigen energieopwekking van de stormvloedkering Oosterschelde gezien worden.

Omdat eigen energieopwekking één van de mogelijkheden is voor de totale energielevering, gelden de specificaties van de huidige dieselgeneratorsets als randvoorwaarden voor de nadere uitwerking van het ontwerp:

Diesel	Cummins, type KTA 2300G
Generator	Van Kayck, type DIDB 110/800-4
A-vermogen	584 kW (normaal vermogen)
B-vermogen	640 kW (piekvermogen)
Spanning	400 Volt
Frequentie	50 Hz

Belangrijk voor de keuze van de totale energielevering is het gegeven dat onder normale omstandigheden met een niet-bewegende kering (sluimertoestand) een constante energie wordt afgenomen op een betrekkelijk laag niveau, terwijl met een sluitende of openende kering (bedrijfstoestand) gedurende een korte periode (circa één uur) een veelvoud daarvan wordt afgenomen. Een ander belangrijk gegeven is dat de kering overwegend alleen tijdens kantooruren wordt bemand, waardoor in de avond- en nachtelijke uren een nog lagere constante energie wordt afgenomen.

Uit de in paragraaf 2.3.1 opgezette vermogensberekeningen blijkt dat er tijdens sluimertoestand van de kering vrijwel altijd een constant vermogen nodig is van 520 kW. Onder deze omstandigheden is het economisch aantrekkelijker, en milieutechnisch beter, de energielevering voor dit vermogen te betrekken uit het openbare distributienet van de PZEM dan uit een eigen energieopwekking. De voordelen zijn:
- de benodigde stroom kan met een voedingskabel over de kering zonder speciale voorzieningen in het distributienet van de PZEM tegen normaal tarief worden geleverd;
- er hoeven geen dieselgeneratoren permanent te draaien, waardoor de levensduur ervan aanzienlijk wordt verlengd;
- er is geen permanente geluidshinder wanneer de energie door PZEM wordt geleverd;
- met levering door PZEM is er aanzienlijk minder brandstofverbruik door dieselgeneratoren, wat als gevolg heeft dat de lucht aanzienlijk minder wordt vervuild.

Tijdens bedrijfstoestand is een veel hoger vermogen nodig dan in sluimertoestand. Uit de vermogensberekening in paragraaf 2.3.1 komt naar voren dat tijdens bedrijfstoestand een vermogen nodig is van maximaal 3000 kW. Aansluiting op het PZEM-net tijdens bedrijfstoestand heeft dan ook nadelen:
- voor de aanvoer van het benodigde vermogen is een behoorlijke investering in het distributienet van de PZEM noodzakelijk;
- tegenover een laag verbruik in sluimertoestand moet voor de leveringsgarantie van het benodigde piekvermogen tijdens bedrijfstoestand een zeer hoog vastrechttarief worden betaald; de belasting is immers voor het PZEM-net zeer ongunstig.

Daar komt bij dat in geval van een storing in de PZEM-leverantie geen reservevermogen beschikbaar is. Dit is onaanvaardbaar met het oog op de veiligheidsfunctie van de kering en de eisen die aan de faalkans gesteld zijn.

Gekozen is dan ook voor het derde alternatief, een combinatie van energielevering door PZEM en uit eigen opwekking: onder normale omstandigheden (tijdens sluimertoestand) wordt (een betrekkelijk laag) vermogen onttrokken aan het openbare distributienet van de PZEM, terwijl tijdens bedrijfstoestand het hoge benodigde vermogen onttrokken wordt uit eigen opwekking. Op deze wijze is energielevering tijdens de bedrijfstoestand veiliggesteld, omdat deze met een voldoende mate van betrouwbaarheid kan worden opgewekt door de eigen energiecentrale. Bovendien fungeert de eigen energieopwekking als reserve wanneer de PZEM-voeding tijdens sluimertoestand uitvalt.

Niet alleen het volledig openen en sluiten van de kering tijdens stormsituaties veroorzaakt een hoog benodigd vermogen, maar ook specifiek onderhoud en bepaalde onderhoudssluitingen. Deze handelingen maken onderdeel uit van de bedrijfstoestand en be-

treffen het afzonderlijk bewegen van meerdere schuiven ingeval van planmatig onderhoud (onder andere het maandelijks bewegen), en het bewegen van alle schuiven van de kering volgens vooraf vastgestelde strategieën, waarbij verschillende schuifhoogten worden aangehouden.
Zoals uit de vermogensberekeningen in paragraaf 2.3.1 blijkt, is het garantievermogen van de PZEM-voeding gebaseerd op het uitvoeren van standaard onderhoud en het bewegen van bijvoorbeeld één enkele schuif. De hiervóór genoemde handelingen overschrijden echter dit garantievermogen en worden daarom gevoed uit eigen opwekking.

Tijdens sluimertoestand is gekozen voor een PZEM-voeding met een garantievermogen van 960 kW, zodat er ten opzichte van het constant benodigde vermogen nog een ruime marge over is om grote pieken als gevolg van bijvoorbeeld standaard onderhoud te kunnen opvangen en om de elektrische installatie nog uit te kunnen breiden.

Door het energieleverend bedrijf is indertijd de mogelijkheid geopperd om de dieselcentrales te laten terugvoeden naar het PZEM-net. Dit verlaagt de energiekosten. Maar om deze mogelijkheid ten volle te kunnen benutten, zouden de benodigde scheidingstransformatoren en de voedingsverbinding van de PZEM flink in capaciteit moeten worden verzwaard. Omdat dit aanzienlijk hogere investeringskosten met zich meebrengt en omdat de gebruiksduur van de eigen energieopwekking betrekkelijk laag is, viel hieruit geen voordeel te behalen. Nu is alleen voorzien in een kortstondig paralleldraaien van enkele dieselgeneratoren met de PZEM-voeding (synchronisatie) om de voeding ongestoord te kunnen overnemen.

Bij de keuze van een eigen energieopwekking moet met de grootst mogelijke bedrijfszekerheid een vermogensbehoefte van minimaal 2900 kW worden gegarandeerd om de kering naar behoren te laten functioneren.
Gerelateerd aan de huidige gegevens en de vermogensberekening in tabel 1.2 zou een eigen energiecentrale met minimaal vijf dieselgeneratoren net voldoende zijn om het benodigde vermogen te leveren.

	Vermogen [kW]	
	normaal	piek
vermogen per dieselgenerator	584	640
vermogen van één energiecentrale (vijf diesels)	2920	3200
eigen verbruik centrale	143	143
vermogen van één energiecentrale	**2777**	**3057**

Tabel 1.2 Opgewekt vermogen met vijf diesels van één energiecentrale

Er dient echter rekening gehouden te worden met het feit dat het hier het kortstondig piekvermogen betreft en dat uitval van één van de generatoren dus absoluut niet mag voorkomen. Tevens moet rekening worden gehouden met het feit dat dieselgeneratoren onderhevig zijn aan een onderhoudscyclus en buiten bedrijf kunnen zijn. Een ander belangrijk gegeven is dat een automatische startregeling nodig is, omdat de kering buiten kantooruren onbemand is. Daarbij bestaat de kans dat één of meer generatoren niet willen opstarten. Het is dus niet realistisch te veronderstellen dat alle dieselgeneratoren inderdaad op het gewenste moment zullen draaien.

In een faalkansanalyse voor de bedrijfstoestand bleek de kans op storing van meer dan twee generatoren op een totaal van acht een te grote bijdrage te leveren aan de totale faalkans. De kans op storing van meer dan drie generatoren uit een totaal van negen bleek voldoende klein om tot een aanvaardbare totale faalkans van de kering te komen. Op basis hiervan is gekozen voor twee bouwkundig gescheiden en elektrisch onafhankelijk werkende energiecentrales met elk vijf dieselgeneratoren. Wanneer alle generatoren draaien kan een totaal vermogen worden geleverd van 5840 kW (normaalvermogen) tot 6400 kW (piekvermogen). Zouden drie generatoren niet beschikbaar zijn wegens storing en is één generator niet beschikbaar wegens onderhoud, dan blijven er zes generatoren over die samen voldoende vermogen leveren voor de bedrijfstoestand (tabel 1.3).

	Vermogen [kW]	
	normaal	piek
vermogen per dieselgenerator	584	640
vermogen totaal (zes diesels draaiend)	3504	3840
eigen verbruik twee centrales	200	200
vermogen totaal	**3304**	**3640**

Tabel 1.3 Opgewekt vermogen met zes diesels verdeeld over twee energiecentrales

De belangrijkste randvoorwaarde voor onderhoud die hieruit volgt is dan ook, dat nooit meer dan één dieselgenerator wegens onderhoud buiten bedrijf mag worden gesteld.

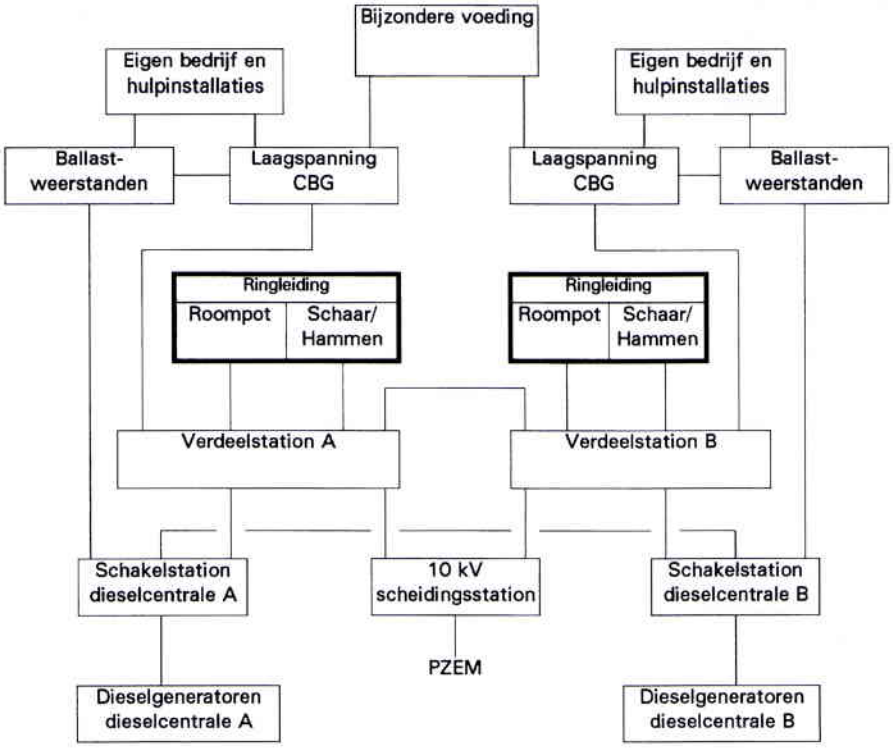
De verdeling van tien dieselgeneratoren over twee onafhankelijk werkende centrales heeft als bijkomend voordeel dat wanneer door een calamiteit, brand bijvoorbeeld, één centrale is uitgeschakeld, de andere nog volledig kan functioneren.

Bij uitval van de PZEM-voeding in sluimertoestand zullen automatisch drie voorgeselecteerde generatoren van de eigen energieopwekking opgestart worden. Het dan beschikbare vermogen is ruim voldoende om in de energiebehoefte te voorzien. Daarmee wordt ook een mogelijke storing of uitval van één van de generatoren opgevangen.

1.1.3 Systeemopbouw energievoorziening

Kenmerkend voor de totale energievoorziening die met voldoende zekerheid de benodigde energie voor de sluimertoestand en de bedrijfstoestand van de kering levert, is de wijze waarop de energie gegenereerd en gedistribueerd wordt. De opzet van de totale energielevering wordt dan ook bepaald door voorzieningen die de energielevering, -opwekking en -distributie met voldoende bedrijfszekerheid waarborgen, alsmede door de regionale spreiding van de aanwezige stroomafnemers op de kering. Op basis van de geschatte vermogens, de randvoorwaarden en de gestelde eisen aan beschikbaarheid en betrouwbaarheid is gekozen voor een energievoorziening met de systeemopbouw volgens figuur 1.1.

Behalve de energielevering moet ook de distributie van de energie over de verschillende locaties van de kering en over de verschillende stroomafnemers aan hoge betrouwbaarheidseisen voldoen. Mede met het oog hierop is het eigen distributienet opgezet als ringleidingsysteem met een dubbele uitvoering van de vitale verdeelfuncties. Vanwege de relatief grote transportafstanden en de



Figuur 1.1 Overzicht totale energielevering

vrij grote te transporteren vermogens is gekozen voor een distributiespanning van 10 kV en een transformatie hiervan naar de gebruiksspanning 220/380 V zo dicht mogelijk bij de gebruikers. Een hoge distributiespanning geeft bij grote vermogens procentueel gezien minder energieverlies dan een lage distributiespanning. Hierdoor kunnen de installatiekosten (er zijn bijvoorbeeld dunnere kabels nodig door minder spanningsverlies) laag gehouden worden.

Om de energielevering op het eigen distributienet zo lang mogelijk te garanderen is het eigen net uitgevoerd als zwevend net (in het IT-stelsel volgens de NEN1041). Dat betekent dat geen van de voedingsbronnen van het distributienet aan de aarde is verbonden en dat er geen nulleidingen of aardleidingen meelopen. Alle metalen frames, kabelrekken, opstelkasten, etc. bij de gebruikers binnen het distributienet zijn afzonderlijk of groepsgewijs ter plaatse geaard. Het voordeel hiervan is dat bij kortsluiting tussen één van de fasen met aarde de stroomvoorziening niet wordt gestoord en in principe doorgang kan vinden. Hierdoor is de betrouwbaarheid van het energietransport zeer groot.
De keuze voor een zwevend net houdt wel in dat voor de kwaliteitsbewaking van de isolatie tussen de stroomvoerende delen en aarde een continue aardfoutmeting en signalering nodig is. Tevens is het voor de veiligheid van het systeem van groot belang dat een consequente elektrische doorkoppeling en aarding wordt aangehouden van die metalen delen die door een isolatielek met hoogspanning in aanraking kunnen komen.

1.1.4 Keuze besturings-, bedienings- en bewakingssysteem

Er zijn drie aspecten waarmee bij de keuze van het besturings-, bedienings- en bewakingssysteem rekening moet worden gehouden:
1. Het economisch aspect; hierbij is gekeken naar wat de personeelskosten zijn tegenover de investerings- en exploitatiekosten van een (deels) geautomatiseerd systeem;
2. Het veiligheidsaspect; het gaat hier niet om een puur technische opsomming van faalkansen, maar vooral om de vraag of de kans op een menselijke fout groter dan wel kleiner is dan de kans op een technische storing van een geautomatiseerde installatie;
3. Het creativiteitsaspect; in tegenstelling tot een geautomatiseerde installatie, heeft de mens de mogelijkheid om te improviseren. Zeker in een situatie waarin geanticipeerd moet worden op een bedrijfstoestand die afhankelijk is van natuurkrachten, is dit een belangrijk aspect.

Vanwege het grote aantal bewegingswerken en de verspreiding van die bewegingswerken over een groot gebied, is centrale bediening, besturing en bewaking van de stormvloedkering noodzakelijk. Dat betekent dat de decentrale installatiedelen volledig geautomatiseerd moeten zijn. Bovendien is het centrale deel van de installatie zo opgezet dat alle routinehandelingen met betrekking tot de bediening en besturing zijn geautomatiseerd en dat er slechts een klein aantal handelingen door de bemanning wordt uitgevoerd. Hierdoor is de kans op menselijke fouten tot een minimum teruggebracht, terwijl er tegelijkertijd ruimte blijft om de kering naar eigen inzicht aan te sturen. Deze opzet van bedienen en besturen is in overeenstemming met de gegevens die naar voren zijn gekomen uit faalkansberekeningen betreffende de meest veilige sluitingsstrategie bij stormvloed. Het meest veilig is een vroegtijdige sluiting op grond van een voorspelling dat een stormvloed zal optreden. Deze sluitingsstrategie is alleen met een menselijke bediening mogelijk. Omdat de frequentie van sluiting bij stormvloed laag is (circa één maal per jaar), is het niet noodzakelijk dat voor deze sluitingsstrategie permanent bemanning aanwezig is. Volstaan kan worden met een oproepbare bemanning.

Keringsoperaties worden uitgevoerd vanuit de centrale bedieningsruimte in het ir. J.W. Topshuis, waarin een centrale bedieningslessenaar en een centraal wandcontrolepaneel zijn opge-

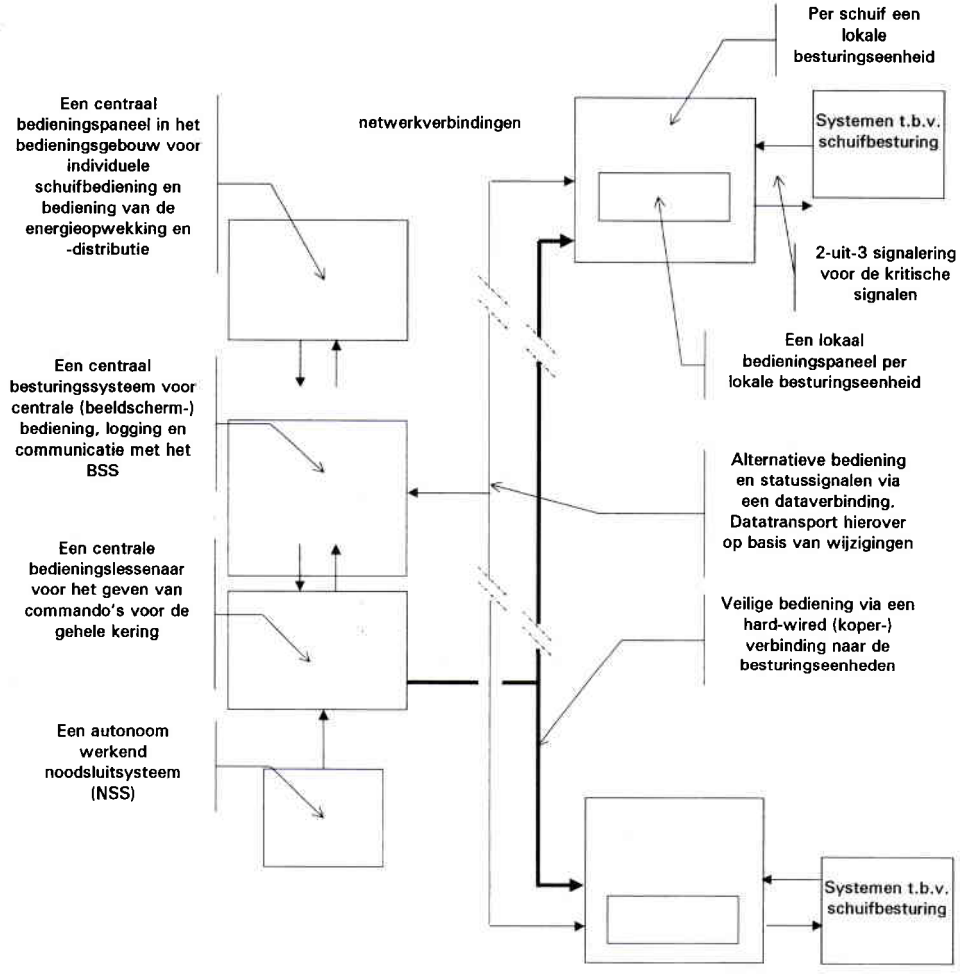
steld. Er zijn twee soorten handmatige bediening van de kering: veilige bediening en alternatieve bediening. Alternatieve bediening wordt vrijwel dagelijks gebruikt voor onderhoudsdoeleinden en voor het beheer van het Oosterscheldebekken. Veilige bediening wordt gebruikt als alternatieve bediening niet mogelijk is en de kering moet worden gesloten. Via veilige bediening wordt een centraal gegeven commando naar alle schuiven gestuurd, zodat alle schuifinstallaties tegelijk worden aangestuurd. Via alternatieve bediening kan elke schuif afzonderlijk en onafhankelijk worden bediend en in elke gewenste positie worden gebracht. Om het bedieningsgemak te vergroten en de kans op fouten te verkleinen, is in het centrale computersysteem een dertigtal sluit/open-patronen opgenomen, waarmee sluitprocedures kunnen worden uitgevoerd.

Er zijn drie manieren om de kering handmatig te laten sluiten:

1. Alle schuiven tegelijk. De beheerder start zelf de eigen energieopwekking en geeft vanaf de centrale bedieningslessenaar het commando om de kering te sluiten of te openen. Hij stuurt hiermee alle schuiven tegelijk aan. Het betreft hier dus veilige bediening;
2. Elke schuif afzonderlijk vanaf het centrale wandcontrolepaneel of met een toetsenbord-beeldschermcombinatie die is aangesloten op het centrale computersysteem. Dit is alternatieve bediening. Mocht de PZEM-voeding ontoereikend zijn, dan dient de beheerder zelf de eigen energieopwekking op te starten;
3. Strategiesluiten. Hierbij wordt met behulp van één van de opgegeven sluit/open-patronen het doorstroomprofiel beheerst. Eén van deze patronen wordt bepaald door het beslissysteem (BSS), dat continu het meest optimale sluit/open-patroon berekent. De bedienaar kan aan dit patroon de voorkeur geven bij een stormsluiting. De beheerder start de eigen energieopwekking en geeft via een toetsenbord-beeldschermcombinatie een strategie-sluitcommando aan de centrale computer. Alle LCC's worden vervolgens afzonderlijk aangestuurd voor wat betreft de schuifhoogte en het tijdstip waarop de schuif in beweging moet komen. Strategiesluiten behoort dus tot de alternatieve bediening.

Naast het handmatig sluiten is er nog een vierde mogelijkheid: volautomatisch noodsluiten. Deze manier van sluiten is aangebracht als reserve voor veilig sluiten en openen, indien de kering onbemand is of als er menselijke fouten worden gemaakt.
Als het waterpeil aan de zeezijde het alarmpeil bereikt, wordt door het noodsluitsysteem het commando sluiten gegeven. Is het waterpeil aan de zeezijde gedaald en is er een zeker verschil met de waterhoogte van de Oosterschelde, dan wordt door hetzelfde noodsluitsysteem het commando openen gegeven. Indien het commando sluiten of openen is gegeven, wordt automatisch de eigen energieopwekking gestart en na tien minuten worden automatisch alle schuiven in beweging gezet. De opzet van het noodsluitsysteem komt in hoofdstuk 7 aan de orde.

Om te controleren of, en in hoeverre, schuifcommando's worden opgevolgd, is voorzien in een signaleringssysteem. Op elk gewenst moment kan zichtbaar gemaakt worden in welke stand een schuif zich bevindt, of er een scheefstand van een schuif is opge-



Figuur 1.2 Overzicht besturings-, bedienings- en bewakingssysteem

treden, en of een schuif lokaal of centraal bediend wordt. Er is sprake van signalering op het centrale wandcontrolepaneel en van signalering op beeldschermen.

Om afwijkingen van de gewenste situatie te signaleren en om zicht te krijgen op de oorzaak van een afwijking is een storingsmeldsysteem aangebracht. Door dit systeem wordt de foutdetectietijd evenals de reparatietijd verkleind. Dit vergroot de betrouwbaarheid van de kering. Het storingsmeldsysteem zorgt ook voor een continue, automatische bewaking van de kering in rust.

1.1.5 Opbouw besturings-, bedienings- en bewakingssysteem

Kenmerkend voor het ontwerp van het besturings-, bedienings- en bewakingssysteem is dat het kan fungeren als substituut voor menselijk handelen. Als reserve is in het ontwerp een automatisch noodsluitsysteem ingepast dat reageert op overschrijding van de werkelijk kritische waterstand. Uitgaande van de geraamde systeembelasting, de randvoorwaarden en de gestelde eisen aan beschikbaarheid en betrouwbaarheid, is gekozen voor een bedienings- en besturingssysteem met de systeemopbouw uit figuur 1.2.

Elke schuif heeft een eigen lokale besturingseenheid, de zogenaamde lokale computerconfiguratie of LCC. Nadat lokaal of centraal een bewegingscommando is gegeven, bestuurt, bewaakt, signaleert en beveiligt de LCC deze beweging geheel autonoom. In het centraal bedieningsgebouw is via een datacommunicatielijn precies te volgen in welke stand de schuif zich bevindt en waar een eventuele storing en/of scheefstand van de schuif optreedt. Voor de besturing van de schuif worden kritische signalen drievoudig uitgegeven. Wanneer twee van de drie signalen overeenkomen, wordt het signaal erkend. De commando's voor de veilige bediening worden via een harde koperverbinding naar de lokale besturingseenheden gestuurd. De keuze voor een harde verbinding ligt in het feit dat de faalkans hiervan aanzienlijk lager ligt dan van een dataverbinding. De commando's voor alternatieve bediening en signalen van de installaties op de kering worden via een dataverbinding getransporteerd. Beide verbindingen werken onafhankelijk van elkaar en waarborgen beide een volledig sluiten van de kering ingeval van een stormvloed. In hoofdstuk 6 zijn de netwerkverbindingen verder uitgewerkt.

2. Uitgangspunten ontwerp en uitvoering

2.1 Levensduur

De levensduur van de stormvloedkering is gesteld op 200 jaar. In de praktijk is deze eis alleen van toepassing op de onvervangbare delen van het kunstwerk. Voor de elektrische installatie kan de genoemde eis niet worden gehanteerd, omdat de componenten binnen de installatie gebonden zijn aan een kortere technische levensduur. Dit betekent dat de elektrische installatie van de stormvloedkering tijdens de gestelde levensduur van 200 jaar meerdere malen moet worden voorzien van nieuwe componenten.

Hoewel geen expliciete eis is gesteld aan de levensduur van de elektrische installatie, is bij het ontwerp uitgegaan van de algemene richtlijn dat de elektrische installatie gegarandeerd 20 jaar moet functioneren. Met betrekking tot de technische levensduur van de componenten van de elektrische installatie gelden de volgende termijnen:

- Kabels, leidingen, kabelgoten, kasten en lessenaars: circa 50 jaar;
- Diesels, toevoer- en afvoerleidingen, stalen constructies e.d.: circa 50 jaar;
- Hardware componenten (relais, zekeringen, schakelaars e.d.): circa 20 à 25 jaar;
- PLC-installatie (besturing e.d.): circa 15 à 20 jaar;
- Accubatterijen: circa 8 à 10 jaar;
- Camera's: circa 10 jaar;
- Beeldschermen en monitoren: 5 jaar;
- PC-apparatuur: 5 jaar.

Ervan uitgaande dat preventief en correctief onderhoud adequaat wordt uitgevoerd, zullen de genoemde installatiecomponenten om het aantal aangegeven jaren vervangen moeten worden.
De elektrische installatie is zo opgebouwd, dat het eenvoudig is om de componenten te inspecteren, te onderhouden en te vervangen. Om de levensduur van de verschillende componenten zoveel mogelijk te garanderen, worden temperatuur en vochtigheidsgraad van de ruimten waar apparatuur is opgesteld, indien nodig aangepast.

2.2 Betrouwbaarheid en beschikbaarheid

Aan de stormvloedkering als geheel zijn eisen gesteld met betrekking tot beschikbaarheid en betrouwbaarheid gerelateerd aan de kans van falen. In Boek 1 werden in respectievelijk de deelnota's 1 en 2 een groot aantal eisen genoemd waaraan de stormvloedkering moet voldoen. Samenvattend kan worden gesteld dat de stormvloedkering (met name) de provincie Zeeland moet beschermen tegen stormvloeden met een kans van voorkomen van 1 op de 4000 jaar (een overschrijdingsfrequentie van $2{,}5 \times 10^{-4}$ per jaar). De kans dat de stormvloedkering niet sluit, mag niet groter zijn dan 1 op de 1000 keer (10^{-3}). Zodoende beschermt de stormvloedkering het achterliggende land met een maximale kans op onderlopen van 10^{-7}.
Op basis van deze getallen is een foutenboom opgesteld van alle faalkanstechnische onderdelen binnen de kering. Volgens de berekening van deze foutenboom kwam voor de elektrische installatie als toelaatbare faalkans 2×10^{-4} naar voren.
Aan de hand van deze faalkans is het ontwerp voor de diverse installaties doorgerekend en waar nodig bijgesteld.

2.2.1 Faalkansanalyses

De faalkans van de stormvloedkering als veiligheid biedende constructie wordt in belangrijke mate bepaald door de faalkans van de transformatiefunctie. Bij het falen van de transformatiefunctie kan sprake zijn van:

- falend beheer: het niet tijdig aanwezig zijn van een bedienaar, of het nemen van een foutieve beslissing door een bedienaar;
- een falend schuifmechanisme: het falen van de elektrische en/of hydraulische installatie.

Uit de nadere analyse van falend beheer kwam naar voren dat het noodzakelijk is om als reserve een volautomatisch werkend noodsluitsysteem en, ter ondersteuning van de mobilisatie en besluitvorming van de bemanning, een beslis- en simulatiesysteem met een automatisch oproepsysteem te installeren.

Uit de nadere analyse van de situatie van een falend schuifmechanisme is het volgende geconstateerd:

- de hoofdvoeding met een aan de toestand aangepaste capaciteit is zowel in de sluimertoestand als in de bedrijfstoestand van essentieel belang voor de werking van de hele installatie;
- het niet goed functioneren van het energiedistributiesysteem kan het niet functioneren van grote groepen schuiven veroorzaken;
- het functioneren van het centrale bedieningssysteem en de communicatie naar de decentrale delen is van essentieel belang voor het functioneren van de schuiven afzonderlijk;
- het niet functioneren van het noodsluitsysteem heeft in het algemeen een nadelige invloed op de totale beschikbaarheid van de transformatiefunctie en is in bijzondere gevallen doorslaggevend voor de veiligheidsfunctie van de kering

In samenhang met het ontwerp van de hydraulische installatie is het ontwerp van de elektrische installatie diverse malen aan een gedetailleerde faalkansanalyse onderworpen. Het doel van deze analyses was:

- het nader analyseren van de kans van het optreden van falend beheer of een falend schuifmechanisme;
- het bepalen in welke mate de faalkansen in de elektrische en hydraulische installatie bijdragen aan de totale faalkans van de kering;
- het verminderen van de faalkansen.

De faalkansanalyses concentreerden zich op het moment dat de transformatiefunctie van de kering daadwerkelijk wordt aangesproken, met andere woorden op het moment dat de kering in bedrijfstoestand is. Dan is de beschikbaarheid van de transformatiefunctie immers van essentieel belang voor de veiligheidsfunctie van de kering. De betreffende analyses worden dan ook 'beschikbaarheidanalyses' genoemd. Het begrip 'beschikbaarheidkans' is daarbij complementair aan de faalkans.

2.2.2 Ontwerpmaatregelen

Bij de faalkansanalyses zijn de storingskansen wanneer de kering in sluimertoestand is, buiten beschouwing gelaten. Een belangrijke storing tijdens de sluimertoestand kan er echter toe leiden dat de kering niet in bedrijfstoestand gebracht kan worden, met andere woorden: dat de transformatiefunctie niet kan worden aangesproken. Ook wanneer de kering in sluimertoestand is, is storing dus niet aanvaardbaar. Daar komt bij dat de elektrische installatie tijdens de sluimertoestand de volgende functies heeft:

- het laten functioneren van de waterstandbewaking van het noodsluitsysteem;
- het op de plaats houden van de schuiven;
- het voeden van andere installaties.

Het is ook in verband met de beschikbaarheid van de transformatiefunctie van belang dat de elektrische installatie bovengenoemde taken kan uitvoeren. Zowel tijdens de sluimertoestand als tijdens de bedrijfstoestand is bedrijfszekerheid dan ook de belangrijkste eis die aan de elektrische installatie wordt gesteld. De hele opzet van de elektrische installatie is daarom gericht op het bevorderen en handhaven van die bedrijfszekerheid. Het optreden van storingen is, zeker in een omvangrijke, actieve installatie, niet te voorkomen. Wel kunnen door het nemen van bepaalde maatregelen de storingskansen verkleind worden en de gevolgen van een storing worden beperkt. Dit reduceert de kans dat de kering niet functioneert. De betreffende maatregelen zijn in twee groepen te verdelen:

1. Ontwerpmaatregelen ter verkleining van de absolute storingskans;
2. Ontwerpmaatregelen ter verkleining van de overdrachtskansen van storingen.

De ontwerpmaatregelen ter verkleining van de absolute storingskans zijn de volgende:

- inbouw van controlepunten die de procesgang bewaken en rapporteren, zodat kan worden ingegrepen voordat een storing daadwerkelijk optreedt (dit is effectiever dan het inbouwen van automatische veiligheden die over het algemeen eerder verhogend werken op de storingskans);
- waar mogelijk toepassing van elektronische schakelingen in plaats van mechanische, waarbij het voordeel van een elektronische schakeling is dat er geen contactfouten op kunnen treden en er geen sprake is van bewegende delen die vast kunnen zitten;
- toepassing van goudcontacten in relais, waardoor er minder kans is op contactfouten.

De ontwerpmaatregelen ter verkleining van de overdrachtskansen van storingen zijn de volgende:

- spreiding van het storingsrisico over meerdere parallel geschakelde eenheden met eenzelfde functie door deze gelijktijdig en met een bepaalde overcapaciteit binnen een installatie te laten functioneren (energieopwekking);
- dubbele uitvoering van installatiedelen, waarbij één deel de gehele functie over kan nemen (energieopwekking en -distributie);
- installatie van een (eventueel alternatieve) reserve-eenheid die in stand-by staat en onmiddellijk de functie van de hoofdeenheid over kan nemen (computers, voedingen);
- drievoudige uitvoering van gegevens, gekoppeld aan een automatisch werkende keuze van 2-uit-3;
- overname van functies die aan storing onderhevig zijn door naastgelegen onderdelen met dezelfde functie (bijzondere voeding).

De genoemde maatregelen zijn op verschillende plaatsen toegepast en resulteren in de onderstaande uitwerkingen die zowel betrekking hebben op de energievoorziening als op het bedienings- en besturingssysteem:

Overdimensionering dieselgeneratoren
Om een betrouwbare werking van de kering tijdens bedrijfstoestand te garanderen, worden alle tien de dieselgeneratoren gelijktijdig opgestart. Hoewel er slechts zes dieselgeneratoren nodig zijn om voldoende vermogen te leveren, bleek uit de faalkansberekeningen de kans dat drie dieselgeneratoren tegelijk in storing vallen en één dieselgenerator in onderhoud is, overeen te komen met de eisen die aan de betrouwbaarheid van de kering zijn gesteld.

Distributie met behulp van een zwevend net
Om de stroomvoorziening zo lang mogelijk te garanderen is het distributienet van de 10 kV-energielevering uitgevoerd als zwevend net. Het voordeel van een zwevend net is dat bij kortsluiting van één van de fasen de stroomvoorziening in principe doorgang kan vinden.

Automatische overname energievoorziening
Om te voorkomen dat door uitval van de PZEM-voeding de kering in sluimertoestand zonder spanning komt te zitten, is een aantal automatische besturingen ingebouwd en zijn in één van de dieselcentrales drie dieselaggregaten geselecteerd die de energievoorziening van de PZEM overnemen.

No-break-voedingen ten behoeve van belangrijke apparatuur
Alle voor de besturing essentiële apparatuur, alsmede de voedingskasten voor belangrijke besturingskasten, zijn voorzien van voedingen die met behulp van accubatterijen gedurende een bepaalde tijd bij spanningsuitval de energievoorziening overnemen en korte onderbrekingen opvangen.

Koppelmogelijkheden schakel- en verdeelstations
De beide schakelstations en de beide verdeelstations in de energielevering kunnen met behulp van schakelwagens met elkaar worden gekoppeld. Hiermee is de energievoorziening via een alternatieve route gewaarborgd, zelfs als complete installatiedelen uitvallen.

Redundant uitgevoerde ringleiding
Door een dubbel uitgevoerde ringleiding te gebruiken, waarbij ook de verdeelfuncties dubbel zijn uitgevoerd, is er bij een storing in een onderdeel van de energiedistributie over de kering, altijd een alternatieve route voorhanden.

Koppelmogelijkheden transformatorstations
Ieder transformatorstation is zodanig uitgevoerd dat het behalve de eigen groepen, als back-up ook de groepen van een naastgelegen transformatorstation kan voeden. Deze mogelijkheid is niet op het transformatorstation Roompotsluis van toepassing.

Hefhoogtemeting
De hefhoogtemeting is dubbel uitgevoerd, dat wil zeggen dat de kabel tussen schuif en gelijkloopinstallatie dubbel is uitgevoerd.

Daarnaast zijn de codegevers driedubbel uitgevoerd. Door gebruik te maken van Gray-code, wordt de foutdetectie sterk verbeterd.

Hydraulische installatie
De hydraulische units kunnen als back-up van elkaar optreden. Door het (handmatig) omschakelen van afsluiters en het omdraaien van een sleutelschakelaar, kan de besturing van een defecte unit worden overgenomen door een goed werkende unit.

Drukopnemers
Drukopnemers zijn drievoudig uitgevoerd en ondergebracht in één afzonderlijke bewakingsunit. De onderlinge drukken van de drukopnemers worden met elkaar vergeleken voordat de installatie wordt aangestuurd. Hierdoor worden er betrouwbaardere meetgegevens verstrekt en fungeren de drukopnemers, bij uitval, als back-up van elkaar.

Back-up beslissingen
In geval van een storing in het datanet of de CCC, is de LCC in staat om zelf een beslissing te nemen omtrent het inschakelen van de transformatorvelden op de kering. Om menselijke fouten zoveel mogelijk uit te sluiten, zijn beslissingsondersteunende (BSS) en beslissingsnemende (NSS) systemen aangebracht.

Back-up bedieningen
Bij uitval van de CCC of het datanet is het mogelijk om een schuif handmatig via de LCC te openen en te sluiten. Mocht ook de LCC uitgevallen zijn, dan bestaat nog de mogelijkheid om direct de hydraulische installatie aan te sturen.

Ingebouwde bewakingen
In de LCC zijn bewakingen ingebouwd om schade door scheefstand of ongewenste inschakelpieken bij het starten van pompen en kleppen te voorkomen.

Drievoudig uitgevoerde I/O-computers en 2-uit-3 logica
Kritische signalen worden drievoudig aangeleverd en behandeld door drie aparte computers. Hoog betrouwbare elektronica zorgt voor een meerderheids-beslisprincipe.

Dubbel uitgevoerde besturingscomputers van de LCC
De besturingscomputers van de LCC zijn dubbel uitgevoerd. Een van de computers is operationeel en de ander is stand-by. Bij storing wordt automatisch overgeschakeld naar het stand-by-systeem.

Wandcontrolepaneel in de operationele ruimte
Het wandcontrolepaneel in de operationele ruimte biedt een back-up mogelijkheid voor zowel de veilige bediening met behulp van de bedieningslessenaar, als de alternatieve bediening met behulp van het beeldschermsysteem.

Veilige bediening
De signalen voor de veilige bediening worden via drie aparte kabels naar de LCC's gevoerd. Het verdrievoudigen van het signaal vindt al plaats bij de drukknoppen op de bedieningslessenaar en op de verbinding tussen de startautomaat van het noodsluitsysteem en de bedieningslessenaar.

Drievoudig uitgevoerde waterhoogtemeting
De opnemers die in de peilmeetstations de waterhoogtemeting uitvoeren, zijn drievoudig uitgevoerd. Iedere opnemer wordt separaat gevoed en van alle drie de opnemers wordt de data afzonderlijk verzonden naar de NSS-computers; elk signaal gaat via een eigen ader en is voorzien van een eigen modem.

Redundante uitvoering overdrachtsmedia en NSS-computers
Alle relevante data voor het noodsluitsysteem wordt via twee verschillende kabels naar de NSS-computers gevoerd, waarbij beide computers dezelfde data ontvangen. Bij uitval van een kabel kunnen beide computers gewoon doorwerken. Hoewel beide kabels door dezelfde kabelgoot worden gevoerd, is er om betrouwbaarheidsredenen overal een tussenruimte van minimaal 80 cm aangehouden. De NSS-computers zijn verder redundant uitgevoerd volgens het principe van 'hot stand-by'. Bij storing aan de primaire computer neemt de secundaire computer de taken direct over.

Vergrendelingen
Om menselijke fouten zoveel mogelijk uit te sluiten, zijn op diverse plaatsen zowel mechanische als besturingstechnische vergrendelingen aangebracht. Hierdoor kunnen schakelfouten voor een belangrijk deel uitgesloten worden.

Naast de genoemde uitwerkingen zijn nog meer maatregelen genomen om de storingskansen in absolute zin en op belangrijke momenten te verkleinen. Zo wordt er geen automatische brandblussing in de dieselcentrales toegepast, en is er communicatie tussen onderhoudspersoneel op de kering mogelijk zonder de aanwezigheid van spanning. Bovendien kenmerkt de installatie zich door een vergaande automatisering in de besturing en door een autonome werking van de componenten. Hierdoor kan met zo min mogelijk handelingen de kering in werking worden gezet.

In elk geval zal een kwalitatief goede uitvoering van de installatie de absolute storingskans verkleinen, evenals het gebruik van speciaal op kwaliteit geselecteerde componenten. Het regelmatig beproeven van installatieonderdelen vermindert de kans op storing op beslissende momenten. Het is wat dat betreft gunstig dat ook tijdens de sluimertoestand grote delen van de installatie actief zijn. Voor onderdelen die alleen in de bedrijfstoestand of alleen in geval van storing actief zijn, is een effectief beproevingsprogramma vereist; zie daarvoor het Handboek Stormvloedkering. In de eerder besproken faalkansanalyses is met alle effecten van de hiervóór genoemde uitwerkingen rekening gehouden.

2.3 Uitgangspunten en eisen aan de totale energievoorziening

2.3.1 Vermogensberekening installaties

Om de capaciteit van de energievoorziening te bepalen, is het noodzakelijk om een raming te maken van de energiebehoefte. Het uitgangspunt hiervoor is het totale vermogen dat de aangesloten installaties op kunnen nemen. Dit vermogen kan echter gereduceerd worden op grond van de volgende overwegingen:
- niet alle aangesloten installaties zullen tegelijkertijd vermogen opnemen;
- de aangesloten installaties zullen niet in alle gevallen het maximale vermogen opnemen.

Op deze wijze is de praktische energiebehoefte geraamd waaraan door de energievoorziening moet worden voldaan.

In verband met de totale vermogensbehoefte kunnen twee verschillende situaties onderscheiden worden:
- de situatie dat de stormvloedkering in sluimertoestand is; er is dan alleen energie nodig om de installatie in de actuele toestand te houden;
- de situatie dat de stormvloedkering in bedrijfstoestand is; er is dan energie nodig om de schuiven te bewegen.

Verbruiker	Geschat vermogen (geïnstalleerd) [kW]	Geschat vermogen (praktisch) [kW]
Centraal bedieningsgebouw		
Kantoren	195,0	100,0
Luchtbehandeling	112,0	93,0
Liftinstallatie	50,0	50,0
Parkeerterrein	5,0	3,0
Computers (NSS, BSS)	50,5	43,6
Totaal CBG	412,5	289,6
Kering		
Lokaal besturingssysteem en trafo's	240,0	155,0
Schuifbewegingen standaard onderhoud	120,0	43,0
Containers t.b.v. onderhoud	60,0	12,0
Containers t.b.v. meetsystemen	56,0	31,6
Totaal kering	**476,0**	**241,6**
Diversen		
Roompotsluis	125,0	42,0
Meetpalen NSS	10,0	6,0
Oriëntatieverlichting dammen	25,0	5,0
Haveninstallaties	50,0	15,0
Opslagterrein	44,0	26,4
Verlichting wegen Neeltje Jans	6,0	3,6
Verlichting N57	32,0	19,2
Windwaarschuwingssysteem	5,0	1,5
Totaal diversen	**297,0**	**118,7**
Totaal CBG	412,5	289,6
Totaal kering	476,0	241,6
Totaal diversen	297,0	118,7
Totaal vermogen sluimertoestand	1185,5	649,9
Gelijktijdigheidsfactor	0,8	0,8
Geschat vermogen sluimertoestand	948,4	519,9

Tabel 2.1 Geschat vermogen voor sluimertoestand

In tabel 2.1 wordt de raming weergegeven voor de sluimertoestand, waarbij in aanmerking is genomen dat in de praktijk slechts een deel van het maximum vermogen wordt opgenomen. Verder is het aannemelijk dat niet alle verbruikers tegelijk zullen functioneren, waardoor het totale vermogen verder gereduceerd kan worden met een gelijktijdigheidfactor van 0,8.

In tabel 2.2 is per schuiftype aangegeven welke vermogens extra nodig zijn wanneer de kering in bedrijfstoestand is. Het vermogen per schuif is het vermogen dat opgenomen wordt door de bewegingswerken, vermeerderd met een toeslag voor:

- de spoel- en conserveringspompen van de conserveringsinstallatie;
- de spanpompen;
- het rustverbruik van de lokale installatie en transformatoren.

Schuiftype	Aantal	Vermogen per schuif [kW]	Vermogen per type [kW]
5,9 m	15	41,6	624,0
6,9 m	6	41,6	249,6
7,9 m	8	46,4	371,2
8,9 m	9	48,8	439,2
9,9 m	6	54,4	326,4
10,9 m	11	56,8	624,8
11,9 m	7	61,6	431,2
Totaal extra vermogen bij activering van alle schuiven			3066,4

Tabel 2.2 Extra vermogen voor bedrijfstoestand

De bedrijfstoestanden zijn te verdelen in het bewegen van alle schuiven tijdens stormsituaties, het bewegen (van een deel) van de schuiven volgens bepaalde sluitingsstrategieën of het bewegen van de schuiven ingeval van planmatig onderhoud.

Voor het bepalen van het totaal benodigde bedrijfsvermogen is alleen de eerste activiteit van belang omdat dan alle schuiven, bewegingswerken en de elektrische installatie worden geactiveerd om de kering in haar geheel te sluiten. De laatste twee activiteiten behoeven een gelijkwaardig of lager bedrijfsvermogen; er is in dit geval dus geen noodzaak om voor deze activiteiten aparte vermogensberekeningen voor de eigen energieopwekking te maken.
In alle drie de gevallen wordt het aangesloten garantievermogen van de PZEM-voeding (sluimertoestand) overschreden en is het opstarten van de eigen energieopwekking (bedrijfstoestand) derhalve een noodzaak.

Om het totaal benodigde bedrijfsvermogen te bepalen, moet het totaal vermogen van de bewegingswerken worden vermeerderd met het totale sluimervermogen. Dit getal moet daarna gecorrigeerd worden, omdat:
- het rustverbruik van de lokale installatie en de transformatoren dubbel is geteld;
- schuifbewegingen ten behoeve van standaard onderhoud tijdens de bedrijfstoestand niet plaatsvinden.

Ook hier geldt dat niet alle gebruikers tegelijk zullen functioneren en dat het totale vermogen kan worden gereduceerd met een gelijktijdigheidfactor van 0,8.

Het vermogen voor de bedrijfstoestand tijdens stormvloed is weergegeven in tabel 2.3.

Totaal vermogen sluimertoestand	649,9 kW
Extra vermogen voor bedrijfstoestand	3066,4 kW
Dubbeltelling rustverbruik	-155,0 kW
Geen schuifbeweging t.b.v. standaard onderhoud	-43,0 kW
Totaal geïnstalleerd vermogen bedrijfstoestand	3518,3 kW
Gelijktijdigheidsfactor	0,8
Geschat vermogen bedrijfstoestand	2814,6 kW

Tabel 2.3 Geschat vermogen bedrijfstoestand tijdens stormvloed

2.3.2 Betrouwbaarheid energievoorziening

Een van de belangrijkste eisen met betrekking tot betrouwbaarheid en beschikbaarheid die aan de totale energievoorziening is gesteld, is dat er in de sluimertoestand een vrijwel even hoge bedrijfszekerheid is als in de bedrijfstoestand, waarbij de kans op menselijke fouten zoveel als mogelijk is geminimaliseerd. Deze eis kan gezien worden als de centrale kwaliteitseis aan de voedingsleverantie van de kering en heeft tijdens het ontwerp geresulteerd in het creëren van diverse reserve-oplossingen (back-ups) in de energielevering en -opwekking en een vergaande automatisering en autonome werking van de componenten.

De belangrijkste eis die aan het distributiesysteem is gesteld, is het (binnen economische grenzen) verschaffen van een zo groot mogelijke zekerheid dat de te distribueren energie terecht komt bij de gebruikers die betrokken zijn bij het functioneren van de kering. Ook hier heeft dat geresulteerd in het creëren van diverse reserve-oplossingen, maar met het verschil dat hier geen vergaande automatisering en autonome werking van de componenten plaatsvindt. Alle componenten staan hier in principe in de bedrijfsstand IN en worden alleen geschakeld als deze een reservefunctie hebben.

Bij het ontwerp moest tevens rekening gehouden worden met een aantal capaciteitseisen die van invloed zijn geweest op de uitvoering en constructieve eigenschappen van de componenten in de distributie:
- in de bedrijfstoestand draaien alle beschikbare diesels parallel;
- het distributiesysteem moet geschikt zijn voor het transport van grote vermogens over langere afstanden;
- tussen de schakelstations moet een mogelijkheid aanwezig zijn van doorkoppeling wanneer een verdeelstation uitvalt;
- tussen de verdeelstations moet een mogelijkheid aanwezig zijn van doorkoppeling wanneer een schakelstation uitvalt.

Deze eisen hebben geresulteerd in een energielevering en -distributie op hoogspanningsniveau teneinde het spanningsverlies, en inherent hieraan de dikte van de toe te passen bekabeling, te minimaliseren. Alleen waar het volledige vermogen van twee dieselcentrales op de componenten aanwezig kan zijn, zijn constructief zwaardere uitvoeringen aangebracht.

Terugvoeding van energie aan het energiebedrijf mag niet mogelijk zijn. Deze eis vloeit voort uit het feit dat niet gekozen is voor terugvoeding aan het nutsbedrijf en heeft geresulteerd in het aanbrengen van terugwatt-beveiligingen en een scheidingstrafo.

Omdat de kering niet permanent bemand is, moet de stroomlevering voor de bedrijfstoestand door een automatische startregeling van de diesels worden gerealiseerd. Het betreft hier de bedrijfstoestand bij stormvloed, waarbij de energieopwekking automatisch wordt geactiveerd door een commando van het noodsluitsysteem.

De voedingen voor de besturing, bediening en bewaking van alle installaties, in het algemeen genoemd het 'centrale zenuwstelsel', moeten van een lage spanning zijn. Deze voedingen moeten ononderbroken – ook bij spanningswegval – blijven functioneren en zo zijn gestabiliseerd dat het schakelen van zware belastingen niet kan leiden tot overschrijding van de gespecificeerde spanningsgrenzen van het 'centrale zenuwstelsel'. Hiervoor zijn specifieke voedingen aangebracht.

De mogelijkheid tot het uitvoeren van onderhoud, het testen van onderdelen en het uitvoeren van een eenvoudige bediening heeft als eis bij het ontwerpen van de energievoorziening een belangrijke rol gespeeld. Alle componenten zijn voorzien van lokale bediening om dergelijke werkzaamheden afzonderlijk, en gescheiden van de rest van de installatie, te kunnen uitvoeren.
Alle bedieningshandelingen, schakelhandelingen en storings- en statusmeldingen binnen de energielevering worden automatisch vastgelegd in een onderhouds-informatiesysteem (OIS) en kunnen op papier worden uitgeprint. Hierdoor is een goede basis verkregen voor het uitvoeren van systematisch onderhoud. Het op papier vastleggen heeft tevens als voordeel dat een overzicht wordt gegeven van het gebruik van de kering en levert het bewijsmateriaal ingeval van juridische kwesties die hiervan mogelijk het gevolg zijn.

2.4 Besturings-, bedienings- en bewakingssysteem

2.4.1 Algemene aspecten besturings-, bedienings- en bewakingssysteem

De benodigde capaciteit van het besturingssysteem is onder meer afhankelijk van de hoeveelheid data in het systeem. Voor de storm-

vloedkering geldt als vuistregel dat er per schuif zo'n 400 signalen gegenereerd worden, hetgeen voor de totale kering ongeveer 25.000 signalen oplevert. Daarnaast worden er signalen gegenereerd vanuit de installaties in het ir. J.W. Topshuis, onder andere door de dieselcentrales, de omvormervoedingen en het distributienet.
Buiten de genoemde capaciteit van het besturingssysteem moet rekening worden gehouden met de transportcapaciteit van het datanet. Hoe langer een datanetverbinding, des te lager de transportcapaciteit.

De snelheid van de datatransmissie is vanwege het trage bewegingsproces van de stormvloedkering minder belangrijk. Er kan in principe worden volstaan met het eens in de drie seconden updaten van data.

Vanwege de grote omvang van de SVKO is een centrale bediening onontbeerlijk. Daarnaast is echter vanwege de betrouwbaarheid (en ook vanwege onderhoud) een lokale bediening vereist. Zowel lokaal als centraal is een storingsmeldsysteem noodzakelijk. Daarnaast moet datalogging plaatsvinden. Dit behoeft alleen centraal te geschieden. Lokaal vindt de bediening plaats via drukknoppen. Centraal wordt hieraan beeldschermbediening toegevoegd.

2.4.2 Eisen besturings-, bedienings- en bewakingssysteem

De volgende eisen worden gesteld aan het besturings-, bedienings- en bewakingssysteem:

1. Centraal veilig kunnen bedienen met een kans op falen van $2x10^{-3}$;
2. Centraal alternatief kunnen bedienen met een kans op falen van $1x10^{-2}$;
3. Kans op falen van een lokaal besturingssysteem van $1x10^{-4}$;
4. Veilige commando's van het noodsluitsysteem kunnen verwerken met een kans op falen van $1x10^{-4}$ voor sluitcommando's en een kans op falen van $1x10^{-2}$ voor opencommando's;
5. Gegevens omtrent strategische bediening met het beslis- en simulatiesysteem kunnen uitwisselen;
6. Elke schuif ter plaatse via veilige bediening kunnen aansturen.
7. De status van alle schuiven centraal kunnen presenteren op een beeldscherm;
8. Strategiegegevens centraal kunnen opvragen en bewerken via een beeldscherm;
9. De energiestatus centraal kunnen presenteren op een beeldscherm;
10. De schuif- en energiestatus, inclusief bediening, implementeren op een synoptisch wandcontrolepaneel;
11. Het kunnen onderhouden en testen van de computerconfiguraties, en het kunnen detecteren en doormelden van storingen aan alarmverwerkende systemen;
12. Afhandeling van de bediening en signalering in real-time;
13. Robuuste en modulaire hard- en software.

Ad 1. Centraal veilig bedienen
De belangrijkste eis die aan het systeem is gesteld, is de betrouwbaarheid waarmee het systeem een sluitcommando, gegeven vanuit de centrale bedieningsruimte, verwerkt en het daadwerkelijk sluiten van de gehele kering tot gevolg heeft. Deze eis staat los van het feit of een dergelijk sluitcommando afkomstig is van een bedienaar of van een extern systeem.
De gestelde betrouwbaarheidseis geldt voor het sluiten van de gehele kering, dus voor het sluiten van alle schuiven tegelijkertijd. Toch kan een schuif in onderhoud zijn of in storing zijn geraakt. Dat wordt tot op een bepaald aantal schuiven toelaatbaar geacht: er mogen maximaal vijf schuiven falen verspreid over de hele kering en niet meer dan vier schuiven naast elkaar. Voor de overige operationele schuiven geldt dat na een centraal gegeven sluitcommando, de kans op weigeren van één of meer schuiven ten gevolge van het falen van het systeem kleiner moet zijn dan $2x10^{-3}$. Dit houdt in dat het opvolgen van een bedieningscommando slechts één keer van de 500 bedieningen mag falen.
Dit is een vrij hoge eis. De initiatie die aan het betreffende algemene sluitcommando ten grondslag ligt wordt 'veilig' genoemd. De specifiek overeenkomstige centrale bediening heet 'veilige bediening'.

Ad 2. Centraal alternatief bedienen
Deze betrouwbaarheidseis heeft betrekking op het creëren van een bepaald doorstroomprofiel van de kering. Het moet namelijk mogelijk zijn om de schuiven individueel of collectief, al of niet volgens een vooraf opgegeven patroon, naar een bepaalde positie te sturen. Dit noemt men 'alternatief bedienen'. Ook deze bediening vindt plaats vanuit de centrale bedieningsruimte. Aan de alternatieve bediening wordt een lagere faalkanseis gesteld dan aan de veilige bediening, namelijk $1x10^{-2}$. Dat komt overeen met één keer falen op honderd benodigde alternatieve sluitingen.

Ad 3. Falen lokaal bedieningssysteem
De opdeling van het systeem tot geografisch bepaalde deelsystemen, heeft geresulteerd in de definitie van een betrouwbaarheidseis aan een van de meest essentiële installaties, namelijk de lokale besturing van één schuif. De faalkans van een dergelijke lokale besturing is gesteld op $1x10^{-4}$ voor de vitale regelfuncties. Dat komt overeen met één keer falen op tienduizend veilige sluitcommando's. De lokale installaties hebben dus een lagere faalkans dan de centrale installaties.Voor het kunnen vervullen van alle taken van het besturings-, bedienings- en bewakingssysteem, is het systeem verbonden met externe systemen als het noodsluitsysteem (NSS) en het beslis- en simulatiesysteem (BSS). Aan de interactie tussen deze systemen zijn verschillende eisen gesteld.

Ad 4. Falen noodsluitsysteem
Het besturings-, bedienings- en bewakingssysteem moet in staat zijn om commando's van het noodsluitsysteem (NSS) te ontvangen, eenduidig te verwerken en ten uitvoer te brengen met een voor dat commando geldende betrouwbaarheid. Het NSS zelf heeft een maximale faalkans van 10^{-4} voor het genereren van een sluitcommando en 10^{-2} voor het genereren van een opencommando. De commando's waar het hier om gaat, betreffen de veilige bediening. Hierbij geldt dat storingen in het bedienings- en besturingssysteem en het NSS niet op elkaar van invloed mogen zijn, wat betekent dat een interferentie binnen een systeem geen afbreuk mag doen aan de betrouwbaarheid van het andere systeem.

Ad 5. Gegevensuitwisseling
Het besturings-, bedienings- en bewakingssysteem krijgt geen commando's van het beslis- en simulatiesysteem (BSS) en volgt per definitie geen commando's van dat systeem op. Wel moet informatie uitgewisseld kunnen worden die benodigd is voor het uitvoeren van de alternatieve bediening. Er is geëist dat het besturings-, bedienings- en bewakingssysteem de status van de stormvloedkering aan het BSS kan verstrekken en dat andersom het besturings-, bedienings- en bewakingssysteem gegevens met betrekking tot de alternatieve bediening van het BSS kan ontvangen en eenduidig kan verwerken tot een voor de bedienaar hanteerbaar sluitpatroon en een hanteerbare bedieningsstrategie.

Ad 6. Veilige bediening ter plaatse
Naast het centraal kunnen bedienen van alle schuiven, moet het besturings-, bedienings- en bewakingssysteem in staat zijn om ie-

dere schuif afzonderlijk te kunnen bedienen. Hiervoor moet het bedienings- en besturingssysteem ter plaatse van iedere schuif, veilige bedieningscommando's kunnen inlezen, verwerken en zorg dragen dat deze commando's, conform de betrouwbaarheidseisen van 'veilige bediening', resulteren in het aansturen van de installatie van de betreffende schuif.

Ad 7. Centraal status schuiven opvragen
Er is geëist dat de bedienaars vanuit de centrale bedieningsruimte van iedere schuif de voor onderhoud en beheer benodigde gegevens naar keuze gepresenteerd moeten kunnen krijgen door een beeldscherm-bedieningssysteem. Het bedienings- en besturingssysteem moet via een afzonderlijk centraal beeldscherm-bedieningssysteem strategiegegevens kunnen opvragen en muteren. Eveneens moeten via het afzonderlijke centraal beeldscherm-bedieningssysteem essentiële gegevens van de installaties van de energievoorziening opgevraagd kunnen worden.

Ad 8. 9. 10. Centrale presentatie en bediening
Alle hiervoor benodigde beeldscherm-bedieningssystemen worden geacht bediend te kunnen worden vanuit een en dezelfde centrale bedieningsruimte. In die ruimte moet het bedienend personeel de status van alle schuiven en die van de energieopwekking en energieverdeling kunnen waarnemen op een synoptisch wandcontrolepaneel, vanwaar men zowel iedere schuif individueel als de energieopwekking moet kunnen aansturen. Met betrekking tot de schuiven moet ten behoeve van het onderhoud bij iedere schuif de status en storing op het paneel gepresenteerd kunnen worden.

Ad 11. Onderhoud, storing en testen
Alle computerconfiguraties in de installatie zijn uitgevoerd met extra voorzieningen ten behoeve van storingsdetectie, onderhoud en testen. Op deze voorzieningen kan service-apparatuur worden aangesloten waarmee zowel on-line als off-line processen kunnen worden geanalyseerd, storingen kunnen worden gedetecteerd en onderhoud kan worden uitgevoerd. Indien nodig kunnen via dezelfde weg ook nieuwe programma's worden ingevoerd.
Het besturings-, bedienings- en bewakingssysteem moet op zijn beurt ervoor zorgen dat storingen aan een automatische telefoondoorkiezer (ATD) worden doorgegeven. Deze ATD informeert dan de storingswachtdienst.

Ad 12. Afhandeling bediening real-time
Voor alle bedieningen en signaleringen geldt dat deze real-time moeten zijn. Dit houdt in dat de totale responstijd korter dient te zijn dan drie seconden. Het gaat hier om de reactietijd die verstrijkt tussen de actie van een sensor, bedienaar of schakelcomponent en de uiteindelijke sturing naar het betreffende onderdeel van de elektrische installatie, en om de tijd die verstrijkt tussen de actie van een sensor of schakelcomponent en de respons op een beeldscherm of door een signaallamp. Hiermee ligt het prestatievermogen van het gehele systeem vast; de snelheid van de centrale- en decentrale systemen en datacommunicatienetwerken dienen hierop te worden ontworpen.

Ad 13. Robuuste en modulaire hard- en software
Materialen en componenten binnen de elektrische installatie moeten toegankelijk opgesteld en modulair opgebouwd worden zodat uitwisseling, systeemuitbreiding of reparatie op eenvoudige en snelle wijze kan plaatsvinden. Van direct vervangbare onderdelen dienen voldoende reservematerialen op voorraad gelegd te worden, waarbij alle reservematerialen van één en hetzelfde productie- en typenummer zijn als de materialen die in de installaties zijn toegepast. Om uitbreidingen in en aan de installatie mogelijk te maken, dient zowel voor de hardware als voor de software rekening gehouden te worden met een reserve van 25% op de oorspronkelijk geplande hoeveelheden.

Als basis voor de kwaliteit van de elektrische installatie, moet worden uitgegaan van het toepassen van standaard op de markt verkrijgbare systemen, componenten en installatiematerialen, waarvan door praktijkervaring is aangetoond dat deze zonder problemen voor de ontworpen doelstellingen inzetbaar zijn. Teneinde meer garanties te krijgen om de kwaliteit van de elektrische installatie gedurende alle fasen van het project te waarborgen, dienen kwaliteits- en controleprogramma's opgezet te worden voor zowel het ontwerp als de uitvoering.

De software dient een flexibele opzet en gestructureerde opbouw te hebben om toekomstige modificaties in de programmatuur zonder problemen uit te kunnen voeren. Tevens moet de software wat betreft robuustheid bestand zijn tegen optredende storingen, en in staat zijn deze zelf te detecteren. Voor de toe te passen programmeertaal gold indertijd dat deze gebaseerd mocht zijn op bestaande ervaring en te verwachten continuïteit bij de systeemleverancier (levering eigen standaard) of anders gebaseerd moest zijn op de standaardtaal (RTL/2) van Rijkswaterstaat, Dienst Informatie Verwerking (DIV). Voor de programmatuur is uiteindelijk gekozen voor eigen standaards van de systeemleverancier, waarbij voor de lokale besturing en bediening een andere standaard is toegepast dan bij de centrale besturing en bediening. Door de technische levensduur van PLC-systemen van 15 à 20 jaar, en de snelheid waarmee deze installaties en de bijbehorende software worden verbeterd, zullen er in de toekomst wellicht andere uitvoeringsvormen en richtlijnen van toepassing worden.

In totaal liggen er dus dertien eisen ten grondslag aan het ontwerp van het besturings-, bedienings- en bewakingssysteem. Deze eisen zijn alle verder uitgewerkt in functionele, operationele en technische eisen, waarvan er enkele in de volgende hoofdstukken aan de orde zullen komen. Sommige eisen hebben namelijk aanzienlijke gevolgen voor het ontwerp, zoals de interacties met de hydraulische installaties, het synchroniseren van de meetsystemen en de complexiteit rond het omschakelen op de hydraulische installatie van de naastliggende schuiven.

2.4.3 Ontwerp- en uitvoeringsrichtlijnen

Door het grote aantal schuiven en de geografisch grote afstanden, is bij het ontwerp uitgegaan van centraal aan te brengen installaties in één bedieningsgebouw en vergaande standaardisering van afzonderlijke installaties bij de schuiven. Van alle installaties dienen het procesverloop, de storings- en statusmeldingen en de aard van de storingsmeldingen te worden gevisualiseerd en te worden vastgelegd.

Voor het ontwerp en de uitvoering van de elektrische installatie van de stormvloedkering is uitgegaan van de algemene richtlijn dat een functionele en goed werkende installatie moet worden gegarandeerd voor een periode van twintig jaar. Een belangrijk punt hierbij was, dat voor de installatiedelen in de verkeerskokers rekening moest worden gehouden met slechte omgevingscondities als gevolg van vochtigheid en verhoogde zoutconcentraties.

Er is gebruik gemaakt van landelijk geldende ontwerp- en uitvoeringsnormen (zowel nationaal als internationaal) en de eigen normen van Rijkswaterstaat. Eén van de ontwerprichtlijnen uit de eigen normen van Rijkswaterstaat is het verdelen van de elektrische installatie in deelinstallaties, en het hieraan toekennen van unieke nummercoderingen. Deze coderingen zijn zowel op de ont-

werptekeningen vermeld als met behulp van naamplaten op de toegepaste componenten in de elektrische installatie. Hierdoor is een duidelijke relatie zichtbaar tussen de ontwerpdocumenten en de aangebrachte componenten in het veld, waardoor het onderhoud, het zoeken naar storingen en het vervangen van componenten aanzienlijk wordt vereenvoudigd.
De onderhoudbaarheid van de installatiedelen, waarbij flexibiliteit, uitwisselbaarheid en testfaciliteiten de maatstaven zijn, heeft als richtlijn bij het ontwerpen van de installaties een belangrijke rol gespeeld. De installatie is zodanig ontworpen en geïnstalleerd dat deze voor servicedoeleinden goed bereikbaar is en dat op een goede manier preventief en kosteneffectief onderhoud kan worden gepleegd.

3. Energielevering, -opwekking en -distributie

3.1 Algemene aspecten energievoorziening

De energielevering, -opwekking en -distributie heeft tot doel het leveren en waarborgen van de totale energievoorziening van de kering. De totale energielevering is opgebouwd uit drie hoofdcomponenten:

1. de PZEM-voeding met het 10 kV-scheidingsstation (energielevering);
2. twee dieselcentrales A en B met de 10 kV-schakelstations (energieopwekking);
3. het distributienetwerk met de 10 kV-verdeelstations, de 10 kV-ringleidingen en de transformatorstations op de kering (energiedistributie).

Ad 1.
De PZEM-voeding heeft tot doel het leveren van de benodigde energie tijdens de sluimertoestand van de kering, dus wanneer de kering – hetzij geopend, hetzij gesloten – in rust is.

Ad 2.
De dieselcentrales voorzien in de energiebehoefte van de kering tijdens de bedrijfstoestand, dus als de transformatiefunctie, het openen of sluiten van de kering, in werking treedt. In essentie gaat het dan om de energiebehoefte van de bewegingswerken, het eigen bedrijf en de hulpinstallaties voor de dieselcentrales, en de direct bij deze onderdelen betrokken installaties zoals de bediening, besturing en bewaking. Een nevendoelstelling van de dieselcentrales is het als reserve stand-by staan tijdens de sluimertoestand: de dieselcentrales nemen de energielevering over als de PZEM-voeding stagneert.

Ad 3.
Het distributienetwerk zorgt ervoor dat de energie terecht komt bij de gebruikers die nodig zijn voor het functioneren van de kering. Vooral de distributie van de hoogspanning naar en over de kering, en de distributie en verdeling van de voeding van de laagspanningsverdeling, zijn hierbij van belang.

Een ander belangrijk onderdeel van de genoemde hoofdcomponenten zijn de bijzondere voedingen.
De bijzondere voedingen verzorgen een in principe altijd aanwezige voeding voor het 'centrale zenuwstelsel' van de installaties en zijn van groot belang voor de besturing, bediening en bewaking.

De systemen t.b.v. de energielevering en -opwekking zijn zodanig opgezet dat vrijwel alle componenten geheel autonoom en automatisch functioneren. De meeste componenten in de distributie zijn onder normale omstandigheden in bedrijf. Over het algemeen maakt deze opzet een eenvoudige controle op de goede werking mogelijk en beperkt dit de gevolgen van eventuele storingen. Tevens vereenvoudigt deze opzet de ingrepen die nodig zijn om de gevolgen van eventuele storingen op te heffen.
Teneinde de bedrijfszekerheid van de totale energielevering te waarborgen, is waar mogelijk voor iedere functie van het systeem een reserve-oplossing gecreëerd. Deze opzet vergt een goede beveiliging van de te schakelen en reeds geschakelde velden binnen de energielevering, -opwekking en -distributie. Zo moet bijvoorbeeld het automatisch inschakelen van schakelvelden pas mogelijk zijn wanneer alle 10 kV-spanningen in frequentie synchroon lopen en van hetzelfde spanningsniveau zijn.

Om deze redenen is een speciale, uniforme beveiligingsunit op basis van PLC-techniek ontwikkeld. Deze unit verzorgt het automatisch in- of uitschakelen van een veld. Doordat iedere beveiligingsunit tevens een eigen voeding heeft, is een autonome en onafhankelijke werking van ieder schakelveld gewaarborgd.

De condities waaronder de schakelvelden moeten sluiten en/of openen worden mechanisch bewaakt door relaisschakelingen en elektronisch door de beveiligingsunits. Alle schakelvelden zijn voorzien van een overstroombeveiliging ter beveiliging van de aangesloten bekabeling.
De schakelvelden in de energielevering, -opwekking en -distributie, die voorzien zijn van een verschilspanning- en frequentiebeveiliging, schakelen alleen in wanneer de voedingen aan beide zijden van de schakelaar met elkaar in fase zijn. De elektronische beveiligingsunit levert hierop een passieve controle.

Overzicht hoofdcomponenten en schakelvelden
Hieronder volgt een overzicht van de hoofdcomponenten en schakelvelden, betrokken bij de energielevering, -opwekking en -distributie. In dit overzicht (tabel 3.1 en figuur 3.1) staan:

- de naam van het schakelveld;
- de paragraaf waarin de beschrijving staat;
- de status van het schakelveld bij PZEM-voeding;
- de status van het schakelveld bij eigen opwekking (SVKO);

Onder normale omstandigheden wordt tijdens de sluimertoestand de kering gevoed vanuit het openbare nutsbedrijf PZEM. De kering is dan geheel in rust of er wordt standaardonderhoud uitgevoerd, waarbij het vermogen van de PZEM-voeding het toestaat één enkele schuif te bewegen. Geheel naar keuze van de beheerder worden in één van de dieselcentrales A of B, drie dieselgeneratoren als stand-by geselecteerd om de PZEM-voeding op te vangen. Bij uitval van de PZEM-voeding worden de geselecteerde dieselgeneratoren automatisch opgestart, waarna er binnen 15 à 20 seconden weer spanning aanwezig is.

Bij het intreden van de bedrijfstoestand krijgen alle dieselgeneratoren in de dieselcentrales A en B een startcommando teneinde de voeding van de kering te verzorgen. Zoals in paragraaf 1.1.2 is aangegeven, zijn minimaal zes dieselaggregaten nodig om de voeding over te nemen.

Het opstarten van de dieselcentrales geschiedt handmatig vanuit de centrale bedieningsruimte wanneer de kering bemand is, of

Schakelveld	Code	Paragraaf	PZEM	SVKO	Opm.
Energielevering					
10 kV-scheidingsstation					
Voedingsveld PZEM	A	3.2.1	dicht	open	
Koppelveld 10 kV-verdeelstation	B	3.2.1	dicht	dicht	
Energieopwekking					
10 kV-schakelstation					
Generatorveld	C	3.3.2	open	dicht	1)
Koppelveld 10 kV-verdeelstation	D	3.3.3	dicht	dicht	
Koppelveld 10 kV-schakelstation	E	3.3.3	open/dicht	open/dicht	5)
Transformatorveld Voeding ballastweerstanden	F	3.3.3	open	dicht	2)
Energiedistributie					
10 kV-verdeelstation					
Koppelveld ringleiding	G	3.4.1	dicht	dicht	
Transformatorveld voeding eigen bedrijf	H	3.4.1	dicht	dicht	
Koppelveld 10 kV-schakelstation	K	3.4.1	dicht	dicht	
Koppelveld 10 kV-scheidingsstation	L	3.4.1	dicht	dicht	
Koppelveld 10 kV-verdeelstation	M	3.4.1	open/dicht	open/dicht	5)
Transformatorstation					
Koppelveld ringleiding	N	3.4.2	dicht	dicht	3)
Koppelveld ringleiding	O	3.4.2	open	open	4)
Transformatorveld voeding LS-gedeelte	P	3.4.2	dicht	dicht	
Hoofdschakelaar	S	3.4.2	dicht	dicht	
Wisselschakelaar	T	3.4.2	open	open	

Opmerkingen:
1) Alleen dicht als generator vermogen levert en is gesynchroniseerd.
2) Alleen bij `eigen' generatorbedrijf en onder bepaalde voorwaarden.
3) Indien uitgevoerd als koppelveld ringleiding.
4) Indien uitgevoerd als sluitschakelaar ringleiding.
5) Als het koppelveld in verdeelstation A open staat, staat het veld in verdeelstation B dicht en vice versa.

Tabel 3.1 Overzicht hoofdcomponenten

automatisch door het noodsluitsysteem (NSS) wanneer de kering onbemand is. De dieselgenerator die als eerste voldoende spanning heeft en synchroon loopt met de PZEM-voeding, wordt automatisch op het schakelstation gekoppeld. Direct daarop wordt automatisch de netvoeding afgeschakeld. Hiermee is een ononderbroken overname van de netvoeding gewaarborgd. De overige dieselaggregaten volgen automatisch zodra deze op spanning en gesynchroniseerd zijn.

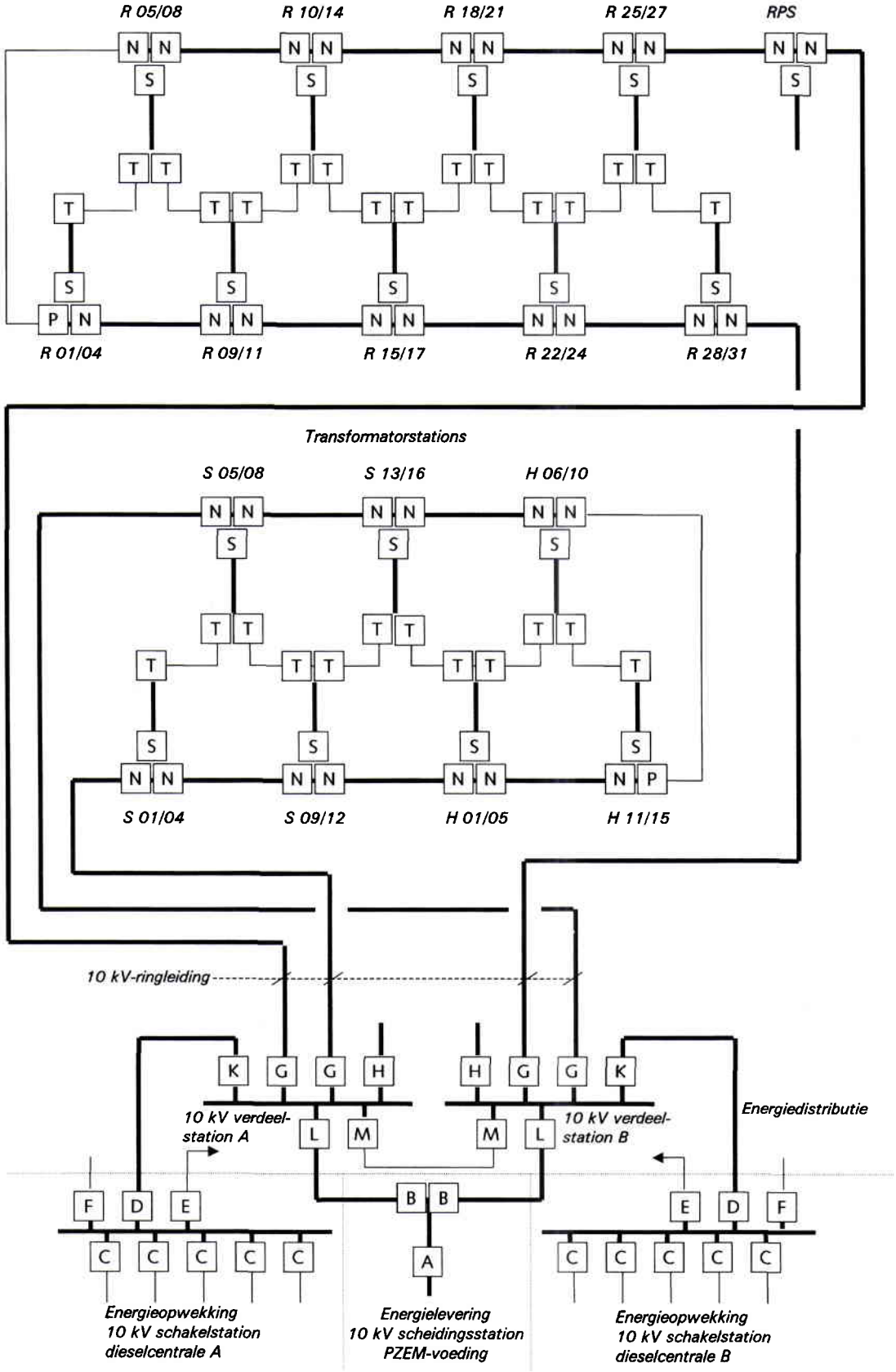
Het terugschakelen naar de PZEM-voeding geschiedt handmatig vanuit de centrale bedieningsruimte of vanuit de dieselcontroleruimte A of B bij een bemande kering, of automatisch door het NSS bij een onbemande kering. Zodra het commando is gegeven, wordt via een meetsysteem eerst gekeken naar het moment dat de voeding van de dieselcentrales in fase synchroon loopt met de PZEM-voeding. Pas dan wordt automatisch omgeschakeld naar de netvoeding en worden automatisch alle dieselgeneratoren afgeschakeld. Daarmee is een ononderbroken overname zonder kortsluitingproblemen gegarandeerd.

Ingeval van calamiteiten in de distributie van de voeding, kunnen op verschillende niveaus doorkoppelingen worden aangebracht om alternatieve routes als 'back-up' te creëren. Het inschakelen van deze back-ups geschiedt vanaf het wandcontrolepaneel in de centrale bedieningsruimte.

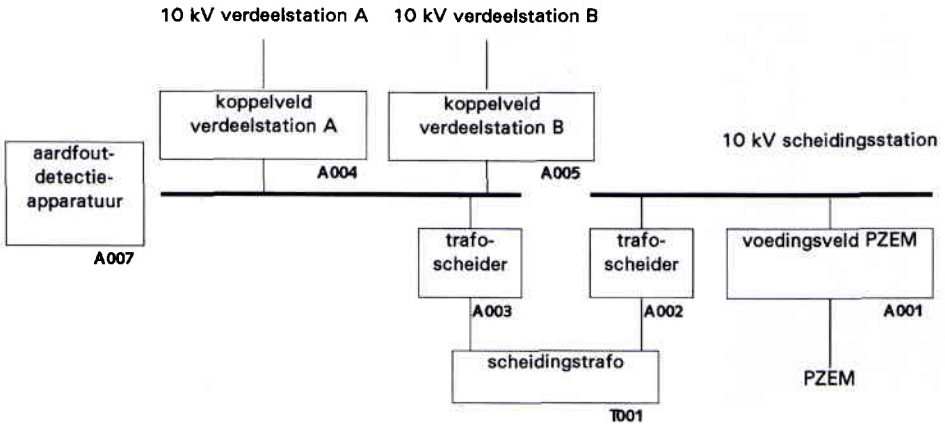
Alle componenten in de energielevering, -opwekking en -distributie kunnen bij een calamiteit in de diverse bedieningen, ook ter plaatse worden bediend. De storings- en statusmeldingen van alle componenten vinden plaats in de centrale bedieningsruimte, de dieselcontroleruimtes A en B en op de lokale bedienings- en besturingskasten bij de diverse componenten. Alle componenten zijn hiertoe voorzien van de nodige hulpcontacten voor storings- en statusmeldingen. Alle meldingen worden tevens vastgelegd in de centrale- en lokale computerconfiguraties (CCC en LCC) en kunnen op papier worden opgevraagd uit het onderhoudsinformatiesysteem (OIS).

3.2 Energielevering door PZEM

De PZEM levert een voeding over drie fasen met een spanning van 10 kV, een frequentie van 50 Hz en een garantievermogen van 960 kW. In de toekomst is er een mogelijkheid om dit garantievermogen indien nodig verder op te voeren tot circa 1200 kW.
Omdat het eigen distributienet is ontworpen als een zwevend net is een elektrische scheiding tussen het PZEM-net en het eigen distributienet noodzakelijk: alleen dan is een betrouwbare aardfoutmeting van het eigen distributienet mogelijk. Deze scheiding wordt gerealiseerd door achter het voedingspunt van de PZEM een scheidingstransformator te plaatsen. Hierdoor is elektrotechnisch een duidelijke scheiding aangebracht tussen het beheersgebied van de PZEM en de eigen energieopwekking.
Achter de scheidingstransformator wordt de PZEM-voeding via een apart koppel/verdeelstation naar de verdeelstations A en B van het 10 kV-distributienet gevoerd. Hier vindt tevens de aardfoutmeting voor het hele distributienet plaats.



Figuur 3.1 Overzicht schakelvelden



Figuur 3.2 Schematisch overzicht PZEM-voeding

3.2.1 10 kV-scheidingsstations

Door de keuze van energieopwekking en -distributie is het 10 kV-scheidingsstation opgebouwd uit de volgende componenten (figuur 3.2):
- voedingsveld PZEM met beveiligingsunit;
- scheidingstransformator inclusief transformatorscheiders;
- aardfoutdetectie in 10 kV-scheidingsstation;
- koppelvelden 10 kV-verdeelstations A en B met beveiligingsunits.

In het 10 kV-scheidingsstation wordt de PZEM-voeding verdeeld over de 10 kV-verdeelstations A en B van het distributienet door de aanwezige koppelvelden. Naast een verdeelfunctie heeft het 10 kV-scheidingsstation een koppelfunctie tussen de PZEM-voeding en de 10 kV-verdeelstations. In de bedrijfstoestand wordt de PZEM-voeding ontkoppeld van het eigen distributienet. Mede met het oog op de diverse koppelmogelijkheden in de bedrijfstoestand kan elke verbinding tussen het 10 kV-scheidingsstation en een 10 kV-verdeelstation het volledige vermogen voeren.

De status- en storingssignalering van de componenten binnen het 10 kV-scheidingsstation geschiedt op de wandcontrolepanelen van de centrales A en B en op het wandcontrolepaneel in de centrale bedieningsruimte. Een storingssignalering stelt tevens het alarmeringssysteem van de automatische telefoondoorkiezer (ATD) in werking. De 10 kV-scheidingsstations zijn ondergebracht in afzonderlijke ruimten op de begane grond in de laagbouw van het centraal bedieningsgebouw (CBG). De voeding van de PZEM komt in het CBG binnen in een aparte ruimte die in principe alleen voor de PZEM toegankelijk is en waar ook de nodige PZEM-apparatuur, de scheidingstransformator en de transformatorscheiders staan opgesteld.

Voedingsveld PZEM

Het voedingsveld PZEM is de koppeling tussen de PZEM-voeding en het 10 kV-scheidingsstation. Het voedingsveld schakelt automatisch uit na het aanspreken van één van de volgende beveiligingen:
- verschilspanning en -frequentiebeveiliging;
- thermische overstroombeveiliging;
- elektromagnetische overstroombeveiliging;
- nulspanningsbeveiliging;
- terug-Watt-beveiliging.

Het voedingsveld wordt eveneens uitgeschakeld als de temperatuur of de druk van de scheidingstransformator te hoog is.

Het voedingsveld wordt automatisch in- en uitgeschakeld bij een *OPEN* of *SLUIT* commando afkomstig van het noodsluitsysteem, maar pas als de eigen energieopwekking in fase synchroon loopt met de PZEM-voeding en er dus een ononderbroken omschakeling kan plaatsvinden.

Koppelveld 10 kV-verdeelstations A en B

De twee koppelvelden van de 10 kV-verdeelstations A en B koppelen het 10 kV-scheidingsstation aan de 10 kV-verdeelstations. Ze staan altijd ingeschakeld.

Een koppelveld schakelt automatisch uit na het aanspreken van één van de volgende beveiligingen:
- verschilspanning en -frequentiebeveiliging;
- thermische overstroombeveiliging;
- elektromagnetische overstroombeveiliging.

3.2.2 Scheidingstransformator

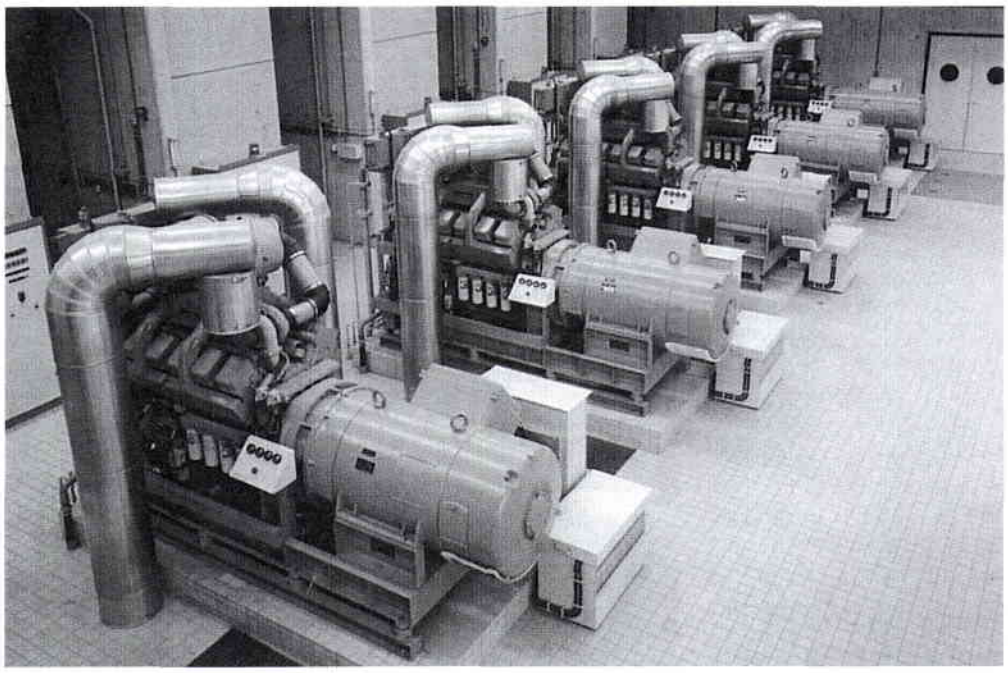
De scheidingstransformator zorgt voor de scheiding tussen de PZEM-voeding en het 10 kV-distributienet van de stormvloedkering. De scheidingstransformator is oliegekoeld en heeft een vermogen van 1600 kVA. Deze overdimensionering ten opzichte van het totaal geschatte vermogen in de sluimertoestand is bedoeld om een eventuele verhoging van het PZEM-garantievermogen te kunnen opvangen. Om de transformator te isoleren zijn, aan beide zijden van de transformator, transformatorscheiders gemonteerd. Deze kunnen alleen met de hand worden bediend.

De scheidingstransformator heeft de volgende storingssignaleringen:
- voorwaarschuwing trafotemperatuur;
- trafotemperatuur te hoog;
- trafodruk te hoog.

De eerste storingssignalering alarmeert de storingsdienst. De andere storingssignaleringen zijn tevens als uitschakelbeveiliging verwerkt in het voedingsveld PZEM.

3.2.3 Aardfoutdetectie

Het 10 kV-scheidingsstation is de plaats waar de PZEM-voeding wordt doorgekoppeld naar de verdeelstations A en B. Derhalve is dit ook de uitgelezen plaats om een aardfoutdetectie uit te voeren. De aardfoutdetectie-apparatuur is aangesloten op de 10 kV-rails van het 10 kV-scheidingsstation. Dit is namelijk de enige plaats van waaruit met een enkele meting de aardweerstand van het hele 10 kV-distributienet op de kering kan worden gecontroleerd.



Figuur 3.3 Overzicht dieselcentrale

De installatie is opgebouwd uit de volgende componenten:
- aanpassingsweerstanden om de 10 kV-spanning omlaag te brengen naar een geschikte meetspanning;
- de eigenlijke meeteenheid;
- een gelijkrichter 220V~/24V= voor de voeding van de meeteenheid.

Ter plaatse is een eenheid aangebracht voor de weerstandsmeting met een extra uitgang voor aflezing van de weerstandsmeting op het centrale wandcontrolepaneel. Een afwijking in de weerstandsmeting, die duidt op een aardfout, resulteert in een storingssignalering en stelt het automatische alarmeringssysteem in werking.

3.3 Dieselcentrales A en B

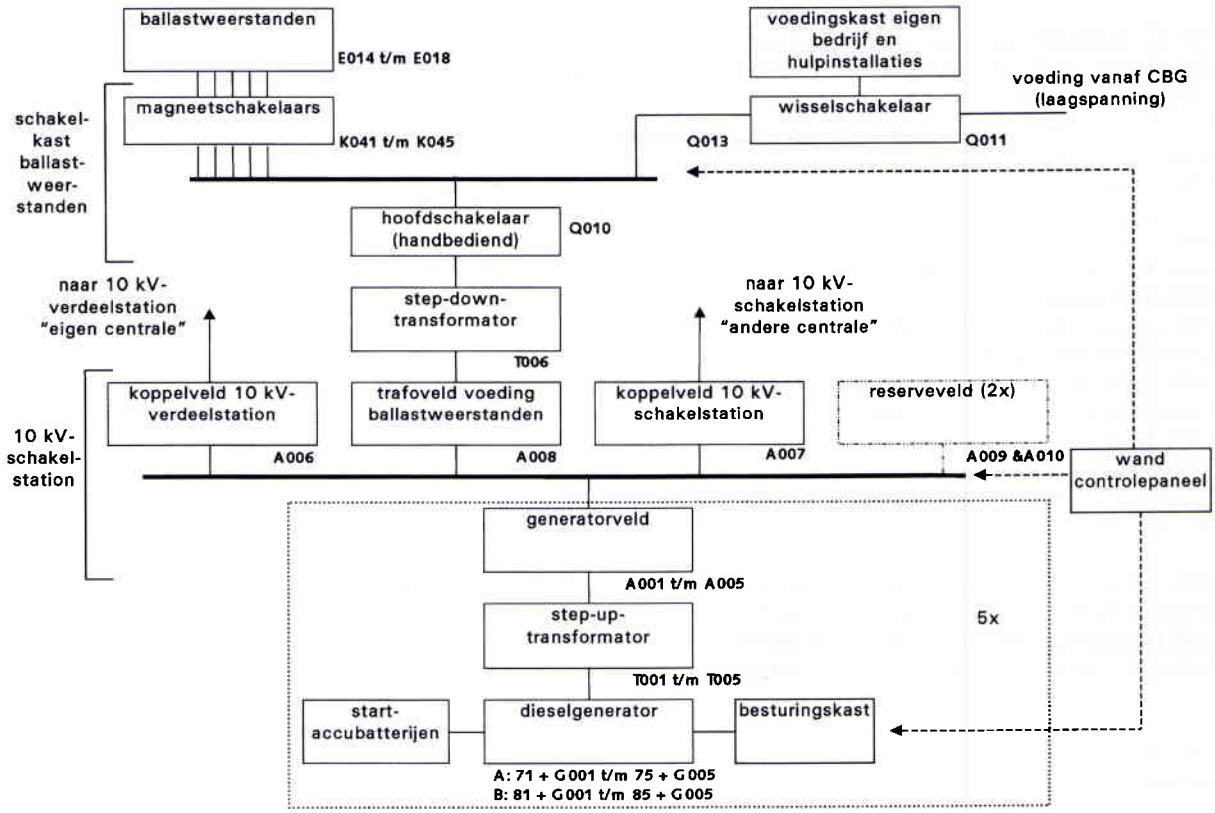
De twee dieselcentrales A en B bevatten elk vijf dieselgeneratoren ten behoeve van de energieopwekking tijdens de bedrijfstoestand (figuur 3.3). Deze leveren na koppeling op het distributienet een voeding over drie fasen met een spanning van 10 kV, een frequentie van 50 Hz en een totaal garantievermogen van 5840 kW (normaalvermogen) tot 6400 kW (piekvermogen). Om tot de distributiespanning van10 kV te komen wordt de generatorspanning van 380/400 V door middel van een bijbehorende step-up-transformator opgewaardeerd naar 10 kV, waarna deze met behulp van een bijbehorend generatorveld wordt aangekoppeld op het distributienet. De twee dieselcentrales werken geheel onafhankelijk van elkaar en kunnen, buiten het distributienet om, direct met elkaar gekoppeld worden.

Het starten van de diesels kan zowel handmatig als automatisch geschieden, waarbij het aantal te starten diesels afhankelijk is van de noodzakelijke actie. In normaal bedrijf worden de centrales met de hand opgestart vanaf het centrale wandcontrolepaneel in de centrale bedieningsruimte of vanaf de wandcontrolepanelen in de bij iedere centrale horende dieselcontroleruimte. Het automatisch starten geschiedt door een tweetal startautomaten. Eén startautomaat wordt gestuurd door de bewaking van de PZEM-voeding en start een beperkt aantal voorgeselecteerde diesels voor de sluimertoestand. De andere startautomaat wordt gestuurd door het noodsluitsysteem en start alle diesels voor de bedrijfstoestand. Tijdens het automatisch starten hoeft de kering niet bemand te zijn.

De (identieke) dieselcentrales zijn opgebouwd uit de volgende componenten (figuur 3.4):
- een ventilatie- en koelsysteem;
- vijf dieselgeneratoren;
- vijf besturingskasten;
- vijf sets start-accubatterijen;
- vijf step-up-transformatoren;
- een 10 kV-schakelstation;
- een step-down-transformator;
- vijf ballastweerstanden;
- een voedingskast Eigen bedrijf en hulpinstallaties;
- een wandcontrolepaneel.

De algemene status- en storingssignalering van de componenten binnen de dieselcentrales geschiedt op de wandcontrolepanelen van de centrales A en B en op het wandcontrolepaneel in de centrale bedieningsruimte. Daarnaast is elke diesel voorzien van een eigen besturingskast waarop gedetailleerde status- en storingssignalering met betrekking tot de dieselgenerator plaatsvindt.

De componenten binnen de dieselcentrales kunnen vanaf drie plaatsen met de hand worden bediend:
1. centraal, vanaf het centrale wandcontrolepaneel in de centrale bedieningsruimte, met vereenvoudigde bedieningsmogelijkheden;
2. decentraal, vanaf de wandcontrolepanelen in de dieselcontroleruimtes A en B, met uitgebreide bedieningsmogelijkheden op het gedeelte van de wandcontrolepanelen dat de eigen dieselcentrale betreft;
3. lokaal, vanaf de besturingskast van een diesel en ter plaatse bij de koppelvelden en generatorvelden.



Figuur 3.4 Schematisch overzicht dieselcentrales

In het algemeen is de bediening sterk geautomatiseerd en werken de componenten in de dieselcentrales in hoge mate autonoom. Hierdoor kunnen met een enkelvoudige handeling de dieselcentrales worden geactiveerd en op het net worden aangesloten. Na een handmatig of automatisch gegeven startcommando zorgen diverse relais-schakelingen automatisch voor de nodige vervolgcommando's voor het opstarten van diesels, het inschakelen van de generatorvelden op het distributienet, het inschakelen van de benodigde ballastweerstanden en het inschakelen van het eigen bedrijf of de hulpinstallaties waaronder het ventilatie- en het koelsysteem.

De beide dieselcentrales zijn ondergebracht in twee afzonderlijke en compleet uitgeruste dieselhallen in de laagbouw van het centraal bedieningsgebouw. Deze dieselhallen zijn van elkaar gescheiden door ruimten waarin transformatoren, schakel- en distributieapparatuur zijn ondergebracht. De onderliggende kelders zijn eveneens voor het onderbrengen van transformatoren benut. Doordat de bedrijfstoestand slechts sporadisch voorkomt, was er ontwerptechnisch geen noodzaak voor geluidisolatie van de dieselcentrales om de geluidoverlast voor het personeel te beperken.

3.3.1 Ventilatie- en koelsysteem

Het ventilatie- en koelsysteem van de diesels zorgt tijdens bedrijf voor:

- de koeling van het koelwater (dieselkoeling);
- de ventilatie van de dieselhal en van de schachten voor de uitlaatleidingen (ruimteventilatie).

De kelders onder de dieselcentrales zijn elk overlangs verdeeld in een koelluchtkelder (die ligt aan de buitenwandzijde) en een ventilatiekelder. Aanvoer van koellucht geschiedt via een aanvoerschacht aan de kopeinden van de kelders. De koellucht (buitenlucht) wordt vanaf het dak van de laagbouw naar de kelders gevoerd. In de koelluchtkelder is per diesel een eigen luchtkoeler voor het koelwater geplaatst. De benodigde koellucht wordt via coulissendempers en regelbare kleppenregisters uit de aanvoerschacht in de koelluchtkelder gebracht. Een regelbare radiator-ventilator blaast de koellucht door de radiator en door een regelbaar kleppenregister om het koelwater te koelen. De lucht komt vervolgens in een eigen afvoerschacht terecht. De afvoerschachten lopen door de dieselhal en voeren via een coulissendemper de (warme) koellucht door de buitenwand af. Om te voorkomen dat de temperatuur van het koelwater te hoog wordt, is de radiator-ventilator uitgevoerd met twee toerentallen die temperatuurafhankelijk worden geregeld.

Een deel van de lucht in de ventilatiekelder wordt gebruikt voor de ventilatie van de schachten waardoor de uitlaatgassen worden afgevoerd. Deze schachten zijn opgenomen in het centrale trappenhuis en de liftschacht en voeren de uitlaatgassen af naar het hoogste punt van de hoogbouw. Het grootste gedeelte van de ventilatielucht wordt via gaten in de halvloer naast de diesels naar de dieselhal gevoerd om enerzijds de dieselhal te ventileren en anderzijds de diesels van verbrandingslucht te voorzien. De diesels zuigen hun verbrandingslucht namelijk in de dieselhal aan. Via een vijftal kleppenregisters en coulissendempers in de dieselcentrale wordt de ventilatielucht weer door de buitenwand afgevoerd. Deze kleppenregisters en coulissendempers zijn aangebracht in de nabijheid van de dieselgeneratoren.

De aanzuigventilatoren en kleppenregisters worden temperatuurafhankelijk aangestuurd om er voor te zorgen dat enerzijds de dieselcentrales niet te koel worden en anderzijds de in verband met de aanwezige elektronische apparatuur maximaal toelaatbare temperatuur van 40°C niet overschreden wordt.

Dieselkoeling
Wanneer één van de diesels wordt opgestart, start automatisch de bijbehorende radiator-ventilator in een laag toerental. De schakelpunten van de thermostaten staan zo ingesteld dat bij een koelwatertemperatuur hoger dan 72°C het hoge toerental wordt ingeschakeld en dat bij een koelwatertemperatuur lager dan 65°C het hoge toerental wordt uitgeschakeld.

Ruimteventilatie
Wanneer één van de diesels wordt opgestart, start automatisch één van de vier ruimteventilatoren. Het starten van de drie andere ruimteventilatoren is afhankelijk van de temperatuur die door drie bijbehorende ruimtethermostaten wordt gemeten. De schakelpunten van de ruimtethermostaten staan zo ingesteld dat de tweede ruimteventilator inschakelt bij een temperatuur hoger dan 27°C, de derde bij een temperatuur hoger dan 31°C, en de vierde bij een temperatuur hoger dan 35°C.

3.3.2 Dieselgeneratorset

Een dieselgeneratorset wekt de benodigde energie op tijdens de bedrijfstoestand van de kering. Als de PZEM-voeding is uitgevallen, werkt zij ook tijdens de sluimertoestand. Iedere dieselgenerator heeft een normaalvermogen van 584 kW en een piekvermogen van 640 kW.

Iedere dieselgenerator is voorzien van een brandstofpomp met een dagtank die 200 liter brandstofolie bevat. De dagtank staat vlakbij de dieselgenerator in een aparte ruimte. Een niveauregeling in de dagtank zorgt ervoor dat deze gevuld blijft; hiertoe is de brandstofpomp aangesloten op een grote opslagtank (10.000 liter) buiten het gebouw.

De koelwaterverwarming houdt de dieselgeneratorset op een temperatuur van ongeveer 10°C als de diesel niet in bedrijf is. Bij een lagere temperatuur kunnen startproblemen ontstaan waardoor het generatordeel bij het starten beschadigd kan worden. Iedere dieselgenerator is verder voorzien van een dieselkoeling, die elders is opgesteld (paragraaf 3.3.1).

Bij iedere dieselgeneratorset behoort een besturingskast die is uitgerust met de benodigde besturingsregelingen en componenten om de dieselgeneratorset zelfstandig te kunnen laten functioneren. Op het front van de kast zijn schakelaars en drukknoppen aangebracht voor automatische bediening en individuele onderhoudsbediening. Ook zijn er signaleringslampjes aanwezig voor storingen en statussen, diverse meters en een noodstopknop. Boven op iedere kast staat een blauw zwaailicht dat dient als algemene storingssignalering. In de besturingskast zijn signaleringen en alarmeringen aanwezig van mogelijke oorzaken waardoor de dieselgenerator tript of niet tript (d.i. stoppen door een storing), naast de gebruikelijke statusmeldingen.

Bij het stoppen van de dieselgenerator wordt onderscheid gemaakt tussen een urgente stop en een niet-urgente (normale) stop. Een urgente stop doet zich voor in noodgevallen: als de bedienaars op de noodstopknop drukken of als de dieselgenerator wordt uitgeschakeld na een trip-alarm. De dieselgenerator stopt onmiddellijk zonder nakoeling. Bij een normale stop draait de dieselgenerator drie minuten door om na te koelen.

Omdat de mogelijkheid bestaat dat een dieselgeneratorset wordt beschadigd bij te veel doorstarten, krijgt iedere diesel, met bepaalde tussenpozen, maar drie keer een automatisch startcommando. Als de dieselgeneratorset na drie commando's nog niet is opgestart, volgt automatisch de storingssignalering 'startstoring'. Ook is de dieselgenerator beveiligd tegen het krijgen van reeds gegeven automatische en/of handmatige commando's. Als de dieselgenerator is gestart en op het net is geschakeld, zullen opnieuw gegeven startcommando's worden genegeerd.

De dieselgeneratoren worden automatisch gestart en op het net geschakeld bij:
1. Een noodsluiting. Alle diesels worden gestart. Voorwaarden om een diesel te starten zijn dat de diesel in de stand auto staat en dat de diesel niet staat geblokkeerd.
2. Uitval van de PZEM-voeding. Alle diesels die op de wandcontrolepanelen in de dieselcentrales zijn geselecteerd als voorkeurdiesel worden gestart. In het algemeen zijn drie diesels voldoende om de uitgevallen PZEM-voeding op te vangen. Voorwaarden om te starten zijn dat de diesel in de stand auto staat, de diesel niet staat geblokkeerd en dat de diesel is geselecteerd voor automatisch starten.

Iedere dieselgenerator wordt via een eigen step-up-transformator en een eigen generatorveld automatisch aangesloten op het 10 kV-schakelstation van de dieselcentrale. Daarbij is het zeer belangrijk dat er een goede automatische spanningsregeling en -afregeling van de fase en frequentie tussen de verschillende spanningen plaatsvindt (synchronisatie): de PZEM-voeding moet zonder spanningsonderbreking worden overgenomen en er worden meerdere dieselgeneratoren op het 10 kV-schakelstation aangesloten. Een ongesynchroniseerde inschakeling zou een complete sluiting tussen de fasen veroorzaken met als gevolg een aanzienlijke schade. Daarom is iedere dieselgenerator uitgerust met een meet- en regelsysteem en een beveiliging, met als belangrijkste componenten:
- een SPM-synchroniser voor de afregeling van de fase en frequentie;
- een Woodward-regelaar type 2301 voor de sturing (brandstoftoevoer en oliedruk) van de diesel;
- een spanningsregeling voor de generator, regelend tussen 380 V en 400 V;
- een speciaal ontwikkelde beveiligingsunit die voorkómt dat het generatorveld ongesynchroniseerd kan worden ingeschakeld.

Bij aanwezigheid van de PZEM-voeding krijgt het meet- en regelsysteem zijn gegevens van het 10 kV-schakelstation, zowel van de algemene 10 kV-zijde als van de 380 V-zijde van de bijbehorende step-up-transformator. De PZEM-voeding dient als referentiespanning voor het meten en regelen van de opgestarte dieselgeneratoren. De eerste dieselgenerator die voldoende vermogen heeft en synchroon loopt met het PZEM-net, wordt op het 10 kV-net geschakeld. Onmiddellijk daarna wordt de PZEM-voeding afgeschakeld. Daarna geldt deze generatorvoeding als referentiespanning voor het meten en regelen van de overige generatoren.

Als de PZEM-voeding is uitgevallen en er dus geen referentiespanning aanwezig is, dan wordt de eerste dieselgenerator die voldoende vermogen levert, op het 10 kV-net geschakeld. Deze generatorvoeding geldt dan als referentiespanning voor het meten en regelen van de andere generatoren.

Gelijktijdige inschakeling van meerdere dieselgeneratoren die op hetzelfde moment voldoende vermogen leveren en mogelijk ongesynchroniseerd draaien, wordt voorkómen door een tijdschakeling tussen de dieselgeneratoren in combinatie met de aanwezige beveiligingsunits. Als de tijdschakeling niet functioneert, dan is het afhankelijk van de fase van een dieselgenerator of er problemen

optreden. In dat geval zijn de beveiligingsunits van belang. Zodra er een situatie ontstaat die gevaar oplevert voor een dieselgenerator, schakelt de beveiligingsunit van die generator het betreffende generatorveld onmiddellijk uit.

Start-accubatterijen 24 V=
Het vermogen dat nodig is om de startmotoren in te schakelen en de diesel te starten, wordt geleverd door een set start-accubatterijen. Iedere diesel heeft zijn eigen set. Ze bestaan uit twintig cellen en hebben een spanning van 24 V.

Tijdens het draaien van een diesel worden de accubatterijen opgeladen en op peil gehouden door de dynamo van de diesel. Als de diesel niet draait, worden de accubatterijen in geladen toestand gehouden door een druppellading uit het 24 V=-deelnet van de dieselcentrale. Omgekeerd voeden de accubatterijen het 24 V=-deelnet als dit in storing is.

Hoewel de dieselgeneratoren uit veiligheidsoverwegingen maar drie startpogingen doen, leveren de start-accubatterijen voldoende vermogen voor minimaal zeven starts.

Step-up-transformator
Bij iedere dieselgenerator hoort een step-up-transformator. Deze zet de gegenereerde spanning (380/400 V) om naar de distributiespanning (10 kV). De transformatoren zijn oliegekoeld, hebben het klokgetal YND5 en een vermogen van 800 kVA (640 kW). De step-up-transformator wordt pas actief als de bijbehorende dieselgenerator via het generatorveld op het eigen 10 kV-schakelstation wordt aangesloten.

Generatorveld
Iedere dieselgenerator heeft een eigen generatorveld dat het 10 kV-schakelstation koppelt aan de bijbehorende step-up-transformator.

Het generatorveld schakelt automatisch uit na het aanspreken van één van de volgende beveiligingen:
- verschilspanning en -frequentiebeveiliging;
- thermische overstroombeveiliging;
- terug-Watt-beveiliging.

Het generatorveld wordt ook uitgeschakeld als de temperatuur of de druk van de step-up-transformator te hoog is.

Het generatorveld werkt autonoom en wordt automatisch ingeschakeld als aan de volgende voorwaarden is voldaan:
- de diesel staat op auto;
- de diesel is gestart, de generator levert voldoende vermogen en de geleverde spanning is gesynchroniseerd met de referentiespanning uit het meet- en regelsysteem.

Uitschakelen gebeurt automatisch als niet langer aan deze voorwaarden wordt voldaan.

3.3.3 10 kV-schakelstation

De twee dieselcentrales hebben elk een eigen 10 kV-schakelstation. Dit schakelstation bestaat uit acht velden met schakelaarwagens en twee reserve-velden waarin schakelaarwagens gereden kunnen worden. Beide 10 kV-schakelstations zijn identiek. Ze kunnen geheel zelfstandig functioneren en worden pas actief als de dieselcentrales in bedrijf zijn. De 10 kV-schakelstations zijn ondergebracht in afzonderlijke ruimten van het centraal bedieningsgebouw.

Het 10 kV-schakelstation is opgebouwd uit de volgende componenten:
- vijf generatorvelden met beveiligingsunits (paragraaf 3.3.2);
- een koppelveld 10 kV-verdeelstation met beveiligingsunit;
- een koppelveld 10 kV-schakelstation met beveiligingsunit;
- een transformatorveld *Voeding ballastweerstanden* met beveiligingsunit en een step-down-transformator.

De functies van het 10 kV-schakelstation zijn het in- en uitschakelen van de generatorvoedingen, het koppelen en distribueren van de opgewekte voeding naar het 10 kV-distributienet en het verzorgen van de voeding voor de schakelkast *Ballastweerstanden* en de voedingskast *Eigen bedrijf en hulpinstallaties*.
Bovendien fungeert het 10 kV-schakelstation als een koppeling met het 10 kV-schakelstation van de andere centrale. Dit is noodzakelijk omdat tijdens de bedrijfstoestand beide centrales zijn opgestart en van beide centrales de referentiespanningen voor de synchronisatie benodigd zijn. Als er een calamiteit in het 10 kV-distributienet optreedt, kan via deze koppeling de voedingsvoorziening voor de bedrijfstoestand via een andere weg worden gewaarborgd. Ten slotte is de koppeling nodig om tijdens onderhoudswerkzaamheden of proefdraaien elkaars ballastweerstanden als extra grondbelasting te kunnen gebruiken.

Koppelveld 10 kV-verdeelstation
Het koppelveld 10 kV-verdeelstation koppelt het 10 kV-schakelstation aan het 10 kV-verdeelstation van dezelfde dieselcentrale: het is de standaardverbinding met het 10 kV-distributienet. Het koppelveld staat altijd ingeschakeld.

Het koppelveld schakelt automatisch uit na het aanspreken van één van de volgende beveiligingen:
- verschilspanning en -frequentiebeveiliging;
- elektromagnetische overstroombeveiliging.

Koppelveld 10 kV-schakelstation
Dit veld koppelt het 10 kV-schakelstation van de ene dieselcentrale aan het 10 kV-schakelstation van de andere dieselcentrale. Als één van de 10 kV-verdeelstations uitvalt, blijft door deze koppeling de verbinding met het 10 kV-distributienet intact. Hiermee is de voeding van de stormvloedkering tijdens bedrijfstoestand gewaarborgd.

Het koppelveld 10 kV-schakelstation werkt geheel autonoom. Het schakelt automatisch in bij bedrijfstoestand, en uit bij sluimertoestand. Het koppelveld schakelt bovendien uit na het aanspreken van één van de volgende beveiligingen:
- verschilspanning en -frequentiebeveiliging;
- elektromagnetische overstroombeveiliging.

Het koppelveld wordt automatisch in- en uitgeschakeld bij een *OPEN*- of *SLUIT*-commando van het noodsluitsysteem (hoofdstuk 7).

Transformatorveld Voeding ballastweerstanden
Dit transformatorveld koppelt het 10 kV-schakelstation aan de step-down-transformator en zorgt daarmee voor de voeding van de schakelkast *Ballastweerstanden* en de voedingskast *Eigen bedrijf en hulpinstallaties*.

Het transformatorveld *Voeding ballastweerstanden* werkt geheel autonoom. Het schakelt automatisch in bij bedrijfstoestand, onder de voorwaarden dat de 10 kV-spanningsrail in het 10 kV-schakelstation spanningvoerend is en dat deze rail wordt gevoed door de eigen centrale. De laatste voorwaarde kan echter vanuit de andere centrale worden overbrugd om de ballastweerstanden te gebruiken als kunstmatige belasting voor die centrale.

Het transformatorveld schakelt automatisch uit bij sluimertoestand, nadat alle diesels zijn gestopt en vijf minuten hebben nagedraaid. Ook schakelt het transformatorveld automatisch uit na het aanspreken van de elektromagnetische overstroombeveiliging. Het transformatorveld wordt bovendien automatisch uitgeschakeld als de temperatuur of de druk van de bijbehorende step-down-transformator te hoog is.

Step-down-transformator
De step-down-transformator transformeert de 10 kV-spanning naar een spanning van 380 V die gebruikt wordt voor de voeding van de ballastweerstanden, het eigen bedrijf en de hulpinstallaties. De transformator is oliegekoeld, heeft een klokgetal van DYN5 en een vermogen van 1000 kVA (800 kW). De step-down-transformator wordt pas actief als het transformatorveld *Voeding ballastweerstanden* is ingeschakeld. Dit gebeurt zodra minstens één dieselgenerator van de eigen centrale, met het generatorveld wordt aangesloten op het 10 kV-schakelstation.

3.3.4 Ballastweerstanden

Elke dieselcentrale beschikt over een set van vijf, geforceerd luchtgekoelde ballastweerstanden: één ballastweerstand van 120 kW per dieselgenerator. De ballastweerstanden zorgen voor de nodige grondlast bij generatorbedrijf. Een dieselgenerator heeft bij het opstarten nog onvoldoende verbruikersbelasting en heeft daarom een grondlast nodig van 120 kW om een goede vermogensregeling van de dieselgenerator te garanderen. De ballastweerstanden worden ook gebruikt als kunstmatige belasting bij onderhoudswerkzaamheden en bij het testen van de dieselgeneratoren. De set ballastweerstanden van de ene centrale kan worden aangesloten op de andere centrale. De ballastweerstanden zijn op het dak van de laagbouw geplaatst.

Een ballastweerstand bestaat uit:
- roestvrijstalen, buisvormige weerstandselementen;
- een ventilator voor de koeling van de weerstandselementen;
- een systeembeveiliging;
- een tijdrelais.

De systeembeveiliging bestaat uit een stroom-meetrelais en een thermostaat. Het stroom-meetrelais is met een inschakelcontact ingebouwd in de ventilatorvoeding en controleert de werking van de ventilator. Bij juiste werking van de ventilator schakelt het relais automatisch de betreffende ballastweerstand in. Bij storing of onjuiste werking schakelt het relais de ballastweerstand respectievelijk niet in of schakelt deze uit. In het oorspronkelijke ontwerp was uitgegaan van een inschakelcontact dat moest reageren op een windvaan in de luchtstroom van de ventilator. Dat bleek te storingsgevoelig. Iedere ballastweerstand wordt bovendien tegen oververhitting beschermd door een thermostaat die de ballastweerstand bij het bereiken van een kritieke temperatuur uitschakelt.

Elke set ballastweerstanden heeft een eigen schakelkast met besturingsrelais, meters, schakelaars, voedingsgroepen en beveiligingen. Deze schakelkasten staan opgesteld in twee afzonderlijke ruimten van het centraal bedieningsgebouw. De schakelkast wordt via de step-down-transformator gevoed door het 10 kV-schakelstation en is alleen spanningvoerend en actief tijdens bedrijfstoestand. Door de koppelmogelijkheden in het distributienetwerk en tussen beide dieselcentrales, kan de voeding ook door de andere dieselcentrale worden geleverd. Als de schakelkast spanningvoerend is, dan zorgt hij voor de besturing en voeding van de weerstandselementen en voor de voeding (via een automatisch geregelde wisselschakelaar) van de voedingskast *Eigen bedrijf en hulpinstallaties*; de ventilatoren van de ballastweerstanden worden aangestuurd en gevoed vanuit deze voedingskast en functioneren alleen tijdens de bedrijfstoestand.

De ballastweerstanden kunnen zowel handmatig als automatisch worden bediend. Hiertoe zijn de wandcontrolepanelen in de dieselcontroleruimtes uitgerust met een meerstandenschakelaar. Voor de handbediening kent de schakelaar vijf stappen (één stap per ballastweerstand). Voor automatische bediening wordt de schakelaar in de stand *auto* gezet. De te nemen stappen worden dan automatisch genomen door de contacten van de vermogensmeters in de besturingskasten van de dieselgeneratoren en door de hulpcontacten in de generatorvelden. Zodra een dieselgenerator op het 10 kV-net wordt geschakeld, wordt automatisch de bijbehorende ballastweerstand (ventilator + weerstandselementen) ingeschakeld. Neemt de generatorbelasting toe tot meer dan 300 kW, dan wordt de bijbehorende ballastweerstand automatisch afgeschakeld omdat er dan voldoende belasting voor generatorbedrijf is. Zakt de generatorbelasting tot onder de 120 kW, dan wordt automatisch weer de ballastweerstand ingeschakeld. Na het uitschakelen van de ballastweerstand zorgt een tijdrelais in de ventilatorschakeling ervoor dat de ventilatoren nog vijf minuten draaien voor een nakoeling.

3.3.5 Eigen bedrijf en hulpinstallaties

De voedingskast *Eigen bedrijf en hulpinstallaties* verzorgt de voeding van de diverse besturingskasten en de apparatuur van de eigen dieselcentrale, zoals de ventilatoren van de ballastweerstanden, het ventilatie- en koelsysteem en het 24 V=-deelnetsysteem.

Tijdens de sluimertoestand wordt deze voedingskast gevoed door de laagspanningsverdeling van het centraal bedieningsgebouw, tijdens de bedrijfstoestand door de schakelkast *Ballastweerstanden*. Tussen deze twee voedingen wordt automatisch geschakeld door een wisselschakelaar met interne, mechanische vergrendeling. Hierdoor is een gelijktijdige voeding vanuit beide netten onmogelijk en is bovendien de voeding voor deze voedingskast altijd gegarandeerd. Dit is vooral van belang omdat deze voedingskast mede het 24 V=-deelnet van de betreffende dieselcentrale voedt. Dit deelnet is noodzakelijk voor het opstarten van de dieselcentrale en het laden van de start-accubatterijen.

De wisselschakelaar wordt automatisch geactiveerd door een hulpcontact (schakelaar *IN*) van de hoofdschakelaar in de schakelkast *Ballastweerstanden* en onder de voorwaarde dat de step-down-transformator (en dus de schakelkast *Ballastweerstanden*) spanningvoerend is. Als de voeding van de schakelkast *Ballastweerstanden* wordt onderbroken, wordt de voeding voor het *Eigen bedrijf en hulpinstallaties* automatisch overgenomen door de laagspanningsverdeling van het centraal bedieningsgebouw.

3.3.6 Wandcontrolepaneel dieselcentrales

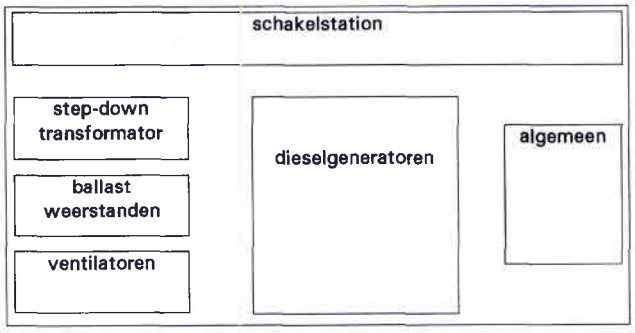
Iedere dieselcentrale heeft een controleruimte met een wandcontrolepaneel. Het wandcontrolepaneel accepteert alleen bedieningen als de aanwezigheidsschakelaar in de stand *bediening aanwezig* is gezet. Het paneel kan dan worden gebruikt om (decentraal) te bedienen en te signaleren. Ieder paneel heeft een synoptisch schema dat de componenten op het front met elkaar verbindt en is in twee delen gesplitst:
- een deel voor de eigen dieselcentrale met de bijbehorende ballastweerstanden en de bijbehorende schakel- en verdeelstations van het 10 kV-distributienet;

- een deel voor de andere dieselcentrale met de bijbehorende ballastweerstanden, de bijbehorende schakel- en verdeelstations van het 10 kV-distributienet, en de PZEM-voeding.

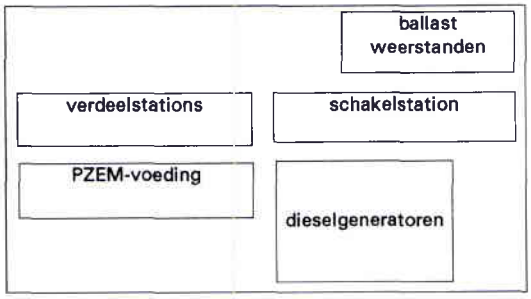
Het deel voor de eigen dieselcentrale heeft schakelaars voor de bediening van de vijf diesels, en voor de bijbehorende 10 kV-schakel en -verdeelstations en ballastweerstanden. Per dieselgenerator kan de spanning, stroomsterke, frequentie en het afgegeven vermogen op meters worden afgelezen. Voor de ballastweerstanden is het gezamenlijke vermogen zichtbaar op een kW-meter. Bovendien worden de status en de eventuele storingen van de componenten van de dieselcentrale met signaleringslampen aangegeven.

Het deel voor de andere dieselcentrale bevat hoofdzakelijk storings- en statusmeldingen. Daarnaast geven kW-meters het afgegeven vermogen aan van de dieselgeneratoren en de gezamenlijke ballastweerstanden.

Het wandcontrolepaneel voor de eigen centrale ziet eruit als aangegeven in figuur 3.5. Het wandcontrolepaneel voor de andere centrale ziet eruit als aangegeven in figuur 3.6.



Figuur 3.5 Overzicht wandcontrolepaneel eigen centrale



Figuur 3.6 Overzicht wandcontrolepaneel andere centrale

In het wandcontrolepaneel van de andere centrale is in het gedeelte 'PZEM-voeding' een drukknop *PZEM-VOEDING UIT* aanwezig. Hiermee kan het voedingsveld van de PZEM worden uitgeschakeld, waarna automatisch de drie dieselgeneratoren worden opgestart die zijn voorgeselecteerd om de PZEM-voeding over te nemen. Verdere bediening is in de gedeelten 'Schakelstation', 'Verdeelstations' en 'PZEM-voeding' niet mogelijk.

Het gedeelte 'Dieselgeneratoren' van het wandcontrolepaneel van de andere centrale bevat per dieselgenerator (met bijbehorende step-up-transformator) een kW-meting en diverse signaleringen, die in het algemeen overeenkomen met die van het deel voor de eigen centrale.

In het gedeelte 'Ballastweerstanden' is de mogelijkheid ingebouwd om de ballastweerstanden van de andere centrale in te schakelen. Als op het wandcontrolepaneel in de andere centrale de bediening is vrijgegeven kunnen de vijf ballastweerstanden van de andere centrale als extra grondlast worden gebruikt.

3.3.7 Brandbestrijding

De twee dieselcentrales in het centraal bedieningsgebouw zijn bouwkundig brandvrij van elkaar gescheiden. Als één dieselcentrale door een grote calamiteit in zijn geheel is uitgeschakeld, dan kan de andere centrale nog volledig functioneren. Het is echter voor de betrouwbaarheid van de kering ontoelaatbaar dat één van de twee dieselcentrales in zijn geheel buiten bedrijf wordt gesteld als er brand uitbreekt bij slechts één dieselaggregaat. De faalkans van de energielevering wordt dan te groot.

De schade die kan ontstaan door het stagneren van de energievoorziening weegt zwaarder dan eventuele brandschade aan de apparatuur. Om deze reden is afgezien van een automatisch brandbestrijdingssysteem. Automatische brandblussing kan namelijk volledige uitval van een dieselcentrale veroorzaken.

Het risico van brand in een dieselcentrale is door de lage frequentie van het gebruik van eigen energieopwekking zeer beperkt. Om dit risico verder te beperken is voorzien in een rookdetectiesysteem met alarmering. Na alarmering moet een eventuele brand met eenvoudige bestrijdingsmiddelen worden geblust.

3.4 Energiedistributie

De opgewekte energie wordt zodanig verspreid dat de gebruikers over een zo betrouwbaar mogelijke energievoorziening kunnen beschikken. Verantwoordelijk voor de distributie zijn (figuur 3.7):

1. de verdeelstations bij de dieselcentrales;
2. de ringleidingen voor het transport over de kering;
3. de transformatorstations (en onderliggende systemen) op de kering;
4. de laagspanningsvoorziening van het centraal bedieningsgebouw.

Door de grote afstanden naar de componenten op de kering is ervoor gekozen de energie onder hoogspanning (10 kV) te transporteren en pas zo dicht mogelijk bij de gebruikers om te zetten naar de gebruikersspanning (380 V).

De hoogspanningsvoeding wordt over het net verdeeld door twee identieke 10 kV-verdeelstations. Normaal werken deze verdeelstations parallel en hebben elk een onafhankelijke voeding. Bij een calamiteit kunnen de verdeelstations elkaar voeden of ieder afzonderlijk de gehele verdeelfunctie overnemen.

Het transport naar de gebruikers op de kering gebeurt met twee ringleidingen. In de normale situatie staan deze ringleidingen op het verste punt in de open stand, waarbij de ene tak van de ringleiding is aangesloten op verdeelstation A en de andere tak van deze ringleiding is aangesloten op verdeelstation B. Een van de ringleidingen verzorgt de voeding voor de gebruikers in het sluitgat Roompot en de Roompotsluis. De andere ringleiding verzorgt de voeding voor de gebruikers in de sluitgaten Hammen en Schaar.

Uit economische overwegingen zijn de gebruikers in groepen ingedeeld. Elke groep is aangesloten op een voedingspunt uit het hoogspanningsnet met een step-down-transformator in een trafostation. De groepen zijn aangeduid met het pijlervak van de kering



Figuur 3.7 Schematisch overzicht energiedistributie

waarin ze zijn aangebracht. Ze zijn zodanig samengesteld dat ze bij een in bedrijf zijnde kering ongeveer dezelfde belasting geven. Hierdoor kan overal hetzelfde type transformator worden toegepast.

Op deze manier heeft het sluitgat Roompot negen groepen (voor 31 gebruikers), het sluitgat Schaar vier groepen (voor 16 gebruikers) en het sluitgat Hammen drie groepen (voor 15 gebruikers). De gebruikers bij de Roompotsluis en de laagspanningsverdeler in het centraal bedieningsgebouw vormen ieder een eigen groep. De groepsindeling is weergegeven in tabel 3.2.

Aan de hoogspanningszijde zijn de trafostations om en om aangesloten op een tak van de ringleiding. Daarmee wordt bereikt dat iedere tak ongeveer evenveel wordt belast. Bij een onderbreking in een tak van de ringleiding wordt de schakelaar op het verste punt gesloten, waarna de voeding voor het onderbroken deel via de andere tak kan plaatsvinden. De verdeling in het centraal bedieningsgebouw wordt naar keuze direct uit één van beide 10 kV-verdeelstations gevoed.

Aan de laagspanningszijde kunnen de gebruikersgroepen in een trafostation zonodig vanuit een naastgelegen trafostation worden gevoed. Bij uitval van de transformator of de hoogspanningsvoeding in een trafostation is hierdoor een reserve gecreëerd op laagspanningsniveau. Door de geïsoleerde ligging van de Roompotsluis is deze reserve daar niet mogelijk.

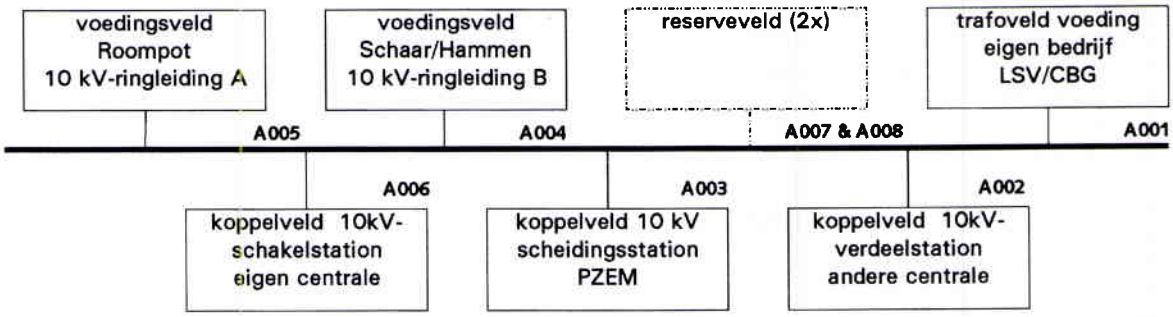
De status- en storingssignalering van alle componenten binnen de energiedistributie geschiedt op het wandcontrolepaneel in de centrale bedieningsruimte. De verdeelstations bij de dieselcentrales en de laagspanningsverdeler CBG geven tevens status- en storingssignaleringen op de wandcontrolepanelen van de centrales A en B. Daarnaast worden lokaal in de trafostations de nodige storings- en statusmeldingen visueel weergegeven en verwerkt in de lokale computer (LCC).

3.4.1 10 kV-verdeelstation dieselcentrale A en B

De twee dieselcentrales hebben elk een eigen 10 kV-verdeelstation. Zo'n verdeelstation bestaat uit vijf velden met schakelaarwagens en twee reservevelden waar schakelaarwagens ingereden kunnen worden. Beide 10 kV-verdeelstations zijn identiek en kunnen geheel zelfstandig functioneren.

Trafostation/groep	Gebruikersgroepen				
R3 Roompot	R1	R2	R3	R4	
R7 Roompot	R5	R6	R7	R8	
R10 Roompot	R9	R10	R11		
R13 Roompot	R12	R13	R14		
R16 Roompot	R15	R16	R17		
R20 Roompot	R18	R19	R20	R21	
R23 Roompot	R22	R23	R24		
R26 Roompot	R25	R26	R27	R28	
R30 Roompot	R29	R30	R31		
RPS Roompotsluis	gebruikers Roompotsluis				
S3 Schaar	S1	S2	S3	S4	
S7 Schaar	S5	S6	S7	S8	
S11 Schaar	S9	S10	S11	S12	
S15 Schaar	S13	S14	S15	S16	
H3 Hammen	H1	H2	H3	H4	H5
H8 Hammen	H6	H7	H8	H9	H10
H13 Hammen	H11	H12	H13	H14	H15

Tabel 3.2 Groepsindeling trafostations



Figuur 3.8 Schematisch overzicht 10 kV-verdeelstation dieselcentrale

De 10 kV-verdeelstations zijn opgebouwd uit de volgende componenten (figuur 3.8):
- twee voedingsvelden voor de ringleidingen Roompot en Schaar/Hammen met beveiligingsunits;
- een transformatorveld *Voeding eigen bedrijf* (LSV/CBG) met beveiligingsunit;
- een koppelveld 10 kV-schakelstation met beveiligingsunit;
- een koppelveld 10 kV-scheidingsstation met beveiligingsunit;
- een koppelveld voor de koppeling met het andere 10 kV-verdeelstation met beveiligingsunit.

De functies van het 10 kV-verdeelstation zijn het verdelen van de opgewekte energie via de 10 kV- ringleidingen over de kering, en het verzorgen van de voeding naar de laagspanningsverdeling van het centraal bedieningsgebouw. Bovendien fungeert het 10 kV-verdeelstation als een koppeling met het 10 kV-verdeelstation van de andere centrale. Als er een calamiteit in de energieopwekking of in het 10 kV-schakelstation van één van de centrales optreedt, kan via deze koppeling de energievoorziening naar de ringleidingen via een andere weg worden gewaarborgd.

Voedingsvelden Roompot en Schaar/Hammen
Een voedingsveld koppelt het 10 kV-verdeelstation aan een tak van de 10 kV-ringleidingen. Beide 10 kV-verdeelstations hebben twee voedingsvelden:
- één voor ringleiding A ten behoeve van de Roompot (tak a of a1);
- één voor ringleiding B ten behoeve van de Schaar/Hammen (tak b of b1).

De voedingsvelden staan altijd ingeschakeld. Een voedingsveld schakelt automatisch uit na het aanspreken van één van de volgende beveiligingen:
- thermische overstroomfrequentiebeveiliging;
- elektromagnetische overstroombeveiliging.

Transformatorveld *Voeding eigen bedrijf*
Het transformatorveld *Voeding eigen bedrijf* koppelt het 10 kV-verdeelstation aan de step-down-transformator van de laagspanningsverdeling van het CBG en zorgt daarmee voor de voeding van het eigen bedrijf.

Het transformatorveld schakelt automatisch uit na het aanspreken van de elektromagnetische overstroombeveiliging en de nulspanningsbeveiliging. Deze beveiligingen zijn ondergebracht in een speciaal ontwikkelde beveiligingsunit. De nulspanningsbeveiliging verzorgt een automatische uitschakeling van het veld bij spanningswegval en een automatische inschakeling als er weer 10 kV-spanning op de rail staat. Het transformatorveld wordt bovendien automatisch uitgeschakeld als de temperatuur of de druk van de step-down-transformator laagspanningsverdeler CBG te hoog is.

Koppelveld 10 kV-schakelstation
Dit veld koppelt het 10 kV-verdeelstation aan het 10 kV-schakelstation van dezelfde centrale en is de standaardverbinding met de eigen energieopwekking tijdens de bedrijfstoestand. Het koppelveld staat altijd ingeschakeld, maar schakelt automatisch uit na het aanspreken van de elektromagnetische overstroombeveiliging.

Koppelveld 10 kV-scheidingsstation
Dit veld koppelt het 10 kV-scheidingsstation van de PZEM-voeding aan het 10 kV-verdeelstation en is de standaardverbinding met het energieleverend bedrijf tijdens de sluimertoestand. Het koppelveld staat altijd ingeschakeld, maar schakelt automatisch uit na het aanspreken van de elektromagnetische overstroombeveiliging.

Koppelveld 10 kV-verdeelstation
Dit veld koppelt het 10 kV-verdeelstation aan het 10 kV-verdeelstation van de andere dieselcentrale. Als één van de 10 kV-schakelstations uitvalt, blijft door deze koppeling de verbinding met de eigen energieopwekking intact en is de voeding van de kering tijdens bedrijfstoestand gewaarborgd.

Het koppelveld 10 kV-verdeelstation werkt geheel autonoom. Het schakelt automatisch in bij bedrijfstoestand, en uit bij sluimertoestand. Het koppelveld schakelt bovendien uit na het aanspreken van één van de volgende beveiligingen:
- verschilspanning en -frequentiebeveiliging;
- elektromagnetische overstroombeveiliging.

Het koppelveld wordt automatisch in- en uitgeschakeld bij een *OPEN*- of *SLUIT*-commando van het noodsluitsysteem (zie hoofdstuk 7) en bij uitval van de PZEM-voeding wanneer de voorgeselecteerde diesels opstarten. Bij storingen kan het koppelveld met de hand worden gesloten.

3.4.2 10 kV-ringleiding

De ringleidingen Roompot en Schaar/Hammen transporteren de opgewekte energie met een spanning van 10 kV naar de transformatorstations op de kering. In' een transformatorstation wordt de betreffende ringleiding gesplitst en aangesloten op twee koppelvelden, alvorens door te gaan naar het volgende transformatorstation. Hierdoor kan bij een calamiteit tussen twee transformatorstations, een deel van een ringleiding als sectie worden geïsoleerd.

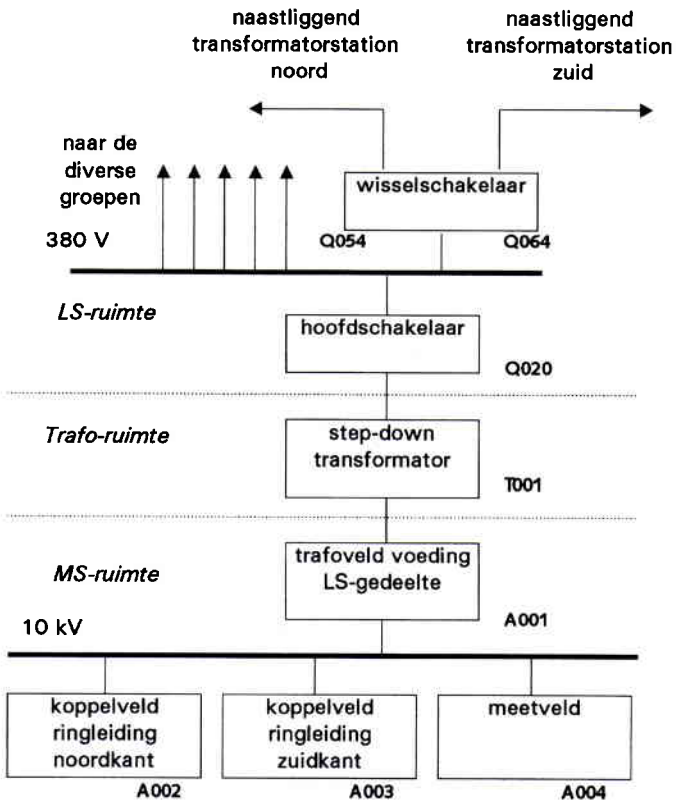
De transformatorstations zijn om en om op de ringleiding aangesloten. Daarmee wordt bereikt dat zowel belasting als lengte van de ringleiding voor beide verdeelstations ongeveer gelijk verdeeld is. De transformatorstations R3 en H13 zijn de verst verwijderde transformatorstations van respectievelijk de ringleiding Roompot

en de ringleiding Schaar/Hammen; zij zijn uitgerust met een koppelveld dat dient als sluitschakelaar voor de ringleiding. Deze velden staan in normaal bedrijf uitgeschakeld zodat er in de normale situatie vier afzonderlijke ringleidingen zijn.
Door deze sluitschakelaars vanaf het wandcontrolepaneel in de centrale bedieningsruimte te sluiten, kunnen ringleidingen worden gecombineerd waardoor er een alternatieve voedingsroute ontstaat. Door alle schakelaars in de ringleidingen in te schakelen, is het mogelijk een ringleiding samen te stellen die door één verdeelstation wordt gevoed. De ringleidingen worden beveiligd door de beveiligingen die zijn opgenomen in de koppelvelden van de aangesloten transformatorstations.

De componenten van de transformatorstations zijn ondergebracht in containers die elk zijn aangeduid met de code voor het pijlervak van de kering waarin ze zijn aangebracht. De containers zijn zodanig ontworpen dat deze, met uitzondering van in- en uitgaande bekabeling, volledig geïnstalleerd in de verkeerskoker konden worden aangebracht. Een nevenfunctie van deze containers is het zo goed mogelijk beschermen van de geïnstalleerde apparatuur tegen de nadelige invloeden van het aanwezige klimaat.

Energieverdeling op de kering (transformatorstations)
De energieverdeling op de kering vindt plaats in de transformatorstations, die zijn aangesloten op de ringleidingen. Ieder transformatorstation voedt een aantal groepen, die zodanig zijn ingedeeld dat de belasting vrijwel overal gelijk is. Hierdoor kan in ieder transformatorstation hetzelfde type transformator worden gebruikt.

Een transformatorstation is in drie delen op te splitsen (figuur 3.9):
- de LS-ruimte;
- de Traforuimte;
- de MS-ruimte.



Figuur 3.9 Schematisch overzicht transformatorstation

Middenspanning-ruimte
In de MS-ruimte zijn twee koppelvelden aanwezig voor de aansluiting op de ringleiding en is het voedingsveld voor het laagspanningsgedeelte aangebracht. Ook is hier een meetveld voor diverse metingen gesitueerd.

Koppelvelden ringleiding
De koppelvelden ringleiding koppelen het transformatorstation aan de ringleiding op de kering. Het ene koppelveld is voor de koppeling aan de noordkant en het andere voor de koppeling aan de zuidkant van de ringleiding.
Een koppelveld schakelt automatisch uit na het aanspreken van de thermische overstroombeveiliging. De koppelvelden staan verder altijd ingeschakeld en kunnen alleen ter plaatse met de hand worden bediend.

Meetveld
Het meetveld biedt de mogelijkheid om diverse metingen uit te voeren aan het MS-gedeelte van het transformatorstation. Het meetveld is alleen ter plaatse met de hand te bedienen en geeft alleen ter plaatse de diverse statusmeldingen.

Transformatorveld Voeding LS-gedeelte
Het transformatorveld koppelt de step-down-transformator in het transformatorstation aan de middenspanning en zorgt daarmee voor de voeding van de diverse groepen op de kering. Het transformatorveld staat altijd ingeschakeld, maar wordt uitgeschakeld bij spanningswegval. Bij terugkomst van de spanning wordt het veld automatisch weer ingeschakeld door een inschakelcommando vanuit de centrale bedieningsruimte.

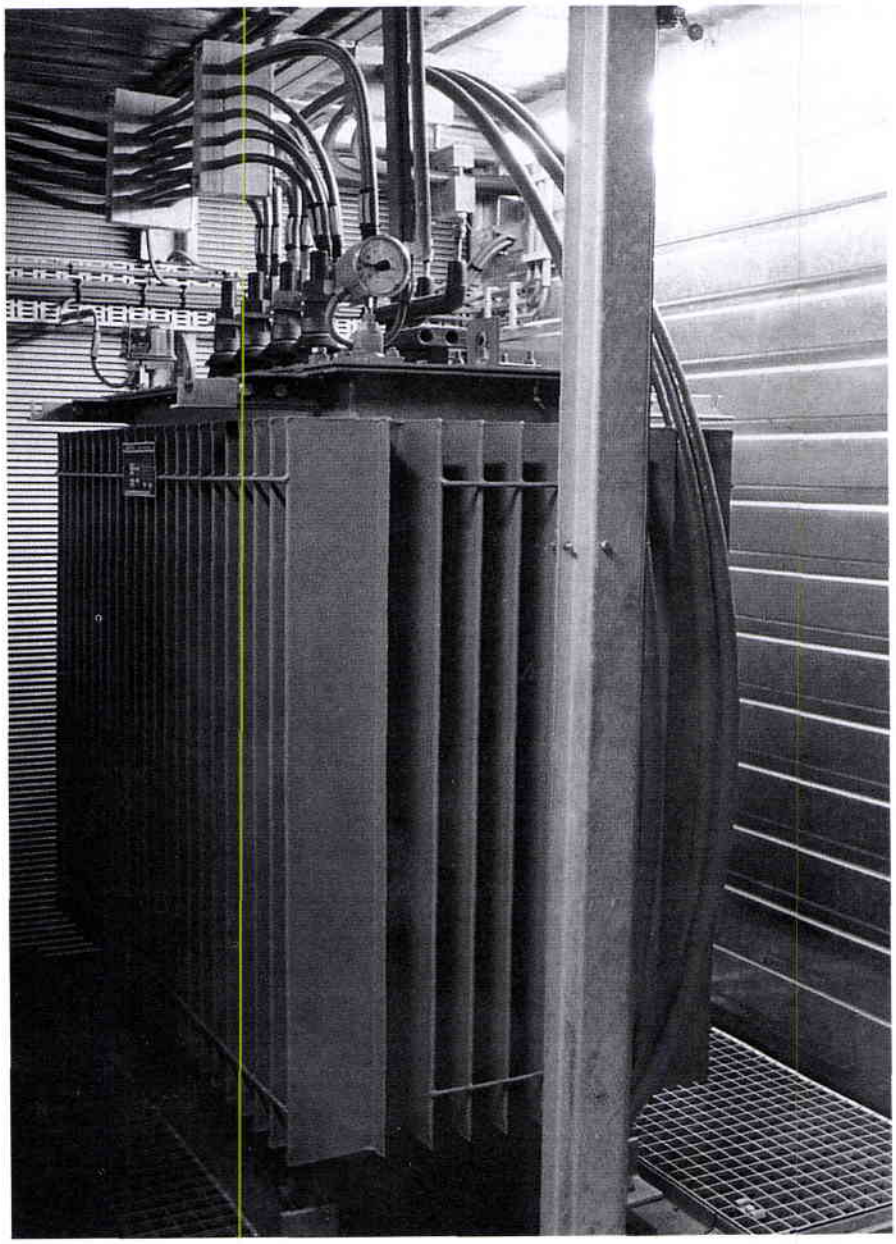
Het transformatorveld schakelt ook automatisch uit na het aanspreken van de thermische overstroombeveiliging en de nulspanningsbeveiliging. Het transformatorveld wordt bovendien automatisch uitgeschakeld als de temperatuur of de druk van de step-down-transformator in de traforuimte te hoog is.

Traforuimte
In de Traforuimte staat de step-down-transformator voor het omzetten van de hoogspanning in laagspanning (figuur 3.10). De step-down-transformator transformeert de 10 kV-spanning vanuit de MS-ruimte, naar een laagspanningsvoeding van 380 V voor de diverse groepen op de kering. De transformator is oliegekoeld, heeft het klokgetal DYN 5 en een vermogen van 630 kVA (504 kW).

Het vermogen is gedimensioneerd op de mogelijke voeding van twee trafostations, namelijk het eigen trafostation en, ingeval van een calamiteit, het belendende trafostation aan de noord- of zuidkant. De step-down-transformator is in de normale situatie altijd actief.

Laagspanning-ruimte
In de LS-ruimte wordt de laagspanningsvoeding over de diverse groepen verdeeld en zijn tevens de hoofdschakelaar en de wisselschakelaar aangebracht.

Hoofdschakelaar
De hoofdschakelaar kan alleen met de hand worden bediend en koppelt de spanningsrail van het laagspanningsdeel aan de step-down-transformator. De schakelaar staat altijd ingeschakeld, maar geeft middels een apart contact een melding aan het wandcontrolepaneel in de centrale bedieningsruimte wanneer deze is of wordt uitgeschakeld.



Figuur 3.10 Step-down-transformator

Wisselschakelaar
Met de wisselschakelaar kan een transformatorstation voeding ontvangen dan wel leveren aan een belendend transformatorstation. In principe kan een verbinding worden gemaakt met zowel het zuidelijk als het noordelijk gelegen transformatorstation. Uitzonderingen hierop zijn:
a) de transformatorstations R3, R30, S3, S15, H3 en H13, die maar één belendend transformatorstation hebben;
b) het transformatorstation RPS, dat door de afgelegen ligging helemaal geen koppelmogelijkheid heeft.

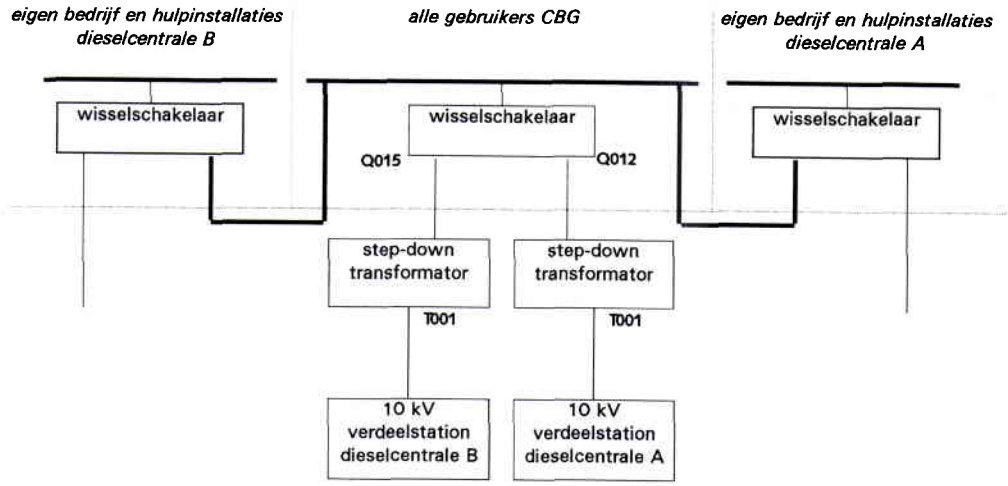
De wisselschakelaar is een combinatie van twee aparte schakelvelden die met behulp van magneetschakelaars worden aangestuurd en die in principe altijd staan uitgeschakeld.

De wisselschakelaar is mechanisch beveiligd zodat nooit een koppeling met beide naastgelegen transformatorstations kan worden gemaakt. Hiermee wordt voorkomen dat er te veel vermogen van de step-down-transformator wordt getrokken. Bovendien is de wisselschakelaar elektrisch beveiligd zodat nooit een koppeling tussen twee separate, onder spanning staande laagspanningsdelen kan worden gemaakt.

3.4.3 Laagspanningsverdeling CBG

De laagspanningsverdeling CBG verzorgt het energietransport naar de gebruikers in het CBG en bestaat uit drie delen (figuur 3.11):
- een laagspanningsdeel "Eigen bedrijf en hulpwerktuigen" voor dieselcentrale B;
- een laagspanningsdeel voor alle gebruikers in het CBG;
- een laagspanningsdeel "Eigen bedrijf en hulpwerktuigen" voor dieselcentrale A.

Het middendeel, de eigenlijke laagspanningsverdeling CBG, verzorgt de voeding van alle verbruikers in het CBG inclusief de ver-



Figuur 3.11 Schematisch overzicht laagspanningsverdeling CBG

delingen 'eigen bedrijf en hulpwerktuigen' voor de dieselcentrales A en B. Dit laagspanningsdeel ontvangt zijn voeding van (één van) de 10 kV-verdeelstations via de step-down-transformatoren. Aan de laagspanningszijde van de step-down-transformatoren wordt deze voeding automatisch geregeld door een wisselschakelaar, afhankelijk van welk deel het eerst spanningvoerend is. De wisselschakelaar is intern mechanisch vergrendeld zodat gelijktijdige voeding uit beide netten onmogelijk is. De laagspanningsdelen 'eigen bedrijf en hulpinstallaties' voor de dieselcentrales A en B zijn beschreven in paragraaf 3.3.5.

Step-down-transformatoren
De step-down-transformatoren transformeren de 10 kV-spanning naar een spanning van 380 V die gebruikt wordt voor de voeding van alle gebruikers in het centraal bedieningsgebouw. De transformatoren zijn oliegekoeld, hebben het klokgetal DYN5 en een vermogen van 630 kVA (504 kW) elk. Verder zijn de step-down-transformatoren altijd actief als het betreffende 10 kV-verdeelstation spanningvoerend is.

Wisselschakelaar CBG
De wisselschakelaar is uitgerust met een nulspanningsbeveiling die ervoor zorgt dat bij spanningsuitval van het voedende verdeelstation, er automatisch wordt overgeschakeld naar het andere verdeelstation. De wisselschakelaar is tevens om te schakelen vanaf het wandcontrolepaneel in de centrale bedieningsruimte.

3.5 Energielevering bijzondere voedingen

De bijzondere voedingen leveren de benodigde energie aan het 'centrale zenuwstelsel' in het centraal bedieningsgebouw en zijn daarom van groot belang voor het functioneren van de kering. Het centrale zenuwstelsel wordt gevormd door de besturing, bediening en bewaking van de centrale bediening en de dieselcentrales en door de aanwezige computersystemen. De bijzondere voedingen zijn noodzakelijk door de volgende eisen:

- alle besturing, bediening, bewaking en de computersystemen moeten te allen tijde blijven functioneren en daarom moet de energieleverantie bij uitval van de netvoeding door een alternatieve voedingsbron, zonder spanningsonderbreking, kunnen worden overgenomen;
- de energielevering uit de alternatieve voedingsbron moet zodanig zijn verdeeld, dat gedeeltelijke afschakeling geen storing veroorzaakt in de overige voedingen;
- de beide computers van het noodsluitsysteem (NSS) moeten elk een eigen, alternatieve voedingsbron hebben, onafhankelijk van de overige alternatieve voedingsbronnen;
- de alternatieve voedingsbron voor de startautomaat van de diesels moet 48 V= zijn en gestabiliseerd op ±10%;
- alle computersystemen moeten worden gevoed door een gezuiverde en gestabiliseerde ('schone') 220 V-wisselspanning.

Het is vooral belangrijk dat er geen onderbreking van de voedingsspanning plaatsvindt, omdat de verschillende installatiedelen van het 'centrale zenuwstelsel' essentieel zijn voor het bedienen, besturen en bewaken van alle aanwezige functionaliteiten. Aan alle bijzondere voedingen worden daarom hoge beschikbaarheideisen gesteld: de bijzondere voedingen moeten altijd ononderbroken doorgaan, ook al wordt de energielevering uit het distributienet voor kortere of langere tijd onderbroken. In dat geval nemen ondersteunende accubatterijen (de alternatieve voedingsbronnen) de voeding tijdelijk over; de duur van deze overbrugging verschilt per bijzondere voeding.

Er zijn drie bijzondere voedingen voor de installaties in het centraal bedieningsgebouw:

- een 'schone' 220 V~-omvormervoeding voor de diverse computersystemen;
- een gestabiliseerde 48 V=-voeding voor de startautomaat van het noodsluitsysteem;
- 24 V=-deelnetvoedingen voor zowel voeding als stuurstroom voor de verschillende onderdelen van de centrale bediening en de energieopwekking.

Een andere bijzondere voeding is de 12 V=-omvormervoeding voor de peilmeetstations. Deze voeding valt onder de elektrische installatie van de Roompotsluis en maakt dus geen onderdeel uit van de installaties in het centraal bedieningsgebouw. Omdat de peilmeetstations van belang zijn voor het activeren van het noodsluitsysteem, wordt deze voeding in globale lijnen behandeld in deze ontwerpnota.

De 220 V~-omvormervoeding (no-breaksysteem) in het centraal bedieningsgebouw is de kern van de voedingen voor de computersystemen. Deze omvormervoeding bestaat uit een drietal omvormereenheden met elk een set ondersteunende accubatterijen. In de omvormereenheden worden de binnenkomende voedingen van het energiedistributienetwerk door mechanische omvormers omgezet naar 'schone' 220 V~-voedingen. Twee omvormereenhe-

den zijn bestemd voor de voeding van de computers van het noodsluitsysteem. Eén omvormereenheid is bestemd voor de voeding van de andere computersystemen. De omvormereenheden verzorgen ook de druppellading voor het op spanning houden van de ondersteunende accubatterijen. Bij onderbreking van de netvoeding wordt de energieleverantie automatisch overgenomen door deze batterijen. Zij kunnen tenminste een netonderbreking van vijf minuten overbruggen. Dat is bijvoorbeeld voldoende om, na spanningswegval van de PZEM-voeding, op eigen energieopwekking over te gaan. Bij storing of onderhoud is het inschakelen van een 'vuile' 220 V~-voeding aanvaardbaar.

De eis dat iedere NSS-computer een eigen, alternatieve voedingsbron moet hebben, bood de mogelijkheid om de alternatieve voedingsbron voor de startautomaat, waarvan een even hoge beschikbaarheid wordt geëist, hiermee te combineren. De gestabiliseerde 48 V=-voeding wordt door een stabilisatoreenheid met keuzeschakelaar betrokken uit één van de twee omvormereenheden van de NSS-computers. Met behulp van een stabilisatoreenheid wordt de 48 V=-voeding tot ± 10% gestabiliseerd en naar de startautomaat van het noodsluitsysteem gevoerd.

Voor de voedingen van de besturing, bediening en bewaking is gekozen voor een 24 V=-deelnet. In de energiebehoefte wordt voorzien door laadgelijkrichters die uit het energiedistributienetwerk worden gevoed. De laadgelijkrichters verzorgen op hun beurt de voeding voor de diverse gebruikers, en de benodigde druppellading voor het op spanning houden van de ondersteunende accubatterijen.

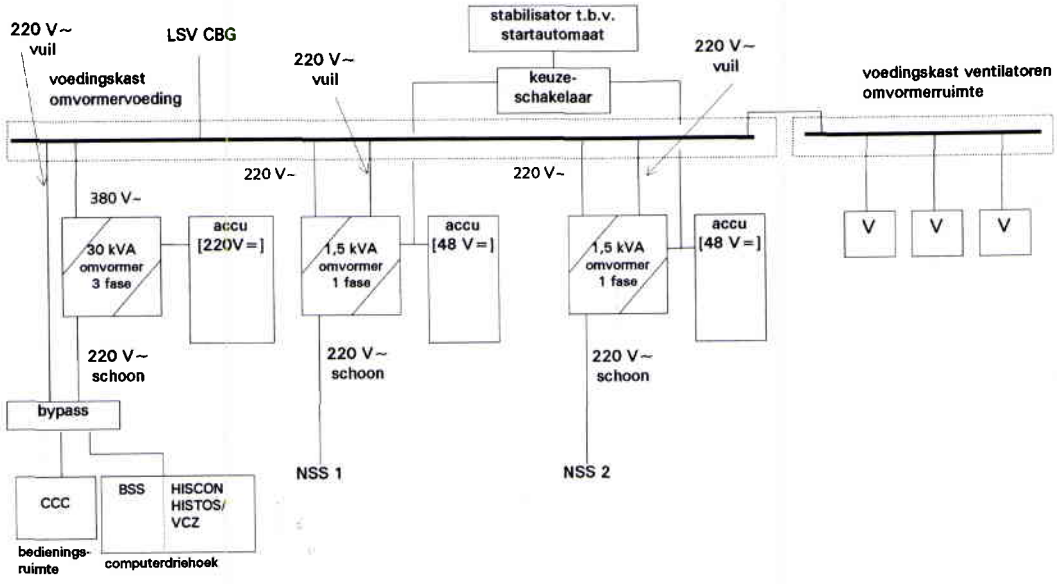
Het 24 V=-deelnet is gesplitst in drie afzonderlijke deelnetten met elk een eigen, onafhankelijke voeding en eigen, ondersteunende accubatterijen. Twee deelnetten voorzien elk een dieselcentrale met de bijbehorende hulpinstallaties en 10 kV-schakel- en -verdeelstations van stuurstroom.
Het derde deelnet voorziet de installatiedelen van de centrale bediening, het gehele PZEM-station en de overige hulpinstallaties van stuurstroom. Bij onderbreking van de netvoeding wordt de energieleverantie automatisch overgenomen door de ondersteunende accubatterijen, die tenminste een netonderbreking van één uur kunnen overbruggen. Dat wordt voldoende geacht om een monteur van de storingswachtdienst te mobiliseren. Bij langere storingen is handbediende inschakeling van andere alternatieven aanvaardbaar.

Omdat alle apparaten binnen de installatie geheel automatisch en autonoom moeten functioneren, zijn alleen op of in de apparatenkasten bedieningscomponenten aangebracht voor handbediende ingrepen. De meest gedetailleerde informatie over het functioneren (storingen en statussen) van de apparaten wordt daarom ook op de eigen apparatenkast weergegeven. In de centrale bedieningsruimte worden alleen essentiële status- en storingssignaleringen gegeven; hiermee krijgen de bedienaars niet meer dan globale informatie over de aard van de storingen.

3.5.1 Omvormervoeding CBG

In het CBG zijn een aantal computersystemen geïnstalleerd die ononderbroken van een schone spanning van 220 V~ moeten worden voorzien. Deze systemen zijn (inclusief randapparatuur):
- de centrale computerconfiguratie (CCC);
- de twee computers van het noodsluitsysteem (NSS);
- de beslis- en simulatiecomputer (BSS);
- de historische-opslagcomputer (HISCON);
- de meteo-computer (HISTOS/VCZ).

Als gevolg van de eisen uit paragraaf 3.5, is voor deze systemen een omvormervoeding gebouwd die bestaat uit de volgende onderdelen (figuur 3.12):
- voedingskasten voor de omvormers en ventilatoren;
- drie ventilatoren voor de ventilatie en koeling van de omvormerruimte;
- een driefase-omvormer voor de diverse computersystemen en de CCC [30 kVA];
- een accubatterij voor de diverse computersystemen en de CCC;
- een apparatenkast 'schone' voedingen voor de bedieningsruimte (CCC, bedieningslessenaar e.d.);
- een apparatenkast 'schone' voedingen voor de computerdriehoek (BSS, HISCON, HISTOS/VCZ);
- twee éénfase-omvormers voor de twee NSS-computers [1,5 kVA];
- twee accubatterijen voor de twee NSS-computers;
- een kast met een keuzeschakelaar en stabilisator voor de voeding van de startautomaat.



Figuur 3.12 Schematisch overzicht omvormervoeding

De drie omvormereenheden hebben elk een eigen kast. De kasten zijn geplaatst in een apart geventileerde omvormerruimte op de eerste verdieping van de laagbouw. Deze ruimte wordt geventileerd en gekoeld met behulp van de ventilatoren. In deze ruimte staan ook de voedingskasten voor de omvormers en ventilatoren, en de kast *Keuzeschakelaar/stabilisator*. De accubatterijen van de omvormers zijn ondergebracht in de belendende accuruimte. Daar zijn ook de accubatterijen van de 24 V=-deelnetvoedingen aangebracht.

De installatie wordt gevoed door de laagspanningsverdeling van het centraal bedieningsgebouw (LSV CBG). De voedingskasten *Omvormervoedingen* en *Ventilatie omvormerruimte* verdelen de voeding verder in:
- de één- en driefase-voedingen voor de omvormereenheden;
- de 'vuile' 220 V-voedingen als alternatief bij storing en/of onderhoud;
- de voedingen voor de ventilatoren (V).

De voedingen en besturing voor de ventilatoren zijn aangebracht in de rechterhelft van de voedingskast *Ventilatie omvormerruimte*. In de linkerhelft van deze kast is de hoofdverdeling met laadgelijkrichter en handbediende schakelaar van het 24 V=-deelnet CBG aangebracht.

De driefase-omvormer van 30 kVA heeft twee aparte, 'schone' 220 V-voedingen. De ene voeding gaat naar de apparatenkast in de bedieningsruimte van waaruit de CCC, de bedieningslessenaar, het centrale wandcontrolepaneel, de toetsenborden, beeldschermen en printers worden gevoed. Deze kast is een samenbouw van 'schone' 220 V~-voedingen in de rechterhelft, en 24 V=-voedingen in de linkerhelft. De andere voeding gaat naar de apparatenkast in de computerdriehoek, die is gesitueerd naast de bedieningsruimte. In deze kast zijn twee afzonderlijk uitschakelbare voedingsverdelingen aangebracht.
De ene voedingsverdeling is voor de 'schone' 220 V~-voedingen naar de computers HISCON en HISTOS/VCZ met bijbehorende randapparatuur. De andere voedingsverdeling is voor de 'schone' 220 V~-voedingen naar de BSS-computer met bijbehorende randapparatuur.
De omvormer is uitgevoerd met een 220 V=-accubatterij waarvan de geïnstalleerde batterijcapaciteit voldoende is om vijf minuten spanningsuitval te overbruggen.

De éénfase-omvormers van 1,5 kVA leveren elk een eigen, 'schone' 220 V~-voeding aan één van de computers van het noodsluitsysteem (NSS1 en NSS2) met bijbehorende randapparatuur; zij zijn zonder tussenkomst van apparatenkasten of verdelers direct op de computers aangesloten.
De omvormers zijn uitgevoerd met 48 V=-accubatterijen waarvan elk een geïnstalleerde batterijcapaciteit heeft om tenminste vijf minuten spanningsuitval te overbruggen.

Vanuit de 48 V=-aansluitingen in de omvormers wordt, via de kast *Keuzeschakelaar/stabilisator*, de startautomaat van het noodsluitsysteem gevoed. Deze 48 V=-voedingen zijn aangesloten op een magneetgestuurde keuzeschakelaar waarmee via een bepaalde voorkeursinstelling één van de twee voedingen wordt gebruikt voor de startautomaat. Valt deze voeding uit, dan wordt via de keuzeschakelaar automatisch overgeschakeld op de andere voeding. Komt de oude voeding weer terug, dan wordt automatisch teruggeschakeld naar de voorkeursstand. Hiermee is de voeding van de startautomaat met een hoge mate van beschikbaarheid gegarandeerd.
Via de keuzeschakelaar is de voeding van de startautomaat aangesloten op een stabilisator die de 48 V=-voeding op ± 10%stabiliseert. Hiermee wordt voorkomen dat overschrijdingen van de spanning met meer dan 10% ontstaan. Dergelijke overschrijdingen kunnen het functioneren van de startautomaat nadelig beïnvloeden.

Elke omvormereenheid heeft aan de uitgang (intern) een statische schakelaar om bij storing of uitval van de omvormereenheid automatisch en zonder spanningsonderbreking over te schakelen op een 'vuile' 220 V~-voedingslijn. Deze schakelaar schakelt eveneens om naar de 'vuile' voeding bij inschakelpieken tot 125% van het omvormervermogen. Zodra de inschakelpiek is verdwenen, wordt automatisch teruggeschakeld naar de 'schone' voeding.
Het omschakelen als gevolg van een storing wordt door een alarmmelding gesignaleerd. Omschakeling als gevolg van een inschakelpiek wordt gezien als een normale werking en daarom niet gesignaleerd.

Elke omvormereenheid heeft aan de uitgang (intern of extern) tevens een handbediende bypass-schakelaar om bij onderhoudswerkzaamheden handmatig en zonder spanningsonderbreking over te schakelen op een 'vuile' 220 V~-voedingslijn. Met behulp van deze schakelaar kunnen werkzaamheden aan onderdelen van de omvormereenheid worden verricht zonder dat dit de voedingsvoorziening beïnvloedt.
Het omschakelen met de handbediende bypass-schakelaar wordt als storingsalarm gesignaleerd, ook al betreft het normale werkzaamheden, opdat de monteurs niet vergeten de schakelaar in de juiste stand terug te zetten.

Op de kastdeuren van de omvormereenheden is een uitgebreide storings- en statusmelding aangebracht met led-signalering. De omvormereenheden geven elk afzonderlijk een algemeen storingssignaal door aan de CCC en de bedieningslessenaar in de centrale bedieningsruimte. De storingsmeldingen worden tevens akoestisch en visueel gegenereerd op de betreffende kasthelften van de apparatenkasten 'schone' voedingen in de bedieningsruimte en de computerdriehoek.

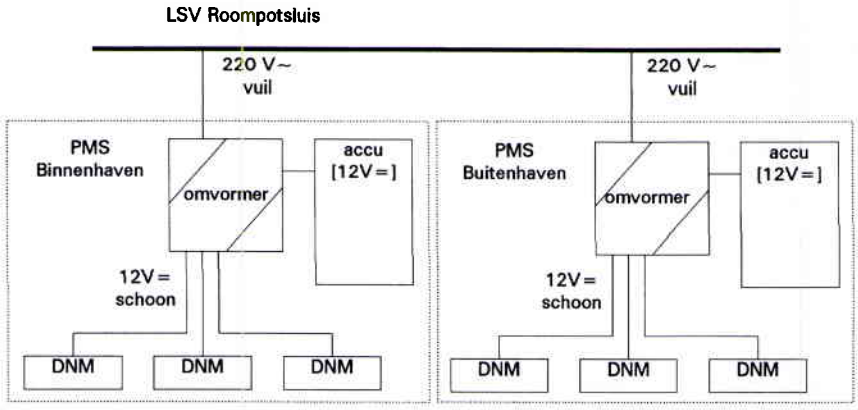
3.5.2 Omvormervoeding PMS

In de binnen- en buitenhaven van de Roompotsluis staan peilmeetstations die het noodsluitsysteem en de daarbij horende computers van waterstandsgegevens voorzien. Elk station bevat drie digitale niveaumeters (DNM's). De voedingsvoorziening van deze DNM's moet aan dezelfde hoge beschikbaarheideisen voldoen als de energievoorziening op de kering zelf. Daarom beschikt elk station over een omvormereenheid die de digitale niveaumeters rechtstreeks voedt (figuur 3.13).

De omvormers in de peilmeetstations worden gevoed door de laagspanningsverdeling van de Roompotsluis, die op haar beurt wordt gevoed door het transformatorstation Roompotsluis.
De omvormers zetten de 'vuile' 220 V~-voeding van de laagspanningsverdeling om naar een 'schone' 12 V=-voeding die afzonderlijk naar elke digitale niveaumeter wordt gevoerd. Beide omvormers zijn voorzien van een accubatterij met een capaciteit die een stroomuitval van tenminste vier uur kan overbruggen.

3.5.3 Het 24 V=-deelnet CBG

In het CBG is een 24 V=-deelnet aangelegd voor zowel de voeding als besturing van de volgende installatiedelen:
- het 10 kV-scheidingsstation (stuurstroom PZEM-voeding);
- onderdelen van de CCC, namelijk de PC-doors, PC-power en de modems;



Figuur 3.13 Schematisch overzicht omvormervoeding PMS

- de alarmeringen voor de CCC, waaronder de knipperende en continue alarmeringen op het centrale wandcontrolepaneel en alle lokale panelen;
- de bedieningslessenaar;
- het centrale wandcontrolepaneel;
- de veilige bediening;
- de personen-oproepinstallatie en de automatische telefoondoorkiezer;
- de storingsalarmen van de omvormervoedingen.

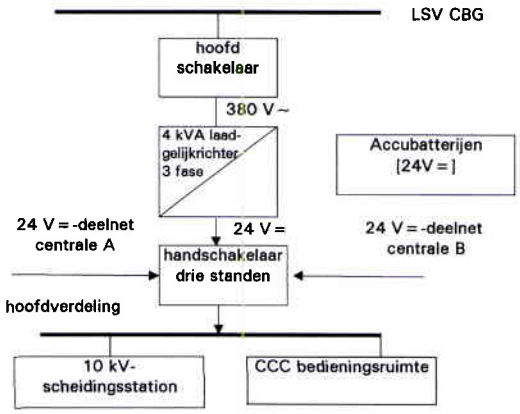
De installatie van het 24 V=-deelnet is opgebouwd uit de volgende onderdelen (figuur 3.14):
- een hoofdschakelaar voor de voeding;
- een driefase-laadgelijkrichter [4 kVA/160A] met ondersteunende accubatterij;
- een handmatige driestandenschakelaar [315A] en hoofdverdeling met twee aftakkingen;
- een apparatenkast 24 V=-voedingen in de bedieningsruimte (CCC, bedieningslessenaar e.d.).

De installatie wordt gevoed door de laagspanningsverdeling van het CBG (380 V~). Deze laagspanning wordt door de 4 kVA/160 A-laadgelijkrichter omgezet naar een 24 V=-voeding, die door de hoofdverdeling wordt verdeeld in een voeding naar het 10 kV-scheidingsstation en een voeding naar de apparatenkast 24 V=-voedingen in de bedieningsruimte.
In de verbinding tussen de laadgelijkrichter en de hoofdverdeling is een driestandenschakelaar aangebracht. Met deze schakelaar kan handmatig worden omgeschakeld naar één van de 24 V=-deelnetten van de dieselcentrales, die daarmee een reserve zijn geworden van de 24 V=-hoofdvoeding. Dit is vooral nodig als er in de hoofdvoeding een storing optreedt die langer duurt dan één uur. De laadgelijkrichter is namelijk uitgevoerd met een 24 V= accubatterij waarvan de geïnstalleerde capaciteit voldoende is om een spanningsuitval van ten minste één uur te overbruggen.

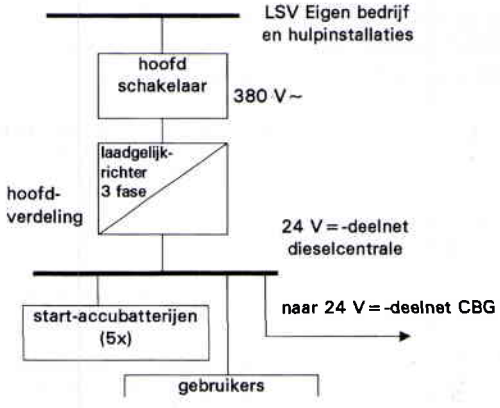
De voeding naar het 10 kV-scheidingsstation is voor de besturing, bediening en bewaking van alle componenten van het scheidingsstation. Omdat het 10 kV-scheidingsstation door één voedingslijn wordt aangestuurd, is gewaarborgd dat alle componenten binnen de PZEM-voedingsleverantie hetzelfde reageren bij een calamiteit in de 24 V=-voeding.
De andere voeding gaat naar de apparatenkast in de bedieningsruimte van waaruit alle andere installatiedelen in het centraal bedieningsgebouw worden gevoed. Deze apparatenkast is een samenbouw van 24 V=-voedingen in de linkerhelft en 'schone' 220 V~-voedingen in de rechterhelft van de kast.

3.5.4 Het 24 V=-deelnet dieselcentrale

Iedere dieselcentrale heeft een eigen 24 V=-deelnet, dat de bij deze centrale horende hulpinstallaties en schakel- en verdeelstations van stuurstroom voorziet. In elke dieselcentrale is de installatie ondergebracht in een eigen apparatenkast. Deze bevat de volgende onderdelen (figuur 3-13):
- een hoofdschakelaar voor de voeding;
- een driefase-laadgelijkrichter;
- een hoofdverdeling met verschillende aftakkingen.



Figuur 3.14 Overzicht 24 V=-deelnet CBG



Figuur 3.15 Overzicht deelnet dieselcentrale

Het 24 V=-deelnet wordt gevoed vanuit de voedingskast *Eigen bedrijf en hulpinstallaties* van de eigen dieselcentrale. Met behulp van de laadgelijkrichter wordt de voeding omgezet naar een 24 V=-spanning die vanaf de hoofdverdeler wordt verdeeld naar de diverse gebruikers en naar de driestandenschakelaar in het 24 V=-deelnet van het centraal bedieningsgebouw

Daarnaast voorziet dit deelnet de start-accubatterijen (24 V=) van de dieselgeneratoren van een druppellading om ze op spanning te houden. De stroom naar de start-accubatterijen is daarom gelimiteerd door een diode-schakeling. Omgekeerd kunnen de start-accubatterijen, bij een storing aan de laadgelijkrichter, de 24 V=-deelnetvoeding overnemen. Met deze opstelling zijn dus geen aparte, ondersteunende accubatterijen voor de laadgelijkrichter nodig. Bij één of meer draaiende diesels wordt de druppellading uit het 24 V=-deelnet ontkoppeld en worden de start-accubatterijen door de dynamo van de generator continu bijgeladen. Door al deze maatregelen is de stroomvoorziening van het 24 V=-deelnet vrijwel onbeperkt gewaarborgd.

3.6 Lokale Elektrische Installatie

De stroomverbruikers op de kering zijn zodanig georganiseerd dat zij per pijler een eenheid vormen. Zo'n eenheid, een Lokale Elektrische Installatie (LEI), is opgebouwd uit een aantal primaire deelinstallaties die nodig zijn voor de functies van besturing, bediening en bewaking, en uit een aantal secundaire deelinstallaties die nodig zijn voor de functies van voeding, beveiliging en bescherming.
In deze paragraaf worden alleen de secundaire deelinstallaties beschreven. De primaire deelinstallaties, zoals de LCC, de hydraulische installatie en de hefhoogtemeting, zijn omschreven in hoofdstuk 5.

Voor de voeding van de diverse lokale onderdelen heeft iedere LEI de volgende componenten:
- een krachtverdeling voor de hydraulische installaties van de bewegingswerken;
- een laagspanningsverdeling voor de facilitaire installaties, zoals verlichting en contactdozen;
- een 24 V=-deelnet voor de stuurstroom aan de diverse hydraulische componenten.

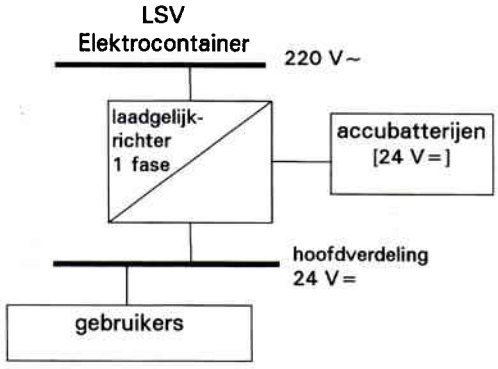
Deze componenten maken deel uit van de elektrische installatie binnen de LEI en verzorgen de aanwezigheid van vaste voedingspunten. Andere onderdelen binnen de lokale installatie zijn de componenten van de verschillende persoonsgerichte communicatiemiddelen, en (afhankelijk van het betreffende pijlervak): de componenten voor de installaties van de trafostations, de installaties voor de HISCON-metingen (conditiebewaking), en de concentratiepunten in het datacommunicatiesysteem.

Voor de beveiliging en bescherming zijn lokaal de volgende installaties aangebracht:
- een veiligheidsaarde voor de beveiliging van de mens;
- een bliksemafleiding en overspanningsbeveiliging voor de beveiliging van de elektrische componenten bij blikseminslag;
- een kathodische bescherming ter voorkoming van corrosie op de schuifgeleidingen.

De componenten van een LEI zijn ondergebracht in een elektrocontainer die zodanig is ontworpen dat deze, met uitzondering van in- en uitgaande bekabeling, volledig geïnstalleerd in de verkeerskokers kan worden aangebracht. Een andere functie van deze container is om de geïnstalleerde apparatuur zo goed mogelijk tegen de nadelige gevolgen van het aanwezige klimaat te beschermen. Als extra bescherming is de container hiertoe tevens voorzien van een anti-condensverwarming. Vanuit de LEI wordt tevens de wegverlichting op de kering gevoed en aangestuurd.

3.6.1 24 V=-deelnet

Het 24 V=-deelnet van een LEI voorziet de hydraulische installaties en de computersystemen van de benodigde voedingen. Bovendien voorziet het deelnet de componenten van de trafostations in de betreffende pijlervakken van de nodige stuurstroom. De installatie is aangebracht in de elektro-container en is opgebouwd uit een laadgelijkrichter met accubatterijen en een hoofdverdeling (figuur 3.16).



Figuur 3.16 Overzicht 24 V=-deelnet

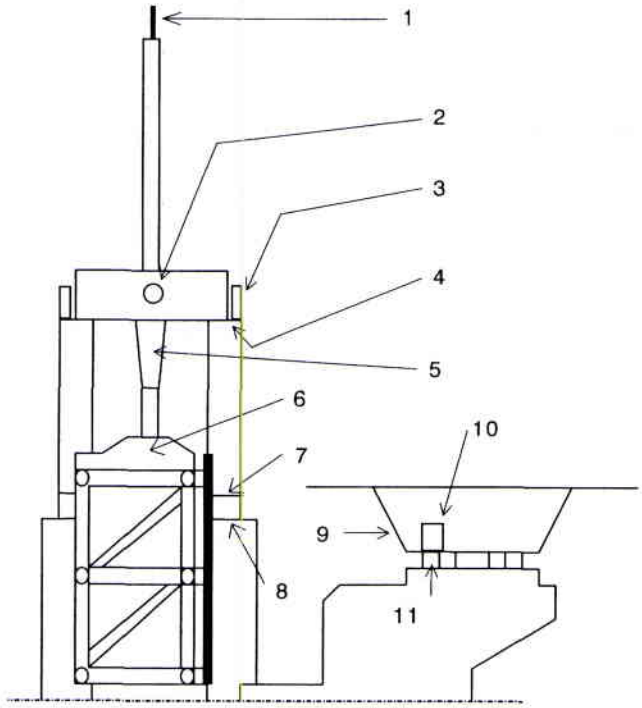
Het 24 V=-deelnet wordt gevoed door de laagspanningsverdeling van de LEI. Met behulp van de gelijkrichter wordt de voeding omgezet naar een 24 V=-spanning die vanaf de hoofdverdeler wordt verdeeld naar de verschillende gebruikers. De laadgelijkrichter is geschikt om zowel de gebruikers op het deelnet te voeden, als de ondersteunende accubatterijen met een druppellading geladen te houden. De stroom naar de accubatterijen is om deze reden door een diodeschakeling gelimiteerd.
De geïnstalleerde capaciteit van de accubatterijen is voldoende om een spanningsuitval van tenminste één uur te overbruggen. Dat is voldoende om ook de grootste schuif in de kering te kunnen sluiten en/of openen.

3.6.2 Veiligheidsaarde

De veiligheidsaarde beperkt de kans op elektrocutie voor de mens. Per sluitgat loopt er door de verkeerskokers een ononderbroken aardleiding waarop alle te aarden objecten in de verkeerskoker zijn aangesloten. De aardleiding is tevens aangesloten op de bliksemafleiding en op het wapeningsnet van de verkeerskoker, die op zijn beurt is verbonden met het wapeningsnet van de pijler. Ingeval van een sluiting tussen een voeding en een metalen gestel, is hiermee een gedegen geleiding naar de aarde gewaarborgd; tevens zal in dat geval de aardfoutmeting in het 10 kV-scheidingsstation een alarmmelding geven.

3.6.3 Bliksemafleiding en overspanningsbeveiliging

De bliksemafleiding (figuur 3.17) beperkt schade ten gevolge van een blikseminslag. Alle constructiedelen zijn elektrisch met elkaar verbonden en zijn via de aardleiding en het wapeningsnet van de verkeerskoker verbonden met het wapeningsnet van de pijler. Hierdoor kunnen grote stromen via de pijler worden afgevoerd. Om



1 Bliksemopvangpunt
2 Overgang cilinder - cardanbalk
3 Overgang cardanbalk - lagerstoel
4 Overgang lagerstoel - voorspanstaven
5 Overgang zuigerstang - cilinder
6 Overgang zuigerstang - ophangbalk
7 Overgang voorspanstaaf - hamerstuknet
8 Overgang hamerstuknet - pijlernet
9 Kabelinvoer verkeerskokers
10 Bliksembeveiligingskast/overspanning
11 Overgang verkeerskoker - pijlernet

Figuur 3.17 Elektrische overgangen bliksemafleiding

problemen met bijvoorbeeld corrosie te voorkomen, zijn de schuiven elektrisch gescheiden van de rest van de installatie. Om bij een bliksemslag op de cilinder toch voor afleiding te kunnen zorgen, is een gasgevulde overslagafleider aangebracht.

De overspanningsbeveiliging is een installatie die geheel bestaat uit passieve elementen, maar die noodzakelijk is voor de bescherming van de gehele elektrische installatie. Alle kabels die vanaf de pijler de verkeerskoker ingaan, zijn ader voor ader beschermd tegen overspanning door een varistor (overspanningsbeveiliging) tussen massa en ader. De overspanningsbeveiligingen en de betreffende kabels zijn gecentraliseerd in een bliksembeveiligingskast in de verkeerskoker.

3.6.4 Kathodische bescherming

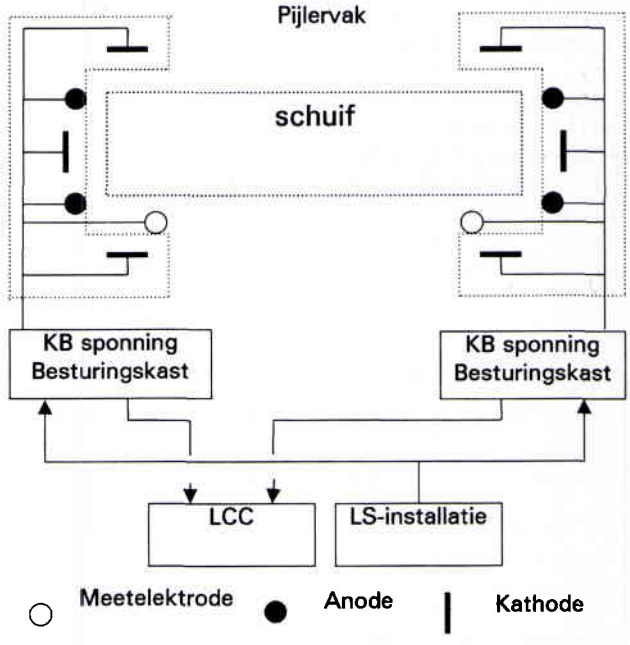
Om corrosie van de schuifgeleidingen tegen te gaan is een kathodische-beschermingsinstallatie (KB) aangebracht (zie ook deelnota 4).

Iedere sponning van een pijlervak heeft een kathodische-beschermingsinstallatie. De KB's van een schuif worden gevoed vanuit de laagspanningsinstallatie (LS-installatie) die bij de schuif hoort. De kathodische-beschermingsinstallatie bestaat per sponning uit de volgende componenten (figuur 3.18):

- een besturingskast;
- een gelijkrichter;
- twee inerte anoden;
- drie kathoden;
- een dubbelcel meetelektrode, type zilver/zilveroxide en type zink.

De besturing van de kathodische-beschermingsinstallatie kan op de volgende niveaus worden gerealiseerd:

- automatisch (potentiaalsturing), waarbij de regeling plaatsvindt aan de hand van een ingestelde referentiespanning;
- handmatig, waarbij de regeling plaatsvindt door de uitgangsstroom handmatig in te stellen.



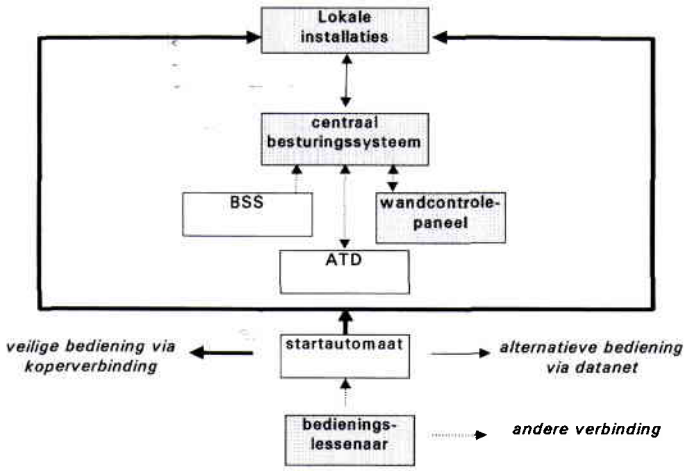
Figuur 3.18 Overzicht kathodische bescherming

4. Centrale besturing, bediening en bewaking

In dit hoofdstuk komen alle systemen aan de orde die deel uitmaken van de centrale elektrische installatie ten behoeve van het besturen, bedienen en bewaken van de stormvloedkering. Hieronder vallen de computersystemen van het centraal besturingssysteem, de bedieningslessenaar en het wandcontrolepaneel (zie figuur 4.1). De overige systemen worden beschreven in de hoofdstukken 5 en 6.

Het doel van de centrale besturing, bediening en bewaking is om de stormvloedkering vanaf één centraal punt geheel of gedeeltelijk te kunnen bedienen en de status van de diverse schuifinstallaties en energiesystemen zowel op beeldscherm als op het wandcontrolepaneel gepresenteerd te krijgen.
Er kunnen slechts een beperkt aantal commando's worden gegeven die buiten het centraal besturingssysteem om rechtstreeks aan alle schuifinstallaties tegelijkertijd worden doorgegeven (zie paragraaf 4.3.1). Veilige bediening geschiedt vanaf de bedieningslessenaar en wordt alleen gebruikt als de bediening via het centraal besturingssysteem faalt. Alternatieve bediening loopt via het centraal besturingssysteem en maakt het mogelijk om de schuiven individueel of collectief te bedienen, al of niet volgens een vooraf opgegeven patroon (zie paragraaf 4.3.2). Deze alternatieve bediening wordt voornamelijk gebruikt voor onderhoudsdoeleinden, voor een regeling van het peil van het Oosterscheldebekken en ter voorkoming van mogelijke bodemschade.

Het centraal besturingssysteem, de bedieningslessenaar en het wandcontrolepaneel staan opgesteld in de centrale bedieningsruimte van het ir. J.W. Topshuis op het eiland Neeltje Jans (figuur 4.2). Vanuit deze bedieningsruimte dragen bedienaars en technici zorg voor zowel de schuiven als de energievoorziening. Onder niet-storm omstandigheden is de bedieningsruimte alleen tijdens kantooruren bemand.



Figuur 4.1 Schematisch overzicht centrale elektrische installatie

Door klimaatregeling in de centrale bedieningsruimte is het niet nodig om speciale eisen te stellen aan de computerapparatuur van het centraal bedieningssysteem. Alle computersystemen zijn ondergebracht in achttien computerkasten van ongeveer 1,5 meter hoog. De computersystemen staan in verbinding met alle schuifinstallaties van de stormvloedkering en met alle daarvoor benodigde energie-installaties zowel op de kering als in het centraal bedieningsgebouw.

4.1 Centraal besturingssysteem

Het centraal besturingssysteem is ontworpen op basis van één type microcomputer die overeenkomt met de microcomputer van de lokale besturingscomputers van de LCC's. Doordat deze als hardware in principe uitwisselbaar zijn, wordt de slagvaardigheid bij een eventuele vervanging bevorderd. De bijbehorende programmatuur, de software, is afhankelijk van de specifieke functies van het centrale computersysteem en is niet uitwisselbaar met die van de LCC's. Voor het ontwerp is uitgegaan van een 16-bits procescomputer voor industriële toepassingen van het fabrikaat ASEA, serie MasterPiece 240, type DS 101. Deze computers zijn uitgerust met processoren van het type Motorola 6800. De software van het centrale computersysteem is op basis van dit type processor ontwikkeld en is geschikt voor het verwerken van 1300 in- en uitgangssignalen. De computers zijn verbonden via een interne databus van het type Masterbus van ASEA.

Het centraal besturingssysteem behandelt de bedieningen die vanuit het centraal bedieningsgebouw worden gegeven. Het centraal besturingssysteem bestaat uit een viertal computersystemen (één daarvan is een trainingscomputer) die werken op het principe van SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). SCADA kent vier hoofdtaken:

1. communicatie met onderliggende systemen voor het verkrijgen van real-time-gegevens; real-time betekent dat zoveel mogelijk recente gegevens worden verkregen;
2. het verwerken van gegevens voor alarmafhandeling, gegevensopslag, printfuncties en gegevensuitwisseling met perifere systemen;
3. het presenteren van gegevens op beeldschermen, lessenaars of panelen;
4. het bedienen of verwerken van commando's voor de onderliggende besturingsinstallaties via grafische presentaties van die besturingsinstallaties op beeldscherm.

De genoemde taken worden uitgevoerd door twee afzonderlijke systemen voor het vervullen van de SCADA-functionaliteiten:

- PC-MMC, PC-BSS, PC-Doors en PC-Power; in deze PC's vindt de gegevensverwerking plaats op basis waarvan de SCADA-functionaliteiten kunnen worden uitgevoerd;
- MMC-1, MMC-2, MMC-3 en MMC-4; in deze PC's draait de



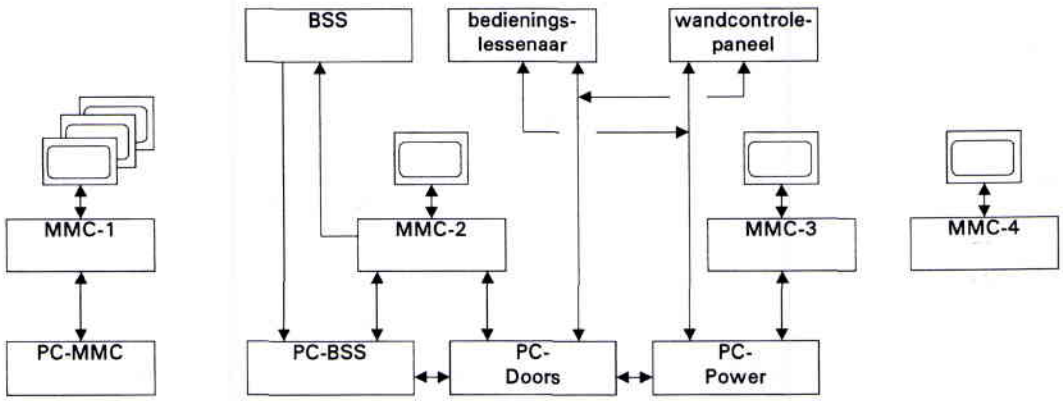
Figuur 4.2 Bedieningslessenaar Topshuis

SCADA-programmatuur volgens het principe van man machine communication (MMC), dat een gebruikersvriendelijke bedieningsdialoog garandeert; deze programmatuur is voor elke MMC anders, zie paragraaf 4.2.

4.2 Computerconfiguratie

De kern van de centrale computerconfiguratie wordt gevormd door een drietal computersystemen, die in figuur 4.3 als MMC-1, 2 en 3 staan aangeduid. De eerste twee (MMC-1 / PC-MMC en MMC-2 / PC-Doors) beheersen de communicatie met de installaties op de kering via het datacommunicatienetwerk. De derde beheerst de energievoorziening en -distributie. MMC-4 wordt gebruikt voor het voorbereiden van wijzigingen in de beeldplaatjes en print-layouts, als trainingsterminal en eventueel voor tijdelijke uitwisseling in het geval van storing.

Rondom de eerste drie computersystemen zijn de overige functies van de centrale elektrische installatie gegroepeerd.



Figuur 4.3 Overzicht centrale computerconfiguratie

Samenvattend werkt de centrale elektrische installatie via de volgende primaire computersystemen:

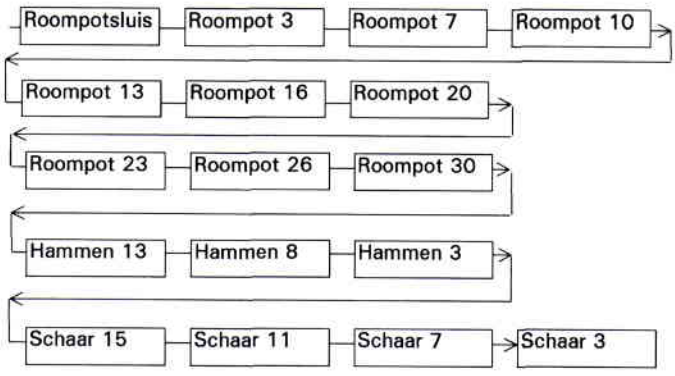
Via PC-MMC + MMC-1 worden de schuiven individueel bediend. De functies zijn:
- het presenteren van de status van de 62 LCC's;
- het sturen van individuele commando's naar een LCC;
- registratie van alarmen, storingen en bedieningshandelingen.

Via PC-BSS + MMC-2 wordt het strategiebeheer afgehandeld. De functies zijn:
- het verstrekken van gegevens aan het BSS (schuifhoogte en schuifstatus);
- het bekijken van de BSS-strategie;
- het invoeren en opslaan van 30 sluitingsstrategieën ;
- het starten van strategiesluitingen;
- registratie van strategiesluitcommando's;
- het genereren van storingsoproepen naar de automatische telefoondoorkiezer.

PC-Doors + MMC-2 verzorgt de afhandeling van het wandcontrolepaneel voor zover het de schuiven betreft. De functies zijn:
- het aansturen van het gedeelte voor het signaleren van de statussen;
- het verwerken en doorsturen van commando's naar de LCC's;
- registratie van lokaal of centraal opgedragen bedieningscommando's;
- het verzorgen van dagrapportages.

PC-Power+MMC-3 verzorgt de afhandeling van het wandcontrolepaneel voor zover het de energieopwekking en -distributie betreft. De functies zijn:
- het aansturen van het gedeelte voor het signaleren van de statussen;
- het verwerken en doorsturen van commando's naar de LCC's;
- registratie van alarmen, storingen en bedieningscommando's;
- het verzorgen van dagrapportages.

PC-Power heeft daarnaast nog een functie in de aansturing van de transformatorvelden op de kering. Wanneer er een spanningsuitval plaatsvindt, schakelen de transformatorvelden op de kering namelijk automatisch uit. Er wordt vervolgens een aantal diesels gestart om de energievoorziening te garanderen. Op het moment dat dit gebeurt, kunnen de transformatorvelden in principe weer inschakelen. Om een inschakelpiek te voorkomen moet dat gefaseerd gebeuren. Hiertoe stuurt PC-Power op verschillende tijdstippen de diverse LCC's aan die ervoor zorg dragen dat de transformatorvelden weer inschakelen. Iedere twee seconden ontvangt een LCC een inschakelcommando. De volgorde van deze startsequence is weergegeven in figuur 4.4 (van links naar rechts). Achtereenvolgens worden de transformatorvelden ingeschakeld van Roompotsluis, Roompot, Hammen en Schaar.



Figuur 4.4 Inschakelvolgorde transformatoren kering

4.3 Bedieningsvormen en bedieningsmiddelen

Met de bedieningsmiddelen zijn de drie bedieningsvormen *veilige bediening*, *alternatieve bediening* en *geen bediening* mogelijk. De keuze voor een van deze bedieningsvormen wordt gemaakt met de sleutelschakelaar 'Bediening' op de bedieningslessenaar.

4.3.1 Veilige bediening

Bij veilige bediening worden de bedieningscommando's naar de lokale besturingssystemen (LCC's) geleid via kabels van koperdraad, buiten de computers van het centrale besturingssysteem om. De commando's in veilige bediening kunnen uitsluitend worden gegeven met de bedieningslessenaar in de centrale bedieningsruimte en met de computers van het noodsluitsysteem, die in de belendende computerruimte zijn opgesteld (zie hoofdstuk 7).

4.3.2 Alternatieve bediening

Bij alternatieve bediening worden de bedieningscommando's naar de lokale besturingssystemen geleid via het datacommunicatienetwerk en dus via de computers van het centrale besturingssysteem. Op deze wijze kunnen de schuiven zowel afzonderlijk als tegelijk worden bediend. Individuele schuifbedieningscommando's kunnen worden gegeven op het wandcontrolepaneel en op het beeldschermbedieningssysteem. Collectieve schuifbediening daarentegen, waarbij aan meerdere schuiven tegelijk een bepaalde schuifpositie wordt opgedragen, kan alleen met het beeldschermbedieningssysteem.

Alternatieve bediening biedt dus de volgende mogelijkheden:
- individuele bediening via het wandcontrolepaneel, waarbij de bedienaar elke schuif afzonderlijk moet commanderen voor een opwaartse of neerwaartse beweging. De schuifbeweging stopt automatisch bij het bereiken van de opgegeven eindstand, of na een stopcommando;
- individuele bediening via het beeldschermbedieningssysteem, waarbij de bedienaar elke schuif afzonderlijk naar een bepaalde positie kan laten bewegen;
- collectieve bediening via het beeldschermbedieningssysteem, door het activeren van een sluitingsstrategie die door het beslis- en simulatiesysteem (BSS) wordt gesuggereerd.

4.3.3 Geen bediening

Als de sleutelschakelaar 'Bediening' op de bedieningslessenaar in de stand *UIT* staat, is de centrale bediening geblokkeerd. Er kunnen geen opdrachten worden gegeven vanuit het centrale bedieningsgebouw: de schuiven kunnen alleen lokaal worden bediend. Wel komt er informatie over de schuiven binnen. Deze kan worden opgevraagd en weergegeven met het beeldschermbedieningssysteem. Ook blijft de signalering op het wandcontrolepaneel actief.

4.3.4 Bedieningslessenaar

De bedieningslessenaar is de plaats waar een keuze wordt gemaakt tussen veilige bediening, alternatieve bediening en geen bediening. Als de veilige bediening is geactiveerd, kunnen er uit-

melding	signalering	lamptest	alarm	sluiting	microfoon	telefoon	verlichting	toegangs-bewaking
	bediening						camera's	

Figuur 4.5 Globaal overzicht indeling bedieningslessenaar

sluitend commando's worden gegeven vanaf de bedieningslessenaar. Bedieningscommando's vanaf het wandcontrolepaneel en het beeldschermbedieningssysteem zijn dan geblokkeerd.

Daarnaast zijn er op de bedieningslessenaar nog andere functies ondergebracht, die betrekking hebben op de beveiliging en bewaking van, en de communicatie met de verschillende onderdelen van de stormvloedkering. Hiervoor is de bedieningslessenaar onderverdeeld in meerdere zones (zie figuur 4.5).

In de zone *melding* bevindt zich het storingsmeldergedeelte met betrekking tot de automatische telefoondoorkiezer (ATD).

In de zone *signalering* kan met een sleutelschakelaar de signaleringsweergave op het wandcontrolepaneel en de bedieningslessenaar worden aangepast.

In de zone *bediening* bevindt zich de sleutelschakelaar 'Bediening' voor de verschillende bedieningsvormen. De bedienaar kan hier bepalen of hij de schuiven centraal wil bedienen of niet, waarbij hij in het geval van centrale bediening kan kiezen tussen veilige of alternatieve bediening.

De zone *lamptest* heeft drukknoppen waarmee de lampen op de bedieningslessenaar en het wandcontrolepaneel kunnen worden gecontroleerd.

De zone *alarm* bevat drukknoppen voor het accepteren van alarmen voor schuifinstallaties, energieopwekking en -distributie, brand en communicatie. Het alarmsysteem bestaat naast optische signaleringen ook geluidalarmeringen (die alleen werken als de kering bemand is).

In de zone *sluiting* zijn de drukknoppen voor de veilige bediening aangebracht. De knoppen werken alleen als de sleutelschakelaar van de zone bediening in de stand 'veilige bediening' staat. Er zijn drie drukknoppen:

- OP : geeft het commando openen aan alle schuiven;
- STOP : annuleert het laatst gegeven commando aan alle schuiven;
- NEER : geeft het commando sluiten aan alle schuiven.

Door het geringe aantal handelingen is de kans op menselijke fouten zeer gering. Als een gegeven commando niet binnen 60 seconden door alle LCC's wordt teruggemeld, dan wordt in deze zone van de bedieningslessenaar een verzamelsignalering gegeven.

De zone *microfoon* bevat de drukknoppen en microfoon voor het bedienen van de geluidsinstallatie op de kering.

In de zone *telefoon* bevindt zich een MS-telefoon waarmee communicatie mogelijk blijft met alle middenspanningsruimten, ook al zou er een volledige spanningsuitval zijn.

De zone *verlichting* bevat twee dimmers voor het schakelen en regelen van de verlichting bij het wandcontrolepaneel en de bedieningslessenaar.

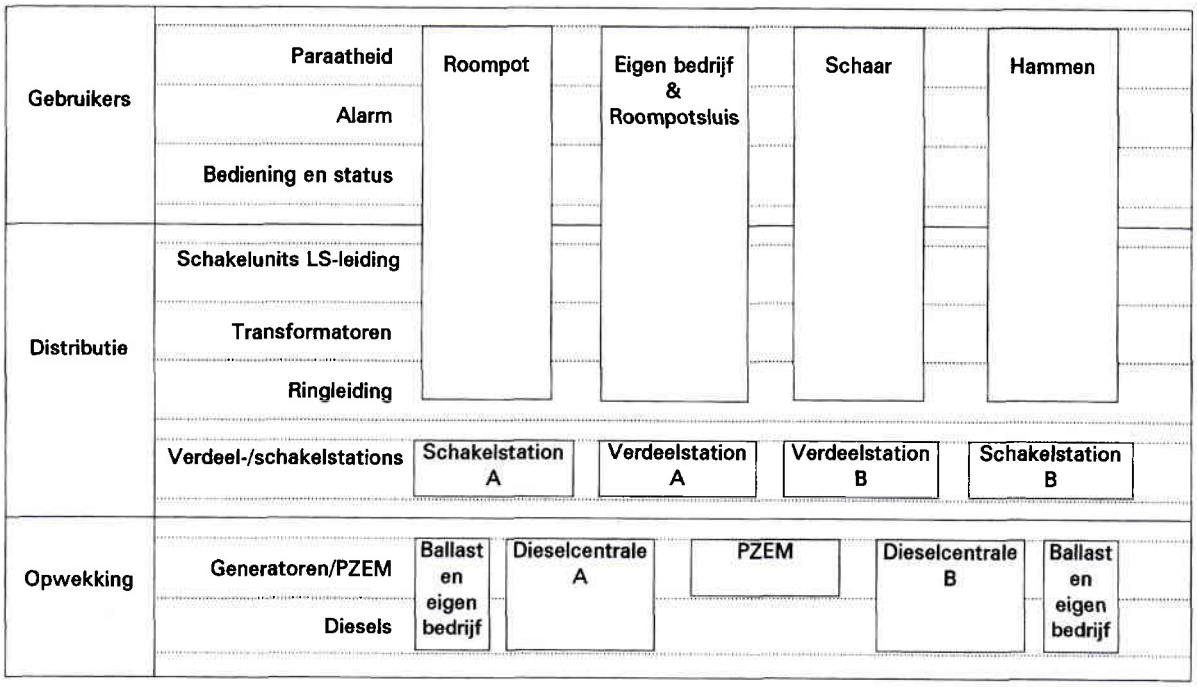
Met de zones *camera's* en *toegangsbewaking* worden de ingangen van het centraal bedieningsgebouw, de lift en de beide dieselhallen bewaakt. Hier bevinden zich een monitor voor de diverse camerabeelden, drukknoppen voor de bediening van camera's, een intercom en drukknoppen voor het ontgrendelen van de toegangsdeuren. De camera's voor de dieselhallen kan men laten roteren. De toegangsdeuren boven en beneden in het centraal bedieningsgebouw zijn altijd gesloten en vergrendeld. Voor bezoekers zijn de twee deuren uitgerust met een intercom.

4.3.5 Wandcontrolepaneel

Het wandcontrolepaneel is opgesteld tegenover de bedieningslessenaar. Het paneel is opgesplitst in de zones gebruikers, distributie en opwekking (figuur 4.6). Het paneel geeft een statusoverzicht van de energiesystemen en de schuifinstallaties en is dus een vitale informatiebron voor de besluitvorming door alle medewerkers die bij bediening, onderhoud en beheer zijn betrokken. Daarnaast kunnen de medewerkers met het paneel elementaire bedieningshandelingen uitvoeren; deze beperken zich tot de energievoorziening van de schuifinstallaties en de individuele bediening van de schuiven. Hiertoe is het paneel aangesloten op de computers voor de schuifbediening en het energiebeheer (zie figuur 4.3).

Het wandcontrolepaneel kan tevens worden gezien als een back-up voor het beeldschermbedieningssysteem, zowel voor de meest noodzakelijke bedieningen als signaleringen. Hiervoor is het paneel, middels de PC-Doorscomputer, via een afzonderlijk netwerk verbonden met de concentrators op de kering (zie figuur 6.2).

De zone *gebruikers* omvat de schuifinstallaties, de Roompotsluis en het centraal bedieningsgebouw. Alleen de schuifinstallaties kunnen worden bediend en gesignaleerd. Bediening in deze zone kan alleen als er op de bedieningslessenaar is gekozen voor alternatieve bediening. De zone is verdeeld in drie horizontale secties (paraatheid, alarm en bediening&status), die in grote lijnen overeenkomen met de functieverdeling op de lokale bedieningspanelen (zie paragraaf 5.2.8).



Figuur 4.6 Overzicht indeling wandcontrolepaneel

De sectie *paraatheid* geeft een overzicht van de bedieningsstatus van alle 62 schuifinstallaties. Per schuif geeft het wandcontrolepaneel de volgende signaleringen:

- *blokkering bediening:* de schuifinstallatie kan niet worden bediend, noch lokaal, noch centraal;
- *lokaal bedienbaar:* de schuifinstallatie kan alleen lokaal worden bediend omdat een keuzeschakelaar op het lokale bedieningspaneel in de stand 'lokale bediening' is gezet;
- *centraal bedienbaar:* een schuifinstallatie kan alleen centraal worden bediend omdat een keuzeschakelaar op het lokale bedieningspaneel in de stand 'centrale bediening' is gezet;
- *niet centraal bedienbaar:* de schuifinstallatie kan niet centraal worden bediend. Deze signalering is geplaatst uit ergonomische overwegingen: ze geeft de bedienaar een overzicht van welke schuiven hij vanuit het centraal bedieningsgebouw kan aansturen.

De sectie *alarm* geeft per schuif kritieke aandachtspunten aan, bijvoorbeeld als er een storing optreedt of als een schuifinstallatie autonoom scheefstandcorrecties uitvoert. Voor elk van de schuiven heeft het wandcontrolepaneel de volgende signaleringen:

- *algemeen alarm:* dit is een verzamelalarm waar iedere storing wordt gemeld. Deze signalering is gecombineerd met een drukknop, waarmee een opgetreden alarm kan worden geaccepteerd;
- *schuifcorrectie:* een schuifinstallatie kan autonoom correcties uitvoeren in de positie (hoogte) en de (scheef)stand van de schuif. Als dergelijke autonome aansturingen plaatsvinden, wordt dat hier gesignaleerd;
- *schuifreactie:* na het geven van een bedieningscommando, wordt van de schuifinstallatie een procesreactie verwacht. Als een dergelijke reactie uitblijft, wordt dat hier gesignaleerd. Er is dan mogelijk een storing.

De sectie *bediening en status* toont op beknopte wijze de actieve commando's en de positie van alle schuiven. Met de drukknoppen in deze sectie kan de bedienaar bovendien commando's geven aan elke schuif, mits op de bedieningslessenaar is gekozen voor 'alternatieve bediening'. Per schuif heeft het wandcontrolepaneel de volgende signaleringen en drukknoppen:

- *eindstand op:* als de schuif na een opwaartse beweging stopt door het bereiken van de hoogst mogelijke positie, is de 'eindstand op' bereikt en wordt dat hier gesignaleerd;
- *eindstand neer:* als de schuif na een neerwaartse beweging stopt door het bereiken van de laagst mogelijke positie (de drempel), is de 'eindstand neer' bereikt en wordt dat hier gesignaleerd;
- *tussenstand:* als de schuif niet in een van de eindstanden stopt maar ergens halverwege, wordt dat hier gesignaleerd. Onder normale omstandigheden is dan een ingestelde waarde bereikt en dient het signaal voor het verkrijgen van een volledig beeld van de schuifposities;
- *beweging op:* bij alternatieve bediening kan met deze drukknop het commando worden gegeven om de schuif opwaarts te bewegen. Na ontvangst van het commando, geeft de schuif een procesreactie en voert vervolgens het commando uit. Dat wordt kenbaar gemaakt door een signalering onder de drukknop. Als de schuif zich al bevindt in de 'eindstand op', dan wordt het commando genegeerd.
- *beweging neer:* deze drukknop functioneert net als de vorige, maar dan voor een neerwaartse beweging van de schuif;
- *stop:* met deze drukknop kan iedere schuifbeweging afzonderlijk worden beëindigd. Na het stoppen van de schuifbeweging wordt de positie van de schuif op het wandcontrolepaneel gesignaleerd.

De zone *distributie* dient voor het schakelen, weergeven en volledig beheren van de energiedistributie in het centraal bedieningsgebouw en over de kering. In deze zone kunnen commando's worden gegeven voor het in- en uitschakelen van de transformatoren op de kering, de daarbij behorende koppelvelden, de generator- en koppelvelden in de schakel- en verdeelstations, en de voedingsvelden Roompotsluis, Roompot, Schaar, Hammen en eigen bedrijf. Het energietransport over de kering wordt weergegeven met licht-

lijnen in verschillende kleuren. De status van het energietransport bepaalt de kleur van de lichtlijn.

De zone *opwekking* geeft informatie over alle beschikbare energiebronnen van de kering en biedt de mogelijkheid deze energiebronnen te bedienen.

4.3.6 Beeldschermbediening

Om alle schuifinstallaties te kunnen bedienen, zijn in de centrale bedieningsruimte nabij het wandcontrolepaneel drie beeldschermbedieningssystemen opgesteld: MMC-1, MMC-2 en MMC-3. De systemen MMC-2 en MMC-3 zijn elk voorzien van één beeldscherm. Het systeem MMC-1 heeft een bedieningslessenaar met drie beeldschermen. Het observeren van meerdere beeldschermen heeft als voordeel dat het totale functioneren van de belangrijkste onderdelen van de kering tegelijkertijd beheerd en bewaakt kan worden.

Alle taken worden uitgevoerd door middel van een beeldschermdialoog: via een keuzemenu kan de bedienaar een selectie maken uit een aantal beeldschermplaatjes. De beeldschermplaatjes geven op grafische wijze een overzicht van een onderdeel van de kering of installatie. Afhankelijk van de gemaakte keuze kan de bedienaar gedetailleerde informatie opvragen door in te zoomen op het getoonde overzicht. Zo kan hij de toestand van een specifieke installatie op het beeldscherm opvragen en deze installatie aansturen door het geven van commando's.

Elke MMC heeft een eigen alarmregistratieprogramma waarin opgetreden en geaccepteerde alarmen worden geregistreerd. Als er zich een alarm voordoet, wordt dat via de betreffende MMC kenbaar gemaakt. De bedienaar kan een alarmpagina opvragen met nadere informatie over de alarmering. De alarmen worden geaccepteerd op de bedieningslessenaar of op het wandcontrolepaneel.

MMC-1
De centrale bediening van de stormvloedkering vindt voornamelijk plaats met de drie beeldschermen van het bedieningssysteem MMC-1. Met dit systeem is het mogelijk om van iedere schuifinstallatie (en enkele rond de schuiven gelegen installaties zoals de kathodische bescherming, het olietankniveau en de verlichting) gedetailleerde gegevens op te vragen en met een printer af te drukken. Bovendien is MMC-1 het enige systeem waarmee de schuiven individueel naar een bepaalde positie kunnen worden gestuurd en waarmee de redundante meetwaarden van de schuifzijden kunnen worden getoond. Deze laatste voor onderhoudsdoeleinden essentiële gegevens kunnen niet op het wandcontrolepaneel worden weergegeven: dit paneel is alleen bedoeld voor het weergeven van de globale schuifstatus (alarm, bediening en positie). Bij uitval van het wandcontrolepaneel moeten alle gegevens echter wel via het systeem MMC-1 kunnen worden opgevraagd.

MMC-2
Met het bedieningssysteem van MMC-2 vindt het strategiebeheer plaats. Met een strategie kunnen meerdere schuiven tegelijkertijd met één bedieningscommando naar een bepaalde positie worden gestuurd. Het systeem biedt ruimte aan dertig strategiecodes, elk met eigen schuifposities en startmomenten. De opgeslagen strategiecodes kunnen worden gewijzigd.
Onder het strategiebeheer valt tevens het beslis- en simulatiesysteem (BSS). Het BSS berekent voortdurend een variabele strategie met een rekenkundig model. De BSS-strategie staat de bedienaars altijd ter beschikking als de meest veilige variant onder bepaalde keringscondities.

MMC-3
Met het bedieningssysteem van MMC-3 vindt het energiebeheer plaats. Met dit bedieningssysteem kunnen uitsluitend energiegegevens gepresenteerd en afgedrukt worden.

5. Lokale besturing, bediening en bewaking

In dit hoofdstuk komen alle systemen aan de orde die lokaal op de stormvloedkering zorg dragen voor het regelen van de schuiven. Deze lokale besturing, bediening en bewaking heeft tot doel de schuiven in een bepaalde positie te brengen en die te handhaven. Voorts dienen de lokale installaties zowel lokale als centrale bedieningsopdrachten te verwerken, te beoordelen op hun relevantie en vervolgens de plaatselijke elektrische en hydraulische installaties aan te sturen. Tevens moeten zij de signalen van die elektrische en hydraulische installaties verwerken voor het nemen van vervolgbeslissingen en het zowel lokaal als centraal kunnen presenteren van de status.

De lokale besturing, bediening en bewaking bestaat uit 62 identieke lokale installaties die bij iedere schuif in de verkeerskokers staan opgesteld. Elke schuif is dus voorzien van een eigen lokale installatie. Hiervoor is gekozen vanwege:

- betrouwbaarheid: als een lokale installatie faalt, heeft dat slechts gevolgen voor één schuif waardoor de beheersbaarheid van de stormvloedkering slechts afneemt met één doorstroomopening.
- complexiteit van de lokale bediening, besturing en bewaking: zou men aan een lokale installatie programmataken voor meerdere schuiven toekennen, dan neemt het aantal lokale installaties weliswaar af, maar neemt de complexiteit van het lokale bedienings-, besturings- en bewakingssysteem exponentieel toe. De gebruiksvriendelijkheid van de lokale bediening zou bovendien sterk verminderen (waarbij de kans op menselijk falen toeneemt) door het aantal interpretaties van procestoestanden. Dit heeft niet alleen implicaties voor bediening, onderhoud en reparatie, maar ook voor het operationele beheer van de afzonderlijke componenten in relatie tot het gedrag van de gehele lokale besturing.

Iedere lokale installatie, ook wel genoemd Lokale Elektrische Eenheid (LEI), bevat een drietal primaire deelinstallaties die van vitaal belang zijn voor het vervullen van de functies van bediening, besturing en bewaking:

- de hefhoogtemeting;
- de hydraulische installatie;
- de lokale computerconfiguratie (LCC).

De secundaire deelinstallaties van de LEI, zoals de elektrische installatie, de bliksemafleiding en de kathodische bescherming, zijn beschreven in paragraaf 3.6.

Voor de lokale bediening, besturing en bewaking van de genoemde deelinstallaties zijn het niet zo zeer de natuurrandvoorwaarden, maar vooral de bedrijfszekerheid, de omgevingscondities waaronder de besturing moet functioneren, de uitwisselbaarheid, de flexibiliteit en de nauwkeurigheid van het regelmechanisme die het ontwerp bepalen.

In figuur 5.1 wordt schematisch een beeld gegeven van een lokale installatie. De elektrische installatie draagt zorg voor de elektrische beveiliging en voor de verdeling van het benodigde vermogen voor de diverse primaire en secundaire deelinstallaties, waaronder de lokale computerconfiguratie (LCC) en de kathodische beschermingsinstallatie. De LCC zorgt voor de lokale besturing, bediening en bewaking van de deelinstallaties van de schuif. Hiervoor staat de LCC in verbinding met de betreffende deelinstallaties en, via een veilige en alternatieve verbinding, met het centrale besturingssysteem voor het verwerken van bedieningsopdrachten en het verstrekken van statusinformatie.

5.1 Hefhoogtemeting/scheefstandsmeting

De LCC heeft twee belangrijke taken met betrekking tot de schuif:

- de schuif in elke gewenste positie brengen;
- de schuif horizontaal houden.

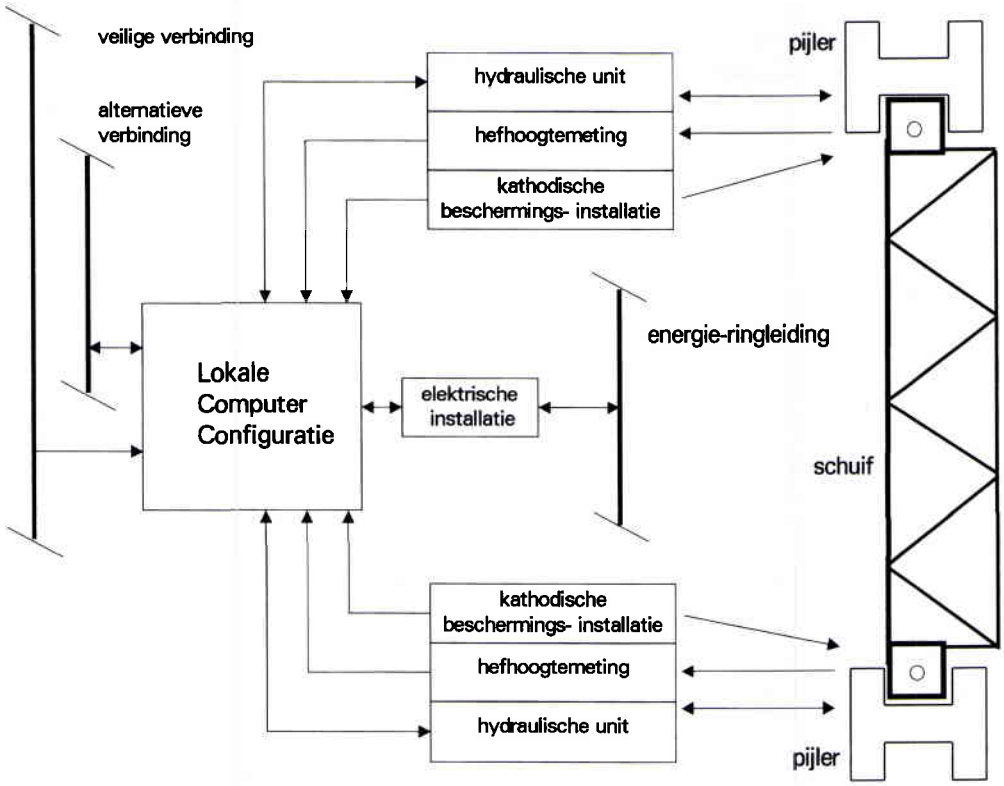
Voor het uitoefenen van beide taken moet de LCC de positie van de schuifzijden weten. Er zijn tal van meetinstrumenten op de markt met een hoge betrouwbaarheid. Er moet echter rekening gehouden worden met het feit dat de instrumenten op de stormvloedkering onder extreme omstandigheden moeten functioneren, zoals continue zilte vochtigheid, storm en vorst.

Wat betreft de positie van de meetapparatuur is onder meer vanuit het oogpunt van onderhoud gekozen voor een opstelling van de meetapparatuur boven het maximale waterniveau. Voor het opstellen van meetapparatuur op of aan de schuif zou elektrobekabeling voor voeding en meetgegevens van de pijler naar de schuif aangelegd moeten worden. Dit is kostbaar en onderhoudsgevoelig. Absolute cilindermeting met de gewenste nauwkeurigheid was tijdens het ontwerp niet voorhanden. Gekozen is daarom om de meetapparatuur aan de pijler te bevestigen.

Door blikseminslag (drie tot vier inslagen per km^2 per jaar) wordt elektronische meting echter bemoeilijkt en is deze zelfs na toepassing van beschermingsmaatregelen niet volledig betrouwbaar. Het alternatief is een mechanisch meetprincipe. Het meest betrouwbaar is een mechanische meting op basis van roterende schakelwalsen. De verticale schuifbeweging moet dus worden omgezet in een roterende beweging. Een starre verbinding is door de dynamische bewegingen van de schuif ten opzichte van de pijler uitgesloten. Daarom is gekozen voor een dubbele staaldraadkoppeling naar een tandwielconstructie, die uit het oogpunt van betrouwbaarheid drie codegevers (schakelwalsen) laat roteren. De door de codegevers gemeten positie van iedere schuifzijde wordt aan de LCC overgedragen.

Codegevers

De codegevers zijn van het fabrikaat Rittmeyer en opgebouwd uit kunststof loopvlakken met verschillend profiel voor het schakelen



Figuur 5.1 Overzicht lokale elektrische installatie (LEI)

van een twaalftal contacten. Per codegever wordt zo een 12-bits parallelle code aan de LCC aangeboden. Deze codegevers zijn van het type dat een Gray-code afgeeft. Het bijzondere van een Gray-code is dat er bij een normaal oplopende reeks altijd maar één bit (contact) per stap verandert. Hierdoor is foutdetectie redelijk eenvoudig en betrouwbaar. De schakelpunten van de opnemers liggen op 45°, 135°, 225° en 315°, met een tolerantie van ±30°. Dit levert een betrouwbare uitlezing van de positie van een schuifzijde tot op 1 cm nauwkeurig, zonder dat er sprake is van het schakelen van meerdere contacten rond een schakelpunt, hetgeen een belangrijke voorwaarde is voor het inlezen van de code en het valideren van de waarde daarvan door de computerinstallatie van de LCC.

Voordat er definitief is besloten tot het toepassen van een bepaald fabrikaat en type Gray-codegever is het schakelgedrag in relatie tot de computerprogrammatuur getest met behulp van een proefopstelling. Daarbij is de schuifsnelheid van 3 mm/s nagebootst met behulp van kleine synchromotoren die de codegevers aandreven.

Uit de beproeving bleek dat de tolerantie niet voldeed aan de gestelde eisen van nauwkeurigheid (het schakelen binnen met een tolerantie van ±30°), waardoor signaalvervuiling optrad met een te grote spreiding van de meetgegevens. In overleg met de betrokken leverancier is die nauwkeurigheid verbeterd tot op de gestelde eis.

In tabel 5.1 wordt van vier contacten de karakterreeks van de Gray-code weergegeven ten opzichte van de binaire code die gebruikelijk is binnen computersystemen. Bij het instellen en presenteren van schuifstanden wordt gebruik gemaakt van de decimale codering.

De LCC, die de contacten van de Gray-codegever krijgt aangeboden, neemt telkens slechts de verandering van één contact waar. De interpretatie is hierdoor eenduidig. Bij een waardeovergang van 3 naar 4 wijzigt in het bovenstaande voorbeeld bij een Gray-codegever slechts contact 2. Indien gebruik zou worden gemaakt van een binaire codegever, zouden dat de contacten 2, 3 en 4 zijn (de gewijzigde contacten zijn onderstreept). Het risico op fouten bij het

Decimale code	Binaire code	Gray-code			
		Contact 1	Contact 2	Contact 3	Contact 4
0	0 0 0 0	0	0	0	0
1	0 0 0 1	0	0	0	1
2	0 0 1 0	0	0	1	1
3	0 0 1 1	0	0	1	0
4	0 1 0 0	0	1	1	0
5	0 1 0 1	0	1	1	1
6	0 1 1 0	0	1	0	1
7	0 1 1 1	0	1	0	0

Tabel 5.1 Gray-code in binaire en decimale code

vaststellen van de werkelijke waarde (de stand van de schuif) door de LCC zou hierdoor aanzienlijk toenemen. De LCC zet de ingelezen Gray-code direct om in een digitale code. Dit gebeurt tevens bij het inlezen van een door de bedienaar opgegeven decimale code.

Per schuifzijde worden de meetwaarden gevalideerd. In beginsel houdt dit in dat de drie meetwaarden ten opzichte van elkaar binnen een bepaalde bandbreedte moeten vallen. Na een controle hierop wordt van iedere schuifzijde de hoogte bepaald. Voor het presenteren en verder verwerken van de positie van de schuif worden de hoogtes van beide schuifzijden gemiddeld.

5.2 Hydraulische installatie

Iedere schuif wordt aangedreven door een hydraulische installatie die bestaat uit twee hydraulische units. De twee hydraulische units zijn noch mechanisch noch hydraulisch met elkaar verbonden. De enige relatie die zij met elkaar hebben loopt via de LCC (zie figuur 5.1). Zie voor een gedetailleerde beschrijving van de hydraulische installatie deelnota 5.

Deze paragraaf behandelt die aspecten van de hydraulische installatie die een functionele relatie hebben met de LCC, te weten:
- de interfacing tussen de hydraulische unit en de LCC;
- het elektrisch aspect van het omschakelen;
- de gedefinieerde toestanden van de hydraulische installatie die door de LCC worden herkend.

Figuur 5.2 geeft een overzicht van de hydraulische installatie voor één schuifzijde. Het betreft hier dus een enkele hydraulische unit.

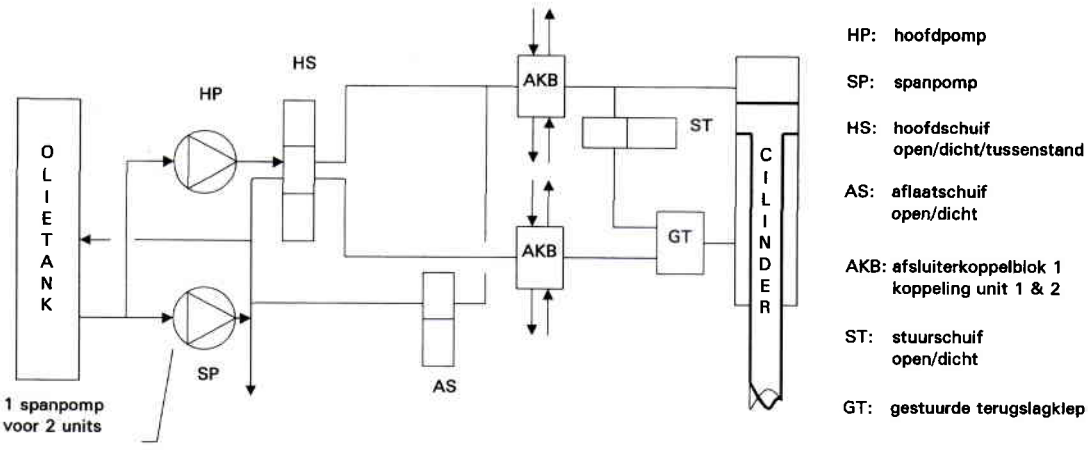
De interface tussen de hydraulische unit en de LCC
Bovenstaand schema is een vereenvoudigde weergave van een hydraulische unit. De LCC stuurt de hydraulische pompen (hoofdpomp en spanpomp) aan en schakelt de schuiven die zich in het hydraulisch circuit bevinden (hoofdschuif, aflaatschuif en stuurschuif) door middel van het elektrisch bekrachtigen van de betreffende schuiven. Voorts stuurt de LCC nog enkele componenten aan van de conserveringsinstallatie (zie deelnota 5).

Het aansturen van de hydraulische installatie voor het openen, sluiten en horizontaal houden van de schuif is een proces dat alleen onder controle kan worden gehouden als informatie uit dat proces aan de LCC wordt aangeboden. Naast de informatie afkomstig van de codegevers voor het bepalen van de stand van de schuif worden de reacties van de aansturingen in de LCC ingevoerd. Hiervoor loopt bekabeling van de pijlers, waar de codegevers staan opgesteld, naar de elektro-container in het tegenover de schuif liggende verkeerskokersegment waarin de LCC is ondergebracht. Daarnaast zijn kabelverbindingen gelegd tussen die elektro-container en de naastliggende hydrauliek-container. De kabels die van de LCC naar de pijlers lopen, staan bloot aan een verhoogd spanningsniveau wanneer de bliksem inslaat in op de pijler aangebrachte elektrisch geleidende onderdelen. Om te voorkomen dat spanningsverhoging door blikseminslag en de daardoor ontwikkelde stromen de elektronica van de LCC zouden beschadigen, is een overspannings-beveiligingsinstallatie aangebracht. Dit houdt in dat in iedere elektrische ader van alle kabels die naar de pijlers lopen, kleine beveiligingscomponenten zijn opgenomen. Deze componenten (varistors) zijn in afzonderlijke kasten in de verkeerskoker ondergebracht. Bij een te hoge spanning op een stroomader, wordt de stroom naar massa afgeleid.

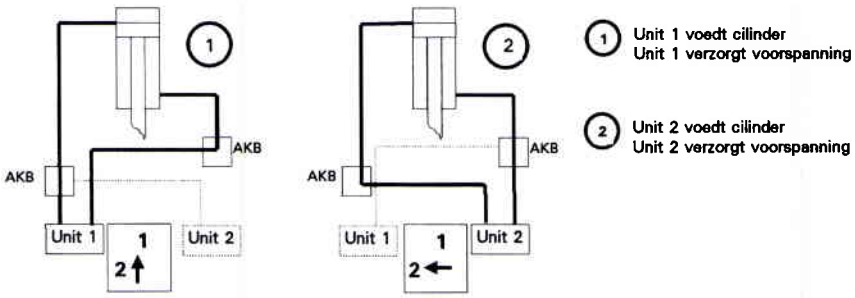
Het elektrisch aspect van het omschakelen
Bij een defect in de hydraulische unit van een schuifzijde kan gebruik worden gemaakt van de hydraulische unit van de naastliggende schuif bij dezelfde pijler. Die naastliggende schuif moet dan in een veilige positie worden gebracht (horizontaal of op de drempel) om zijn hydraulische unit tijdelijk ter beschikking te stellen aan een andere LCC.

Het omschakelen van de hydraulische units geschiedt door het bedienen van een aantal kogelkranen (2- en 3-weg-schakelaars) in hydraulische schakelblokken. Deze kogelkranen bevinden zich in de betreffende hydrauliek-container en moeten met de hand worden bediend. Voor dat omschakelen geldt slechts een bepaald aantal gedefinieerde schakelposities van de kogelkranen. Gezien het grote aantal mogelijkheden aan schakelposities is besloten tot het signaleren van alle schakelaarstanden. Het wel of niet in een gedefinieerde toestand staan van de kogelkranen, wordt op de bedieningskast gemeld. Voor het aansturen van de andere unit en het inlezen van de bijbehorende reacties uit de installatie, moet een deel van de elektrische installatie worden omgeschakeld. Hiervoor is per pijler een schakelaar opgenomen waarmee de stuur- en terugmeldsignalen kunnen worden omgeleid.

Gedefinieerde toestanden randpijlers noord en zuid
In elke toestand is bij de randpijlers slechts één unit in bedrijf (figuur 5.3). De andere unit is stand-by. De voorspanning van de cilinder wordt verzorgd door de in bedrijf zijnde unit.



Figuur 5.2 Overzicht hydraulische unit



Figuur 5.3 Gedefinieerde toestanden randpijlers noord en zuid

Gedefinieerde toestanden middenpijlers
In tegenstelling tot de randpijlers, zijn bij de middenpijlers beide units altijd in bedrijf. Omschakelen is dus alleen mogelijk indien geen schuiven in beweging zijn. Bovendien kunnen beide cilinders niet tegelijk door één enkele unit worden bediend.

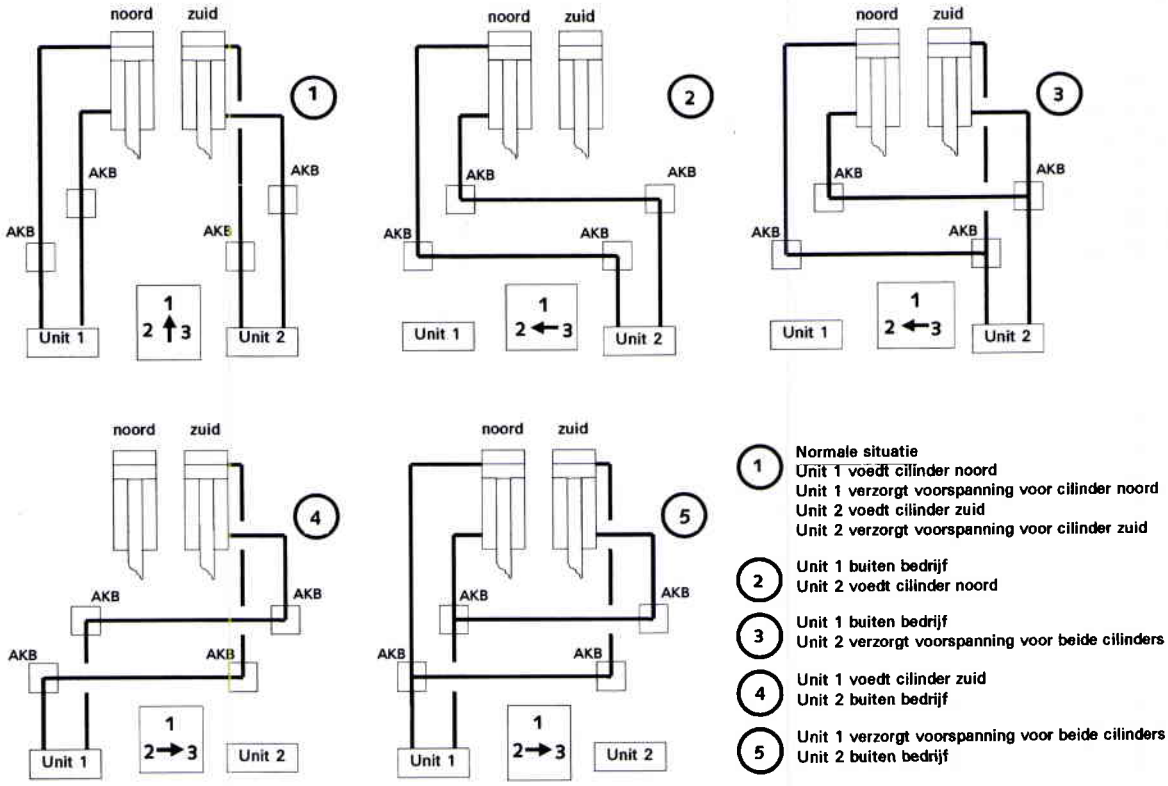
De voorspanning van beide cilinders daarentegen kan wel door één enkele unit worden verzorgd. Vandaar dat er meerdere gedefinieerde toestanden zijn (figuur 5.4). Behalve een toestand bij bewegen (voeden), waarbij slechts één cilinder wordt bediend, is er een bijbehorende toestand voorspannen, waarbij beide cilinders worden bediend.

5.3 De Lokale ComputerConfiguratie

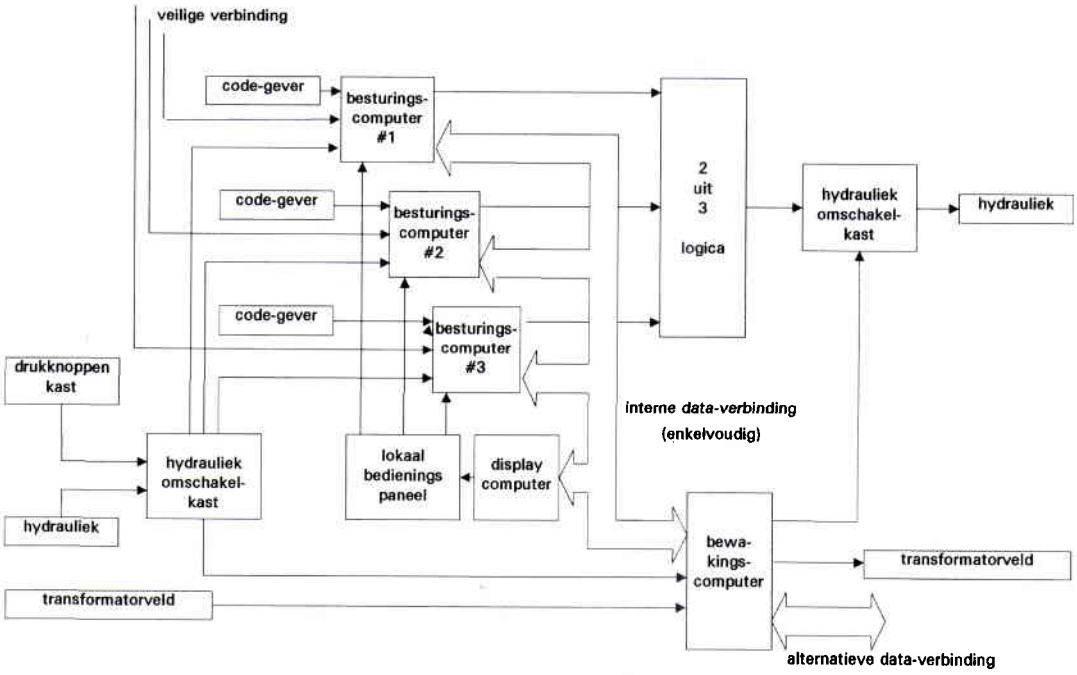
Deze paragraaf behandelt de opbouw van de lokale computerconfiguratie (LCC). Bij de beschrijving van de verschillende onderdelen van de LCC in deze paragraaf komen de ontwerpgrondslagen en de verbeteringen daarvan aan de orde.

Figuur 5.5 geeft een beeld van de computerconfiguratie zoals deze oorspronkelijk is gebouwd en waarvan men dacht dat deze zou beantwoorden aan de gestelde eisen aan functionaliteit en betrouwbaarheid.

Op basis van de faalkansanalyse lag het aantal LCC's en de configuratie van de informatietechnologie binnen een LCC in relatie tot de elektrische en hydraulische installatie vast. Dat concept was gebaseerd op de configuratie van figuur 5.5, waarin de interne dataverbinding enkelvoudig is uitgevoerd. Aan de besturingscomputers zijn de vitale besturings- en regeltaken toebedeeld en aan de bewakingscomputer de minder vitale taken als het interpreteren van het procesverloop en het onderhouden van de communicatie met de centrale installatie via de alternatieve dataverbinding. De simulaties die in een onderzoeksfase binnen RWS zijn uitgevoerd en de daarop volgende fabriekstesten in Zweden bij de fabrikant ASEA, brachten geen fouten aan het licht in het functioneren van de diverse besturings- en bewakingstaken. Tijdens het in bedrijf stellen van de LCC constateerde men echter een afwijkend besturingsgedrag van de besturingscomputers als reactie op het dynamische gedrag van de hydraulische installatie.



Figuur 5.4 Gedefinieerde toestanden middenpijlers



Figuur 5.5 Overzicht oorspronkelijke LCC

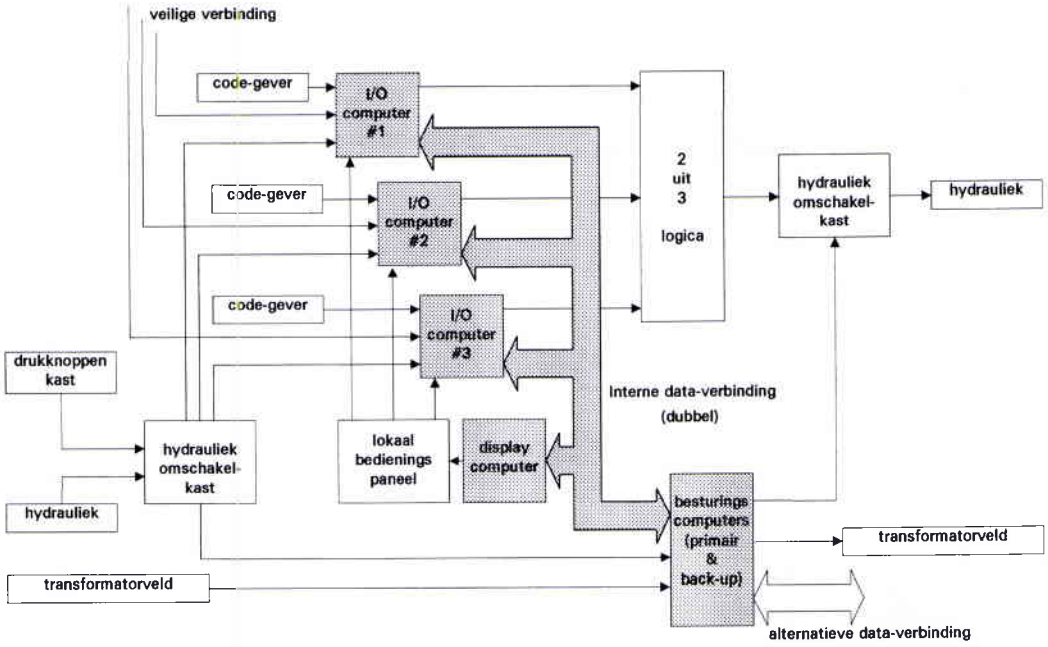
De problematiek manifesteerde zich als volgt: de besturingscomputers zijn identiek en nemen hun beslissingen op basis van gelijkwaardige informatie. Hiervoor zijn de veilige commando's, meetwaarden van codegevers en oliedrukken drievoudig uitgevoerd. De beschikbaarheid aan procesinformatie en procesbesturing is hierdoor erg hoog, waardoor in geval van storing van één van de signaalgevers of besturingscomputers er nog steeds twee actief zijn voor het vervullen van de vitale besturings- en regeltaken. Dit is voldoende voor de 2-uit-3 fail-safe-logica om de hydraulische installatie betrouwbaar aan te sturen.

Hierbij ontstaat het risico dat de hydraulische installatie wordt aangestuurd op basis van de beslissingen van twee besturingscomputers en dat de derde nog goed functionerende besturingscomputer deze informatie niet eenduidig kan interpreteren. Hij mist immers de besluitvorming van de andere twee, wat ook de bedoeling was binnen de ontwerpfilosofie (individuele besluitvorming als invoer voor de 2-uit-3 fail-safe-logica). Om de laatst beslissende computer tijdig in het gelid te krijgen, waren in de regelmodulen van de besturingscomputers diverse bandbreedten in de vorm van meetwaarden- en tijdmarges opgenomen. Sommige tijdmarges werden echter aanzienlijk overschreden door bijvoorbeeld de extreme spreiding in tijd tussen het schakelen van de oliedruksensoren tijdens een stabiele toestand van de hydraulische installatie. Het gevolg hiervan was dat een niet-beslissende besturingscomputer geconfronteerd werd met een voor hem autonoom veranderende procesomgeving. Ook bleek het voor te komen dat een beslissende besturingscomputer met het uitblijven van een procesreactie geconfronteerd werd, omdat geen van beide andere computers opdracht tot een reactie gaven. Beveiligingsmechanismen zorgden ervoor dat in dergelijke gevallen de computers zich successievelijk uitschakelden.

Na intensieve analyses bleek de oplossing voor bovengenoemde problemen gezocht te moeten worden in het synchroniseren van signalen of functies. Hierbij kwam men echter in conflict met de eis dat slechts in uitzonderlijke situaties redundante taken gekoppeld mogen worden om de betrouwbaarheid van de programmatuur te kunnen waarborgen. Uiteindelijk werd gekozen voor een discrete weging van de meetwaarden buiten de besturingscomputers om. Hiervoor moest een taakverschuiving plaats vinden van de besturingscomputers naar de minder vitale bewakingscomputer, waardoor de besturingscomputers werden gedegradeerd tot intelligente interfaces, die I/O-computers worden genoemd. Alle drievoudig aangeboden informatie moest nu worden doorgegeven aan de bewakingscomputer die de besturings- en regeltaken kreeg toebedeeld. Dit is een bijzonder ingrijpende wijziging, want een aantal onderdelen van de LCC moest van niet-vitaal naar vitaal worden opgewaardeerd. Hiervoor werd de databusverbinding van de I/O-computers naar de bewakingscomputer, die men 'prime' noemt omdat deze computer altijd als eerste operationeel is en de meeste taken toebedeeld heeft gekregen, dubbel uitgevoerd. Tevens werd een extra computer toegevoegd. Deze noemt men de 'back-up', omdat de computer pas in actie komt wanneer de prime in storing valt. Verder moest de programmatuur voor een groot deel herschreven en opnieuw getest worden. Hierbij moet men zich voorstellen dat het, gezien de reeds ontworpen installatie-interfacing, niet meer verantwoord was om alle taken van de bewakingscomputer dubbel uit te voeren, waaraan doorgaans in het kader van onderhoud en softwarebeheer de voorkeur wordt gegeven. De dubbele databus heeft het voordeel dat de vitale taken zowel in de prime- als in de back-up-computer kunnen worden ondergebracht. De niet-vitale taken kunnen slechts aan één computer worden toebedeeld en wel aan de prime. Bij de nadere beschrijving van de diverse onderdelen wordt hier verder op ingegaan. Figuur 5.6 geeft de definitieve configuratie weer, waarbij de belangrijkste wijzigingen grijs gemarkeerd zijn.

5.3.1 I/O-computers

De I/O-computers zorgen voor het inlezen van commando's en schakelaarstanden van de lokale en centrale bediening en voor het inlezen van meetwaarden en signalen uit het schuifproces. Ze dragen hun informatie via een dubbele parallelle databus over aan zowel de prime- als de back-up-computers. Via die databus lezen de I/O-computers weer de opdrachten in van de prime of de back-



Figuur 5.6 Schematisch overzicht uiteindelijke lokale computerconfiguratie

up. Deze opdrachten, stuursignalen voor de hydraulische installatie, worden vervolgens aan de 2-uit-3 fail-safe-logica doorgegeven. Om de uit de installatie aangeboden signalen in de I/O-computers te kunnen verwerken, wordt gebruik gemaakt van interfacekaarten. Hiermee wordt een galvanische scheiding gerealiseerd door middel van standaard computermodulen. Aanvankelijk konden deze modulen slechts 7 mA aan stroom verwerken. Dat is erg laag voor de slecht geleidende contacten waarmee de installatiecomponenten zijn uitgerust. Door de grote verschillen in overgangsweerstand kon de betrouwbaarheid van de signaalingangen niet worden gegarandeerd. Om dit te verbeteren zijn de contactstromen verhoogd tot 20 mA. Door een stroomdeling naar 13 en 7 mA kon het vereiste ingangssignaal worden gewaarborgd. Dit is tevens op de signaalingangen van de prime-computer toegepast.

5.3.2 De display-computer

De display-computer is van hetzelfde type als de I/O-computers en verzorgt de presentatie op het lokale bedieningspaneel. De display-computer, noodzakelijk als interface tussen het bedieningspaneel en de prime- en back-up-computers, krijgt zijn informatie via de dubbele databus van de prime en in geval van storing van de back-up-computer. Die informatie omvat de bedieningsstatus, de bedrijfsstatus, de schuifpositie en de storingscode.

5.4.3 De primaire besturingscomputer

De primaire besturingscomputer ('prime') leest via de dubbele databus informatie in van de I/O-computers, die onder andere bestaan uit lokale en centrale bedieningscommando's, meetwaarden en processignalen. Via de databus worden door de prime diverse opdrachten naar de I/O-computers verzonden voor het aansturen van de hydraulische installatie. De prime verzorgt tevens de aansturing van de transformatorschakelaars. Via het datacommunicatienetwerk, dat langs alle LCC's naar de centrale computerinstallatie loopt, leest de prime de opdrachten van de centrale bediening in. Deze opdrachten zijn commando's en schuifposities. Via dat netwerk verstrekt de prime informatie aan de centrale bediening over de lokale installaties, met name informatie over het schuifproces. Verder leest de prime direct diverse statusinformatie in van de hydraulische installatie en het transformatorveld. De prime onderhoudt via een afzonderlijke databus contact met de back-up-computer. Ingeval van storing neemt de back-up-computer de vitale taken van de prime over. De taken van de prime zijn namelijk onderscheiden in vitale en niet-vitale taken. Deze zijn als volgt gedefinieerd:

Vitale taken van de prime:
- besturen en bewaken van het hydraulisch proces;
- besturen en bewaken van het transformatorveld;
- regelen van de datacommunicatie over de dubbele databus tussen de diverse computers van de LCC.

Niet-vitale taken van de prime:
- inlezen status hydraulische cilinders;
- communiceren met de CCC.

5.3.4 De back-up besturingscomputer

Deze computer dient als back-up voor het geval de primaire besturingscomputer defect raakt en is van hetzelfde fabrikaat en type als de prime. In geval van storing van de prime neemt de back-up-computer niet alle taken over, omdat een aantal verbindingen met de hydraulische installatie en het datacommunicatienetwerk niet dubbel is uitgevoerd. De back-up neemt uitsluitend de niet-vitale taken van de prime over. Verder bewaakt de back-up-computer continu de prime op het juist functioneren.

5.3.5 De interne databus

De interne databus is om redenen van betrouwbaarheid dubbel uitgevoerd. De databus verbindt de zes computers van de LCC met elkaar, te weten de drie I/O-computers, de display-computer, de prime- en de back-up-computer. De databus wordt gebruikt voor het transporteren van vitale commando's, meetwaarden en processignalen binnen de computerconfiguratie van de LCC.

5.3.6 De 2-uit-3 logica

De drie I/O-computers geven hun stuursignalen door aan hoog-betrouwbare elektronicacomponenten. Deze componenten meten of minimaal twee van de drie aangeboden stuursignalen aan elkaar gelijk zijn. Als dat zo is, resulteert dat in een overeenkomstige sturing van de hydraulische installatie. De techniek die hiervoor wordt gebruikt, berust op een elektrisch principe zonder gebruik te maken van programmatuur, dat is ondergebracht op kleine printkaarten. De betrouwbaarheid hiervan is erg hoog: in de faalkansberekeningen is een getal opgenomen van $P=10^{-8}$ / uur, wat overeenkomt met één keer falen in de 11.500 jaar.

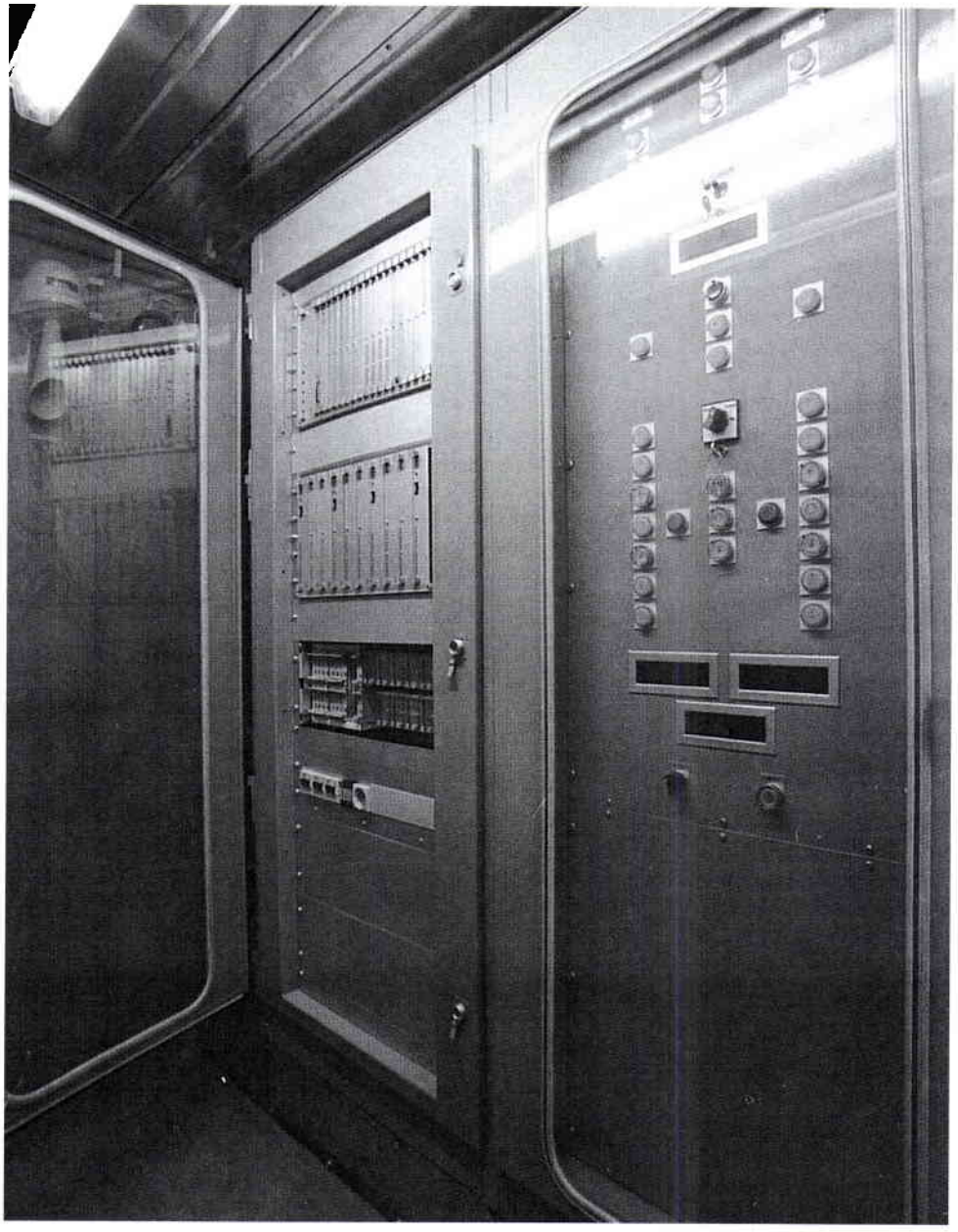
5.3.7 Hydrauliek omschakel- en drukknoppenkast

Mocht de LCC uitgevallen zijn of is er sprake van een noodgeval of onderhoudsbediening, dan kan de hydraulische installatie direct via de noodbediening op de omschakelkast aangestuurd worden.

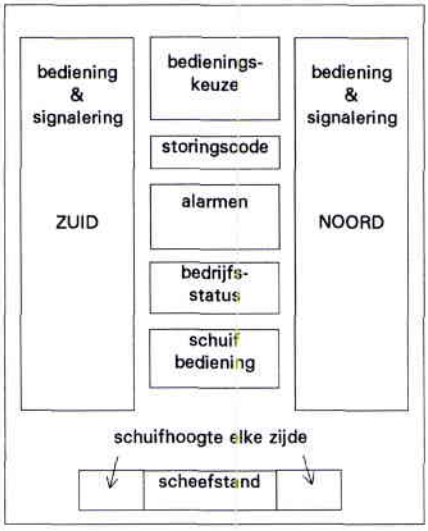
Met een kleine draagbare drukknoppenkast kan, via een kabel aangesloten op de omschakelkast, één cilinder bewogen worden, terwijl men zelf bij die cilinder staat. Met behulp van de drukknoppen kunnen direct de commando's 'op' en 'neer' aan de hydraulische installatie geven worden. Alvorens te kunnen bedienen moet de besturingsinstallatie van de LCC voor lokale en centrale bediening worden geblokkeerd en moet een schakelaar van de stand 'automatisch' naar de stand 'hand' worden gezet.

5.3.8 Het lokale bedieningspaneel

Iedere schuifinstallatie is uitgerust met een bedienings- en signaleringspaneel (figuur 5.7 en figuur 5.8). Dit paneel dient voor het ter plaatse bedienen van de schuiven bij onderhoud of als centrale bediening niet meer mogelijk is doordat bijvoorbeeld het datacommunicatienetwerk of de centrale computerinstallatie in storing is. Het paneel staat in directe verbinding met de I/O-computers en de display-computer.



Figuur 5.7 Lokaal bedieningspaneel



Figuur 5.8 Globaal overzicht lokaal bedieningspaneel

Alle bedieningshandelingen van drukknoppen en keuzeschakelaars worden schakeltechnisch verdrievoudigd om deze in de I/O-computers in te kunnen voeren. De signaleringen en displays worden aangestuurd door de display-computer.
Het bijzondere van het lokale bedieningspaneel is dat men de mogelijkheid heeft tot het uitvoeren van uitzonderlijke bedieningshandelingen, waaronder het per schuifzijde laten bewegen van de schuif. Zoals figuur 5.8 laat zien, is het lokale bedieningspaneel in verschillende secties opgedeeld.

Sectie bedieningskeuze
Als op verschillende plaatsen een toestel of object, in dit geval een schuif, kan worden bedient moeten afspraken gemaakt worden wie wanneer mag bedienen. Immers, als men voor onderhoudsdoeleinden een schuif ter plaatse bedient, is het onverstandig en bovendien gevaarlijk om bediening vanuit een andere plaats toe te staan.
De afspraken betreffende de bediening worden vastgelegd in protocollen en resulteren in een hiërarchie tussen de verschillende bedienaars en bedienplaatsen. De hiërarchie tussen de centrale en lokale bediening is conventioneel van aard. Dit houdt in dat als men vanaf de centrale bedieningslessenaar een commando geeft, bijvoorbeeld om de schuif te heffen, dit men ter plaatse, dus lokaal, kan wijzigen door het geven van een andere bedieningsopdracht. Bedient men ter plaatse, dan worden centrale bedieningscommando's niet uitgevoerd. De centrale bediening wordt pas vrijgegeven wanneer er lokaal enkele schakelaars in de juiste stand zijn gezet. De lokale bedienaar kan met deze schakelaar de bediening ook weer tot zich nemen. De centrale bedienaar beschikt niet over deze mogelijkheden.

Staat de sleutelschakelaar op 'centraal' (dit is de gebruikelijke stand) dan is de centrale bediening vrijgegeven en is de lokale bediening geblokkeerd. Zet men deze schakelaar op 'lokaal', dan wordt de centrale bediening van de betreffende schuifinstallatie geblokkeerd en kan men de schuif lokaal laten bewegen. In de stand 'blokkering' kan men noch centraal, noch lokaal bedienen.

Sectie bediening & signalering noord en zuid
Symmetrisch zijn aan beide zijden van het paneel een reeks bedieningen en signaleringen aangebracht om één zijde van de schuif te kunnen bedienen. Dit is nodig bij onderhoud, bij testen of bij extreme scheefstand. Beide paneelsecties zijn identiek.

De bedieningsfuncties worden alleen vrijgegeven als op het paneel een keuzeschakelaar in de stand 'extreme correctie' wordt gezet. De schuif beweegt zolang men de drukknop voor 'op' of 'neer' ingedrukt houdt. De bediening kan echter alleen een corrigerende beweging van de schuifzijde uitvoeren, een beweging dus die een horizontale schuifstand bewerkstelligt. De beweging stopt automatisch wanneer de schuif de horizontale stand heeft bereikt. Staat de schuif horizontaal, dan heeft het bedienen van de drukknoppen 'op' en 'neer' geen resultaat.

Sectie storingscode
Wanneer een schuifinstallatie een storing detecteert, wordt hiervan melding gemaakt. Ter plaatse gebeurt dat door middel van het lokale bedieningspaneel om de onderhouds- en storingstechnici een eerste indicatie te geven van de ontstane problematiek. De storingscode verschijnt op een digitaal display. De code die hier wordt gepresenteerd, is uitsluitend die van de laatst geconstateerde fout van de schuifinstallatie.

Sectie alarmen
Sommige storingen zijn afzonderlijk op het paneel gepresenteerd. In geval van deze storingen hoeft geen storingscode geïnterpreteerd te worden. Het personeel kan daardoor direct handelen.

Bij elke storing gaat het lampje 'algemeen alarm' branden, ook licht de drukknop 'algemeen alarm' op. Het alarm wordt geaccepteerd door de drukknop te bedienen. De essentie hiervan is dat aan het accepteren van de storing een functie gekoppeld kan worden. De acceptatie is bovendien het bewijs dat het alarm is waargenomen.

Sectie bedrijfsstatus
Het is noodzakelijk dat uitzonderlijke bedieningshandelingen ter plaatse kunnen worden uitgevoerd. Voorbeelden van dergelijke handelingen zijn het corrigeren van extreme scheefstand of het brengen van de schuif in een bijzondere positie. Dit kan voorkomen tijdens onderhoud, montagewerkzaamheden of tijdens het verhelpen van storingen. Om de bediening hiervoor in een bepaalde bedrijfstoestand te brengen, zit in het midden van het paneel een keuzeschakelaar die door middel van een sleutel vergrendeld kan worden. Met deze keuzeschakelaar kunnen de volgende toestanden van de lokale bedrijfsvoering onderscheiden worden:

Bedrijfstoestanden
- Normaal bedrijf; deze stand van de keuzeschakelaar geeft de bediening vrij van de keuzeschakelaar 'lokaal', 'centraal' of 'geblokkeerd' van de sectie bedieningskeuze;
- *Onderhoudsbedrijf; het onderhoudsbedrijf concentreert zich op* het bewegingsgebied van de schuif dat hoger ligt dan binnen de grenzen van het normale bedrijf gebruikelijk is. Hierbij kan de schuif tot 1,2 meter boven zijn hoogste stand worden gebracht. Men gebruikt hiervoor de bedieningsdrukknoppen 'op' en 'neer' *van de sectie schuifbediening;*
- Extreem bedrijf; met de keuzeschakelaar in de stand 'extreem bedrijf' wordt de bediening per schuifzijde (paneelsectie *bediening & signalering*) vrijgegeven, waarmee men een scheefstand van de schuif handmatig kan corrigeren;
- Montagebedrijf; in deze stand worden geen besturingscommando's van het systeem opgevolgd. Handmatige bediening is wel mogelijk.

Sectie schuifbediening
Ter plaatse moet men altijd de mogelijkheid hebben om onder controle van het bewakingssysteem de schuif te kunnen laten bewegen en weer te laten stoppen. Hiervoor heeft men op het paneel de

sectie 'schuifbediening' aangebracht met de bedienings- en signaleringsfuncties 'op','stop' en 'neer'.

Het bedienen van de drukknoppen 'op' of 'neer' resulteert in een overeenkomstige schuifbeweging, zolang er geen eindtoestand wordt bereikt. Na het geven van een stopcommando wordt de schuifbeweging beëindigd.

Sectie schuifhoogte
Bij lokale bediening of bij het waarnemen van schuifbewegingen ter plaatse, dient men altijd de positie van de schuif te weten. Hiervoor zijn op het paneel drie digitale displays aangebracht. Daarop worden de volgende waarden gepresenteerd:

Displaywaarden
- Schuifhoogte zijde noord;
- Schuifhoogte zijde zuid;
- Verschilhoogte tussen noord- en zuidzijde van de schuif.

Deze waarden worden weergegeven in meters tot twee cijfers achter de komma. De waarden van de schuifhoogtezijden zijn genomen ten opzichte van een nul-waarde wanneer de schuif zich in de hoogste positie bevindt. De displaywaarde is dan 00,00. Vanaf die positie tot 1,2 m neerwaarts bevindt de schuif zich in het onderhoudsgebied. Het gebruikelijke bewegingsgebied van elke schuif begint dan ook bij een displaywaarde van 1,2 m. Een schuif die vervolgens zes meter neerwaarts beweegt en op de drempel rust, heeft een displaywaarde van 7,2 m.

5.4 Procesbesturing

De meeste functies van de procesbesturing zijn ondergebracht in zowel de prime- als de back-up-computer. Alleen minder vitale functies als melding-signalering en communicatie met de centrale installatie worden alleen door de prime uitgevoerd. De prime-computer is speciaal ontworpen voor het besturen en bewaken van elektrische installaties voor industriële bedrijfsprocessen van onder meer de petrochemie, waterkrachtcentrales en nucleaire installaties.

Vereist is naast kwalitatieve hardware en een structurele en inzichtelijke opbouw van de programmatuur. De programmatuur heeft een modulaire structuur, waarbij strikte afspraken gelden voor het programmeren van de diverse programmamodulen. Zo kent de programmatuur van de prime-computer een formele hiërarchie tussen de diverse programmamodulen en wordt de inzichtelijkheid verkregen door gebruik te maken van leerbare programmatuur (functie-elementen) en het beperken van codering.

De procesbesturing zoals die door de LCC wordt uitgevoerd, is onder te verdelen in de volgende taken:
- initialisatie;
- bediening;
- beveiliging;
- stationaire controle;
- actie-controle;
- melding-signalering;
- communicatie.

Deze taken zijn het resultaat van een zorgvuldige weging bij het opdelen van alle functionaliteiten. Aan iedere taak is een aantal functionaliteiten toebedeeld. Om een taak niet te zwaar te belasten is deze soms opgesplitst. Zo behoorde tot de controletaak aanvankelijk een diversiteit aan functionaliteiten. De taak is daarom opgesplitst in controle van het passieve proces (stationaire controle) en controle van het dynamische proces (actie-controle). Afhankelijk van de complexheid van een taak zijn de functies verdeeld over diverse programmamodulen. Tussen die programmamodulen kunnen afspraken gemaakt worden voor het toekennen van master- en slavefuncties. Voorts is het mogelijk om aan programmamodulen een bepaalde prioriteit of behandelfrequentie toe te kennen. Tevens kan, afhankelijk van een bepaalde processituatie, een programmamodule geactiveerd worden. Hiervoor kent iedere programmamodule een gegevenskader voor het vastleggen van dergelijke specifieke voorwaarden.

Een eerste aandachtspunt bij het ontwerpen van de procesbesturing was het maken van concrete afspraken daarover. Hierbij werd wederom de eis in beschouwing genomen van minimale koppeling tussen taken onderling en maximale cohesie binnen een taak. Dit proces moest vooraf door de opdrachtgever worden gewaarborgd, wat heeft plaats gehad door het maken van een functioneel ontwerp en uitwerking daarvan tot het niveau van de besturingsfuncties. Het functioneel ontwerp werd opgezet volgens de methode van 'Hayes Davies'. Dit houdt in dat een gedragsmodel werd toegeleverd waarin taken, functies, gegevens- en besturingsstromen waren verwerkt. De processen werden beschreven conform die van 'Nassi-Shneidermann' en gedetailleerd tot op het niveau van de uiteindelijke besturing. Hiermee was voor de opdrachtgever voldoende grond aangebracht om bij de detail-engineering de vinger aan de pols te houden om te kunnen blijven sturen op de gestelde eisen en uiteindelijk een betrouwbare en onderhoudbare programmatuur opgeleverd te krijgen.

ASEA had als opdrachtnemer de taak om deze opgelegde structuur en subdetaillering onder te brengen in de modulariteit van de programmatuur van de prime-computer. Het is echter niet eenvoudig een sequentieel proces controleerbaar te houden dat op elk moment moet kunnen reageren op een bepaald commando of storing en dat een veilige situatie moet kunnen waarborgen. Bij de detail-engineering werd dan ook voortdurend onderzocht hoe belangrijk een bepaalde functie is en welke relatie deze heeft met bijvoorbeeld de bedienings- en beveiligingstaken. Vervolgens moest elke functie in de juiste programmamodulen worden ondergebracht. Navolgend worden de taken die tot de procesbesturing behoren toegelicht.

Initialisatie
Onder initialisatie wordt verstaan: de controles die na het inschakelen van de elektrische installatie door de processor van het computersysteem zelfstandig worden uitgevoerd, voordat taken kunnen worden gestart of voortgezet. Zo wordt de werking van bepaalde onderdelen van de computer na inschakeling tenminste één keer gecontroleerd. Deze controle richt zich op de interne werking van de hardware, de interfacing met andere systeemcomponenten en enkele belangrijke softwarefuncties. Een gestelde eis aan de controle is het optreden van een bepaalde reactie wanneer zich een storing voordoet in de:
- hardwaremodulen
- interne interface
- externe interface
- schuifcodeverwerking
- geheugenverlies
- geheugenfuncties
- systeemfuncties

Wanneer de computer operationeel is, blijft de controle op bovengenoemde onderdelen actief. Een belangrijke controle is die op de schuifcodeverwerking. Deze moet eerst uitgevoerd worden voor-

dat de procesbesturing kan worden vrijgegeven. De schuifcode wordt extern in de computer ingevoerd en is een unieke code die aangeeft met welk type schuif de computer te maken heeft. De drempelwaarden en de maximaal toelaatbare scheefstanden verschillen namelijk per type schuif. De computer moet de juiste waarden aan de hand van de schuifcode uit zijn database halen.

Nadat alle controles zijn uitgevoerd wordt de procesbesturing vrijgegeven. De eis is gesteld dat er voortdurend gecontroleerd moet worden op het onderkennen van herkenbare procestoestanden en het controleren van de aangeboden meetwaarden. Dat wil zeggen dat de computer de actuele toestand van de hydraulische en de elektrische installatie moet identificeren aan de hand van de hem aangeboden procesvariabelen (statussignalen en meetwaarden) en dat de computer een oordeel moet kunnen geven over de juistheid van de meetgegevens. Om de actuele toestand te kunnen bepalen —waar bevindt de schuif zich en staat deze horizontaal? — worden eerst de meetwaarden onderzocht. Bij het aanzetten van de computer kunnen deze meetwaarden niet vergeleken worden met daaraan voorafgaande meetwaarden. De controle is dan ook beperkt tot het meetgebied en het onderlinge verschil tussen de meetwaarden per schuifzijde. Vervolgens wordt de positie en de scheefstand van de schuif bepaald. Daarna wordt de toestand van de hydraulische en elektrische installatie onderzocht. Bij het aanzetten van de computer wordt dan uitsluitend gezocht naar een herkenbare toestand om een uitgangspositie te bepalen voor het kunnen sturen naar een andere gewenste schuifpositie. Zo'n herkenbare toestand is bijvoorbeeld de ruststand 'eind-op' onder centrale bediening.

Is de procesbesturing vrijgegeven en de computer operationeel, dan spitsen de controles zich toe op het handhaven van die schuifpositie. De meetwaarden worden dan tevens voortdurend gecontroleerd op verandering ten aanzien van het te verwachten gedrag van de schuif en ten aanzien van de hydraulische en elektrische installatie. Omdat niet exact op een bepaald tijdstip een bepaalde meetwaarde kan worden verwacht, zijn aan dergelijke controles restricties verbonden in de vorm van vastgelegde bandbreedtes en tijdmarges waarbinnen een verandering moet hebben plaatsgevonden. Uiteindelijk verwachten we een schuifbeweging die voldoet aan het opgedragen commando en die zich gedraagt conform het verwachtingspatroon volgens het ontwerp van de installatie. Onder een commando om de schuif te heffen, verwacht de computer om de drie seconden een centimeter verplaatsing in opgaande richting. Wordt een verkeerde waarde gemeten, bijvoorbeeld een meetwaarde die lager is dan de drempelwaarde, dan wordt een foutmelding gegeven en kan de besturing geblokkeerd worden. Ook bij een te grote plotselinge wijziging van een meetwaarde of bij tegenstrijdige metingen is dit het geval. Doordat voortdurend wordt gecontroleerd, bezit de procesbesturing een hoge mate van betrouwbaarheid.

Bediening

De bedieningstaak analyseert de diverse standen van de bedieningsschakelaars en bepaalt overeenkomstig een vastgelegde bedieningshiërarchie welke commando's op welke bedieningsniveaus (lokaal of centraal) geaccepteerd worden en mogen leiden tot de beoogde procesbesturingen. In deze taak wordt rekening gehouden met alle bedieningsvarianten in de situaties waarin het besturingsproces kan verkeren. Enkele commando's zijn afkomstig van pulsdrukknoppen. Om dergelijke signalen, waaronder ook alle kortstondige proces-pulsen, te kunnen waarnemen worden deze in afzonderlijke programmamodulen ondergebracht die met een hoge scanfrequentie worden uitgelezen.

Eenmaal geaccepteerde commando's moeten uiteindelijk hun impact hebben op het schuifproces, dat in een afzonderlijke taak door verschillende programmamodulen wordt uitgevoerd. Het was een optie om bedieningsfuncties in het proces van openen en sluiten te integreren, omdat dan aan iedere procesvariant een bedieningstemplate (dat is een aantal vanaf dat moment toelaatbare commando's) kan worden toegekend. Gezien het uitgangspunt om te streven naar een zo homogeen mogelijke samenstelling van een taak, is echter besloten om alle bedieningsfuncties bijeen te houden en geen rechtstreekse link te leggen met een taak die zich bezighoudt met het openen en sluiten. Dat betekende dat er een analyse moest plaatsvinden om er zeker van te zijn dat een willekeurige stap in de procesbesturing vervolgd kon worden met het validatieresultaat van een inkomende bedieningshandeling, voordat een daarvan afhankelijke volgende stap van de procesbesturing ingezet kon worden. Door de traagheid van de schuifbeweging was deze expliciete scheiding van taken haalbaar en kon een leesbare en onderhoudbare programmatuur worden gewaarborgd.

Zowel bediening als beveiliging lopen als een rode draad van interrupties door alle taken van de procesbesturing. Functies hiervan hadden eventueel ondergebracht kunnen worden in een overkoepelende managertaak, zoals deze was voorgeschreven in de specificaties voor het coördineren en het afhandelen van alle taken. Gedurende het ontwerp en de detailengineering is gebleken dat het onderbrengen van bedienings- en beveiligingsfuncties in de managertaak niet nodig was.

Beveiliging

De beveiligingstaak draagt zorg voor het voorkomen van schade aan de installatie en pijlers door het tijdig uitschakelen van de installatie of het blokkeren van de bediening. De beveiligingstaak is hiertoe bevoegd, doordat deze uitsluitend het gedrag van de installatie onderzoekt op basis van drievoudig aangeboden informatie. Enkelvoudig aangeboden alarmeringen zoals signalen van thermische beveiligingen en maximum-stroom-beveiligingen worden wel door de beveiligingstaak verwerkt, maar hebben geen impact op de procesbesturing. Dergelijke thermische beveiligingen en maximum-stroom-beveiligingen breken op brute wijze in op een lopende besturingsactie door bijvoorbeeld een pompmotor uit te schakelen. Dit wordt wel door bewakingsfuncties waargenomen, maar resulteert niet in het blokkeren van de elektrische installatie via de programmatuur. Binnen andere taken wordt op deze veranderende processituatie adequaat gereageerd door het handhaven van een verantwoorde procestoestand.

De beveiligingstaak moet voorkomen dat eindposities van de schuif worden overschreden en dat de schuif geen grotere scheefstand bereikt dan 30 cm. Doordat beide schuifzijden afzonderlijk worden aangedreven, is er per definitie sprake van een scheefstand. Deze scheefstand treedt tevens op wanneer de schuif niet wordt aangedreven en zolang de schuif niet op de drempel rust. Gebruikelijk is het om mechanische bewegingen met hoog betrouwbare eindschakelaars elektrisch te onderbreken. Bij de SVKO is dat om technische redenen niet haalbaar gebleken. Het was tevens praktischer om gebruik te maken van de meetwaarden van de drievoudig uitgevoerde hoogtemeting. Wanneer een schuif een gewenste positie bereikt die niet overeenkomt met een eindpositie, stopt de beweging uitsluitend door een functie van de taak 'stationaire controle'. Bereikt de schuif om welke reden dan ook een eindpositie, dan stopt de schuif mede door het ingrijpen van de beveiligingstaak.
Voor onderhoudsdoeleinden moet de schuif boven de eindpositie 'op' kunnen worden bewogen. Via het lokale bedieningspaneel kan met een keuzeschakelaar de hoogste eindwaarde met 1,2 meter

worden verhoogd. Dit betekent dat een beveiliging nodig is op het overschrijden van deze nieuwe hoogste eindwaarde.
Een afzonderlijke taak draagt zorg voor het bewaken van de scheefstand van de schuif. Wanneer toch een ontoelaatbare scheefstand wordt bereikt, grijpt de beveiligingstaak in door het uitschakelen van de procesbesturing. Dit gebeurt bij het bereiken van de scheefstandwaarde die ook wel 'extreme scheefstand' wordt genoemd. Door buitengewone bedieningshandelingen kan deze scheefstand vanaf het lokale bedieningspaneel gecorrigeerd worden.

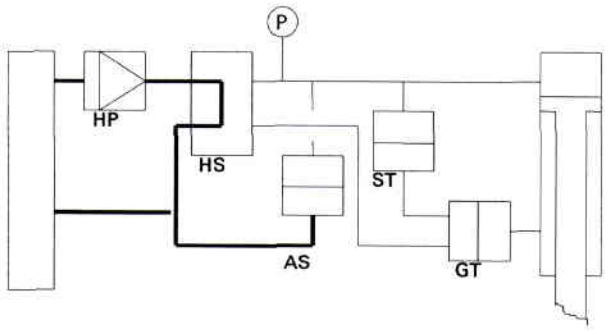
Stationaire controle
De taak 'stationaire controle' richt zich op het bewaken van hoofd- en overgangstoestanden.
Hoofdtoestanden zijn situaties waarbij de installatie in rust is en de schuif zich in een bepaalde positie bevindt. Dit kan een eindpositie zijn, maar ook een positie ergens halverwege. Bij overgangstoestanden is de installatie niet in rust, maar vindt er ook geen wijziging van de procesbesturing plaats. De schuif beweegt zich dan bijvoorbeeld in een neergaande beweging, of één zijde van de schuif wordt aangestuurd om een scheefstand te corrigeren. Het bewaken van hoofd- en overgangstoestanden houdt in dat er voortdurend gecontroleerd wordt of de schuif zich nog wel in de verwachte toestand bevindt. Als geconstateerd wordt dat de schuif een hoofdtoestand verlaat of dat niet aan het verwachtingspatroon van een beweging wordt voldaan, wordt dat door de stationaire controletaak gesignaleerd. Er wordt vervolgens ingegrepen doordat bepaalde besturingsmodulen geactiveerd worden.

Een voorbeeld is het corrigeren van een schuif die te veel uit positie staat, bijvoorbeeld door het wegzakken van de hele schuif of van één schuifzijde waardoor een ontoelaatbare scheefstand is ontstaan. De schuif moet dan worden aangestuurd om op zijn positie terug te keren. Dit kan door een correctie in gang te zetten naar de ingestelde waarde of een eindpositie. Zo wordt ook bij het detecteren van een te lage voorspanning deze weer op druk gebracht. In het geval van een overgangstoestand neemt de stationaire controletaak na het waarnemen van bijvoorbeeld een maximale scheefstand het initiatief om de voorlopende schuifzijde tijdelijk tegen te houden. Herkenbaar is nu dat één schuifzijde zich in een hoofdtoestand bevindt en de andere in een overgangstoestand.

Gezocht is naar een zo praktisch mogelijke invulling van de procesbesturing van een schuif. Reeds in een vroeg stadium werd de conclusie getrokken om de besturingsprocessen van beide schuifzijden los van elkaar te ontwerpen. Dit komt overeen met het ontwerp van de hydraulische installatie. Het ontwerp van de elektrische installatie is daardoor inzichtelijker voor beheer en onderhoud.

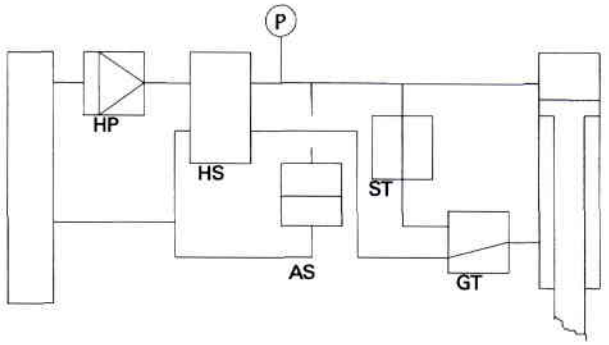
Hieronder worden twee functies van de stationaire controletaak beknopt beschreven:

1) Corrigeren van een scheefstand (figuur 5.9);
Tijdens het bewegen van de schuif is een kleine afwijking tussen beide zijden van de schuif toegestaan. Zodra deze afwijking een bepaalde waarde overschrijdt, wordt de beweging van de voorlopende cilinder gestopt totdat de achtergebleven cilinder is bijgekomen. Het stoppen van de voorlopende cilinder gebeurt door de hoofdschuif van de betreffende cilinder in de middenstand te plaatsen en de aflaatschuif te sluiten, waardoor de hoofdpomp tijdelijk gaat rondpompen. Zolang de scheefstandcorrectie actief is, is de stuurschuif gesloten. Als de achtergebleven cilinder niet binnen 60 seconden is bijgekomen, worden beide cilinders definitief gestopt.



Figuur 5.9 Scheefstandcorrectie

2) Corrigeren van de voorspandruk (figuur 5.10);
Als de drukmeting een te lage druk aangeeft, wordt de hoofdpomp gestart op een hoog toerental. Na het aanlopen van de pomp wordt de hoofdschuif in de stand sluiten gezet. Bij de maximum druk wordt de hoofdschuif in de middenstand gezet, waarna de hoofdpomp wordt gestopt.



Figuur 5.10 Schuif gesloten

Actie-controle
De ontwerpgedachte gaat uit van eenduidigheid in taken en functies. De actie-controletaak is dan ook uitsluitend bevoegd tot het controleren van procesreacties. De actie-controletaak controleert of een stuurfunctie van de computer leidt tot de gewenste reactie van de elektrische en hydraulische installatie. Deze controletaak is actief tijdens het wijzigen van een hoofd- of overgangstoestand, of tijdens het corrigeren binnen een hoofd- of overgangstoestand. Wijzigingen vinden plaats door het maken van stappen in de procesbesturing en deze te controleren op basis van tijd en statuswaarde.

Het heffen van een schuifzijde is bijvoorbeeld opgebouwd uit elf stappen verdeeld over vier deelacties, te beginnen met het wegnemen van de voorspanning. Hiervoor moet, dat is de eerste stap, een elektrisch bedienbare schuif van de hydraulische installatie worden aangestuurd. De tweede stap is het schakelen van de druksensoren. Formeel worden er dus twee reacties terugverwacht. De eerste is het signaal dat de aangestuurde schuif daadwerkelijk van stand is veranderd, de tweede reactie is de drievoudige melding dat de druk boven de zuiger lager dan 30 bar is. De actie-controlefunctie is de derde stap: gecontroleerd wordt op enkelvoudig en drievoudig aangeboden procesinformatie. Blijft een enkelvoudige terugmelding uit, of is deze onjuist, dan volgt slechts een alarmering. De procesbesturing vervolgt gewoon de opgedragen actie. Het kan immers zijn dat de terugmelding defect is en de beschikbaarheid van de kering mag niet afhangen van laag-be-

trouwbare gegevens. Is de drievoudige terugmelding van de druksensoren onjuist, dan wordt ingegrepen bijvoorbeeld door het blokkeren van een deel van de procesbesturing. De stationaire controletaak krijgt vervolgens de opdracht om de hydraulische installatie onder controle te houden tot onderhoud heeft plaatsgevonden.

Melding-signalering
Gedurende het procesverloop dienen zowel lokaal als centraal gegevens te kunnen worden gepresenteerd. Deze gegevens worden door de melding-signaleringstaak ter beschikking gesteld aan lokale en centrale presentatieprogrammatuur. De melding-signaleringstaak betrekt de betreffende gegevens van verschillende programmamodulen van het lokale computersysteem en draagt deze over aan de LCC en het presentatiesysteem van de centrale computerinstallatie.

Communicatie
De communicatietaak verzorgt de interne communicatie tussen de zes verschillende computers van de LCC. Tevens verzorgt ze de gegevensoverdracht naar de centrale computerconfiguratie. De gegevensoverdracht vindt plaats via een datacommunicatienetwerk dat de LCC's verbindt met de centrale computerinstallatie. Deze overdracht kan, door de grote hoeveelheid aan te verwerken gegevens, niet rechtstreeks plaatsvinden en verloopt via tussenstations, de zogenaamde concentrator-computers. Hier wordt in hoofdstuk 6 nader op ingegaan. De functies van de communicatietaak zijn als een netwerk fysiek verdeeld over de computers van de LCC en de tussenstations.

In iedere computer zijn voor het verzenden en ontvangen gelijkwaardige gegevenspakketten samengesteld van verschillende grootte. Zo is voor het verzenden van de gegevens van een meetwaarde van de hoogtemeting van de schuif een gegevenspakket van twaalf signalen in de database van zowel de interface-computer als de prime-computer samengesteld.

Voor het verzenden en ontvangen wordt een gegevenspakket gekoppeld aan een adresseringspakket. Aan de prime-computer is de master-taak toebedeeld waardoor deze de zorg draagt voor het ophalen en bezorgen van de verschillende gegevenspakketten. Bij een storing van de prime-computer schakelt de back-up-computer over van slave naar master en neemt zo de organiserende taak van de prime over. Alle gegevens die over de Masterbus 200 gaan, komen ter beschikking van zowel de prime als de back-up en blijven zo bij uitval van de prime behouden voor de back-up. De extern enkelvoudig aan de prime aangeboden procesgegevens verliezen echter hun bestemming bij een storing van de prime. Hierdoor valt ook de reactiebewaking op het besturingsproces uit. Aangezien de gegevensoverdracht uitsluitend vanuit de prime plaatsvindt, is er bij een storing van de prime geen gegevensoverdracht tussen de LCC en het centrale computersysteem.

6. Netwerkverbindingen voor besturing, bediening en bewaking

Het doel van de netwerkverbindingen is te zorgen dat berichten en signalen tussen de verschillende computersystemen en de verschillende installatiedelen kunnen worden overgedragen binnen de randvoorwaarden die aan het netwerk zijn gesteld, zoals capaciteit, verwerkingssnelheid en betrouwbaarheid. Tijdens het ontwerp bleek dat niet kon worden volstaan met één of meer (eventueel dubbel) uitgevoerde datacommunicatienetwerken tussen de lokale en de centrale installaties. De gewenste hoge betrouwbaarheid voor het centraal kunnen bedienen van alle schuiven bleek niet gewaarborgd te kunnen worden. Om de betrouwbaarheid toch te bereiken is een hoog betrouwbare netwerkverbinding gerealiseerd tussen de lokale elektrische installatie, met name de LCC's, en de centrale bedieningslessenaar. Deze netwerkverbinding wordt de 'veilige verbinding' genoemd. Voor de overige functies, waaraan minder hoge betrouwbaarheidseisen zijn gesteld, is een afzonderlijk datacommunicatienetwerk aangelegd tussen de LCC's en het centrale computersysteem. Deze netwerkverbinding wordt de 'alternatieve verbinding' genoemd.

6.1 Veilige verbinding

Om een betrouwbare verbinding te kunnen garanderen moet het aantal installatiecomponenten in de verbinding zo laag mogelijk zijn. De veilige verbinding bestaat uit installatiekabels waarin tien koper-aders zijn opgenomen. Deze aders lopen vanaf de bedieningslessenaar naar de LCC's. Op de bedieningslessenaar bevindt zich een aantal drukknoppen en schakelaars. Met de drukknoppen kunnen verschillende commando's gegeven worden, bijvoorbeeld het commando om alle schuiven te sluiten.

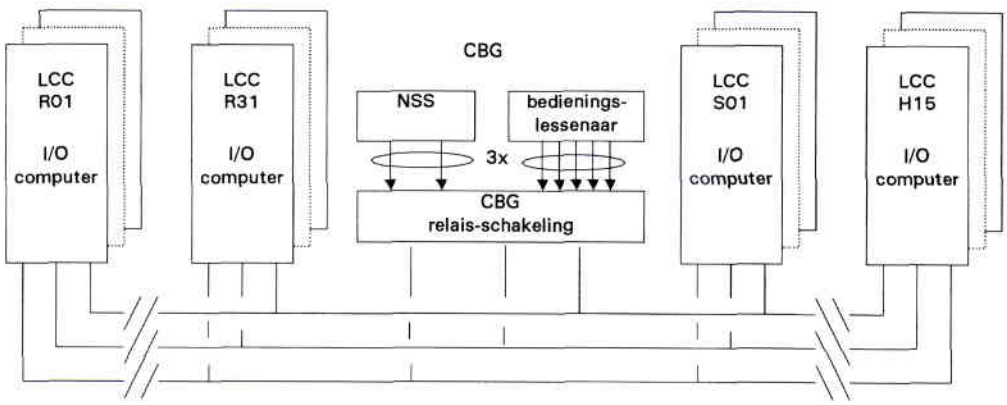
De drukknoppen zijn uitgevoerd met een drievoudig mechanisme dat bij het bedienen drie gelijksoortige signalen afgeeft die de drie interface-computers van elke LCC moeten bereiken. Er zijn 62 schuiven en dus 62 LCC's die elk commando van de bedieningslessenaar in drievoud moeten kunnen verwerken. Elk commando ('op', 'stop', 'neer', 'veilig' en 'alternatief') wordt daarom vermenigvuldigd door middel van een relais-schakeling. Vanuit die relais-schakeling lopen vervolgens 186 (62 x 3) tien-aderige kabels naar de LCC's. De signalen van het autonome noodsluitsysteem worden eveneens via deze relais-schakeling ingevoerd. Bij de LCC's worden de drievoudig aangeboden signalen weer doorgegeven aan het dubbele besturingssysteem voordat deze via de 2-uit-3 fail-safe-logica kunnen worden omgezet in daadwerkelijke besturingsacties.

Vanuit de centrale installatie lopen dus 93 (31 x 3) kabels noordwaarts over de kering naar de schuiven van de sluitgaten Schaar en Hammen en 93 (31 x 3) kabels zuidwaarts naar de schuiven van het sluitgat Roompot. Deze laatste kabels gaan eerst via een kabeltracé onder de grond van het eiland Neeltje Jans en vervolgens onder de Roompotsluis door naar de verkeerskoker bij de schuiven van Roompot. Vanuit het noodsluitsysteem, dat zich bij de Roompotsluis bevindt, lopen signaalkabels via hetzelfde kabeltracé weer terug naar de centrale installatie. Via deze afzonderlijke signaalkabels geeft het noodsluitsysteem noodbedieningssignalen af aan de relais-schakeling die deze signalen weer 62 keer vermenigvuldigt en volgens bovenbeschreven route naar de LCC's leidt.

Figuur 6.1 geeft een overzicht van de verbindingen tussen alle LCC's en de centrale installatie. Essentieel is het beperkte aantal installatie-componenten dat in deze veilige verbinding is opgenomen. Een pijltje stelt symbolisch een verdrievoudigd bedieningscommando voor. Vanaf de relais-schakeling lopen drie keer 62 kabels naar de LCC's.

Vanwege het belang van de veilige verbinding vindt continue lijnbewaking plaats op het intact zijn van de verbindingen.

Omdat het aantal schuiven voor de Roompot gelijk is aan het aantal schuiven voor Schaar en Hammen, bevatten de noord- en zuidzijde van de kering een gelijk aantal LCC's waardoor de stroom-



Figuur 6.1 Overzicht veilige verbinding

verhouding tussen noord en zuid gelijk is. Storingen kunnen dan ook eenvoudig ontdekt worden door de stroomverhouding op de veilige verbinding te controleren. In de praktijk blijkt de genoemde methode niet erg betrouwbaar te zijn, omdat de stroomverhouding bij een kabellengte van 9 km verandert door variatie in temperatuur. Hierdoor wordt er geregeld een storingsmelding gegenereerd, terwijl de verbinding in orde is. Naast stroombewaking vindt daarom een keer in de twee weken een inspectie plaats op de kabelverbindingen. Er worden daarbij signalen op de afzonderlijke aders gegenereerd, waarna gecontroleerd wordt of deze aan het andere eind worden waargenomen.

6.2 Alternatieve verbinding

De alternatieve verbinding bestaat uit een datanet dat zich over de gehele kering uitstrekt. In tegenstelling tot de veilige verbinding kunnen over het datanet commando's worden gestuurd naar elke willekeurige LCC. Naast het geven van commando's wordt het datanet voornamelijk gebruikt om gegevens uit de LCC's op te halen.

Door het transporteren van deze gegevens wordt het datanet door elke schuifinstallatie belast met ongeveer 400 signalen. Is de gehele kering operationeel dan wordt het netwerk maximaal met 25.000 signalen belast. Het gegevenstransport van het centrale computersysteem naar de LCC's is marginaal in vergelijking met de terugkomende informatie. Voor het actualiseren van de gegevens op de presentatiesystemen zijn de volgende periodieke eisen gesteld die ten grondslag liggen aan het ontwerp van het datanetwerk:

- gegevens betreffende het globale procesverloop die direct worden gepresenteerd zoals de status van de LCC en de schuifpositie dienen één keer per drie seconden geactualiseerd te worden;
- gegevens betreffende de omschakelkranen van de hydraulische installatie dienen één keer per tien seconden geactualiseerd te worden;
- gegevens ten behoeve van het onderhoud aan de hydraulische installatie zoals olieniveaus en filtermeldingen dienen één keer per tien seconden geactualiseerd te worden;
- gegevens betreffende de energiedistributie dienen één keer per drie seconden geactualiseerd te worden;
- de LCC's moeten autonoom significante procesgebeurtenissen, zoals storingen of het bereiken van een eindstand, melden conform de bovengenoemde responstijden;
- van een of meerdere LCC's dienen alle bovengenoemde gegevens opgevraagd te kunnen worden binnen de genoemde responsietijden.

De overige eisen die aan de alternatieve verbinding worden gesteld, luiden:

- naast een maximale belasting aan te verwachten gegevenstransport moeten gelijktijdig alternatieve sluitingen kunnen worden uitgevoerd, wat inhoudt dat alle schuiven naar een bepaalde positie kunnen worden gestuurd;
- het datanet moet zodanig ontworpen zijn dat het uitvallen van een of meer LCC's geen invloed heeft op het functioneren daarvan;
- het transporteren van gegevens vindt uitsluitend plaats tussen de LCC's en het centrale computersysteem, niet tussen de LCC's onderling;
- het datanet mag slechts één keer in de 25 jaar een storing geven.

Deze laatste eis geldt uitsluitend voor de datanetcomponenten. Als het gaat om de betrouwbaarheid van het presenteren van gegevens of het opdragen van alternatieve sluitingen, dienen ook de achterliggende componenten van de LCC's en die van het centrale computersysteem in beschouwing te worden genomen. Het netwerk is dan ook berekend op deze laatste componenten, waaraan de eis is gesteld van één keer falen in de 4600 uur, ofwel een keer per 6,5 maand bij een reparatietijd van 14 uur. Kabelstoringen, zo is gebleken, hebben hierin een bijdrage van 2%.

Netwerkgeografie

Door uit te gaan van het principe dat alleen informatie wordt overgedragen als deze is veranderd ten opzichte van de vorige gegevens of wanneer erom wordt gevraagd, kan de hoeveelheid gegevens die over een lange afstand getransporteerd moet worden, in grote mate worden beperkt. Aan de hand van de te verwachten netwerkbelasting en reactietijden is het datanet verdeeld over vier identieke concentrators die als tussenstations functioneren in de verbinding van de LCC's met het centrale computersysteem. Elke concentrator communiceert met een groep van 15 of 16 LCC's en handelt tevens de opdrachten en de vereiste gegevensstroom af met het centrale computersysteem. Hiervoor is een concentrator uitgerust met een computer die in staat is om als doorgeefluik te functioneren. De LCC's zijn in groepen van zeven of acht via een enkele kabel met elkaar verbonden en zo op de concentrator aangesloten. Van het centrale computersysteem gaan er twee rechtstreekse verbindingen naar elke concentrator. De computers van de concentrators zijn hiervoor uitgerust met speciale communicatieapparatuur en -programmatuur. Vanwege de grote afstanden zijn de concentrators gesitueerd in de elektro-containers nabij de schuiven waarmee de gegevensuitwisseling plaatsvindt.

Tabel 6.1 geeft weer welke schuiven onder welke concentrator vallen en waar de concentrators zijn gesitueerd.

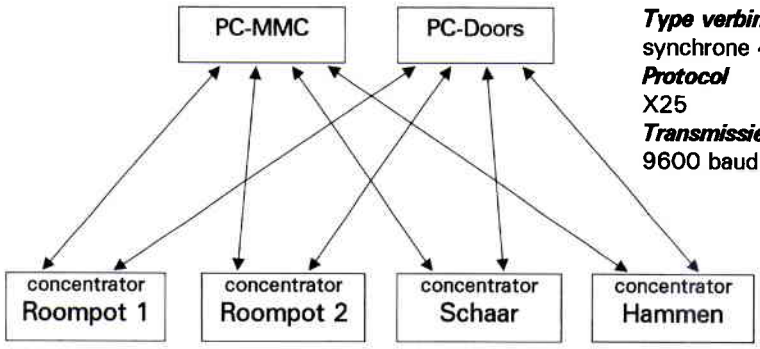
Concentrator	bedient de schuiven	vanuit
Roompot 1	R01 t/m R08 en R09 t/m R16	R09
Roompot 2	R17 t/m R24 en R25 t/m R31	R24
Schaar	S01 t/m S08 en S09 t/m S16	S09
Hammen	H01 t/m H08 en H09 t/m H15	H08

Tabel 6.1 Overzicht concentrators

Verbinding concentrators met centraal computersysteem

Het centrale computersysteem communiceert via twee verschillende computers met de vier concentrators, te weten PC-MMC en PC-Doors. PC-MMC is de afkorting van Proces-Computer Man-Machine-Communication. Via PC-MMC kan bijvoorbeeld de status van de schuiven worden opgevraagd en grafisch op beeldscherm worden gepresenteerd. Het merendeel van de centrale bedieningshandelingen verloopt via deze computer.

PC-Doors staat voor Proces Computer Schuiven, deze dient voornamelijk voor het presenteren van de status van de schuiven op een wandpaneel en het verzorgen van sluitingsstrategieën. De reden dat twee aparte computers gebruikt worden, is dat het gebruik van één computer een te grote faalkans oplevert met betrekking tot het presenteren van de schuifstatus en het centraal bedienen van de schuiven.



Type verbinding
synchrone 4-draads verbinding
Protocol
X25
Transmissiesnelheid
9600 baud

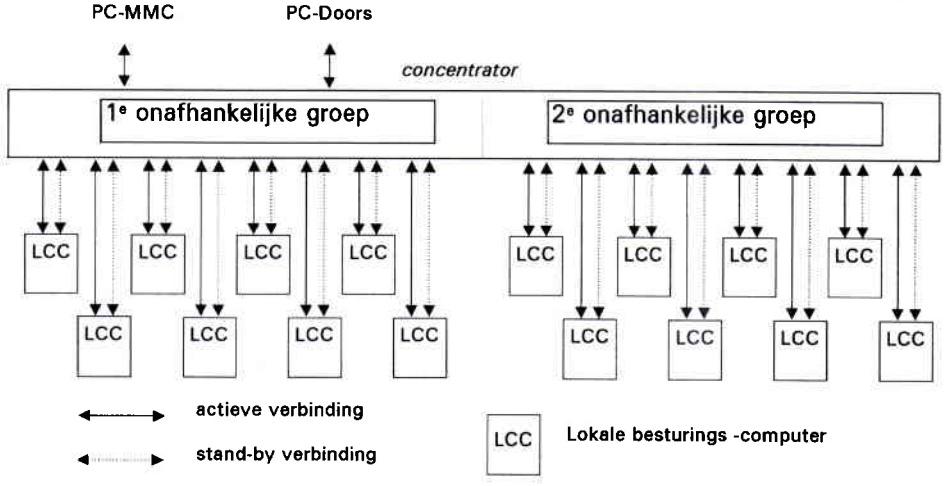
Figuur 6.2 Schema verbinding centraal computersysteem - concentrators

Beide computers staan met de vier concentrators in verbinding voor het overdragen van commando's en het opvragen en verwerken van gegevens (figuur 6.2). Eén maal per seconde worden alle gegevens die PC-Doors nodig heeft, opgestuurd door de concentrators. Gegevens die nodig zijn in PC-MMC worden door de concentrators per dataset opgestuurd. Bij het oproepen van bijvoorbeeld een beeldplaatje door PC-MMC wordt direct het betreffende grafisch onveranderlijke deel van het plaatje uit de database van PC-MMC gehaald en gepresenteerd. Voor de veranderlijke, statusafhankelijke gegevens worden alle benodigde datasets door de concentrators opgestuurd. Is een beeldplaatje eenmaal gepresenteerd, dan worden alleen datasets opgestuurd wanneer zich een wijziging heeft voorgedaan. Het filteren van de data vindt dus in de concentrator plaats. Daardoor blijft de hoeveelheid informatie die naar het centrale computersysteem wordt gestuurd binnen de perken.

Figuur 6.2 laat zien dat elke concentrator de hem beschikbare informatie van de onderliggende schuifinstallaties aan zowel de PC-MMC als de PC-Doors moet kunnen overdragen. De informatieoverdracht moet tevens gelijktijdig kunnen plaatsvinden. De snelheid van de verbinding van de concentrator met het centrale computersysteem is dan ook relatief hoog in vergelijking met de verbinding van de concentrator met de LCC's.

Verbinding concentrator met LCC's
Op elke concentrator zijn 15 (Roompot 2 en Hammen) of 16 (Roompot 1 en Schaar) LCC's aangesloten. Het aantal LCC's is vervolgens verdeeld over twee groepen om de beschikbaarheid en de actualiteit van de gegevens zo optimaal mogelijk te houden. De verbinding tussen een concentrator en een groep van zeven of acht LCC's wordt gevormd door een communicatiemodule in de concentrator, waarvandaan een tweedraads datacommunicatiebus loopt waarop elke LCC van die groep is aangesloten. Die verbinding is van het master/slave-principe, waarbij de concentrator de master is. Cyclisch worden door de concentrator alle LCC's afgevraagd, waarbij alleen datasets worden opgehaald die zijn gewijzigd. Ondanks de lage verwerkingssnelheid van 153,6 Kbaud is door het geringe aantal LCC's binnen een groep de gewenste informatie tijdig bijgewerkt naar de actuele status van de schuifinstallaties. Hierdoor is de informatie in de concentrators maximaal 0,5 seconde oud. De beschikbaarheid van de verbinding wordt gewaarborgd doordat er naast de normale verbinding een parallelle (stand-by) verbinding aanwezig is, die bij een storing in de normale verbinding in werking komt (figuur 6.3).

In figuur 6.3 is te zien dat de twee groepen LCC's onafhankelijk van elkaar communiceren met dezelfde concentrator, maar dat die concentrator de verkregen informatie van beide groepen tegelijk aan het centrale computersysteem overdraagt.



Figuur 6.3 Overzicht verbinding concentrator- LCC's

7. Noodsluitsysteem

De stormvloedkering wordt in beginsel bediend door het dienstdoend personeel. De bedienaars zijn niet alleen tijdens kantooruren aanwezig, maar op afroep ook daarbuiten als een sluiting van de kering wordt verwacht. Voor het bepalen van de juiste sluitingsstrategie gebruiken zij het beslis- en simulatiesysteem (BSS), dat op grond van een rekenkundig model automatisch een veilige strategie voorstelt. De uiteindelijke beslissing wordt echter altijd genomen door de bedienaars: alleen zij kunnen de kering sluiten en weer openen.

Het kan echter gebeuren dat de (al dan niet aanwezige) bedienaars geen commando tot het sluiten van de kering geven, terwijl de situatie vergt dat sluiting noodzakelijk is. Om een dergelijk falen van de (menselijke) bediening te ondervangen, is het noodsluitsysteem (NSS) ontworpen. Dit systeem sluit de kering automatisch als de waterstand een grenspeil bereikt, maar het bedienend personeel geen sluitcommando geeft.

Het noodsluitsysteem moet derhalve kunnen bepalen wanneer een sluiting noodzakelijk is. Bovendien moet het systeem een genomen beslissing kunnen uitvoeren, dat wil zeggen dat het de benodigde energievoorzieningen moet kunnen activeren en de schuifinstallaties moet kunnen aansturen.

De beslissing tot het sluiten of openen van de kering wordt gebaseerd op de waterstanden van de Oosterschelde en de Noordzee. Hiertoe zijn twee peilmeetstations opgesteld aan weerszijden van de kering. De gemeten waterstanden worden continu doorgeseind aan een besluitvormingssysteem dat bestaat uit twee computers (de NSS-computers). Deze computers zijn om praktische redenen ondergebracht in het centraal bedieningsgebouw; zij worden bewaakt door het beslis- en simulatiesysteem (figuur 7.1).

Bij het bereiken van vooraf ingestelde, kritieke parameters (grenspeil) beslissen de NSS-computers tot het sluiten of weer openen van de kering. Hiertoe geven de computers opdracht aan de startautomaat. Deze stelt de twee dieselcentrales in werking en zorgt ervoor dat alle onderdelen van de kering van energie worden voorzien via de schakel- en verdeelstations. Vervolgens geeft de startautomaat aan alle schuifinstallaties (LCC's) het sein 'sluiten' door; dit sein loopt rechtstreeks van de startautomaat naar de schuifinstallaties via de veilige verbinding.

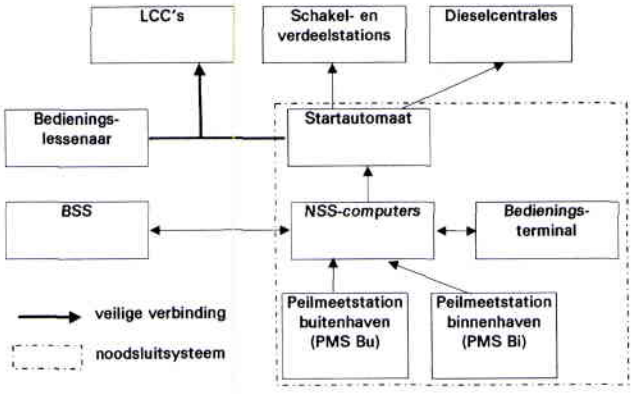
Op een bedieningsterminal kunnen de meetstanden en de status van de NSS-computers worden afgelezen. Bovendien kunnen hiermee aan de NSS-computers commando's worden gegeven, bijvoorbeeld bij een storing in de verbinding tussen het BSS en het NSS of bij onderhoud.

In het noodsluitsysteem spelen de volgende onderdelen een cruciale rol:
- de peilmeetstations voor het bepalen van de waterstanden;
- een betrouwbare verbinding tussen de peilmeetstations en de NSS-computers;
- de NSS-computers voor de besluitvorming;
- een startautomaat voor het uitvoeren van een genomen beslissing.

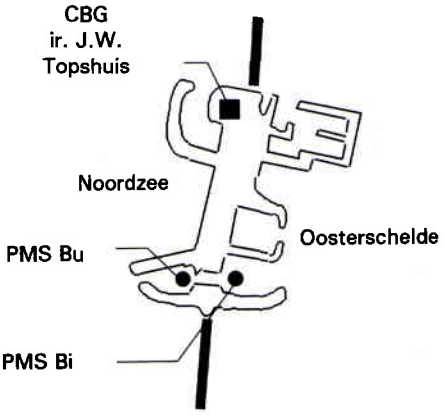
7.1 Peilmeetstations

Het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) heeft berekend dat meting van de waterstand in de voorhavens van de Roompotsluis de meest representatieve meetwaarden oplevert. Daarom zijn er twee peilmeetstations geplaatst in respectievelijk de binnenhaven (PMS Bi) en de buitenhaven (PMS Bu) van de Roompotsluis (zie figuur 7.2).

Elk peilmeetstation bestaat uit een ronde, stalen paal van drie meter doorsnede. Daarin zijn compartimenten aangebracht voor de meetruimte en de instrumentatieruimte.



Figuur 7.1 Overzicht noodsluitsysteem



Figuur 7.2 Locatie peilmeetstations

Ter verhoging van de betrouwbaarheid zijn in de meetruimte van een PMS drie onafhankelijk werkende meetsystemen opgesteld. Elk meetsysteem heeft een eigen voedingseenheid die is aangesloten op de laagspanningsverdeling van de Roompotsluis.

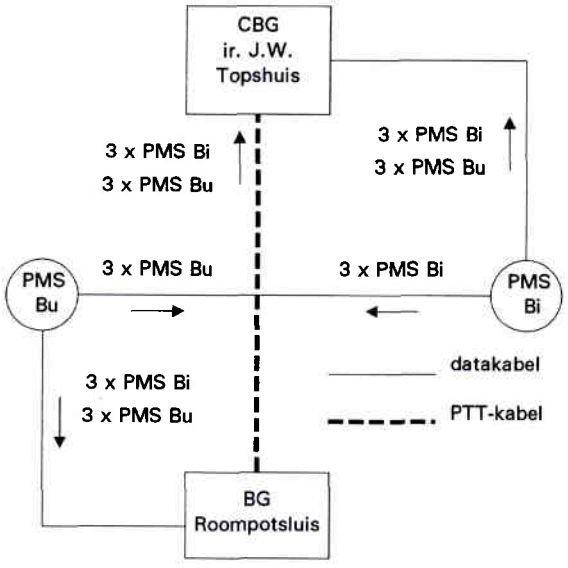
Een meetsysteem bestaat uit een verticale, kunststof buis die met het water in verbinding staat. Hierin hangt een gekalibreerde, koperen vlotter. De positie van de vlotter wordt iedere 1,25 seconde afgelezen. Om dit mogelijk te maken, is de vlotter opgehangen aan een metalen band die boven, in de instrumentatieruimte, een roterende codegever aanstuurt. De codeschijven in de codegever worden door een microprocessor afgelezen. De microprocessor middelt acht opeenvolgende meetwaarden. Dit gemiddelde over tien seconden is het uitgangssignaal van een niveaumeting.

7.2 Communicatie en verbindingen

Elke tien seconden moeten er drie meetwaarden van PMS-Bi en drie meetwaarden van PMS-Bu naar de NSS-computers worden geleid. Elk van de zes meetwaarden wordt afzonderlijk verzonden met een eigen modem en via een eigen ader in de bekabeling.

Omwille van de betrouwbaarheid zijn de verbindingen tussen de peilmeetstations en de NSS-computers redundant uitgevoerd: elke meetwaarde wordt via twee verschillende trajecten naar het CBG verzonden. Deze trajecten lopen als volgt (figuur 7.3):

1. de drie signalen van het peilmeetstation in de Buitenhaven (PMS Bu) lopen eerst naar het meetstation in de Binnenhaven (PMS Bi); vervolgens worden alle zes de meetwaarden gezamenlijk naar het CBG geleid;
2. de drie signalen van het peilmeetstation in de Binnenhaven (PMS Bi) lopen eerst naar het meetstation in de Buitenhaven (PMS Bu); vervolgens worden alle zes de meetwaarden gezamenlijk via het bedieningsgebouw bij de Roompotsluis naar het CBG geleid.



Figuur 7.3 Overzicht communicatie PMS-NSS

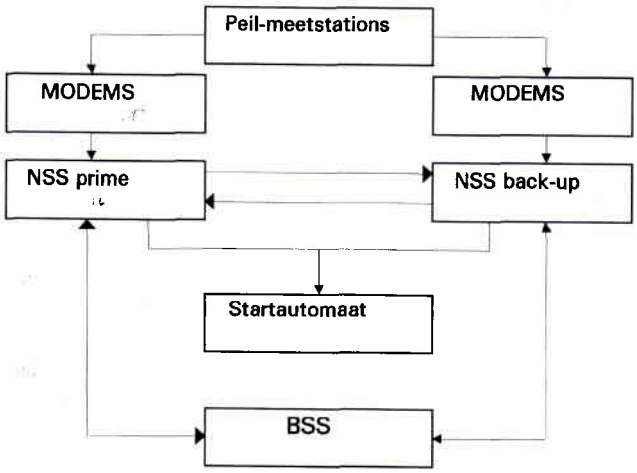
Er zijn vier deeltrajecten die de signalen van de peilmeetstations leiden naar de NSS-computers. Als er een storing optreedt in een van de deeltrajecten, kunnen de meetwaarden nog steeds worden doorgezonden via de andere, intact gebleven deeltrajecten.

Hoewel beide kabels tussen Roompotsluis en het CBG door dezelfde kabelgoot in de verkeerskoker moeten worden gevoerd, is er overal een ruimte van minimaal 80 cm tussen de kabels aangehouden. Dat beperkt de kans dat beide kabels tegelijkertijd worden beschadigd.

7.3 NSS-computersysteem

Voor het verwerken van alle meetwaarden en het aansturen van de startautomaat is een systeem ontworpen met de naam 'NSS-computersysteem'. Het NSS-computersysteem is redundant uitgevoerd volgens het principe van 'hot stand-by' (figuur 7.4). Dat wil zeggen dat twee dezelfde computers elk hetzelfde programma afwerken aan de hand van afzonderlijk aangeboden informatie. Slechts één computer, de prime, stuurt de startautomaat aan. De andere computer, de back-up, neemt de operationele taken over als er een storing optreedt in de prime.

De configuratie en functionaliteit van het noodsluitsysteem zijn bewust eenvoudig en beperkt gehouden voor het bereiken van de vereiste betrouwbaarheid.



Figuur 7.4 Overzicht redundantie NSS-computers

Het NSS-computersysteem heeft de volgende taken:

- het bewaken van de interne werking ('hot stand-by');
- het bewaken van de communicatie met de peilmeetstations;
- het bewaken van de waterstanden;
- het aansturen van de startautomaat;
- het uitwisselen van informatie en commando's met het BSS.

Het bewaken van de communicatie met de peilmeetstations
Iedere 10 seconden moeten nieuwe meetwaarden binnenkomen van de peilmeetstations. Blijven deze meetwaarden gedurende langere tijd uit, dan wordt het peilmeetstation waarvan geen waarden binnenkomen als 'niet-beschikbaar' aangemerkt. Als het peilmeetstation in de Buitenhaven niet beschikbaar is en de waterstand in het Oosterscheldebekken een vooraf opgegeven kritieke waarde bereikt, dan wordt veiligheidshalve het commando 'sluiten' gegeven. Ook als geen van beide peilmeetstations beschikbaar is, wordt het commando 'sluiten' gegeven.

Het bewaken van de waterstanden
De NSS-computers berekenen de waterstand van de Noordzee of de Oosterschelde uit de drie ontvangen metingen van een peil-

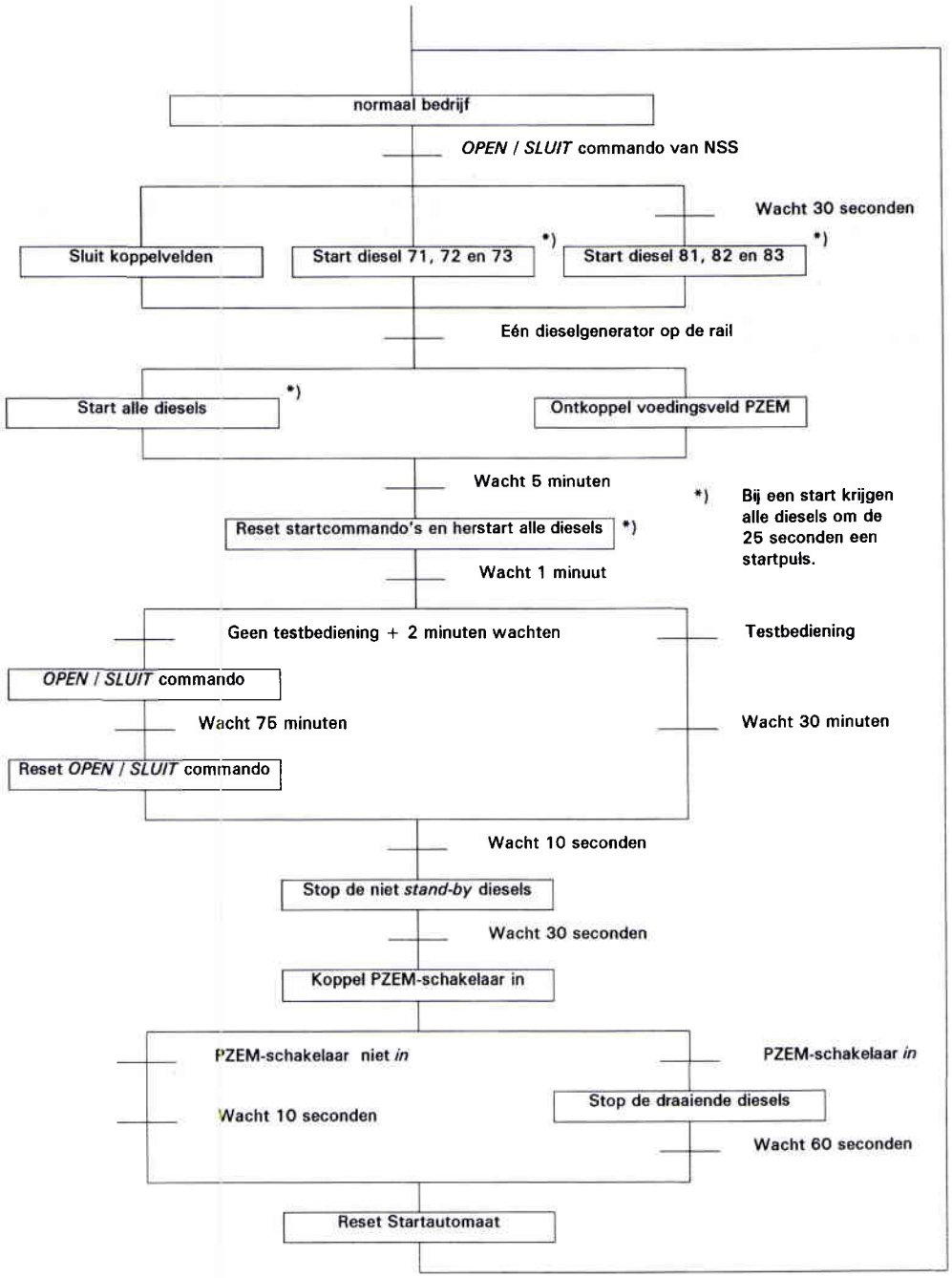
meetstation. Deze metingen worden eerst gevalideerd op grond van de volgende criteria:

- binnen een maximale afwijking ten opzichte van de vorige meetwaarde;
- binnen een maximale afwijking ten opzichte van de valide meetwaarden van de andere twee meetsystemen van het peilmeetstation;
- binnen een minimaal en maximaal toegestane meetwaarde.

Als een meetwaarde niet aan deze criteria voldoet, dan wordt zij als 'niet-beschikbaar' aangemerkt en buiten beschouwing gelaten. Zijn alle drie de meetwaarden niet-beschikbaar, dan krijgt ook het peilmeetstation de status 'niet-beschikbaar'.

De NSS-computers berekenen de waterstand als het gemiddelde van de geldige metingen. Op grond van de zo verkregen waterstanden aan weerszijden van de kering, wordt bepaald of er tot sluiten of openen moet worden overgegaan. Als de waterstand aan één van beide zijden van de kering hoger is dan een vooraf ingesteld grenspeil, zal het commando 'sluiten' worden gegeven. Als na een noodsluiting de waterstand van de Noordzee weer gelijk is aan de waterstand in het Oosterscheldebekken, zal het commando 'openen' worden gegeven, tenzij de menselijke bediening dat met een speciale instructie heeft verboden.

Het uitwisselen van informatie en commando's met het BSS
De NSS-computers zijn verbonden met het beslis- en simulatiesysteem (BSS). Dat heeft een aantal redenen.



Figuur 7.5 Volgordediagram noodsluitproces

In de eerste plaats heeft het BSS de waterstanden nodig voor het uitvoeren van zijn hoofdtaak (strategie-advies). Hiervoor ontvangt het BSS gevalideerde meetwaarden van het NSS. In de tweede plaats biedt het BSS de menselijke bediening de mogelijkheid het NSS te beheren:

- via het BSS kunnen nieuwe besliswaarden aan het NSS worden verstrekt;
- via het BSS kunnen sensoren, die niet-betrouwbaar zijn verklaard, worden afgemeld;
- via het BSS kan het NSS worden verboden de kering automatisch te openen na een noodsluiting.

Bovendien bewaakt het BSS het functioneren van het noodsluitsysteem. Als het noodsluitsysteem geen betrouwbare meetwaarden aflevert of anderszins niet naar behoren functioneert, brengt het BSS hiervan de bedienaars op de hoogte, hetzij door het genereren van een alarm, hetzij door het oproepen van personeel.

7.4 Startautomaat

De startautomaat is een uit relais opgebouwde schakeling die een commando van het noodsluitsysteem, zonder menselijke tussenkomst, doorgeeft aan de dieselcentrales en de veilige bedieningsinstallatie in het centrale bedieningsgebouw (figuur 7.5).

Als het noodsluitsysteem een commando aan de startautomaat heeft gegeven, is het gedurende 90 minuten niet mogelijk het commando ongedaan te maken of het in beweging gezette proces te onderbreken. De alternatieve bediening via het wandpaneel of de beeldschermbediening, en de veilige bediening via de bedieningslessenaar zijn dan uitgeschakeld.

Een commando van het noodsluitsysteem wordt door het BSS waargenomen. Het BSS roept vervolgens via de telefoondoormelder het benodigde personeel op.

Wanneer het noodsluitsysteem een commando geeft, krijgen alle dieselgeneratoren gestaffeld een onvoorwaardelijk startcommando. Verwerking van dit commando vindt verder in de dieselcentrales plaats.

Naast het starten van de diesels, worden door de startautomaat ook de koppelvelden en het PZEM voedingsveld automatisch ingeschakeld.
Na deze handelingen zijn alle onderdelen van de kering van energie voorzien. Daarna wordt het *open*- dan wel *sluit*-commando gegeven via de veilige bediening. Het verloop van dit proces is conform het handmatig gegeven commando vanaf de bedieningslessenaar (hoofdstuk 4).

Voor testdoeleinden is de startautomaat voorzien van een testschakelaar. Hiermee kan de werking van de startautomaat worden gecontroleerd, zonder dat de uitvoerende commando's aan de dieselcentrales, schakelstations en LCC's worden doorgegeven.

8. Uitvoeringsaspecten

Omdat de leveranciers zelf moeten aantonen dat de apparatuur in de elektrische installatie voldoet aan de gestelde eisen, zijn effectieve controleprogramma's van het productieproces geëist. Hierin moeten de leveranciers aangeven hoe de apparatuur is gemaakt en hoe de kwaliteit is gewaarborgd. De controleprogramma's zijn dus niet alleen gebaseerd op de gestelde eisen aan de apparatuur, maar ook op alle noodzakelijke aspecten om die eisen te realiseren. De kwaliteit van de apparatuur is tenslotte afhankelijk van de controles die leveranciers uitvoeren tijdens alle stappen in het productieproces: van het ontwerp en de ontwikkeling, tot aan het testen en de serieproductie van apparatuur.

De levering en montage van de energielevering, -opwekking en -distributie van de kering is gebaseerd op een door Rijkswaterstaat *op voorhand* geleverd uitvoeringsgereed ontwerp. In dit ontwerp was alle apparatuur reeds met naam en type genoemd en waren alle gestelde eisen en functies aan de installatiedelen gedetailleerd weergegeven. Hoewel ook voor deze apparatuur controleprogramma's zijn opgezet, zijn deze niet zo ingrijpend geweest als voor de ontwikkeling van de bediening en besturing. Immers, de betrouwbaarheid van dit deel van de elektrische installatie was tijdens het detailontwerp al beoordeeld; daarbij was uitgegaan van in de praktijk reeds getoetste en toegepaste standaard fabrikaten. De controle op de kwaliteit kon hier worden beperkt tot het doen van afnametesten van de apparatuur bij de leveranciers.

Anders ligt het met de bediening, besturing en bewaking, waarvan de ontwikkeling en detaillering van de hard- en software grotendeels bij de leverancier was neergelegd. Eerst moesten systemen en programmatuur *aan de hand van functionele* eisen worden ontworpen, daarna kon tot uitvoering worden overgegaan. Teneinde hier een goede controle op de kwaliteit te hebben, is door de leverancier een projectplan van het gehele productieproces opgezet waarin de controleprogramma's zijn geïntegreerd. Uitgangspunt bij de ontwikkeling was het toepassen van standaard op de markt verkrijgbare systemen en bouwcomponenten (hardware), en het uitwerken van een systematische ontwikkelingsmethode voor de computerprogrammatuur (software) die resulteerde in een modulaire programmering.

In dit hoofdstuk wordt hoofdzakelijk ingegaan op de ontwikkeling en beoordeling van de bediening, besturing en bewaking. Daarbij ligt het accent op de lokale installaties, omdat van de lokale apparatuur een hogere betrouwbaarheid wordt gevraagd dan van de centrale apparatuur. De beschrijving van de ontwikkeling is echter ook van toepassing op de centrale installatie.

8.1 Productieproces

De productie van de hard- en software voor bediening en besturing verliep volgens het door de leverancier opgestelde projectplan. In het projectplan waren alle fasen in het productieproces ingepland *en nauwkeurig omschreven*: het opstellen van een gedetailleerd functioneel ontwerp, waarbij een zo hoog mogelijke betrouwbaarheid van de systemen centraal stond, het ontwikkelen van de systemen, waarbij een groot aantal proefmodellen moest worden gefabriceerd, en het uitgebreid testen van de gebouwde proefmodellen. Daarna kon de ontwikkelde apparatuur door de opdrachtgever worden geaccepteerd en tot serieproductie worden overgegaan. Ten slotte konden de geproduceerde systemen in de stormvloedkering worden geïnstalleerd en kon de eindafname plaatsvinden.

De leverancier moest onder andere een filosofie van het model schrijven, waarin de eisen die aan ieder gefabriceerd model moesten worden gesteld, waren gespecificeerd. Bovendien beschreef de leverancier voor ieder model in elke fase de status van de hardware, de software en de *documentatie*. De volgende modellen zijn gehanteerd:

- een omgevingsmodel en een gedragsmodel dat de opdrachtgever aan de leverancier leverde en op basis waarvan een functioneel ontwerp kon worden gemaakt
- een breadboardmodel, een kwalificatiemodel en een prototypemodel die werden gebouwd tijdens het ontwikkelingsproces en uitgebreid werden getest
- een seriemodel op basis waarvan de opdrachtgever het systeem kon accepteren, en waarna tot serieproductie kon worden overgegaan.

8.2 Ontwerp

Rijkswaterstaat leverde een globaal functioneel ontwerp aan de leverancier. Dit ontwerp omvatte een beschrijving op hoofdlijnen van alle functies van de te ontwikkelen hard- en software. Daarbij waren zowel de omgeving waarin de systemen moesten functioneren, als het gedrag van de systemen gespecificeerd in een omgevings- en gedragmodel. Het was vervolgens aan de leverancier om systemen te ontwikkelen die aan deze specificaties voldeden. Hiertoe moest de leverancier eerst een plan ontwikkelen om een zo hoog mogelijke betrouwbaarheid van de systemen te verkrijgen (betrouwbaarheidsengineering).
De betrouwbaarheidsengineering maakte het mogelijk om de betrouwbaarheid van de systemen te analyseren, te kwantificeren en te voorspellen.

De betrouwbaarheidsengineering omvatte vier deeltaken:

1. Het opstellen van richtlijnen en eisen voor het systeemontwerp
De *richtlijnen voor het systeemontwerp* zijn aanwijzingen aan de ontwerpers en bouwers voor de inrichting en opzet van het systeem en de programmatuur, om aan de betrouwbaarheidseisen te voldoen. Deze richtlijnen zijn opgenomen in de ontwerp- en bouwstandaards van het kwaliteitscontroleprogramma. Het ontwerp en het eindresultaat zijn getoetst aan deze standaards. Een

van de richtlijnen was het beperken van het aantal taken, de verwevenheid en de diepgang. Onderdeel van de *Eisen voor het systeemontwerp* was dat kritische programmadelen op last van de opdrachtgever via een bepaalde structuur ontwikkeld moesten worden. Een aantal eisen vloeide voort uit de analyses van de betrouwbaarheidsengineering.

2. Het uitvoeren van een Function Failure Analysis en een Failure Model Effects and Critical Analysis
Function Failure Analysis (FFA) vindt plaats op conceptueel en functioneel niveau, waarbij de gevolgen voor een systeem worden geanalyseerd als er bepaalde functies wegvallen. Failure Model Effects and Critical Analysis is een uitbreiding van FFA naar het technische niveau. Hierbij worden alle mogelijke foutsituaties vastgelegd, waaronder oorzaken, effecten, detectiemethoden en compenserende maatregelen. De analyses werden niet alleen gebruikt voor de richtlijnen voor systeemontwerp en bouw, maar vormden ook de basis voor de testengineering en voor het onderhoud in de nazorg.

3. Het uitvoeren van een betrouwbaarheidsanalyse
Bij de betrouwheidsanalyse wordt via betrouwbaarheidsmodellen het ontwerp geëvalueerd en verbeterd. Specifiek op het gebied van de applicatiebouw kunnen additionele maatregelen genomen worden om de kwaliteit van de programmatuur en daarmee de betrouwbaarheid van het hele systeem te garanderen. De betrouwbaarheidsanalyse heeft er onder andere toe geleid dat systeemdelen dubbel zijn uitgevoerd en in tal van ondefinieerbare situaties, defaults en procestoestanden zijn vastgesteld.

4. Het opstellen van een Reliability Qualification Testplan
Het Reliability Qualification Testplan (RQT) beschrijft hoe de beschikbaarheid en betrouwbaarheid van het gerealiseerde systeem aangetoond moet worden.

De conclusies van de betrouwbaarheidsengineering moesten in het ontwerp worden verwerkt en gedocumenteerd. Vervolgens werd het ontwerp op basis van deze kritische aandachtspunten gerealiseerd en gecontroleerd. De kritische aandachtspunten die uit de betrouwbaarheidsengineering voortvloeiden, zijn eerst via design-reviews aan de opdrachtgever kenbaar gemaakt. Hiervoor waren twee formele reviews afgesproken:

1. Preliminary Design Review
Doelstelling van het Preliminary Design Review (PDR) was het scheppen van voorwaarden die leidden tot een optimaal ontwerp. Het ontwerp werd doorgelicht aan de hand van het conceptontwerp, de ontwerpbenadering, de technische eisen en specificaties, de opgestelde testprogramma's, de betrouwbaarheidsanalyses, de documentatie-eisen, de eisen aan omgevingscondities en dergelijke. Op basis van de resultaten van het Preliminary Design Review kon het projectverloop worden gecontinueerd. Het PDR was in het project ingepland op een moment dat alle modificaties effectief en optimaal konden worden geïmplementeerd.

2. Critical Design Review
Het Critical Design Review (CDR) werd gehouden vóórdat de definitieve software- en hardwarefabricage zouden worden gestart. Het doel van het Critical Design Review was vast te stellen of het ontwerp voldeed aan de contractuele voorwaarden, waarna de uiteindelijke productiespecificaties konden worden vrijgegeven. De leverancier diende een testprogramma op te stellen dat de gehele projectgang omvatte en in fasen opklom tot veldtestniveau. Van alle uit te voeren tests dienden testprogramma's, testrapporten en logboeken te worden bijgehouden. Bij de offerte heeft de leverancier een concept van zowel het kwaliteitscontroleprogramma als van het projectplan aangeboden. Tevens heeft de leverancier een gedetailleerde projectplanning verstrekt, waarin alle items van het projectplan verwerkt waren.

8.3 Fabricage

Voor de fabricage van een systeem diende van een bepaalde filosofie van het model te worden uitgegaan. Zowel voor de hardware als de programmatuur zijn een breadboard- en een kwalificatiemodel gehanteerd. Bij de fabricage van de hardware werd tevens een prototype-model ontwikkeld.

8.3.1 Hardwaremodellen

Breadboard-model
Het breadboard-model diende ter ondersteuning van de fabricageactiviteiten en moest bij afsluiting van de fabricage overeenkomstig de specificaties functioneren en onderwerp zijn van de te houden design-reviews. Op dit niveau werd de installatie van een LCC samengesteld voor toetsing aan de ontwerpcriteria.

Kwalificatie-model
Het kwalificatie-model diende ter ondersteuning van de engineeringsactiviteiten en werd bij afsluiting van de engineering tijdens het Critical Design Review getoetst aan de omgevingscondities. Er werd onderscheid gemaakt tussen de kwalificatiemodellen I en II, waarbij een test met het eerste model werd afgerond voordat kon worden gestart met het Critical Design Review. De functie van het kwalificatie-model II is beperkt gebleven tot de functionele behuizing met alle naar buiten uitgevoerde mechanische interfaces.

Prototype-model
Het prototype-model, waaraan aan de hand van het testresultaat formeel goedkeuring werd gegeven voor fabricage, was identiek aan de later in serie geproduceerde systemen. Op dit prototype zijn de acceptatie- en kwalificatietest op ontwerpbasis uitgevoerd.

8.3.2 Softwaremodellen

Breadboard-model
De software van het breadboard-model moest na afsluiting van de eerste ontwerpfase alle gespecificeerde functies vervullen, terwijl bij de vrijgave tot de bouw van de definitieve software dit pakket "gedebugd" is en voorzien is van in-line testfaciliteiten. In-line testfaciliteiten zijn interne controles op het functioneren van systeem en programmatuur. On-line testfaciliteiten zijn aangebracht in verband met periodiek onderhoud. Gedurende het ontwikkelingsproces zijn foutzoekprogramma's en functioneringstests uitgevoerd om onjuist of afwijkend gedrag van de programmatuur op te sporen.

Kwalificatie-model
De uiteindelijke testprogramma's moesten alle goed-functies en verder zoveel mogelijke foutsituaties onderzoeken. Bij instructies waar sprake was van keuzes in de diversiteit van de te volgen programmawegen, zijn alle mogelijkheden uitgetest. Gegevens over computerbelasting en geheugenbezetting zijn vervolgens in overleg vastgesteld alvorens de productie werd vrijgegeven. Verder is aandacht besteed aan de volgende aspecten:
- timing, zoals looptijden, reactietijden en responstijden;
- robuustheid (operator-bestendigheid);
- bedieningsparameters;
- modificeerbaarheid (lokaal door PROM-wijziging);
- onderhoudbaarheid;
- uitbreidbaarheid.

8.4 Beproeving

Het doel van de diverse tests was om aan te tonen dat het systeem, het deelsysteem of de unit voldeed aan de eisen die waren gedefinieerd en gespecificeerd in de ontwerpdocumentatie.
De module- en/of unittests speelden zich af op programma- en moduleniveau en zijn uitgevoerd door de ontwerpers en programmeurs. Zij werkten in hun eigen testomgeving en met hun eigen testgegevens. Op het moment van opleveren werden de programma's overgebracht naar de integratie-testomgeving en werd er vanaf dat moment op de programma's, hun documentatie en testresultaten, configuratiebeheer toegepast. De programma's en hun documentatie werden dan ook alleen nog maar volgens de regels en procedures binnen het configuratiebeheer gewijzigd.

De leverancier droeg de zorg voor het uitvoeren van de onafhankelijke, integratie- en systeemtests, die als volgt moesten zijn samengesteld en worden aangepakt:

Onafhankelijke tests
Ieder zelfstandig systeemonderdeel werd eerst onafhankelijk en los van de rest getest op het testsysteem. Daarbij werden alle in- en externe interfaces, die gegevens toeleveren, gesimuleerd. Er werd, zoals voor alle testcycli, gewerkt op basis van een testplan en van testspecificaties. De resultaten werden vastgelegd in testprotocollen.

Integratie- en regressietest
Nadat de onafhankelijke tests succesvol waren beëindigd, volgde integratie van het systeemdeel in de integratie-testomgeving, waarna de integratietest volgde. Deze tests dienden om te onderzoeken of de hardware- en software-deelsystemen goed samenwerken. De regressietest onderzoekt of de al eerder geïntegreerde systeemdelen na het toevoegen van nieuwe systeemdelen nog steeds correct werken. Niet aanwezige functionaliteit en interfaces werden ook nu weer gesimuleerd. Dit integreren op basis van het integratietestplan en de testspecificaties ging door tot het systeem compleet was. Alle resultaten werden gedocumenteerd in de integratie-testprotocollen. Werden fouten geconstateerd, dan volgde via de wijzigingsprocedure van configuratiebeheer het verzoek aan het bouwteam tot wijziging. De testcyclus voor dit specifieke programma startte dan weer van voren af aan.

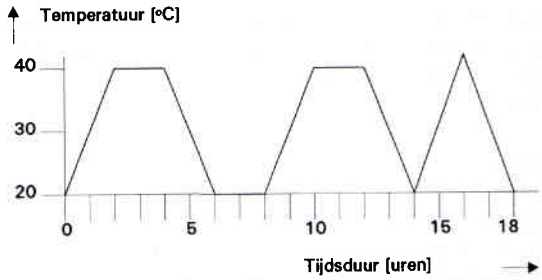
Systeemtest
De systeemtest richtte zich op het systeem als geheel en beoordeelde of de prestaties van het geïntegreerde systeem voldeden. De systeemtest werd uitgevoerd in de systeem-testomgeving op basis van het systeem-testplan en de systeem-testspecificaties. De resultaten werden vastgelegd in testprotocollen. Bij een geslaagde test werd het complete systeem overgebracht naar de acceptatie-testomgeving en voor acceptatie aan de opdrachtgever ter beschikking gesteld.

8.4.1 Omgevingsbeproeving

Het beproevingsprogramma voor de apparatuur, die gebruikt is voor de schuifbesturing en -bewaking, bevatte eisen met betrekking tot de optredende omgevingscondities. De volgende tests zijn uitgevoerd:
- klimaattesten;
- zoutneveltest;
- voedingsspanning-variatietest.

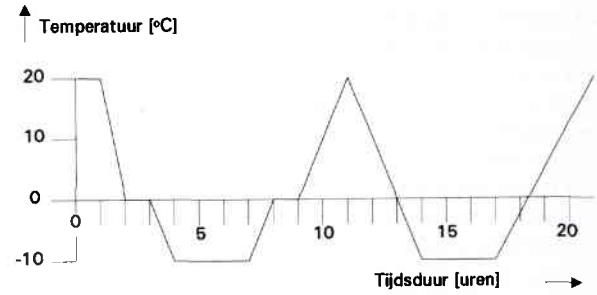
Klimaattesten
De klimaattesten moesten aantonen of de apparatuur volgens de specificaties bleef functioneren bij temperatuurschommelingen en een hoge luchtvochtigheid. De test bestond uit drie delen:
- een warmtetest;
- een koudetest;
- een luchtvochtigheidtest.

Warmtetest
De warmtetest beproefde de apparatuur op temperatuurschommelingen tussen de 20 en 40°C gedurende achttien uur (figuur 8.1). Dit is conform de militaire norm MIL 810c. De apparatuur, zonder de behuizing, moest blijven functioneren volgens de specificaties.



Figuur 8.1 Temperatuurverloop warmtetest

Koudetest
De koudetest beproefde de apparatuur op temperatuurschommelingen tussen de 20 en -10°C gedurende twintig uur (figuur 8.2). Dit is conform de militaire norm MIL STD 810c. De apparatuur, zonder de behuizing, moest blijven functioneren volgens de specificaties.



Figuur 8.2 Temperatuurverloop koudetest

Luchtvochtigheidtest
De luchtvochtigheidtest beproefde de apparatuur op een hoge relatieve luchtvochtigheid. De test werd uitgevoerd volgens de internationale norm IEC 6-2-4. Een testcyclus duurde 24 uur. Eerst werd de temperatuur verhoogd tot 40°C bij een relatieve luchtvochtigheid van 80-100%. Hierbij moest condensatie op het testobject optreden. Daarna werd gedurende zestien uur de relatieve luchtvochtigheid tussen de 95 en 100% gehouden. Minstens vier keer per uur moest de temperatuur tussen de 30 en 42°C schommelen zodat vocht op het testobject condenseerde. Ten slotte werd de temperatuur weer verlaagd, en de relatieve luchtvochtigheid tot 80-100% teruggebracht.

De testcyclus werd twee keer uitgevoerd. De apparatuur, zonder de behuizing, moest blijven functioneren volgens de specificaties.

Aan de centrale installatie (CCC) werden aanzienlijk lagere klimaateisen gesteld dan aan de lokale installatie (LCC):
- werktemperatuur: -5 tot +40°C;
- relatieve luchtvochtigheid: 0 tot 95% zonder condensatie;
- opslagtemperatuur: -10 tot +60°C;
- temperatuurschommelingen: 10 °C per uur;
- druk: 860-1060 mBar.

Daarnaast werden de volgende omgevingseisen aan de centrale installatie gesteld:
- magnetische veldsterkte < 4000 A/m;
- geluid < 55 dB op één meter afstand.

Zoutneveltest
De zoutneveltest beproefde de corrosiebestendigheid van de apparatuur en de behuizing, inclusief alle mechanische onderdelen die met de buitenlucht in aanraking komen, zoals kabels, connectoren en schakelaars. De test werd uitgevoerd volgens de militaire norm MIL STD 810c, methode 509, met als testparameters:
- zoutconcentratie : 10 %
- testduur : 96 h
- temperatuur : 40°C.

Na afloop van de test moest uit een visuele inspectie blijken in hoeverre de behuizing en overige materialen waren aangetast of beschadigd.

Voedingsspanning-variatietest
Tijdens deze test diende de apparatuur volgens de specificaties te blijven functioneren. De voedingsspanning-variatietest werd onderverdeeld in:
- spanningsvariaties; ±10%
- frequentievariaties; ±5% (t.o.v. 50 Hz)
- spanningsonderbrekingen; van 1,5 tot 5 msec.
- korte symmetrische en asymmetrische op de spanning gesuperponeerde stoorpulsen

De apparatuur mocht niet defect raken bij:
- spanningsvariaties; ±20%
- frequentievariaties; ±10% (t.o.v. 50 Hz)
- spanningsonderbrekingen; 5 msec.
- zwaardere korte symmetrische en asymmetrische op de spanning gesuperponeerde stoorpulsen

8.4.2 Mechanische beproeving

Trillingen
Triltests werden uitgevoerd om materiaal- en constructiefouten te detecteren in verband met optredende mechanische belastingen. Allereerst werd met een aanstoting van ongeveer 0,3 g in het frequentiegebied van 0-500 Hz een resonantie-onderzoek in x-, y- en z-richting uitgevoerd, waarbij op bepaalde punten de opslingering bepaald werd. De uitslag van dit onderzoek was bepalend of het systeem voor verdere proefneming geschikt was.
De proefneming bestond uit het uitvoeren van de trillingstest volgens de methode MIL STD 810c, 514,2 categorie c. De testparameters waren:
- 0-52 Hz verplaatsing 0.018 inch;
- 52-500 Hz constante versnelling 2g.

Valtest
De valtest diende om aan te tonen of de apparatuur bestand was tegen bij transport voorkomende schokken. De test werd zodanig uitgevoerd dat een bij transport of andere handeling voorkomende val werd gesimuleerd door de apparatuur op een hoogte van 50 cm te plaatsen. De valtest is twee achtereenvolgende keren uitgevoerd.

8.5 Acceptatie

Het eerste, volgens de methode van de serieproductie geproduceerde apparaat werd bestempeld als schouwmodel en werd volgens de hierna volgende acceptatie-eisen afgenomen. Na goedkeuring van het schouwmodel werden de seriematig geproduceerde apparaten afgenomen, eveneens volgens de hierna volgende eisen, waarbij de nadruk lag op de aspecten productie- en componentenspreiding. Het was aan de leverancier om aan te tonen dat de apparaten voldeden aan de eisen.

Deze acceptatieprocedure maakte het mogelijk om de doelmatigheid van de afnameprocedure van de in serie geproduceerde apparaten reeds te testen op het prototype. Bovendien maakte de procedure het mogelijk om naar aanleiding van de keuring van het schouwmodel, correcties aan te brengen in ontwerp, productiemethode en afnamespecificaties.

Acceptatie-eisen seriemodel
De eisen voor afname van de seriematig geproduceerde apparaten waren ontleend aan de apparatuurspecificaties. Aan de hand van deze eisen diende de leverancier een acceptatietest op te stellen. De acceptatietest bestond uit een:
- visuele inspectie;
- inbrandtest;
- functionele test.

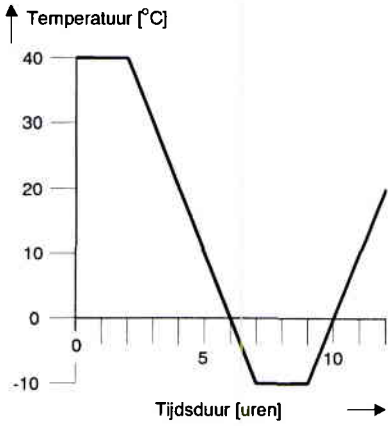
Visuele inspectie
Nadat het systeem al of niet gedeeltelijk gedemonteerd was, werd door de afnemer een indruk van de kwaliteit van het systeem gevormd waarbij bekeken werd of het kwaliteitsniveau gehandhaafd was ten opzichte van het voor het prototype (uiteindelijk) geaccepteerde niveau. Hierbij werd gelet op goed vakmanschap en het naleven van specifieke voorschriften en algemeen geldende voorschriften zoals de NEN 1010. Het resultaat van de visuele inspectie was doorslaggevend voor het al of niet voortzetten van de acceptatie.

Inbrandtest
De apparatuur is ook onderworpen aan een inbrandtest. Deze test werd gehouden over een tijdsbestek van zeven dagen (168 uur) exclusief eventuele reparatietijden, waarbij het vereist was dat de apparatuur, op eventuele componentenfouten na, naar behoren functioneerde.

Niet goed functioneren en oorzaken hiervan werden in een logboek bijgehouden. In het logboek werd aangegeven: de storing, tijd, oorzaak en de aard en duur van de correctieve actie. Het logboek diende aan de afnemer ter beschikking te worden gesteld.

De test werd uitgevoerd met de parameters die in figuur 8.3 zijn aangegeven. De apparatuur werd zonder behuizing aan de test onderworpen.

Functionele test
Aan de hand van de specificaties is een functionele test ontworpen om aan te tonen dat de apparatuur correct functioneerde volgens de gestelde specificaties. De functionele test bevatte voor elke functie zowel een goed-test, als een fout-test waarvoor afwijkend gedrag moest worden gecreëerd.

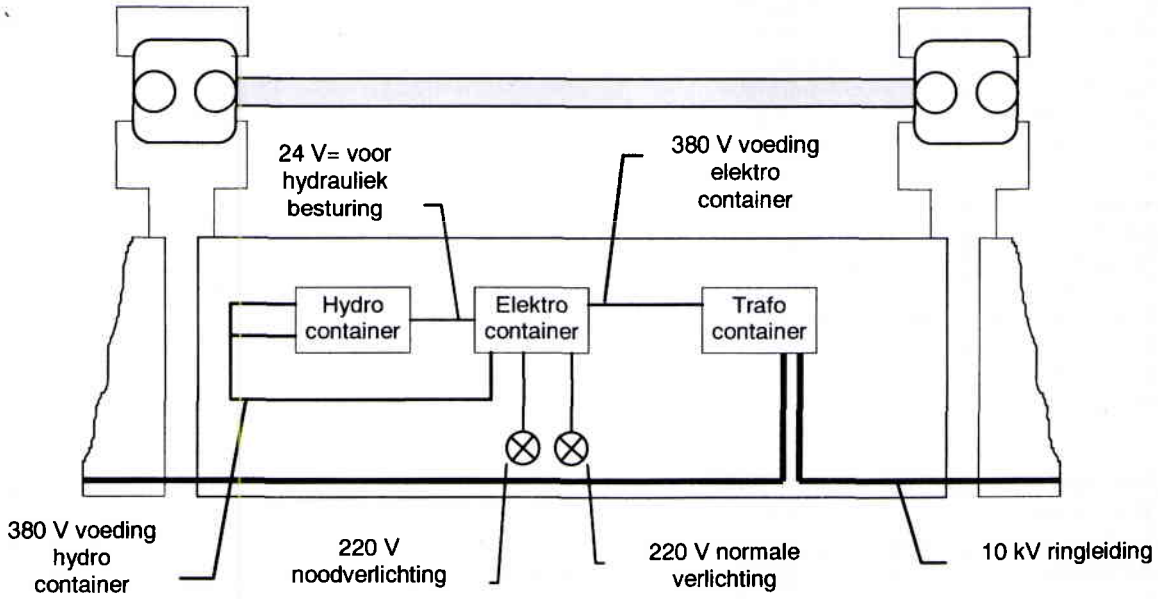


Figuur 8.3 Temperatuurverloop inbrandtest

8.6 Assemblage en montage

De onderdelen van de elektrische installatie zijn geplaatst in de verkeerskokers die horen bij de schuif waarvoor het onderdeel is bedoeld (figuur 8.4). De schuifafhankelijke delen van de elektrische installatie zijn in de koker geplaatst in een elektrocontainer, samen met de bijbehorende lokale besturingsinstallatie. De groepsafhankelijke delen van de elektrische installatie zijn geplaatst in een transformatorcontainer.
Het voordeel van het werken met containers is dat de volledige elektrische installatie getest kon worden voordat ze geplaatst werd. De geteste elektrische installatie kon vervolgens tegelijk met de betreffende verkeerskoker in de stormvloedkering worden aangebracht. De onderlinge verbindingen tussen de containers in een verkeerskoker werden van tevoren aangesloten en getest, zodat na plaatsing van de koker alleen nog de onderlinge verbindingen moesten worden aangesloten. Daarna kon een complete test van dat gedeelte van de installatie plaatsvinden.

Teneinde de levensduur van de installaties zoveel mogelijk te garanderen, zijn de componenten en materialen waar nodig geconditioneerd opgesteld. Bij de keuze van de materialen is rekening gehouden met de invloeden van zout water en met de temperatuur en vochtigheidscondities in de verkeerskokers. Daarom zijn voor de diverse toegepaste materialen de eisen gehanteerd die in de offshore of scheepsbouw gebruikelijk zijn.



Figuur 8.4 Overzicht onderlinge verbindingen containers

9. Beheer en onderhoud

9.1 Beheer van de stormvloedkering

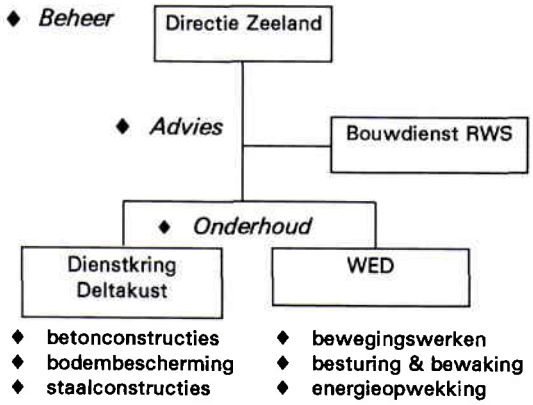
De stormvloedkering in de Oosterschelde wordt beheerd door Rijkswaterstaat (RWS) directie Zeeland (figuur 9.1). De dienstkring Deltakust verzorgt de inspectie en het onderhoud van de civiele constructie, zoals de betonnen pijlers, de onder- en bovenbalken, de verkeerskokers, de stalen schuiven en de bodembescherming.

Inspectie en onderhoud van bewegingswerken, energieopwekking, besturing en bewaking is ondergebracht bij de Werktuigkundige en Elektrotechnische Dienst (WED). In dit hoofdstuk wordt alleen de WED-taak behandeld.

Door het belang van de kering voor de veiligheid van het achterliggende gebied en door de omvang van de installatie, van computers tot energieopwekking, is continu drie man beschikbaar via een storingsdienst. Deze storingsdienst is niet alleen verantwoordelijk voor het oplossen van storingen, maar ook voor de bediening van de stormvloedkering. Hierdoor is voor de volgende bezetting gekozen:
- 4 x 3 personen voor de storingsdienst;
- 1 hoofd stormvloedkering;
- 1 administrateur/magazijnbeheerder.

Door deze relatief grote bezetting wordt een groot deel van het preventief onderhoud door eigen personeel gedaan. Eventuele ondersteuning door de leverancier bij storingen is vastgelegd in het onderhoudscontract dat met de betreffende leverancier is afgesloten.

De storingsdienst is een continu proces waarbij er verschillende procedures zijn voor zowel een bemande als een onbemande kering. De procedures zijn weergegeven in figuur 9.2. Vanwege de gestelde betrouwbaarheidseisen, is het van groot belang dat snel en adequaat wordt gereageerd op storingsmeldingen.



Figuur 9.1 Organigram beheer en onderhoud

9.2 Onderhoud van de stormvloedkering

Om te kunnen blijven voldoen aan de bij het ontwerp gestelde beschikbaarheideisen, dienen alle onderdelen in optimale staat van onderhoud te verkeren. Om het onderhoud te ondersteunen, zijn er twee hulpmiddelen aanwezig:
- het onderhoudsinformatiesysteem;
- het onderhoudshandboek.

9.2.1 Het onderhoudsinformatiesysteem

Het onderhoudsinformatiesysteem (OIS) heeft tot doel om de informatiestromen ten behoeve van het onderhoud te ordenen en daardoor gericht onderhoud te kunnen plegen en eventuele problemen snel te kunnen opsporen.

De belangrijkste onderdelen van het OIS zijn (figuur 9.3):
- het onderhoudsconcept, voortkomend uit de fabrieksvoorschriften en aangepast aan de in de praktijk opgedane ervaringen;
- de planning van het onderhoud, voortkomend uit het onderhoudsconcept;
- functionele testen, zowel tweewekelijks als driemaandelijks;
- preventief onderhoud;
- correctief onderhoud, ten gevolge van storingsmeldingen of opgedane ervaringen.

Het zal duidelijk zijn dat het OIS, door de invloed van praktijkervaringen, een systeem is dat continu aan veranderingen onderhevig is.

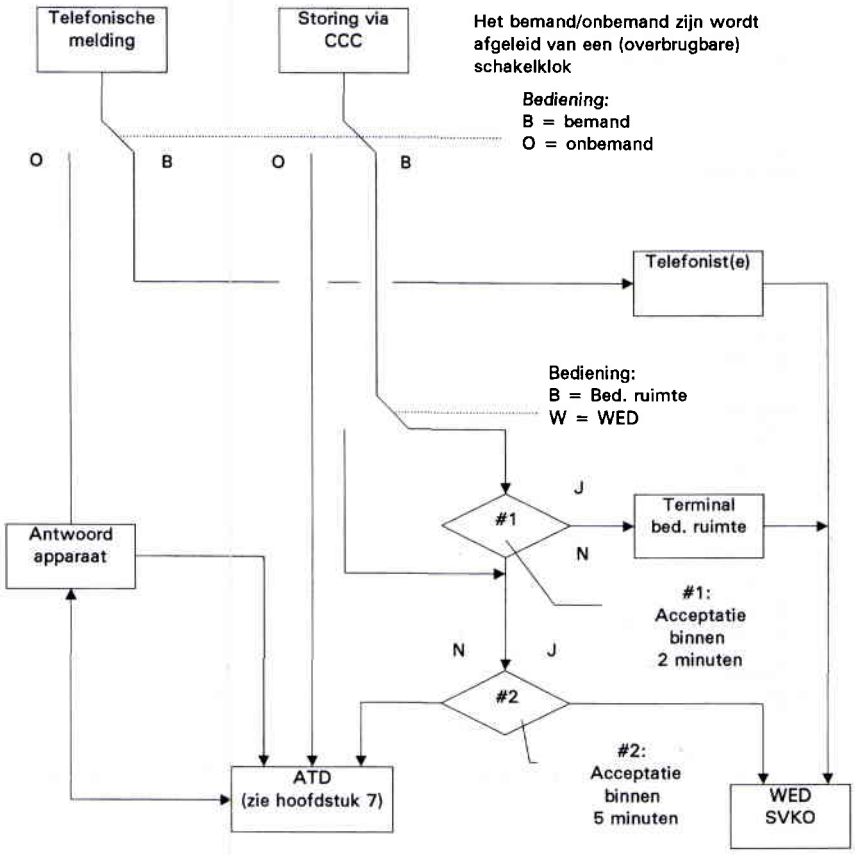
9.2.2 Het onderhoudshandboek

Het onderhoudshandboek bevat gegevens en beschrijvingen van constructies en installaties met daarnaast een groot aantal instructies voor bediening en onderhoud van de geïnstalleerde apparatuur en constructiedelen.

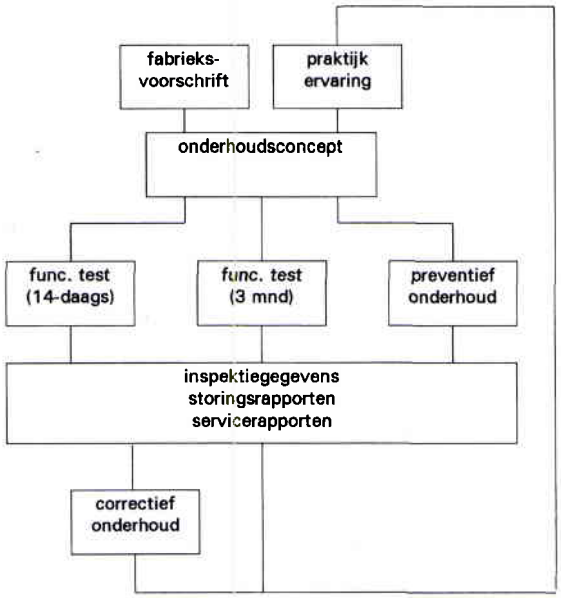
Het onderhoudshandboek is als volgt opgebouwd:
- hoofdstukken met een algemene beschrijving van de werking van de SVKO en de Roompotsluis;
- procedures voor diverse onderhouds- en testwerkzaamheden ten behoeve van de SVKO en de Roompotsluis.

9.2.3 Verschillende typen onderhoud

Met een type onderhoud wordt aangegeven hoe vaak er onderhoud moet worden gepleegd en wat de eventuele consequenties zijn. Er worden twee typen onderhoud onderscheiden:
- correctief onderhoud (SOA);
- preventief onderhoud (TOA en GOA).



Figuur 9.2 Procedure bij storingsmelding



Figuur 9.3 Weergave informatiestromen

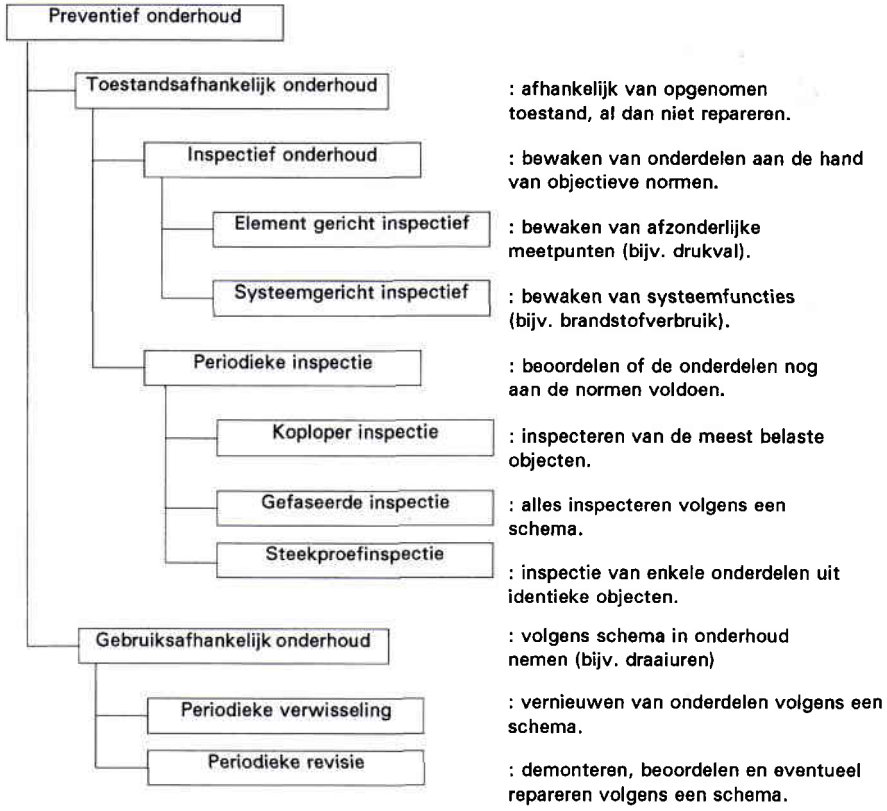
Correctief onderhoud omvat storingsafhankelijk onderhoud (SOA), waarbij een onderhoudsactie wordt ondernomen als er een storing is ontdekt (figuur 9.4). Een bepaalde vorm van correctief onderhoud is opportunistisch onderhoud. Hierbij worden (ingeval van een storing) ook nog functionerende delen vervangen waarvan de verwachting is dat deze op korte termijn een storing zullen veroorzaken.



Figuur 9.4 Splitsing correctief onderhoud

Bij preventief onderhoud wordt een onderhoudsactie ondernomen vóórdat er een storing is ontdekt. Er wordt onderscheid gemaakt tussen toestandsafhankelijk onderhoud (TOA) en gebruiksafhankelijk onderhoud (GOA) (zie figuur 9.5). Toestandsafhankelijk onderhoud bevat hoofdzakelijk het inspecteren, het controleren en het bewaken van installatiedelen volgens vastgestelde normen, instellingen, functies en onderhoudsschema's ter beoordeling of er al dan niet aangepast of gerepareerd moet worden. Gebruiksafhankelijk onderhoud is het aan de hand van onderhoudsschema's vervangen van onderdelen en materialen die hun gebruiksduur hebben gehad. Afhankelijk van de belangrijkheid van een onderdeel of object kan voor één van beide typen of voor beide tegelijk worden gekozen.

Voor de begrippen SOA, TOA en GOA, en voor de raakvlakken van het onderhoud met de bewegingswerken, wordt verwezen naar *deelnota* 5.



Figuur 9.5 Splitsing preventief onderhoud

9.3 Communicatiemiddelen t.b.v. beheer en onderhoud

Voor de veiligheid van het personeel, een efficiënte taakvoering en de algemene bewaking is, zeker voor een complex en uitgebreid object als de stormvloedkering Oosterschelde, een goede communicatie onontbeerlijk.

De wijze waarop en de vorm waarin deze communicatie kan of moet plaatsvinden, wordt in belangrijke mate bepaald door de wijze van taakvervulling van het betrokken personeel en de omstandigheden waaronder dit moet plaatsvinden. Uit de gegevens over het beheer en onderhoud is indertijd een duidelijk beeld naar voren gekomen welke functionele vormen van communicatie moeten worden onderscheiden:

- in tweerichtingsverkeer: spreken en luisteren met al dan niet de mogelijkheid tot oproepen voor het tot stand brengen van de communicatieverbinding (telefoon, werkspreekverbinding e.d.);
- in éénrichtingsverkeer: spreken en luisteren (geluidsinstallatie e.d.);
- in éénrichtingsverkeer: waarneming door een signaal (geluidsinstallatie, oproepinstallaties e.d.);
- in éénrichtingsverkeer: kijken en gezien worden op afstand (tv-installaties e.d.).

Gerelateerd aan deze functionele vormen zijn de volgende communicatiemiddelen op de stormvloedkering aanwezig:

1. telefoon MS-installatie (MS = middenspanning);
2. werkspreekverbinding;
3. automatische telefoondoorkiezer (ATD);
4. geluidsinstallaties;
5. telefoon via PTT-netwerk;
6. tv-installatie;
7. deursignalering en -intercom.

De eerste vier communicatiemiddelen zijn van essentieel belang voor het beheer en het onderhoud van de stormvloedkering en worden hieronder nader beschreven.

9.3.1 Telefoon middenspanningsinstallatie

De telefoon middenspanningsinstallatie is bedoeld om bij een totale spanningsuitval toch een communicatieverbinding op te kunnen bouwen met de op dat moment belangrijkste ruimten, namelijk de middenspanningsruimten. Dit wordt gedaan met een door de stem bekrachtigde telefooninstallatie die geen externe voeding nodig heeft. Hiermee kan men zowel luisteren als spreken.
Een telefoon bestaat uit een microfoon met knijpcontact (handset) die wordt aangesloten op een waterdichte klemmenkast. Oproepen zijn niet mogelijk en er is een verbinding met alle aangesloten telefoons.

Er zijn in totaal 23 handsets aangebracht op de locaties uit tabel 9.1.

9.3.2 Werkspreekverbinding

De werkspreekverbinding brengt een eenvoudige verbinding tot stand die gebruikt wordt tijdens het inbedrijfstellen en onderhouden van de diverse installaties.

De communicatieverbinding bestaat uit een drielijnsverbinding (twee lijnen voor de voeding en één lijn voor luisteren en spreken) waarop waterdichte contactdozen worden aangesloten. De voeding wordt betrokken uit een netvoedingsapparaat van 220V~/9V=. Over de kering zijn verschillende lokale netwerken met ieder een eigen netvoedingsapparaat. Sommige van deze netvoedingsapparaten zijn voorzien van een accubatterij om ingeval van algehele spanningswegval, toch een werkspreekverbinding te behouden.

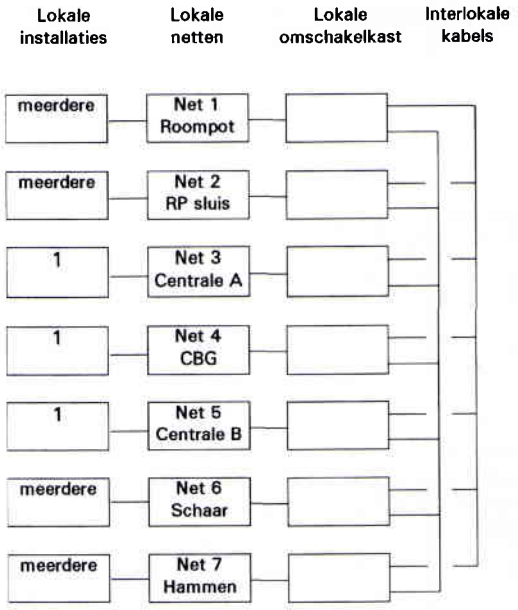
Locatie		Aantal	Microfoon	Telefoon
Centrale bediening	Bedieningslessenaar	1	•	•
Middenspanning	Scheidingstrafo	1	•	•
	Schakelstation A	1	•	•
	Verdeelstation A	1	•	•
	Schakelstation B	1	•	•
	Verdeelstation B	1	•	•
SVKO	Trafocontainers	16	•	•
Roompotsluis	Traforuimte	1	•	•

Tabel 9.1 Locaties handsets telefoon middenspanningsinstallatie

Als communicatiemateriaal worden telemicrofoons toegepast waarvan er twee soorten op de kering aanwezig zijn, namelijk: handsets en hoofdsets, beide uitgevoerd met een tien meter lang aansluitsnoer en een vier-polige stekker die wordt ingeplugd op de waterdichte contactdozen. Alle ingeplugde telemicrofoons zijn direct met elkaar verbonden, waardoor men zowel kan luisteren als spreken. Oproepen is met deze installatie niet mogelijk.

De werkspreekverbinding bestaat uit zeven verschillende, lokale netten, die weer zijn onderverdeeld in een aantal lokale installaties (figuur 9.6). Zo heeft iedere schuifinstallatie een eigen lokale installatie.
De lokale netwerken kunnen via interlokale kabelverbindingen, in de lokale omschakelkast met elkaar worden verbonden. Het omschakelen gebeurt met behulp van een driestandenschakelaar met drie mogelijkheden:
1. lokaal;
2. interlokaal;
3. uit.

In iedere kast, lessenaar of ruimte uit tabel 9.2 is een contactdoos voor de werkspreekverbinding aangebracht.



Figuur 9.6 Overzicht werk-spreekverbinding

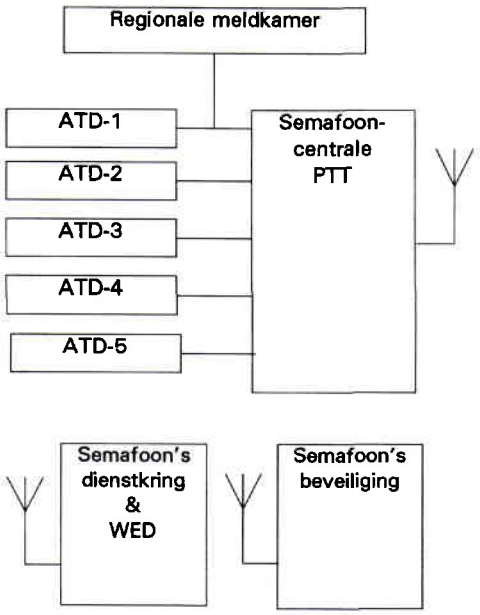
Locatie		Aantal	Plugin-set	Lokaal net	Lokale installaties
Centrale bediening	Bedieningslessenaar	1	•		
	Wandcontrolepaneel	1	•	net 4	1
	CCC	1	•		
Dieselcentrale A	Bedieningsruimte	1	•		
	Schakelruimte	1	•	net 3	1
	Apparatenkasten	6	•		
Dieselcentrale B	Bedieningsruimte	1	•		
	Schakelruimte	1	•	net 5	1
	Apparatenkasten	6	•		
SVKO	Hydrauliekcontainers	63	•		
	Elektrocontainers	62	•		
	Trafocontainers	16	•		
	Conserv. zuid	62	•	net 1, 2,	meerdere
	Conserv. noord	62	•	6 en 7	
	Verkeerskokers	62	•		
	Codegevers zuid	62	•		
	Codegevers noord	62	•		

Tabel 9.2 Locaties contactdozen werk-spreekverbinding

9.3.3 Automatische telefoondoorkiezer

De ATD zorgt ervoor dat ingeval van storingen of andere calamiteiten de juiste mensen worden gewaarschuwd, ook als de kering onbemand is.

Samen met de semafooninstallatie wordt de ATD beschouwd als één installatie. De installatie is uitgevoerd als een multimaster met vijf ATD-netwerken en gekoppeld aan een telefoondoorkiezer, een geprogrammeerde schakelklok, selectieve storingsacceptatie-apparatuur en een aantal draagbare semafoonontvangers waarop door middel van een display afgelezen kan worden welke prioriteit de optredende storing heeft (figuur 9.7).



Figuur 9.7 Overzicht ATD-netwerk

De ATD reageert volgens een bepaald scenario wanneer een bepaalde ingang actief wordt. Het te volgen scenario is in de ATD vastgelegd. Er zijn in totaal vijf ATD's, elk met hun eigen functie. Iedere ATD stuurt een vastgestelde code naar de semafooncentrale van de PTT, waarna de betreffende semafoons worden opgeroepen.

De ATD-netwerken met de bijbehorende functies zijn omschreven in tabel 9.3.

Accepteren en fixeren van een oproep
Zodra een oproep op de semafoon is ontvangen, moet een bij de ontvangen code behorend telefoonnummer worden gebeld. Hierdoor wordt het alarm als geaccepteerd beschouwd. Een oproep moet binnen 15 minuten door de opgeroepen persoon worden geaccepteerd. Gebeurt dit niet, dan wordt automatisch diens plaatsvervanger gebeld. Is een alarm geaccepteerd, dan moet het binnen 120 minuten gefixeerd worden. Gebeurt dit niet, dan wordt automatisch diens plaatsvervanger gebeld, ook al is het alarm wel op tijd geaccepteerd. Fixeren gaat handmatig door het indrukken van de fixeertoets van de betreffende code op het storingsmeldergedeelte van de bedieningslessenaar.

Semafooncodes
Afhankelijk van de aard van de storing wordt er een code opgestuurd waarop de opgeroepen perso(o)n(en) moeten reageren met het accepteren en fixeren van het alarm. Er worden negen codes gebruikt (zie tabel 9.4).

9.3.4 Geluidsinstallatie

De geluidsinstallatie is bedoeld om algemene oproepen te doen uitgaan, personen op te roepen die zich in de verkeerskokers bevinden, en om te waarschuwen voordat een schuifbeweging wordt uitgevoerd.

De installatie bestaat uit twee centrale bedieningsposten en 63 lokale geluidsinstallaties: 62 voor de schuifinstallaties en één in het

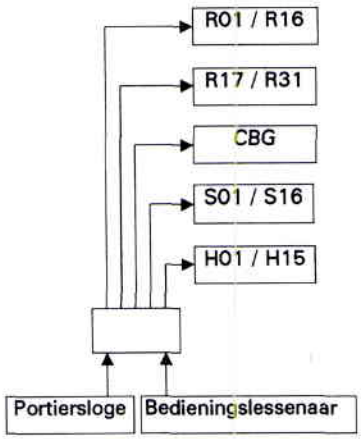
ATD	Aard van de oproep	Dienstkring	WED	Beveiliging	Meldkamer
Nr 1	Brandalarm	•	•1)	-	•2)
Nr 2	Inbraakalarm	-	-	•	•3)
Nr 3	Procesalarm CCC	-	•	-	-
Nr 4	Procesalarm BSS/NSS	-	•	-	-
Nr 5	Windpresentatiesysteem	•	-	-	-

1) Via CCC ook naar WED 2) Regionale meldkamer 3) Meldkamer beveiliging

Tabel 9.3 Overzicht ATD-netwerken

Code	Betekenis	Oproep naar:
1	CCC prioriteit 1	eerste persoon
2	CCC prioriteit 2	eerste persoon
3	CCC prioriteit 3	eerste en tweede persoon
4	CCC brandalarm	eerste en tweede persoon
5	noodsluiting actief	eerste, tweede en derde persoon
6	windwaarschuwingssysteem	eerste persoon
7	reserve	eerste persoon
8	reserve	eerste persoon
9	intern ATD (voeding)	eerste persoon

Tabel 9.4 Overzicht semafooncodes



Figuur 9.8 Overzicht geluidsinstallatie

CBG. De centrale posten zijn ondergebracht bij de bedieningslessenaar en bij de portiersloge (figuur 9.8). Bij de portiersloge is een keuzeschakelaar aanwezig waarmee zijn bedienpost kan worden omgeschakeld naar de andere bedienpost.

Vanuit het CBG kunnen alleen gesproken boodschappen worden verzonden. Vanaf de schuifinstallaties kan alleen een geluidssignaal worden gegenereerd op het eigen lokale netwerk. Het lokaal gegenereerde signaal heeft voorrang boven het geluidssignaal.

De installatie is in vijf groepen verdeeld. Deze groepen kunnen vanaf de centrale bedienposten worden aan- en uitgezet. Iedere bedienpost is voorzien van een microfoon, een spreektoets om de oproep te activeren en vijf signaaldrukkers, één voor iedere groep.

De hoorns zijn zodanig geplaatst dat een waarschuwingssignaal of oproep overal goed hoorbaar is. Ze bevinden zich op de locaties die zijn genoemd in tabel 9.5.

Locatie		Aantal	Microfoon	Hoorn
Centrale bediening	Bedieningslessenaar	1	•	•
Dieselcentrale A	Bedieningsruimte	1	-	•
	Dieselhal	1	-	•
Dieselcentrale B	Bedieningsruimte	1	-	•
	Dieselhal	1	-	•
Algemeen	Hal	1	-	•
	Portiersloge	1	•	-
	Kabelkelder	1	-	•
SVKO	Hydrauliekcontainer	63	-	•
	Elektrocontainer	62	-	•
	Conserv. zuid	62	-	•
	Conserv. noord	62	-	•
	Verkeerskokers	62	-	•
	R01 t/m R16	16	-	•
	R17 t/m R31	15	-	•
	S01 t/m S16	16	-	•
	H01 t/m H15	15	-	•
	Codegevers zuid	62	-	•
	Codegevers noord	62	-	•

Tabel 9.5 Locaties microfoons en hoorns geluidsinstallatie

10. Documentatie

- *Technische beschrijving van de installatie voor de besturing, de beveiliging en de bewaking van de hydraulische aandrijving van de schuiven van de stormvloedkering Oosterschelde.* — RWS, directie bruggen & dienst informatieverwerking, 1986
- *Funktionele beschrijving van de installatie voor de besturing, beveiliging en bewaking van de hydraulische aandrijving van de schuiven van de stormvloedkering Oosterschelde.* — RWS, directie bruggen & dienst informatieverwerking, 1986
- *Beschrijving van en specificaties voor, de functies van de Centrale Computer Configuratie t.b.v. de Stormvloedkering Oosterschelde.* — RWS, directie bruggen & dienst informatieverwerking, 1984
- *Stormvloedkering Oosterschelde, supplement documentatie hoofdstuk 3 t/m 7.* — RWS, directie bruggen, 1986
- *Handboek Oosterscheldekering band 1, 2 en 3.* — RWS, afdeling Operationeel Waterbeheer en Waterkeringen. Bijgewerkte versie 1997.
- *Evaluatienota Stormvloedkering Oosterschelde, elektrische installaties.* — RWS, directie bruggen, 1988.

Deelnota 7: Inspectievoertuig schuiven

Inhoud

1. Inleiding pagina **300**

2. Inspectie en onderhoud sluitingsmiddelen **301**
2.1 Bereikbaarheid sluitingsmiddelen
2.1.1 Demontabele bordessen
2.1.2 Ponton met hoogwerker
2.1.3 Inspectievoertuig op bovenbalk
2.1.4 Inspectievoertuig op verkeerskoker

3. Inspectievoertuig **305**
3.1 Algemene eisen
3.2 Werkgebied
3.3 Vormgeving
3.4 Constructie
3.4.1 Onderboom met inspectiekorf
3.4.2 Kleine draaikoning met nivelleercilinder
3.4.3 Middenboom
3.4.4 Bovenboom
3.4.5 Grote draaikoning
3.4.6 Stempelframe
3.4.7 Hydraulische stempels
3.4.8 Oplegger
3.4.9 Trekker
3.5 Massa en afmetingen
3.6 Materialen en conservering
3.7 Aandrijving en besturing
3.8 Bediening
3.9 Veiligheid
3.10 Levering

4. Documentatie **313**

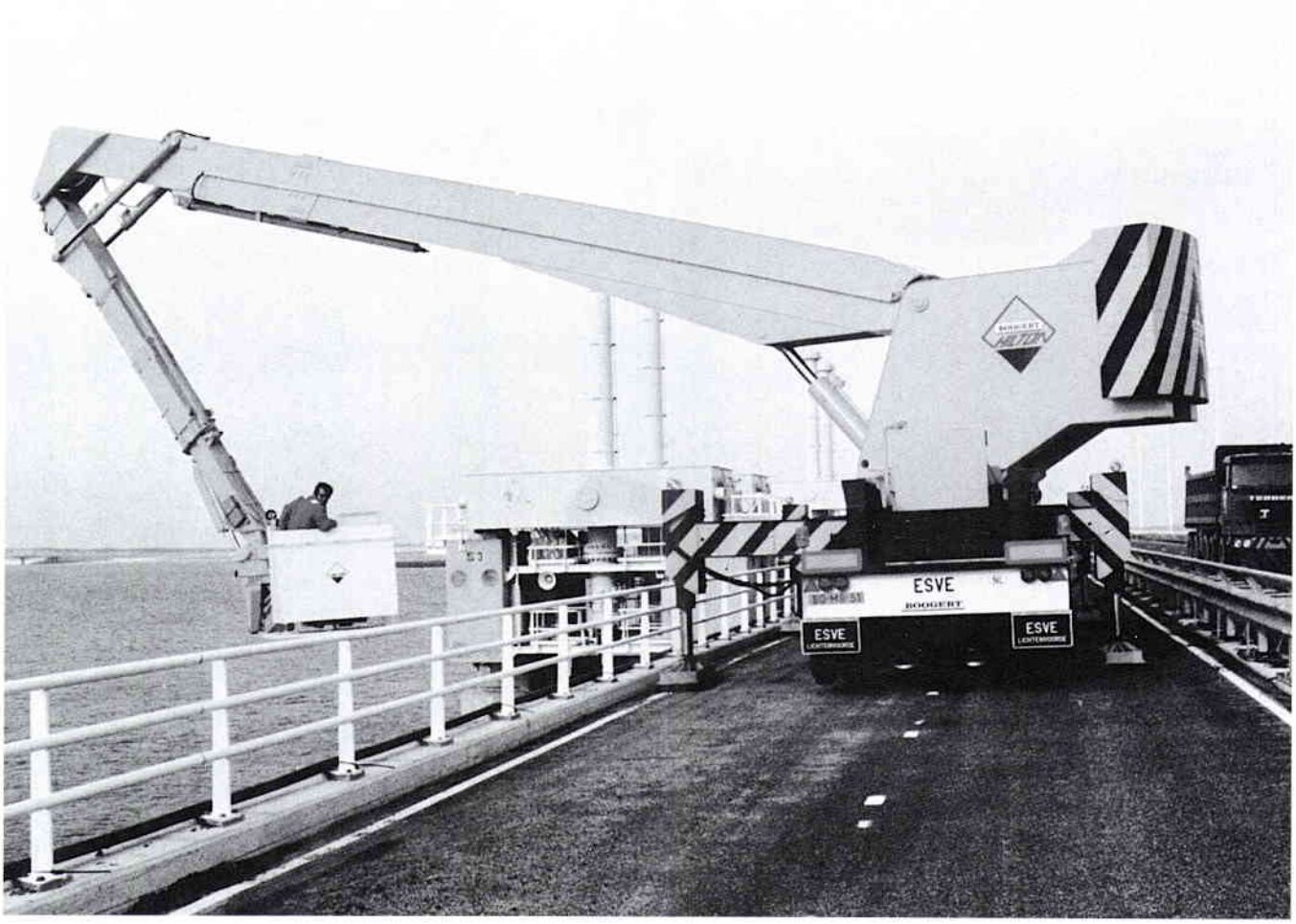
1. Inleiding

De Oosterscheldekering bestaat uit vaste onderdelen en uit beweegbare sluitingsmiddelen. De vaste onderdelen zijn de pijlers, de dorpelbalken en de bovenbalken. Gezamenlijk vormen zij het raamwerk van de kering. De sluitingsmiddelen omvatten de schuiven en de schuifgeleidingen waarmee het raamwerk kan worden afgesloten, en de bewegingswerken met de hydraulische en electrische installaties, waarmee de schuiven worden bewogen.

Onder normale weersomstandigheden is de kering geopend en hangen de schuiven in geheven positie, dat wil zeggen boven de waterspiegel, aan de cilinders. De schuiven zijn dan in principe toegankelijk voor inspectie en onderhoud. Bij dreigende stormsituaties worden de schuiven neergelaten en is de kering gesloten.

Om de veiligheid van Zeeland te kunnen waarborgen moet de stormvloedkering optimaal functioneren. Om dit te garanderen is een regelmatige inspectie en onderhoud van de schuiven en schuifgeleidingen, de bewegingswerken en de electrische en de hydraulische installaties noodzakelijk. Daarvoor dienen deze sluitingsmiddelen alle goed bereikbaar te zijn. In deze deelnota wordt op de bereikbaarheid van met name de schuiven nader ingegaan, waarbij de nadruk ligt op het speciaal ontwikkelde inspectievoertuig (figuur 1).

Voor het onderhoud van de hydraulische en electrische installaties wordt verwezen naar de deelnota's 5 (Bewegingswerken) en 6 (Bediening).



figuur 1 Gebruik inspectievoertuig

2. Inspectie en onderhoud sluitingsmiddelen

Inspectie en onderhoud zijn nodig om de sluitingsmiddelen in optimale conditie te houden. Een juiste materiaalkeuze, een onderhoudsvriendelijke constructie en een regelmatige inspectie zullen ertoe bijdragen dat schade en gebreken vroegtijdig kunnen worden geconstateerd en zonodig direct hersteld. Het inspecteren van de sluitingsmiddelen is in drie categorieën te verdelen.

Allereerst zullen na elke sluiting van de kering in verband met een zware storm (gemiddeld 1x per jaar) de zwaarst belaste onderdelen van de schuiven geinspecteerd worden. Als gevolg van de golfbelastingen tijdens zo'n storm kunnen in deze onderdelen vermoeiingsscheuren ontstaan. Een tijdige waarneming daarvan is noodzakelijk om door reparatie te voorkomen dat ze tot ontoelaatbare afmetingen groeien. De onderdelen waar het hier om gaat zijn vooral de knooppunten van de horizontale en verticale verbanden in het hoofddraagsysteem van de schuiven.

Op de tweede plaats zullen er jaarlijkse en meerjaarlijkse inspecties van de overige onderdelen van de schuiven en de schuifgeleidingen worden uitgevoerd. Dit is nodig in verband met de kans op corrosie door het agressieve zeeklimaat.

Ten derde staan er meerjaarlijkse inspecties op het programma van de bewegings-werken (cilinders, cardanbalken, bevestigingsoog zuigerstang) en de hydraulische en electrische installatie. Dit is noodzakelijk om een goed functioneren van de kering tijdens een stormsluiting te garanderen. Voor het uitvoeren van deze inspecties dienen de genoemde onderdelen alle goed bereikbaar te zijn.

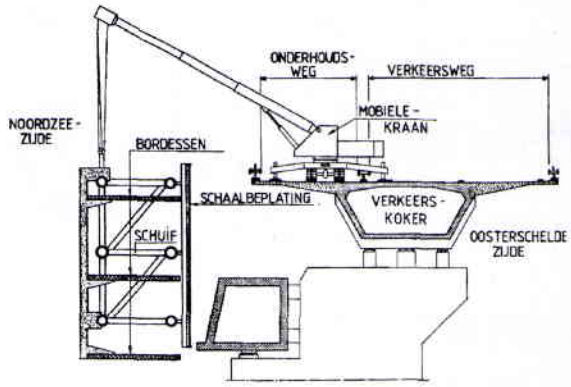
2.1 Bereikbaarheid sluitingsmiddelen

De onderdelen van de hydraulische en de electrische installaties die zijn ondergebracht in de verkeerskokers zijn goed bereikbaar. De onderdelen die zich buiten de verkeerskoker bevinden kunnen geïnspecteerd worden vanaf de bordessen op de pijlers. De cilinders, zuigerstangen, cardanbalken, eindkokers van de schuiven en de schuifgeleidingen zijn in de nabijheid gesitueerd, of maken deel uit, van de pijlers. Deze onderdelen zijn inspecteerbaar vanaf de bordessen tussen de hamerstukken. De bordessen staan via trappen in verbinding met een loopbrug, waarlangs elke pijler bereikbaar is vanuit de verkeerskoker. Van hieruit kan ook het bovenvlak en de neus van de betonnen bovenbalk worden bereikt (figuur 2).

De overige onderdelen van de schuiven kunnen niet vanaf deze vaste voorzieningen bereikbaar gemaakt worden. Het betreft hier hoofdzakelijk de onderdelen die ten opzichte van de verkeerskoker aan de Noordzeezijde van de schaalbeplating liggen, zoals de binnenzijde van de schaalbeplating, de verticale verbanden en de horizontale regels. De bereikbaarheid van deze onderdelen moet derhalve op een andere wijze gerealiseerd worden. Hiervoor zijn de volgende mogelijkheden bekeken en beoordeeld op veiligheid, technische mogelijkheden en financiële consequenties [doc.1].

2.1.1 Demontabele bordessen

De onderdelen die aan de Noordzeezijde van de schaalbeplating liggen zijn in principe bereikbaar te maken door in de schuiven op verschillende niveaus bordessen aan te brengen (figuur 3).

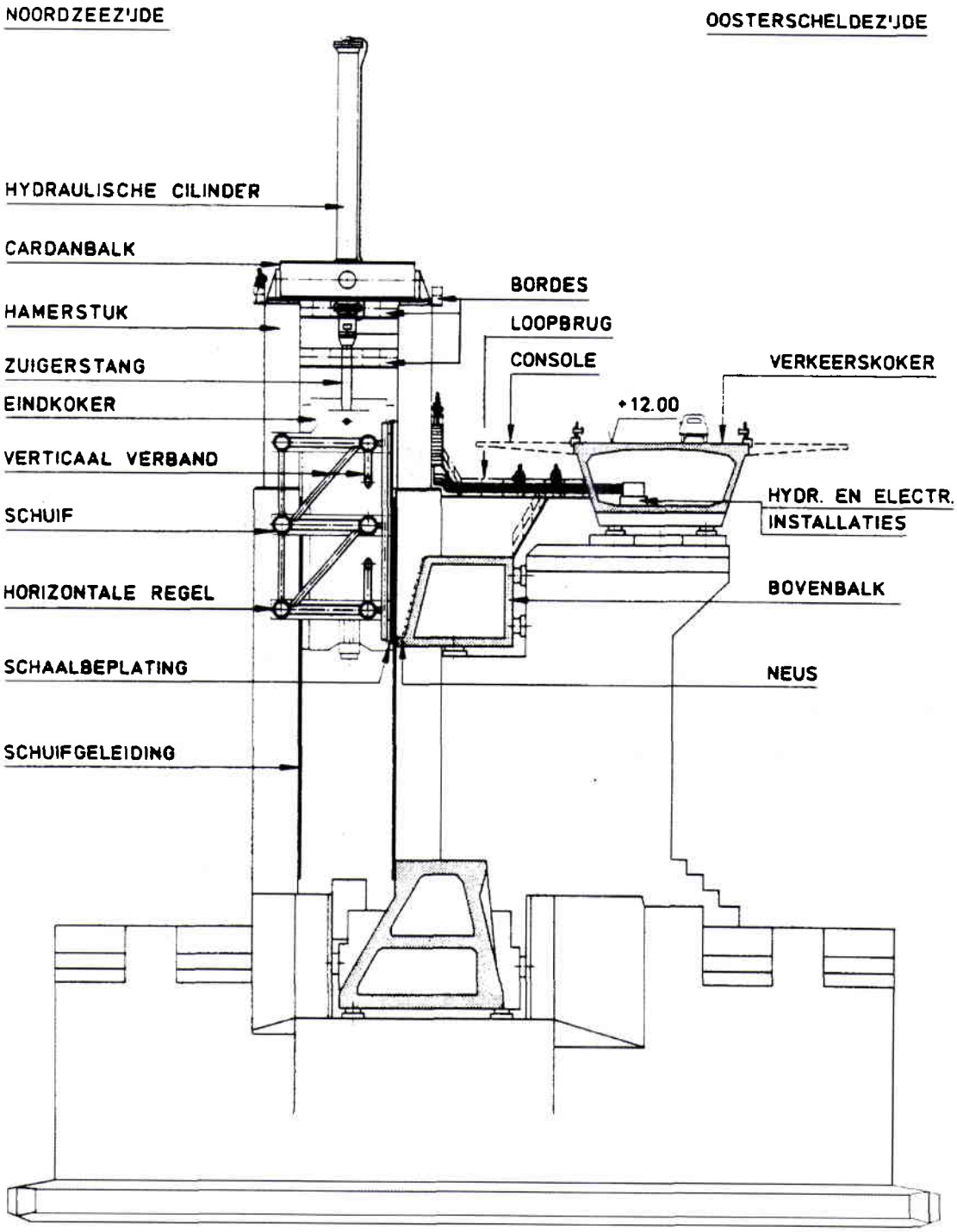


figuur 3 Inspectie met demontabele bordessen

Dit moeten evenwel demontabele bordessen zijn omdat vaste bordessen de grote optredende golfklapdrukken tijdens stormcondities niet kunnen weerstaan . Het toepassen van demontabele bordessen in de schuiven heeft echter de volgende nadelen:

- Demontabele bordessen zijn niet bestand tegen de golfklappen die optreden tijdens de testsluitingen. Bordessen in de schuiven moeten áltijd verwijderd worden voordat een schuif gesloten wordt.
- Door het aanzienlijke gewicht van de demontabele bordessen en de grote benodigde vlucht, kan montage en demontage van de bordesdelen alleen plaatsvinden met behulp van een 'zware 'mobiele kraan (plaatsing met een bok is nog duurder dan met een kraan). Het gevolg is dat de onderhoudsweg volledig en de verkeersweg gedeeltelijk geblokkerd zullen zijn. Doordat tijdens het inspecteren de bordessen telkens verplaatst en dus gemonteerd respectievelijk gedemonteerd worden, zal de weg veelvuldig geblokkeerd worden.
- Bevestiging van de bordessen aan de schuifconstructie is lastig. Een belangrijke ontwerpeis voor de schuiven was dat de onderdelen van de horizontale en verticale verbanden zo glad mogelijk zijn in verband met spanningstechnische eisen.

Naast deze technische en verkeerstechnische bezwaren zijn ook de financiële consequenties aanzienlijk, omdat frequent de inzet van een zware mobiele kraan noodzakelijk is. Daarnaast zijn voor het monteren en demonteren van de bordessen extra arbeidskrachten nodig. Gezien deze bezwaren is van de toepassing van demontabele bordessen voor inspectie afgezien.



figuur 2 Dwarsdoorsnede kering

2.1.2 Ponton met hoogwerker

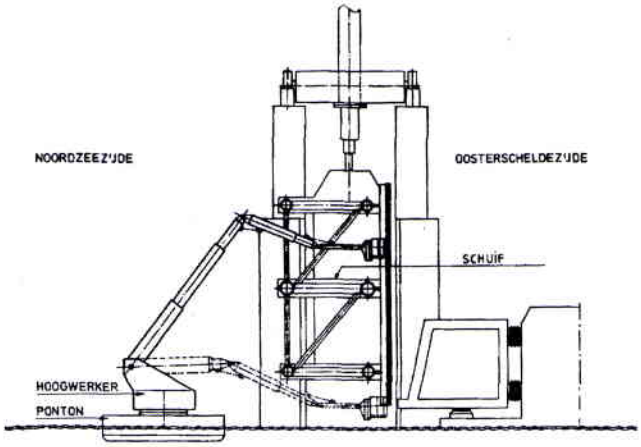
De bereikbaarheid van de schuifonderdelen vanaf het water is in principe mogelijk vanaf een ponton waarop een hoogwerker is geplaatst (figuur 4). Om het inspecteren op een veilige en verantwoorde wijze te kunnen uitvoeren dienen verticale verplaatsingen van de ponton gecorrigeerd te worden. De geleidelijke verticale verplaatsing van de ponton ten gevolge van het niveauverschil tussen eb en vloed is te corrigeren door de inspectiekorf door de hydraulische cilinders van de hoogwerker een gelijke maar tegengestelde verplaatsing te laten ondergaan. Correctie van de verticale golfbeweging is moeilijker.

Horizontale bewegingen van de ponton zijn met de hydraulische constructie van de hoogwerker nauwelijks te corrigeren. Hierdoor moet de ponton op een zodanige wijze worden verankerd dat de horizontale verplaatsingen vermeden worden. Aan de hiervoor in aanmerking komende mogelijkheden kleven echter bezwaren die het inspecteren op deze wijze onuitvoerbaar maken. Deze bezwaren zijn:

- De bodembescherming en de drempelopbouw van de kering laten het verankeren van de ponton door middel van ankers niet toe.
- Verankeren van de ponton aan de pijlers door middel van kabels is onvoldoende mogelijk. Als gevolg van de eis dat de ponton

aan de zeezijde van de schuif moet zijn gelegen, is door de wisselende stroomrichting verankeren op deze wijze alleen mogelijk tijdens de ebfase. De beschikbare inspectieperiode wordt hierdoor onaanvaardbaar kort.

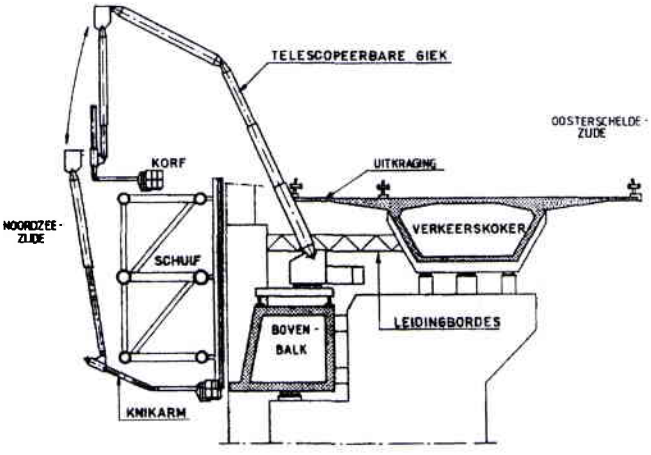
- De ponton een zodanige lengte geven dat hij tegen de pijlers kan worden afgesteund heeft tot gevolg dat het stroomgat tussen de twee pijlers gedeeltelijk wordt afgedicht. De grotere stroomsnelheden die dan ontstaan vormen een onacceptabele hydraulische situatie, en tevens een grote belasting op de ponton.
- Het op zijn plaats houden van de ponton met behulp van sleepboten heeft als nadeel geen nauwkeurige plaatsbepaling van de ponton is te realiseren. Daarnaast is deze mogelijkheid vanwege het constant 'stand by' zijn van meerdere sleepboten een dure oplossing.



figuur 4 Inspectie met hoogwerker op ponton

2.1.3 Inspectievoertuig op bovenbalk

Een voordeel van plaatsing van een inspectievoertuig op de bovenbalk is de onbelemmerde doorgang van het verkeer op de verkeerskoker. Door het hoogteverschil tussen het bovenvlak van de bovenbalk en de bovenkant van de schuif, en mede door de grootte van de benodigde vlucht, is de bereikbaarheid van de Noordzeezijde van de schuif liggende onderdelen alleen mogelijk met behulp van een grote, telescopische constructie (figuur 5).



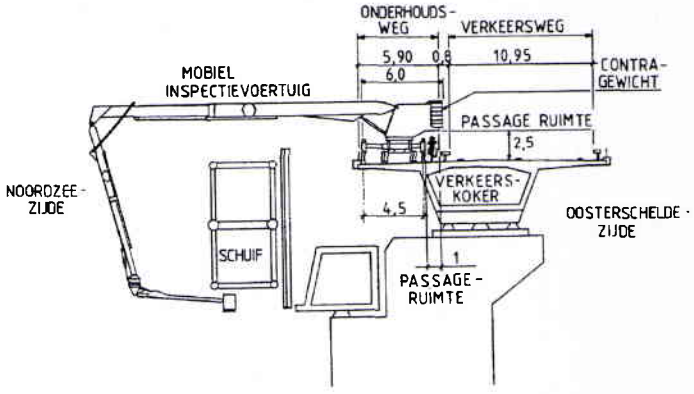
figuur 5 Inspectie met voertuig op bovenbalk

Een dergelijke constructie bestaat in principe uit een, op de bovenbalk af te stempelen draagsysteem, voorzien van een draaibare en telescopische giek. Aan de giek is een stelsel van knikarmen bevestigd waarmee een inspectiekorf boven, tussen en onder de regels van de schuif gebracht kan worden. Het bereikbaar maken van de schuiven op boven omschreven wijze heeft echter de volgende bezwaren:

- Een telescopische giekconstructie wordt in gebruik beperkt door de uitkragende verkeerskoker.
- Alhoewel de bovenbalken door middel van een overgangsconstructie onderling met elkaar verbonden kunnen worden, waardoor per sluitgat een doorgaande verbinding aanwezig is, kan hiervan voor het transporteren van een inspectievoertuig geen gebruik worden gemaakt. Enerzijds omdat de bovenbalken niet vanaf de damaanzetten bereikbaar zijn en anderzijds omdat de doorrijhoogte ter plaatse van de pijlers, door de aanwezigheid aldaar van een leidingbordes, beperkt is.
- Doordat de uitkraging van de verkeerskoker de bovenbalk overlapt is het ook onmogelijk een inspectievoertuig vanaf de verkeerskoker met behulp van een mobiele kraan op de bovenbalk te plaatsen.

2.1.4 Inspectievoertuig op verkeerskoker

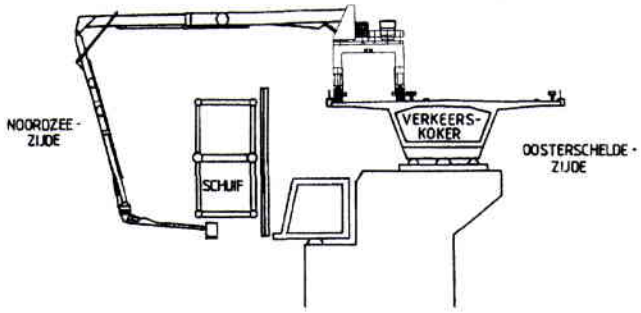
De enige reële mogelijkheid die overbleef om een inspectiemiddel op te stellen was gebruik te maken van de onderhoudsweg op de uitkraging van de verkeerskoker (figuur 6). Nadeel van deze lokatie is dat tijdens het inspecteren de onderhoudsweg geblokkeerd zal zijn voor het overige onderhoudsverkeer. Dit is echter, gezien het karakter van de weg, toelaatbaar, mits wordt voldaan aan de eis dat op de onderhoudsweg een passeermogelijkheid aanwezig is voor fietsverkeer dat eveneens gebruik maakt van deze weg.



figuur 6 Inspectie met voertuig op verkeerskoker

Omdat de onderhoudsweg voor alle schuiven langs loopt en tevens in verbinding staat met het openbare wegennet en de wegen op de damaanzetten, is elke schuif vanaf de onderhoudsweg met een inspectievoertuig goed bereikbaar. Nadat de keuze voor inspectie vanaf de verkeerskoker gemaakt was, is een speciaal voor dit doel ontworpen inspectievoertuig gebouwd.

Een variant van het inspectievoertuig als portaalconstructie (figuur 7) is afgevallen vanwege de hogere kosten en de onmogelijkheid de Roompotsluis te passeren. Voor passage van de sluis zijn los neer te leggen brugliggers en een aangepast, recht, wegenplan noodzakelijk.



figuur 7 Inspectievoertuig als portaal

De optie het portaalvoertuig op de hoofdrijbaan van de verkeerskoker te laten rijden, om zo de passage van de Roompotsluis te vermijden, is ontoelaatbaar vanwege de vernauwing van de hoofdrijbaan tot één rijstrook.

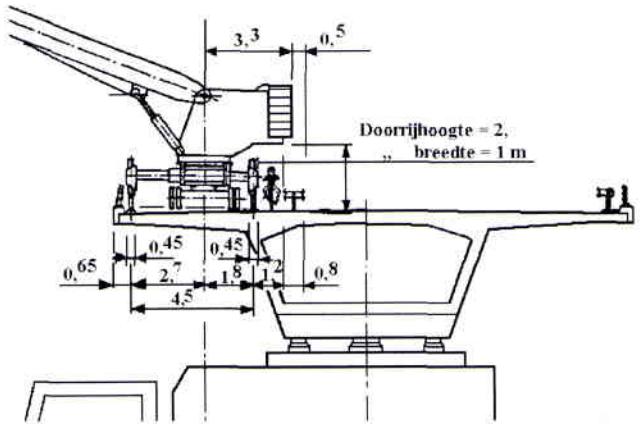
3. Inspectievoertuig

3.1 Algemene eisen

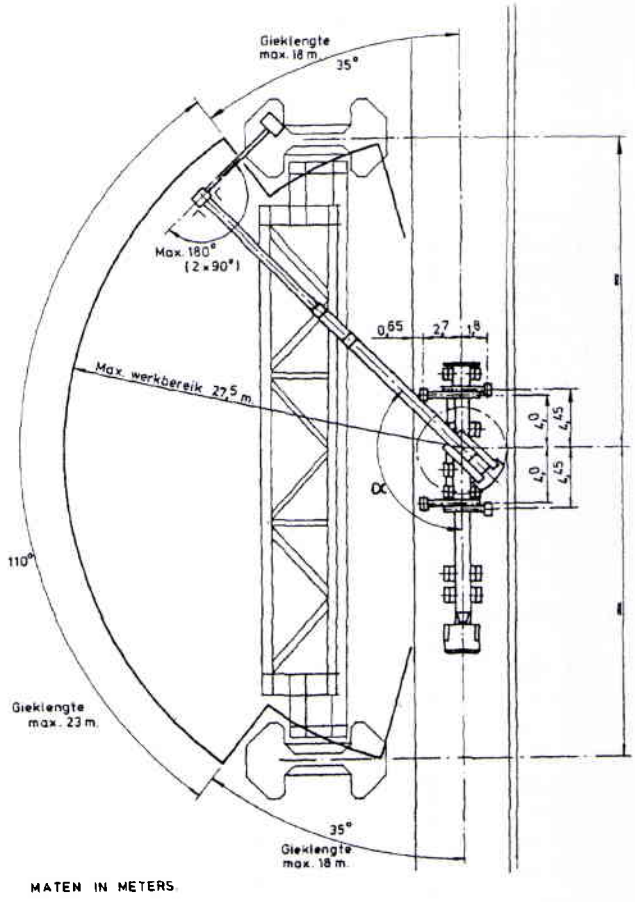
Voor het inspecteren van de schuiven wordt gebruik gemaakt van fijngevoelige meetapparatuur waarmee de schuifonderdelen worden afgetast. Hierdoor kan het doelmatig en veilig inspecteren van de schuiven alleen plaatsvinden vanuit een inspectiekorf. Deze dient daarvoor boven, tussen en onder de regels van de schuiven gebracht te kunnen worden. Door de ligging van het te inspecteren gebied van de schuiven vóór en beneden de onderhoudsweg, kan de inspectiekorf alleen met behulp van een laagwerker in deze posities gebracht worden.
De vormgeving van de schuiven en de ligging hiervan ten opzichte van de onderhoudsweg, de breedte van de onderhoudsweg en het gegeven dat naast het onderhoudsverkeer ook fietsverkeer gebruik maakt van deze weg, zijn bepalend geweest voor de vormgeving en het werkbereik van het inspectievoertuig.

De onderhoudsweg heeft een beperkte breedte en is door middel van een geleiderailconstructie gescheiden van de verkeersweg (zie boek 3 'Betonwerken'). Om het fietsverkeer de gelegenheid te geven het op de onderhoudsweg op te stellen inspectievoertuig op een veilige wijze te passeren, zijn er eisen gesteld aan het profiel van vrije ruimte en aan de opstelplaats van het inspectievoertuig. In de eerste plaats mag het profiel van het opgestelde inspectievoertuig tot op een hoogte van 2,50 m boven het wegdek een breedte van 4,50 m en daarboven een breedte van 6,0 m niet te boven gaan. Hierdoor is bereikt dat voor het fietsverkeer tussen de geleiderailconstructie en het opgestelde inspectievoertuig een passeerstrook van 1,0 m beschikbaar is en dat het contragewicht tijdens het inspecteren van de schuiven niet voorbij de geleiderailconstructie steekt (figuur 8).

Op grond van de sterkte van de uitkragingen van de verkeerskokers is het niet mogelijk het inspectievoertuig te dicht bij de voegovergangen te plaatsen. Dit heeft geleid tot de keuze om één schuif volledig te inspecteren vanaf één opstelplaats op de onderhoudsweg (figuur 9). Deze plaats is op het wegdek gemarkeerd en ligt in het midden tussen twee pijlers. Het inspecteren van een schuif vanuit één positie heeft het voordeel dat verplaatsingen van het inspectievoertuig tijdens de inspecties van een schuif niet nodig zijn. Dit levert een efficiëntere werkmethode op. Bovendien voorkomt dit dat tijdens verplaatsingen gevaarlijke situaties ontstaan op de onderhoudsweg op het moment dat fietsers het inspectievoertuig passeren.

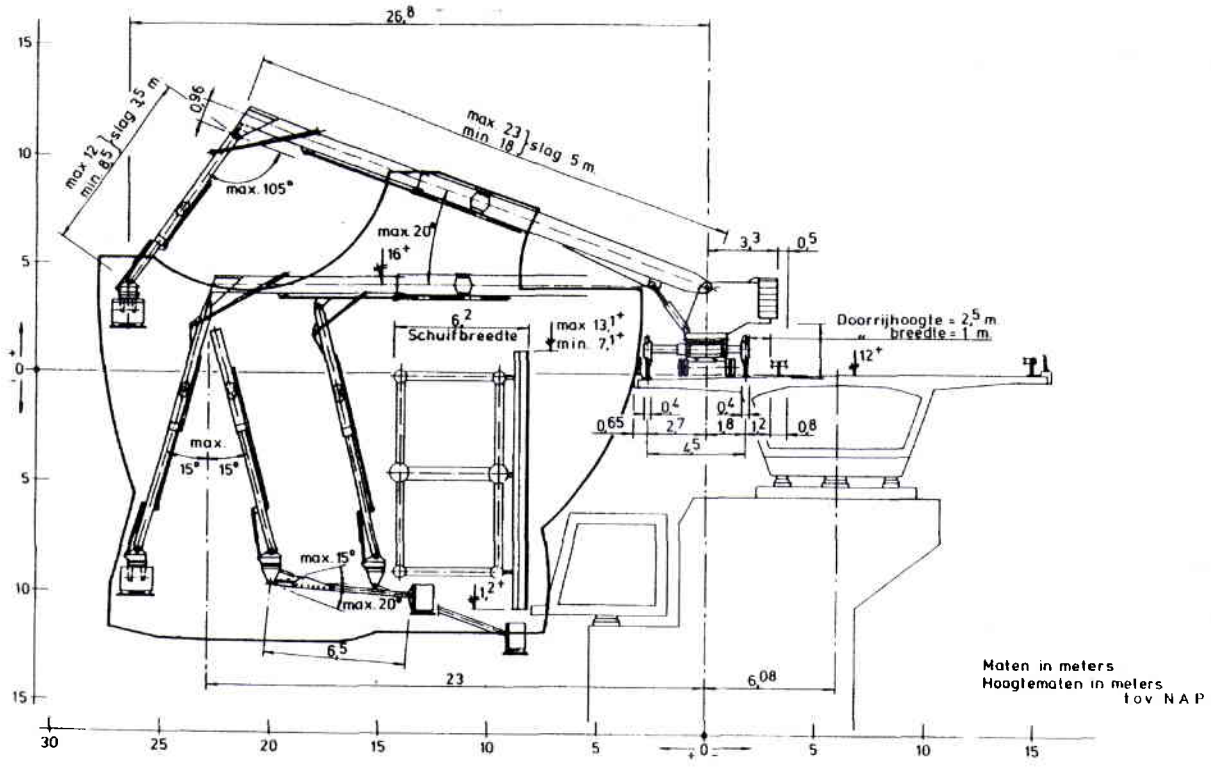


figuur 8 Profiel van vrije ruimte



figuur 9 Horizontaal werkgebied

Door de positie van de schuiven ten opzichte van de onderhoudsweg in combinatie met de gegeven opstelplaats van het inspectievoertuig in het midden tussen de pijlers, is voor het inspecteren van één schuif het werkbereik van de inspectiekorf bepaald op horizontaal 27 m en verticaal 16 m (figuur 10).



figuur 10 Verticaal werkgebied

Omdat een laagwerker met dit grote vluchtbereik niet als standaard machine uit de handel was te betrekken, is een inspectievoertuig speciaal voor dit doel ontworpen en gebouwd. Hiervoor is gebruik gemaakt van de aanwijzigingen voor het ontwerpen, vervaardigen en gebruiken van hoogwerkers, gesteld in het publikatieblad PNO.81 van de Arbeidsinspectie. De aanwijzingen hebben onder andere betrekking op grondslagen voor de sterkteberekening, stabiliteit, opstelling, bediening en beproeving. Voor het toepassen van bepaalde hydraulische en electronische componenten en voor het ontwerp van de mobielewagen zijn speciale adviezen ingewonnen bij respectievelijk de Arbeidsinspectie en de Rijksdienst voor het Wegverkeer.

3.2 Werkgebied

Met de drie bomen, twee draaikoningen en 7 cilinders zijn alle bewegingen te realiseren om een schuif volledig te inspecteren. In de figuren 9 en 10 is het werkgebied weergegeven in het horizontale en verticale vlak. Door het telescopeerbaar zijn van de bovenboom tot 23 m is in combinatie met het tot 20° meer of minder toppen van deze boom, en door de mogelijkheid van het verdraaien van de middenboom in het verticale vlak over een hoek tot maximaal 105°, het benodigde werkgebied van de inspectiekorf te realiseren tot 27 m vanuit de as van het voertuig.

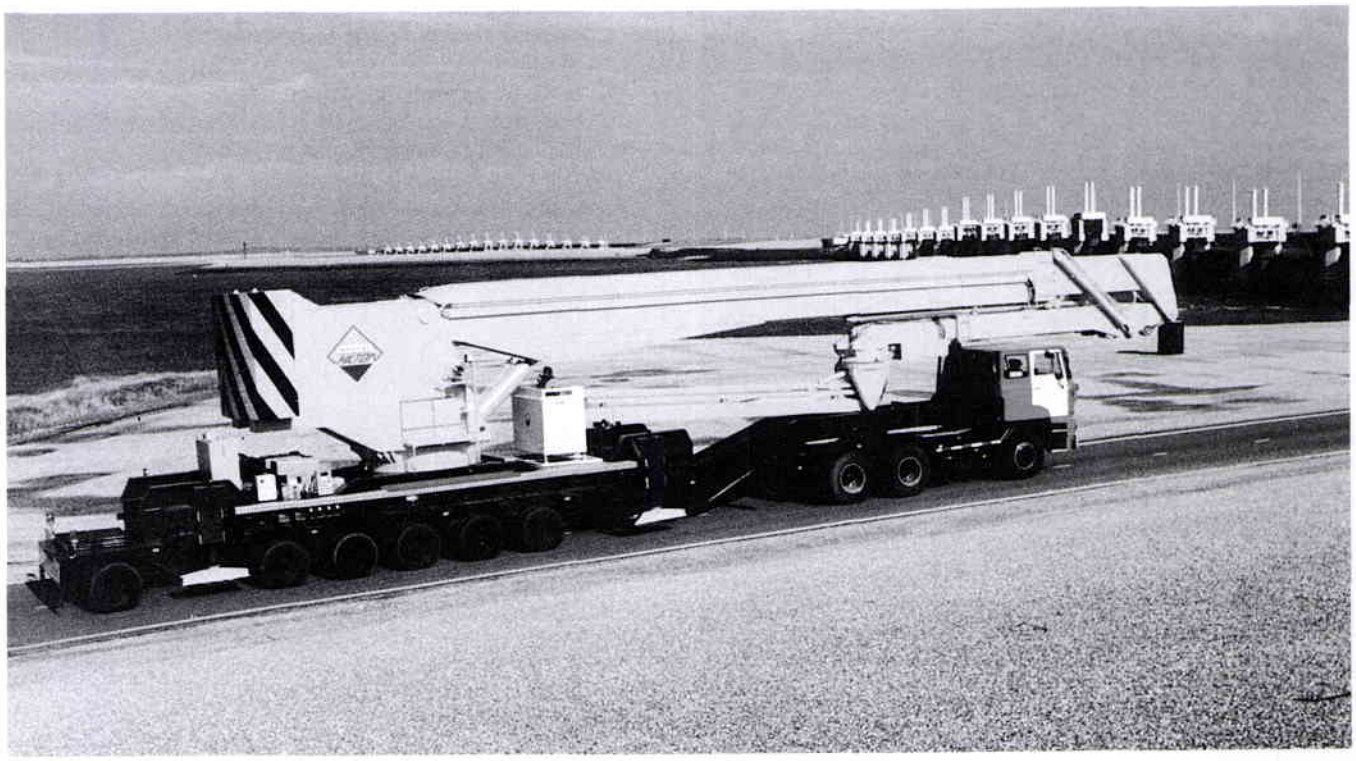
In combinatie met de bewegingen die de bovenboom en de onderboom toelaten, is met de tot 12 m telescopeerbare middenboom een verticale verplaatsing van de inspectiekorf te realiseren tot 16 m. Hierdoor kunnen alle variabele schuifhoogten afgetast worden. Aftasten van de schuiven in het horizontale vlak vindt plaats door de korf in het horizontale vlak te verplaatsen. Deze verplaatsing wordt gerealiseerd door het tot maximaal 180° verdraaien van de boven- en/of onderboom, eventueel gecombineerd met de mogelijkheid de inspectiekorf te verplaatsen in het gebied 15° omhoog tot 20° naar beneden.

Gebruik van het inspectievoertuig is beperkt tot een windsnelheid van 13,8 m/s (6 Beaufort).

Van de mogelijkheid met het inspectievoertuig ook de hydraulische cilinders te inspecteren is afgezien. De inspectiefrequentie van de cilinders ligt lager dan die van de schuiven en de noodzakelijke aanpassingen aan het inspectievoertuig werden niet rendabel geacht. De onderzijde van de cilinders is bereikbaar vanaf de bordessen op de pijlers, voor de bovenkant kan met een hoogwerker worden volstaan.

3.3 Vormgeving

De functionele vormgeving, die een gevolg is van het te bestrijken werkgebied, is voor een belangrijk deel bepaald door enerzijds een begrenzing gesteld aan de doorbuigingen, en anderzijds de beperkingen opgelegd door de smalle onderhoudsweg van waaraf het inspectievoertuig moet opereren. Omdat vanuit de inspectiekorf met fijngevoelige inspectieapparatuur wordt gewerkt is een beperkte deining van de korf vereist. Dit is bereikt door de bomen van het inspectievoertuig hoofdzakelijk op stijfheid te construeren. Voor de bovenboom bijvoorbeeld zijn de afmetingen hierdoor bepaald op 1,0 m hoog en 0,75 m breed. De uit de stijfheidseis volgende grote afmetingen en de relatief zware profilering van de bomen, en ook van de overige onderdelen, heeft geleid tot de hoge massa van het inspectievoertuig. Om dezelfde reden zijn de telescopeerbare bomen opgebouwd uit ten hoogste twee delen. Hierdoor wordt het doorhangen van de inspectiekorf, ten gevolge van de altijd tussen de boomdelen onderling aanwezige speling, zoveel mogelijk voorkomen. Nadeel van de twee-delige bomen is dat de ingeschoven bovenboom nog altijd een lengte heeft van 18 m. De boomlengte is hierdoor bepalend voor de lengte van het inspectievoertuig in rijstand. Door de eveneens grote hoogte van het voertuig in rijstand (4,8 m), en enige andere afwijkingen in de vormgeving, voldoet het inspectievoertuig niet meer aan de algemene



figuur 11 Inspectievoertuig in rijstand

regels van de verkeerswet en kan het inspectievoertuig alleen ingezet worden op de Oosterscheldekering (figuur 11)[doc.2].
De stempelafstand van 4,5 m is erg kort bij de gegeven last aan de bovenboom van ongeveer 5 ton (massa midden- en onderboom met inspectiekorf en toebehoren) en de maximale lengte van de bovenboom van 23 m. Een mobiele kraan heeft bij een vergelijkbaar kantelmoment een stempelafstand van 8 m. Deze korte stempelafstand heeft een vergrotend effect op de stempelkrachten. Dit heeft geleid tot 'zware' stempelvijzels met forse stempelvoeten en een robuuste profilering van het stempelframe.

Het vanuit stabiliteit benodigde contragewicht mag vanwege de veiligheid voor het verkeer op de snelweg niet voorbij de geleiderailconstructie zwenken. Door deze eis, en door de beperkte breedte van de onderhoudsweg, is het contragewicht direkt achter de draaikoning geplaatst. De korte momentarm van het contragewicht van ca. 3 m tot het hart van de draaikoning is, in combinatie met de geringe stempelafstand van 4,5 m bepalend voor de grootte van het contragewicht. De massa hiervan bedraagt 35 ton en is voor een laagwerker extreem groot. Doordat het langzame verkeer onder het contragewicht moet kunnen doorrijden, is het contragewicht hoog op het inspectievoertuig geplaatst. De onderzijde hiervan ligt op 2,5 m en de bovenzijde op 4,8 m boven het wegdek.

3.4 Constructie

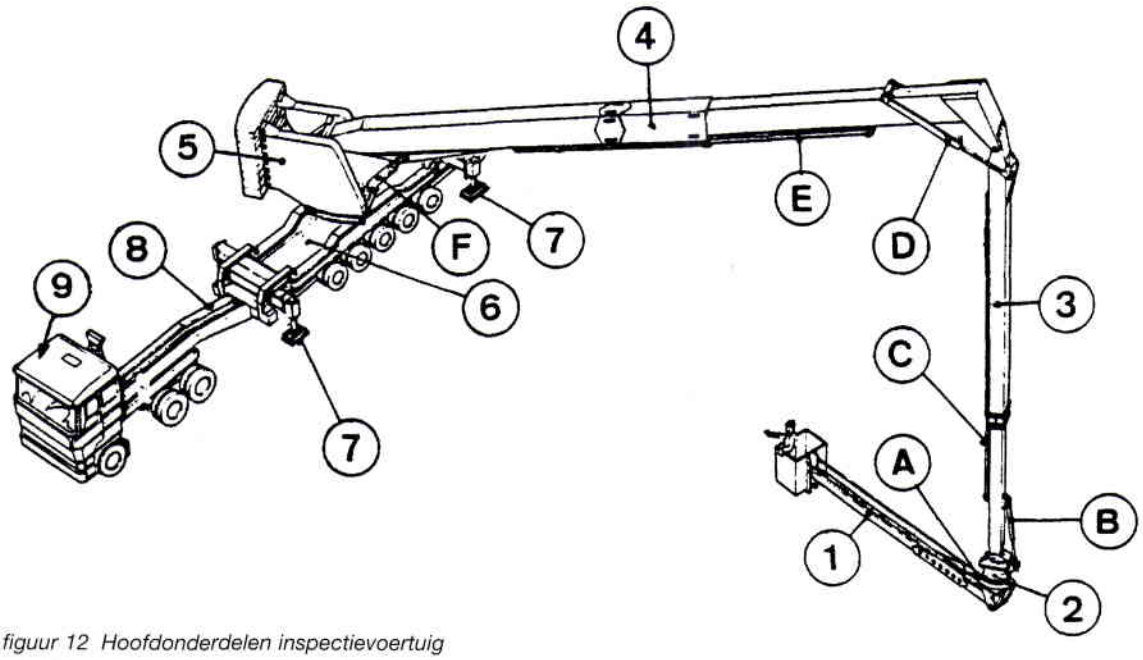
Het inspectievoertuig bestaat in principe uit twee hoofdcomponenten. De eerste is het inspectiemiddel met het contragewicht. Dit is het deel waarmee de inspectiekorf boven, tussen en onder de regels van de schuiven gebracht wordt en van waaruit de inspecties worden uitgegevoerd. Bij dit systeem worden nagenoeg alle bewegingen gerealiseerd via hydraulische overbrengingen waardoor soepele verplaatsingen mogelijk zijn. De laagwerker is opgebouwd uit de volgende,in figuur 12 aangegeven, hoofdonderdelen:

1. onderboom met inspectiekorf
2. kleine draaikoning met nivelleercilinder
3. middenboom
4. bovenboom
5. grote draaikoning
6. stempelframe
7. hydraulische stempels

De tweede hoofdcomponent is het voertuig, bestaande uit de oplegger (8) waarop de laagwerker is geplaatst en de trekker (9) waardoor het geheel transportabel is.

3.4.1 Onderboom met inspectiekorf

De kokervormige onderboom draagt de inspectiekorf (1) en is scharnierend bevestigd aan de kleine draaikoning (2). De onderboom heeft een vaste lengte van 6,50 m. Door middel van cilinder (A) kan de onderboom uit het horizontale vlak 15° naar boven en 20° naar beneden scharnieren. Hierdoor, en door de mogelijkheid de onderboom over 180° in het horizontale vlak te verdraaien, is de inspectiekorf nauwkeurig naar de te inspecteren constructiedelen van een schuif te sturen.
Parallelstangen die bevestigd zijn tussen de kleine draaikoning en de inspectiekorf houden, ongeacht de stand van de onderboom, de korf in een horizontale positie. In verband met het manoeuvreren met de korf in de schuifconstructie zal de bediening van de laagwerker in bijna alle gevallen plaatsvinden vanuit de inspectiekorf. Omdat de bedieningsman hierbij alle aandacht nodig heeft om de korf te positioneren, wordt het inspecteren van de schuiven uitgevoerd door een inspecteur, die als tweede persoon in de korf plaatst neemt. Inclusief de benodigde inspectieapparatuur is hierdoor de korfbelasting vastgelegd op 2,50 kN (250 kg). Overbelasting van de korf wordt door middel van een akoestisch signaal kenbaar gemaakt. Hiervoor is op de cilinder van de onder-



figuur 12 Hoofdonderdelen inspectievoertuig

boom een schakeling aangebracht. Treedt overbelasting op dan wordt de bediening van het laagwerkergedeelte buiten bedrijf gesteld.

In verband met de kans dat de korf tijdens het bewegen in de schuif tegen de schuifconstructie stoot, is onder de korf een aanstootbeveiliging aangebracht. Deze beveiliging treedt in werking bij een uitwendige belasting tegen de onderzijde van de korf, waarna alle bewegingen, behoudens het nivelleren -dit is het horizontaal houden van de korf- worden gestopt. Nadat de bedieningsman de oorzaak heeft vastgesteld en verholpen, kan vanaf het bedieningspaneel de bewegingsblokkering worden opgeheven.

De inspectiekorf is uitgerust met een bedieningspaneel en een aansluitpunt voor een monitor waarmee de gegevens uit de inspectieapparatuur worden doorgegeven naar een elders op te stellen verwerkingseenheid. Ook is een spraakverbinding aanwezig tussen de korf en de wagen op de onderhoudsweg. Dit is nodig omdat tijdens het bewegen met de korf in de schuif, het zichtcontact met de wagen is verbroken. Naast deze functionele voorzieningen is er ook nog een noodnivelleersysteem waarmee in geval van een storing in het automatisch nivelleersysteem tot handnivellering kan worden overgegaan.

3.4.2 Kleine draaikoning met nivelleercilinder

De kleine draaikoning (2) bestaat uit een vast deel dat scharnierend bevestigd is aan de middenboom (3) en een, door middel van een kogeldraaikrans, draaibaar deel. Aan dit deel is de onderboom (1) bevestigd. Aangedreven door een hydromotor en via een planetaire tandwielkast is hierdoor de onderboom over 180° in het horizontale vlak te verdraaien. De kleine draaikoning heeft een belangrijke functie in het horizontaal houden van de inspectiekorf. Omdat de parallelstangen, die de horizontale stand van de korf verzekeren bij elke stand van de onderboom, verbonden zijn met de kleine draaikoning, dient dit onderdeel ongeacht de stand van de midden- en/of bovenboom altijd in een verticale positie te worden gehouden. Dit wordt gerealiseerd door middel van een automatisch nivelleersysteem. Dit systeem bestaat uit een pendelhoekgever gemonteerd op het vaste deel van de kleine draaikoning, een electro-impulssysteem geschakeld aan de pendelhoekgever, een hydraulische unit en een nivelleercilinder (B) tussen de middenboom en de kleine draaikoning. Wordt door de pendelhoekgever een afwijking van de verticale stand gemeten dan wordt door het electro-impulssysteem een signaal afgegeven waarmee de hydraulische unit wordt bediend, die de nivelleercilinder activeert, zodat de scheefstand wordt gecorrigeerd. Treedt er een storing op in het electronisch circuit, waardoor het automatisch nivelleren uitvalt, dat kan met behulp van het noodsysteem in de korf tot handdiening van het nivelleersysteem worden overgegaan. Dit systeem is een op zichzelf staande hydraulische unit, bestaande uit een handpomp, olietank en een handbedienbare stuurschuif waarmee de nivelleercilinder kan worden geactiveerd.

3.4.3 Middenboom

Door het telescoperen varieert de lengte van de middenboom (3) tussen 8,5 en 12 m. Het telescoperen geschiedt met een dubbelwerkende hydraulische cilinder (C). De middenboom scharniert ten opzichte van de bovenboom (4) door middel van twee dubbelwerkende hydraulische cilinders (D). Het telescoperen van de middenboom is begrensd voor het bewegingsgebied met een hoek van 85° tot 105° ten opzichte van de bovenboom. Hierdoor wordt bereikt dat het bewegingstraject van de middenboom van 0°tot 85° uitgescharnierd, en omgekeerd, alleen met een ingetrokken middenboom bewogen kan worden. Dit is spanningstechnisch gunstig omdat in dit traject de grootste momenten optreden ten gevolge van de eigen massa van de middenboom en de daaraan bevestigde onderboom met inspectiekorf.

3.4.4 Bovenboom

De bovenboom (4) draait in het horizontale vlak over de schuif heen. Met behulp van een hydraulische cilinder (E) kan de lengte variëren van 18 m tot 23 m. Een dubbelwerkende cilinder (F) kan de bovenboom in het verticale vlak over een hoek van 20° verstellen. Omdat de kans bestaat dat de bovenboom in de uitgeschoven stand de pijlers kan raken, is het telescoperen van de bovenboom alleen mogelijk in het horizontale bewegingsgebied dat ligt tussen 35° en 145° gemeten vanuit de lengteas van het inspectievoertuig.

Zowel de midden- als bovenboom zijn van kokerprofielen vervaardigd waarin tevens de hydraulische slangen en de kabels ten behoeve van de energievoorziening zijn ondergebracht.

3.4.5 Grote draaikoning

De grote draaikoning vormt de verbinding tussen de bovenboom (4) en het stempelframe (6) op de oplegger (8). De draaikoning bestaat uit twee gesloten wangconstructies waartussen de bovenboom scharnierend is bevestigd. De draaikoning draagt aan de achterzijde het contragewicht en is aan de onderzijde voorzien van een draaikans. De draaikrans is een kruisrollenlager met een uitwendige diameter van ruim 2 meter. Deze grote diameter is een gevolg van de grootte van de over te brengen krachten en momenten. Met deze draaikrans, aangedreven door een hydromotor, is via een planetaire tandwielkast de draaikoning theoretisch over 360° draaibaar. Het praktisch draaibereik is echter begrensd, en ligt tussen 0° en 180° vanuit de lengteas van het voertuig aan de inspectiezijde, dit is de zijde waar de stempels op 2,7 m uit het hart van het voertuig zijn geplaatst. Door de begrenzing van het draaibereik tot de inspectiezijde van het voertuig wordt voorkomen dat, ten gevolge van het eventueel doordraaien van de bovenboom naar de niet-inspectiezijde, de standzekerheid in gevaar komt. Ook voorkomt de begrenzing dat de bovenboom over de snelweg kan zwenken waardoor er een gevaarlijke situatie voor het verkeer zou kunnen ontstaan.

3.4.6 Stempelframe

Het stempelframe is opgebouwd uit 2 langsliggers, onderling gekoppeld door kokers en door het draagvlak van de grote draaikoning. Het stempelframe vormt daardoor een stabiele ondersteuning voor de draaikoning (5) en voert de krachten en momenten uit de laagwerker af naar de stempels (7). Hiervoor is het stempelframe voorzien van horizontale geleidekokers waarin de stempels door middel van hydraulische cilinders in- en uitschuiven. Het stempelframe is door middel van een voorspanboutverbinding schuifvast verbonden met de oplegger (8).
Op het stempelframe zijn, direct achter de grote draaikoning, de dieselaggregaten geplaatst ten behoeve van de energievoorziening.

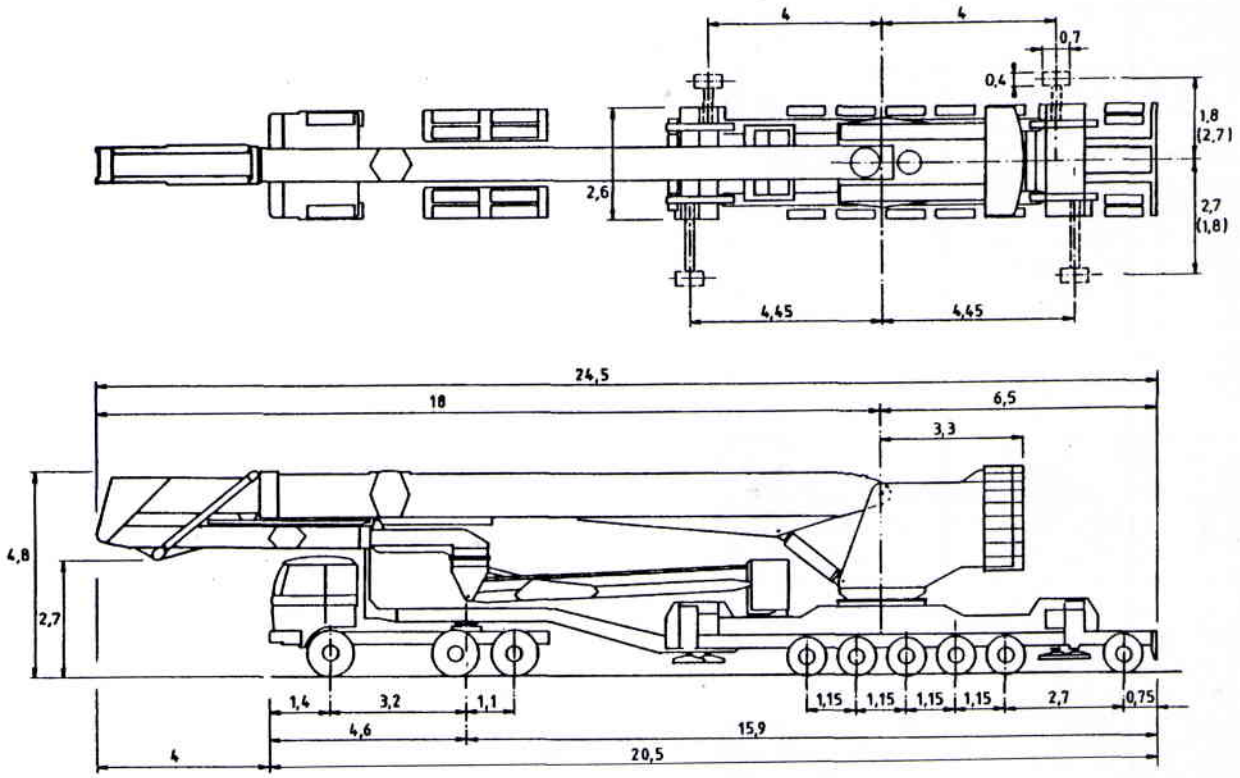
3.4.7 Hydraulische stempels

Tijdens het uitvoeren van inspecties staat het inspectievoertuig door middel van vier hydraulische stempels op het wegdek afgestempeld. Door de eerder genoemde beperking, opgelegd aan het ruimtelijk profiel van het op de onderhoudsweg opgestelde inspectievoertuig, bedraagt de hart op hart maat van de stempels loodrecht op de voertuig-as slechts 4,5 m. In verband met de stabiliteit van de gehele constructie worden bij gebruik de stempels aan de Noordzeezijde, dit is de inspectiezijde, op 2,7 m, en die ter plaatse aan de niet-inspectiezijde op 1,8 m uit het hart van het voertuig geplaatst.

De hart op hart maat van de stempels in lengterichting van het voertuig bedraagt 8 m, respectievelijk 8,9 m. De stempels zijn hydraulische vijzels die door middel van terugslagkleppen tegen wegzakken zijn beveiligd. De afmetingen van de stempels bedragen 0,7x0,4 m.

3.4.8 Oplegger

De oplegger bestaat uit twee langsliggers, die onderling gekoppeld zijn door consoles die tevens het draagvlak vormen voor de laagwerker. De oplegger is een dieplader en is speciaal geconstrueerd voor de laagwerker. Door het toepassen van een dieplader is bereikt dat tussen de dieplader enerzijds en het hoogste punt van het inspectievoertuig, dit is de bovenkant van het contragewicht, anderzijds voldoende vrije ruimte aanwezig is om in de rijstand de ingeklapte bomen te kunnen wegbergen (figuur 13).



figuur 13 Afmetingen inspectievoertuig

Tijdens inspecties waarbij het inspectievoertuig staat afgestempeld op de onderhoudsweg, hangt de oplegger vrij van de grond onder de laagwerker en dient dan als ballast ten behoeve van de stabiliteit. Aan de voorzijde is de oplegger voorzien van een zwanenhals waaraan de koppelconstructie is gemonteerd waarmee de oplegger aan de trekker wordt gekoppeld. Aan de achterzijde zijn 6 assen met 12 dubbele wielstellen aanwezig om de belasting ten gevolge van de massa van de laagwerker, het contragewicht en de massa van de oplegger zelf, gelijkmatig af te dragen naar het wegdek. Het luchtveersysteem van de oplegger is zodanig uitgevoerd dat de drukverdeling, ongeacht eventuele obstakels op of in het wegdek, altijd gelijkmatig over de 6 assen plaatsvindt.

Om het geheel te kunnen sturen zijn 3 assen stuurbaar uitgevoerd. Het besturen van deze assen gebeurt gedwongen en wordt ingeleid door de hoekverdraaiing tussen de trekker en de oplegger. Deze hoekverdraaiing wordt via een hydraulisch systeem overgebracht naar het assenstelsel. Met dit systeem kan het wegtracé op en nabij de kering worden bereden. Uitzondering hierop is de passage van Roompotsluis. Omdat op de overbrugging van de Roompotsluis geen ruimte is gereserveerd voor een onderhoudsweg, wordt het onderhoudsverkeer ter plaatse van de Roompotsluis via de in de sluishoofden aanwezige roldeuren naar de andere zijde van de sluiskolk geleid. De wegbreedte op de roldeuren is smaller dan op de overige onderhoudswegen van het wegtracé. Tevens sluit de onderhoudsweg via een scherpe bocht aan op de weg op de roldeur. Door deze obstakels was het noodzakelijk om naast het gedwongen systeem een tweede, handbedienbare hulpbesturing aan te brengen. Hiermee kunnen de assen nog een extra hoekverdraaiing ondergaan waardoor het inspectievoertuig de Roompotsluis in een vloeiende beweging kan passeren.

3.4.9 Trekker

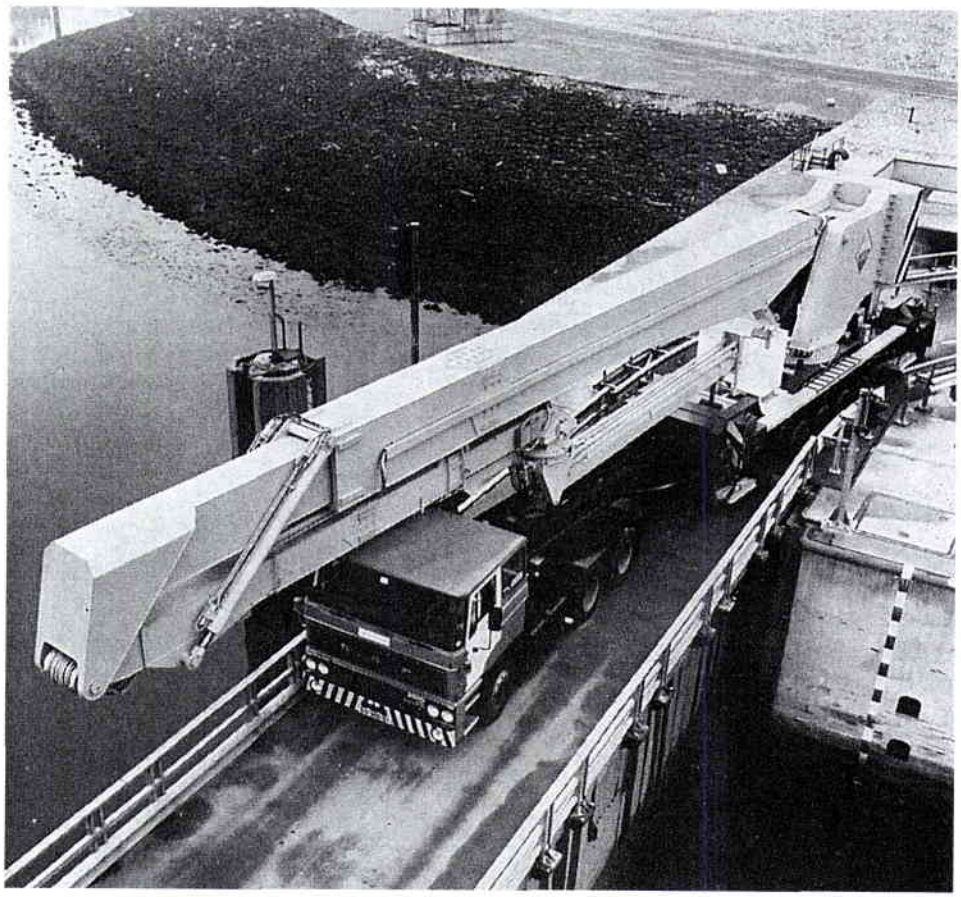
De trekker bestaat uit een 3-assige motorwagen met dubbel aangedreven achterassen. Aan de trekker wordt door middel van een schotelconstructie de oplegger gekoppeld. De snelheid van de combinatie bedraagt maximaal 20 km per uur. Deze lage rijsnelheid is acceptabel omdat het inspectievoertuig alleen op de kering wordt ingezet en zich dus niet tussen het normale wegverkeer hoeft te begeven.

Het vermogen van de trekker bedraagt 228 kW. Dit is ruim voldoende om de grote massa van het inspectievoertuig in beweging te brengen en in beweging te houden op de hellingen in het wegtracé.

3.5 Massa en afmetingen

De massa van het inspectievoertuig bedraagt inclusief trekker 91 ton. Hiervan komt 35 ton voor rekening van het contragewicht en 9 ton voor de trekker. In rijstand wordt een klein deel van de massa (13 ton) via de schotelconstructie naar de trekker overgebracht. Het resterende deel (69 ton) wordt over de 6 assen van de oplegger gelijkmatig verdeeld. De hierdoor optredende asdruk van 115 kN is bij de gegeven rijsnelheid van 20 km/uur acceptabel.

In rijstand bevindt de laagwerker zich in ingeklapte stand in de lengterichting van het voertuig (figuur 13). De boven- en middenboom zijn hierbij boven de cabine geplaatst en strekken hier 4 m voorbij. De lengte van de totale combinatie bedraagt 24,5 m, de breedte 2,6 m en de grootste hoogte 4,8 m. Met deze afmetingen



figuur 14 Passage Roompotsluis

en het grote werkbereik van de laagwerker is dit inspectievoertuig uniek.

Het wegenplan op de kering is, waar nodig, aangepast aan de grote afmetingen van het inspectievoertuig. Obstakels zoals lichtmasten, slagbomen, etc. zijn zodanig geplaatst dat deze geen hinder ondervinden van het uitzwaaien van de bomen in de rijstand. Dit effect treedt op bij het rijden door bochten en ontstaat door de overstek van de bomen voorbij de cabine (figuur 14). Op de damvakken en op de beide oevers zijn hulpwegen voorzien waardoor het mogelijk is het inspectievoertuig ter plaatse te keren. Op het damvak is ook een overdekte stallingruimte aanwezig.

In opgestelde positie, dit is de positie tijdens het uitvoeren van inspecties, bedraagt de maximale stempelkracht 320 kN. Deze ontstaat uit de massa van het inspectievoertuig vermeerderd met de krachten ten gevolge van het uitkragende moment en door dynamische effecten, zoals afremmen van een boombeweging en door wind. De lengte van het inspectievoertuig in opgestelde stand bedraagt ca. 30 meter gemeten tussen achterzijde contragewicht en de uiterste stand van de inspectiekorf.

3.6 Materialen en conservering

De voor dit soort constructies gangbare materialen zijn toegepast:

• Staalconstructie laagwerker	St. 52-3
• Staalconstructie oplegger	St. 37-2
• Zuigerstangen	SKF280 hard verchroomd
• Cilindermantels	St. 52-3
• Assen	42CrMo4
• Lagerbussen	Beverbrons
• Kunststof glijblokken	Gietnylon olg 90

Het conserveringssysteem is afgestemd op het agressieve zeeklimaat. Voor de laagwerker is het systeem opgebouwd uit:
- Voorbehandeling door stralen tot een reinheidsgraad SA-3
- 75 micrometer ethyl-zinksilicaat
- 50 micrometer epoxy-hechtprimer
- 2 x 80 micrometer dekverf in de kleur geel. De kleur van de inspectiekorf is wit gehouden

Het conserveringssysteem van de oplegger is, door de kans op beschadigingen ten gevolge van stoten, voorzien van een harde metallieke onderlaag. Dit systeem bestaat uit:
- Voorbehandeling door stralen tot een reinheidsgraad SA-3
- metalliseren met 100 micrometer zink
- 110 micrometer epoxy-hechtprimer
- 2 x 50 micrometer dekverf in de kleur zwart. De kleur van het stempelframe is anthraciet

3.7 Aandrijving en besturing

De energieopwekking voor het rondpompen van de hydraulische olie geschiedt door middel van twee op zichzelf staande dieselaggregaten met electrische startmotor, dynamo en 24 volt accubatterij. Er is altijd maar één aggregaat in werking. Het tweede is 'Stand-By' en kan worden ingeschakeld in geval van een storing in het operationele aggregaat. Aan elk aggregaat is een tandwielpomp gekoppeld door middel waarvan olie in het circuit wordt rondgepompt.
Elk dieselaggregaat heeft een vermogen van 21 kW en verzorgt de druk in het hydraulisch systeem. Een hoofdveiligheidsventiel, geplaatst direct achter de pomp, begrenst de pompdruk op 200 bar.

Een hoofdschakelschuif verdeelt het hydraulisch circuit in twee aparte delen, een stempelciruit en een laagwerkercircuit. Deze schuif heeft een belangrijke veiligheidsfunctie. Met deze schuif wordt gerealiseerd dat alleen in de situatie dat het inspectievoertuig is afgestempeld, de laagwerker bewogen kan worden. Tijdens het afstempelen stuurt de hoofdschakelschuif de oliestroom alleen door het stempelcircuit. Het laagwerkercircuit is dan drukloos, zodat bewegen met de laagwerker onmogelijk is. Pas nadat de stempels op druk zijn gebracht, en dit is gesignaleerd, en de stempels zijn afgesteld op een druk waarbij het zeker is dat alle krachten en momenten via de stempelcilinders in het wegdek kunnen worden gevoerd, wordt de hoofdschakelschuif omgezet. De oliestroom wordt nu alleen door het laagwerkercircuit gestuurd. Het stempelcircuit is geblokkeerd waardoor stempelbewegingen niet meer mogelijk zijn.

Bij het beëindigen van een inspectie kan de hoofdschakelschuif pas van het laagwerkercircuit weer omgezet worden naar het stempelcircuit als de laagwerker is ingeklapt en een eindschakelaar heeft gesignaleerd dat de bomen zijn terug gebracht naar de eindpositie op de wagen.
Zowel het op druk zijn van de stempelvijzels als het bereiken van de eindsituatie van de laagwerker wordt op het bedieningspaneel gesignaleerd.

Het besturen van de scharnier-, telescopeer- en zwenkbewegingen gebeurt met voorgestuurde proportionele stuurschuiven waarmee een traploze snelheidsregeling mogelijk is. Hierdoor wordt voorkomen dat tijdens het aanzetten of afremmen van een beweging, hinderlijke schokeffecten ontstaan. Via potentiometers op de bedieningspanelen worden de stuurschuiven gestuurd. De stuurschuiven zijn zodanig uitgevoerd dat zij tevens functioneren als leidingbreuk- en veiligheidsventielen. Hierdoor wordt bij een eventuele slangbreuk of overbelasting de constructie geblokkeerd en kan geen ongewenste verplaatsing van de inspectiekorf plaatsvinden. Om dezelfde reden is ook elke stempelcilinder voorzien van deze ventielen. Alle schuiven en ventielen worden electrisch bediend, maar zijn tevens met de hand te bedienen. Het is hierdoor mogelijk in geval van een electrische storing over te gaan tot handbediening. Het hydraulisch systeem is zodanig afgesteld dat de korfsnelheid max. 0,2 m/sec bedraagt. De maximale versnelling c.q. vertraging die bereikt kan worden bedraagt 0,40 m/sec^2. Deze waarden zijn bewust laag gehouden om de optredende massakrachten en schokeffecten binnen aanvaardbare grenzen te houden.

De besturing is ondergebracht in twee schakelstations en vier bedieningskasten (panelen), waarvan twee ten behoeve van de stempelprocedure en twee voor het uitvoeren van de laagwerkerbediening.

3.8 Bediening

Vanwege veiligheidsoverwegingen is de bediening van de stempels volledig gescheiden van de laagwerkerbediening. Voor het bedienen van de stempels zijn twee bedieningspanelen aanwezig, één aan de linker- en één aan de rechterzijde van de oplegger. De aanrijrichting van het inspectievoertuig is vrij, en inspecties kunnen over de linkerzijde dan wel over de rechterzijde van het voertuig plaatsvinden. Het bedieningspaneel aan de inspectiezijde stuurt de vier hydraulische stempels vanuit de opbergstand gelijktijdig hori-

zontaal uit. Dit gebeurt zodanig dat de stempels automatisch aan de inspectiezijde op de vanwege stabiliteit noodzakelijke afstand van 2,7 m, en aan de niet-inspectiezijde op 1,8 m, uit het hart van het voertuig worden geplaatst. Alleen deze stand kan worden ingenomen en pas als deze stand is bereikt, en gesignaleerd, kan de afstempelprocedure worden vervolgd.

De bediening van de laagwerker kan geschieden zowel vanaf de grote draaikoning als vanuit de inspectiekorf, echter nooit gelijktijdig. Op beide plaatsen is een bedieningspaneel aanwezig. Omdat de componenten voor de besturing op de oplegger zijn geplaatst, en omdat in geval van een storing in het electrisch circuit hiervan, de componenten met de hand bediend moeten worden, is de bedieningskeuze alleen vanaf het bedieningspaneel op de grote draaikoning door middel van een sleutelschakelaar te bepalen. Hierdoor is het mogelijk dat ten gevolge van een storing in de componenten van het hydraulisch systeem, of in een noodsituatie, waarbij het bedienen vanuit de korf niet meer mogelijk is, de korf vanaf het bedieningspaneel op de grote draaikoning terug wordt gedirigeerd naar de nulstand.

De bedieningspanelen zijn, naast de lampen die de drukken in het hydraulisch systeem signaleren en de lampen die aangeven of de stempelvijzels op druk zijn, voorzien van een noodstopschakelaar en bedieningshandels. Door het indrukken van de noodstopschakelaar worden alle bewegingsmogelijkheden geblokkeerd. De horizontale stand van de inspectiekorf blijft gewaarborgd.

De bedieningshandels zijn voorzien van een zogenaamde 'dodemansfunctie' welke een ongewenste bediening verhindert. Tevens zijn deze handels uitgevoerd met een terugvering naar nul. Dit houdt in dat bij het loslaten de handels automatisch terugkomen in de nulstand waardoor de gecommandeerde beweging stopt en geleidelijk wordt afgeremd. Hierdoor worden schokeffecten tijdens afremmen voorkomen.

De bediening is zodanig uitgevoerd dat in de volgende gevallen kan worden overgegaan tot noodbediening:
- Uitval van de bedieningsmogelijkheid in de inspectiekorf
- Storing in een dieselaggregaat
- Electrische storing in de hoofdschakelschuif van het oliecircuit
- Electrische storing in de stuurschuiven
- Electrische storing in het automatische nivelleersysteem

3.9 Veiligheid

Om een zo hoog mogelijke graad van veiligheid te bereiken voldoet het inspectievoertuig, qua uitvoering, stabiliteit en bediening aan de strenge eisen. Naast het hanteren van de hiervoor gangbare normen en het inwinnen van adviezen bij de Arbeidsinspectie en de Rijksdienst voor het Wegverkeer, is veiligheid ook bereikt door het toepassen van hoogwaardige componenten met een geringe storingsuitval en een lange levensduur. Worden de belangrijkste veiligheidsvoorzieningen, die in het inspectievoertuig zijn ingebouwd, nogmaals op een rij gezet, dan blijkt hieruit dat in het ontwerp grote aandacht is besteed aan de veiligheid. De belangrijkste beveiligingen zijn:
- Nadat het inspectievoertuig op de inspectieplaats is gemanoeuvreerd, is de eerste handeling die verricht moet worden het afstempelen op het wegdek. Zonder deze handeling is de laagwerker niet in beweging te brengen.
- Het afstempelen wordt gerealiseerd door het op druk brengen van de stempelvijzels. Deze zijn afgesteld op een druk waarbij het zeker is dat alle krachten en momenten via de stempelvijzels in het wegdek worden gevoerd. Pas nadat de stempelvijzels dit drukniveau hebben bereikt, wordt de hoofdschakelschuif geactiveerd waarmee de laagwerker in gang kan worden gezet.
- De bediening van de laagwerker kan zowel vanaf het voertuig als vanuit de inspectiekorf geschieden, echter nooit gelijktijdig.
- De bedieningspanelen zijn voorzien van een noodstopschakelaar en bedieningshandels die tevens fungeren als dodemansknop. Bij het loslaten van deze knop komt de gehele constructie tot stilstand.
- De bediening is zodanig uitgevoerd dat telkens maar één beweging tegerlijkertijd gedaan kan worden.
- Alle hydraulische cilinders en stempels zijn voorzien van leidingbreuk- en veiligheidsventielen. Hierdoor wordt bij een eventuele slangbreuk of overbelasting de constructie geblokkeerd en vindt geen ongewenste verplaatsing van de inspectiekorf plaats.
- Een tweede aggregaat is aanwezig waardoor het mogelijk is om bij storing in de energievoorziening de laagwerker in de 'nulstand' terug te brengen.
- Een breed scala aan noodbedieningen is ingebouwd.
- Een begrenzing is opgelegd aan de doorbuiging van de bomen en aan het deinen van de inspectiekorf.
- De bewegingssnelheid is laag gehouden. Dit voorkomt schokeffecten tijdens het aanzetten of afremmen van een beweging.

Om de veiligheid te garanderen moet het inspectievoertuig in een optimale conditie blijven verkeren. Dit wordt verzekerd door een onderhoudsplan. Dit plan omvat uit te voeren controles voordat men met het inspectievoertuig gaat rijden en werken, maandelijkse en drie-maandelijkse controle- en onderhoudsbeurten en een jaarlijks uit te voeren veiligheidskeuring. De jaarlijkse veiligheidskeuring is wettelijk voorgeschreven en wordt uitgevoerd door een onafhankelijk keuringsinstituut onder supervisie van de Arbeidsinspectie. De driemaandelijkse en jaarlijkse controle- en onderhoudsbeurten, alsmede de veiligheidskeuring zijn van een zodanig specialistisch karakter dat voor het uitvoeren daarvan kennis van het inspectievoertuig noodzakelijk is. De overige controle- en onderhoudsbeurten zijn van algemene aard en kunnen door de beheerder van het inspectievoertuig zelf worden uitgevoerd.

3.10 Levering van het inspectievoertuig

Voor het definitieve ontwerp en de bouw van het inspectievoertuig zijn een aantal gespecialiseerde bedrijven benaderd met de vraag of zij in staat waren een dergelijk inspectiemiddel te ontwikkelen en zo ja, hiervoor een plan in te dienen met opgave van afmetingen, massa, kosten e.d. De ingediende plannen zijn beoordeeld op technische mogelijkheden, veiligheid, aanschafprijs en economische bedrijfsvoering. Op grond van de beoordeling is gekozen de schuifinspecties uit te voeren met behulp van het hier beschreven inspectievoertuig [3]. Ontwerper en leverancier van het inspectievoertuig is de combinatie van "Boogert Hoogwerkers B.V." uit Amsterdam en "Hilton Engineering" uit Maastricht. Het inspectievoertuig heeft 2 miljoen gulden gekost.

Om het inspectievoertuig in optimale conditie te houden heeft de beheerder met de leverancier een contract afgesloten voor het onderhouden van het inspectievoertuig voor zover dit de specialistische controle en het onderhoud betreft. Daarnaast verleent dit bedrijf bedieningsondersteuning indien de beheerder dit wenst.

4. Documentatie

Documenten in deze lijst zijn opgenomen in het archief van Rijkswaterstaat. De aanduiding PROBU verwijst naar het projectbureau dat tijdens de bouw het document opgesteld heeft.

[1] Toegankelijkheid schuiven voor inspectie en onderhoud, notitie 6PROBU-M-82060

[2] Mobiele inspectiewagen, notitie 6PROBU-M-83034

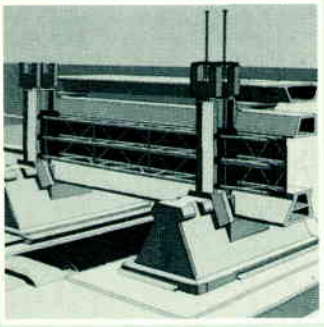
[3] Aanbeveling engineering en fabricage inspectiewagen, notitie 6PROBU-B-84031

[alg] De (technische) beschrijving van het inspectievoertuig is gebaseerd op de 'Berekening staalconstructie inspectievoertuig Oosterscheldekering' en het 'Gebruikers handboek inspectievoertuig Oosterscheldekering'.

ministerie van verkeer en waterstaat

rijkswaterstaat

ontwerpnota stormvloedkering oosterschelde

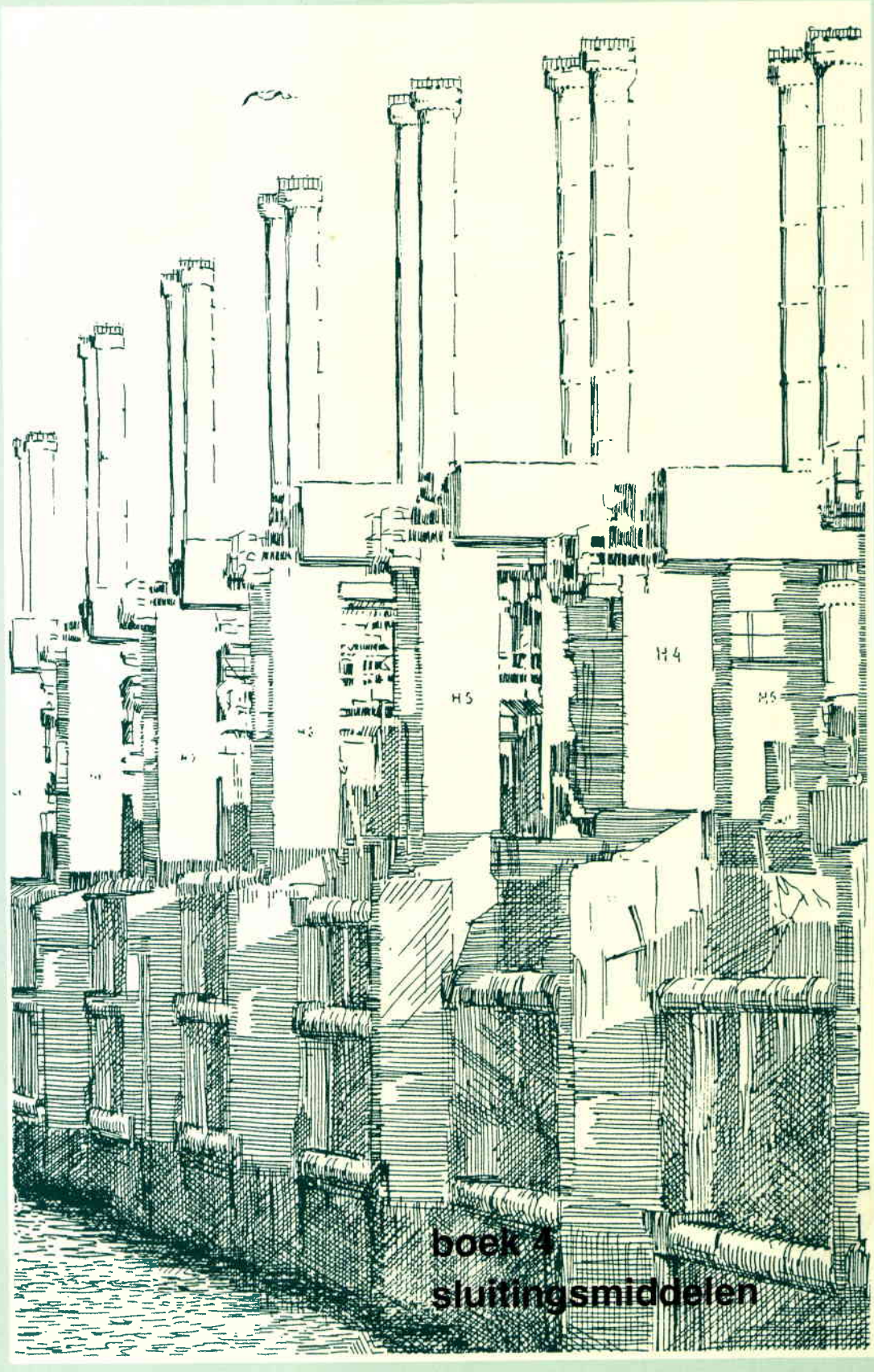












boek 4
sluitingsmiddelen

(2.1-4) TS - Technick.