



Ontwerp Geleidewerken Hoofdvaarweg Lemmer-Delfzijl

DO-berekeningsrapport

Zaaknummer: 31156999

projectnummer 00463688
definitief revisie 1.0
8 oktober 2020

Ontwerp Geleidewerken Hoofdvaarweg Lemmer-Delfzijl

DO-berekeningsrapport

Zaaknummer: 31156999

projectnummer 00463688
documentnummer 463688-BER-DO-01
definitief revisie 1.0
8 oktober 2020

Auteurs

Ir. G. Dorgelo

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

datum vrijgave
9 okt 2020

beschrijving revisie 1.0
definitief

controle

F. den Hollander

vrijgave
M. de Kloet

Inhoudsopgave

Blz.

1	Inleiding	1
1.1	Algemeen	1
1.2	Revisiebeheer	2
1.3	Doel en scope van het rapport	2
2	Basis voor het ontwerp	3
2.1	Normen, richtlijnen en literatuur	3
2.2	Contractdocumenten	3
2.3	Volgorde contract, normen en richtlijnen	4
2.4	Eisen, uitgangspunten en randvoorwaarden	4
2.5	Aan project gerelateerde documenten	6
2.6	Rekenprogrammatuur	6
3	Ontwerp van de constructies	7
3.1	Algemeen	7
3.2	Overzicht constructies	8
4	Materiaal- en grondgegevens	12
4.1	Materiaalgegevens	12
4.2	Grondgegevens	12
4.2.1	Spannenburg	13
4.2.2	Uitwellingerga	14
4.2.3	Ald Skou	15
4.2.4	Blauwverlaat	16
4.3	Corrosie	17
5	Belastingen	18
5.1	Permanente belasting	18
5.2	Veranderlijke belasting	18
5.3	Buitengewone belasting	18
5.4	Vermoeiing	18
5.5	Belastingfactoren en belastingcombinaties	18
6	Berekening beschermpanelen	19
6.1	Opzet van de berekening	19
6.2	Groepering van de constructies	20
6.3	Bepaling aanvaarbelastingen	20
6.3.1	Schamp aanvaring	20
6.3.2	Frontale aanvaring	22
6.4	Gekozen constructieve elementen	23
6.5	Controle sterkte schampaanvaring	24

6.6	Controle sterkte frontale aanvaring	25
6.7	Controle stabiliteit buispaal	27
6.8	Controle vervorming	27
6.9	Controle scheepshuidbelasting	27
6.10	Controle verjonging	28
6.10.1	Ontwerp van het verjongingsdetail	28
6.10.2	Effect op de doorbuiging	28
6.10.3	Sterktetoetsing	29
6.11	Aanvaring bij hogere aanvaarsnelheden en grotere aanvaarhoeken	29
7	Berekening geleidewerken	30
7.1	Opzet van de berekening	30
7.2	Groepering van de constructies	30
7.3	Bepaling aanvaarbelastingen	31
7.4	Controle sterkte geleidewerk type 1: enkelzijdig	33
7.4.1	Modellering	33
7.4.2	Energiebeschouwing	35
7.4.3	Vergelijking modellen D-Sheet Piling en SCIA Engineer	36
7.4.4	Toetsingen	37
7.4.4.1	Scheepshuidbelasting	37
7.4.4.2	Funderingspalen	37
7.4.4.3	Overige constructie onderdelen	38
7.5	Controle sterkte geleidewerk type 2: dubbelzijdig	39
7.5.1	Modellering	39
7.5.2	Energiebeschouwing	40
7.5.3	Vergelijking modellen D-Sheet Piling en SCIA Engineer	40
7.5.4	Toetsingen	40
7.5.4.1	Scheepshuidbelasting	40
7.5.4.2	Funderingspalen	40
7.5.4.3	Overige constructieonderdelen	41
7.6	Controle sterkte geleidewerk type 3: uniek	42
7.6.1	Modellering	42
7.6.2	Energiebeschouwing	43
7.6.3	Vergelijking modellen D-Sheet Piling en SCIA Engineer	43
7.6.4	Toetsingen	43
7.6.4.1	Scheepshuidbelasting	43
7.6.4.2	Funderingspalen	43
7.6.4.3	Overige constructieonderdelen	44
7.7	Controle stabiliteit funderingspalen	44
7.8	Controle knikkrachten	45
8	Controle	47
8.1	Eigen controles	47
8.1.1	Controle geleidewerken – doorbuiging bij aanvaring met simpel model	47
8.1.2	Controle geleidewerken – veerstijfheden en verplaatsingen in D-Sheet Piling	48
8.2	Controle door controleur	49

9	Conclusie en aandachtspunten	50
9.1	Conclusie	50
9.2	Aandachtspunten	50

Bijlage 1 Eisen

Bijlage 2 Sonderingen

Bijlage 3 Grondeigenschappen

Bijlage 4 Berekeningen beschermipalen

Bijlage 5 Berekeningen beschermipalen

Bijlage 6 Verjongingen beschermipalen

Bijlage 7 Sterktetoets geleidewerken D-Sheet

Bijlage 8 Sterktetoets geleidewerken SCIA

Bijlage 9 Stabiliteitstoets geleidewerken

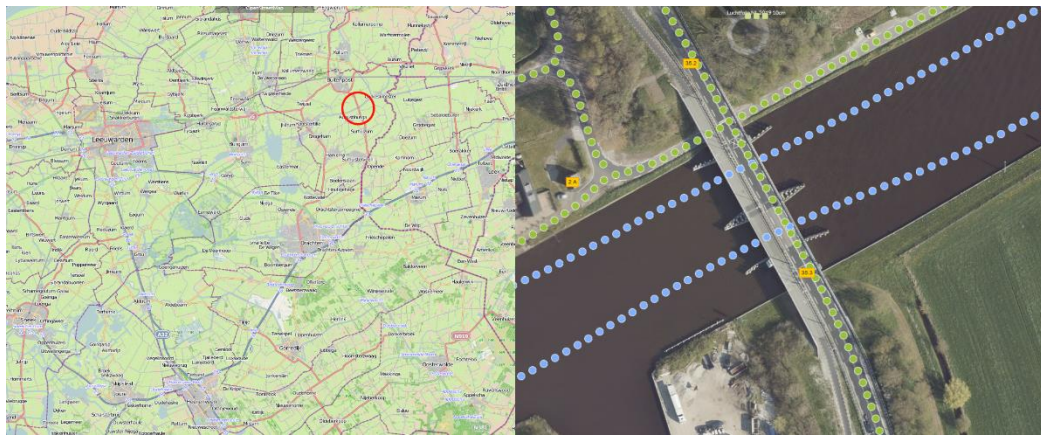
Bijlage 10 Verificatieformulier

1 Inleiding

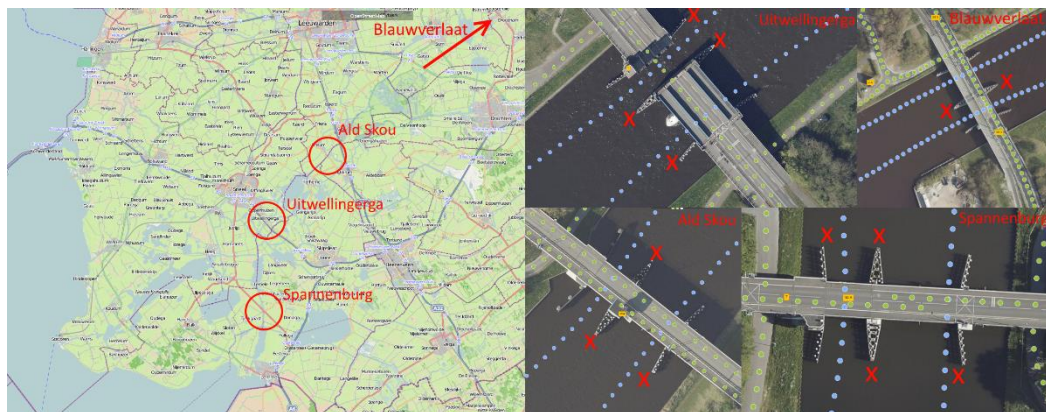
1.1 Algemeen

Voorliggend document omvat de DO-berekeningsrapportage voor het constructieve ontwerp van de geleidewerken en beschermipalen welke in de vaarweg Lemmer – Delfzijl gebouwd dienen te worden. In dit rapport worden de eisen en uitgangspunten uitgewerkt tot concrete en eenduidige berekeningen voor de bouw van de constructies.

Dit rapport is opgesteld door Antea Group in opdracht van Rijkswaterstaat, ten behoeve van hun werkzaamheden in de vaarweg Lemmer – Delfzijl. Onderstaande afbeeldingen illustreren de beschouwde locaties. In de illustraties worden vier locaties gepresenteerd. Voor de locatie Blauwverlaat moeten de geleidewerken vervangen worden, bij de overige drie locaties zullen beschermipalen gerealiseerd worden ten behoeve van de bescherming van de bestaande bruggen. Voor Ald Skou zullen dit drie beschermipalen zijn, voor de overige locaties vier beschermipalen. Naast het vervangen van de bestaande geleidewerken bij Blauwverlaat worden hier ook nieuwe beschermipalen gerealiseerd.



Figuur 1. Locatie geleidewerken te Blauwverlaat (Bron: Street Smart, 2020)



Figuur 2. Locaties beschermipalen te Ald Skou, Uitwellingerga, Spannenburg en Blauwverlaat (Bron: Street Smart, 2020)

1.2 Revisiebeheer

Revisie	status	Datum	Gewijzigde hoofdstukken	Beschrijving wijzigingen
0.1	Concept	24-09-2020	-	Initiatie beschermipalen
0.2	Concept	02-10-2020	-	Verbeteringen beschermipalen en initiatie geleidewerken
0.3	Concept	06-10-2020	-	Verbetering geleidewerken
0.4	Concept	07-10-2020	-	Enkele aandachtspunten
1.0	Definitief	08-10-2020	-	Verduidelijking van secties

1.3 Doel en scope van het rapport

Voor dit project is een eisenspecificatie voorhanden. De relevante eisen voor de berekening van de objecten zijn in bijlage 1 van dit rapport opgenomen. In de eisenspecificatie zijn tevens de vigerende normen en richtlijnen aangegeven. Het doel van dit rapport is om relevante eisen, uitgangspunten en voorgeschreven documenten in dit rapport uit te werken tot een concrete berekening van de constructies.

De volgende onderdelen vallen binnen de scope van het berekeningsrapport:

- 6 geleidewerken brug Blauwverlaat
 - o Berekening funderingspalen
 - o Berekening liggerbuis
 - o Berekening stalen gordingen
 - o Berekening verbinding gording met liggerbuis
- 2 beschermipalen bij brug Blauwverlaat
- 3 beschermipalen bij brug Ald Skou
- 4 beschermipalen bij brug Spannenburg
- 4 Beschermipalen bij brug Uitwellingerga

Dit rapport biedt alle constructieve berekeningen behorende in de DO fase.

2 Basis voor het ontwerp

2.1 Normen, richtlijnen en literatuur

Bij dit project zal gebruik worden gemaakt van de onderstaande normen en richtlijnen.

Norm	Omschrijving	ref
NEN-EN 1990+A1+A1/C2:2019, NEN-EN 1990+A1+A1/C2:2019/NB:2019	Grondslagen van het constructief ontwerp	[N.1]
NEN-EN 1991-1-1+C1+C11:2019, NEN-EN 1991-1-1+C1+C11:2019/NB:2019	Belastingen op constructies - deel 1-1: Algemene belastingen - Volumieke gewichten, eigengewicht en opgelegde belastingen voor gebouwen	[N.2]
NEN-EN 1991-1-7+C1+A1:2015, NEN-EN 1991-1-7+C1:2011/NB:2019	Belastingen op constructies - Deel 1-7: Algemene belastingen - Buitengewone belastingen: stootbelastingen en ontploffingen	[N.3]
NEN-EN 1993-1-1+C2+A1:2016 NEN-EN 1993-1-1+C2+A1/NB:2016	Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen	[N.4]
NEN-EN 1993-1-5+C1:2012; NEN-EN 1993-1-5:2006/NB:2017	Ontwerp en berekeningen van Staalconstructies Deel 1-5: Algemene regels - Constructieve plaatvelden	[N.5]
NEN-EN 1993-1-8+C2:2011 NEN-EN 1993-1-8+C2/NB:2011	Ontwerp en berekeningen van staalconstructies - Deel 1-8: Ontwerp en berekening van verbindingen	[N.6]
NEN-EN 1993-5:2008 (en), NEN-EN 1993-5:2008/C1:2009 (en), NEN-EN 1993-5:2008/NB:2012 (en)	Ontwerp en berekening van staalconstructies - deel 5: palen en damwanden	[N.7]
NEN-EN 1997-1+C1+A1:2016, NEN-EN 1997-1+C1+A1:2016/NB:2019	Geotechnische ontwerp – Deel1: Algemene regels	[N.8]
NEN 9997-1+C2:2017	Geotechnische ontwerpen van constructies Deel 1: Algemene regels	[N.9]

Richtlijn/ ontwerpvoorschrift	Omschrijving	ref
ROK 1.4 - RTD 1001:2017	Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken	[R.1]
RVW 2020	Richtlijn vaarwegen	[R.2]
EAU 2012	Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways	[R.3]
CUR 166 (2008) 6de druk, deel 1 en 2 + errata 2014	Damwandconstructies	[R.4]

Literatuur	Omschrijving	ref
Plastic design of breasting dolphins	Thesis TuD, Bruijn, 2004	[L.1]
Local Buckling Strength and Deformation Capacity of Pipes	Paper TuD, Gresnigt 2009	[L.2]

2.2 Contractdocumenten

Document	Omschrijving	ref
31156999 Bijlage A - Vraagspecificatie	Vraagspecificatie ontwerp geleidewerken	[C.1]
Verzameling bijlagen 1a tot 1g - 190097	Verzameling ontwerptekeningen Kootstertille	[C.2]

2.3 Volgorde contract, normen en richtlijnen

Indien tegenstrijdigheid ontstaat tussen de eisen in de Vraagspecificatie, reglementen, Europese normen incl. Nationale Bijlagen, praktijkrichtlijnen, aanbevelingen, beoordelingsrichtlijnen, publicaties of andere van toepassing verklaarde documenten, dan geldt onderstaande rangorde:

1. Eisen uit nota's, aanvullingen en contractwijzingen;
2. Eisen uit de vraagspecificatie;
3. Bindende documenten, waaronder referentieontwerp;
4. Generieke normen (bouwbesluit), richtlijnen, e.d.;
5. Informatieve documenten.

Indien er tegenstrijdigheden ontstaan tussen eisen uit contractdocumenten, dan dient de volgende rangorde aangehouden te worden:

1. Eisen uit nota's, aanvullingen en contractwijzingen;
2. Eisen uit de vraagspecificatie.

Indien normen en richtlijnen, genoemd in dit hoofdstuk onderling tegenstrijdig zijn geldt de volgende rangorde:

1. Uitgaven NEN/EC;
2. Uitgaven CUR, CROW en TAW/ENW en overige (daar waar deze meer specifiek zijn).

Verder geldt dat binnen de Eurocode normen specifieke normen boven algemene normen gaan, bijvoorbeeld NEN-EN 1992-2 "betonnen bruggen" gaat boven NEN-EN 1992-1-1 "betonconstructies algemeen".

2.4 Eisen, uitgangspunten en randvoorwaarden

De onderstaande uitgangspunten worden gehanteerd, de eisen uit de eisenspecificatie (zie bijlage 1) zijn verder aangevuld om tot onderstaande uitgangspunten te komen. Voor de maatgevende bodemdiepte is het uitgangspunt dat de volledige vaarweg in de toekomst gebaggerd gaat worden tot de genoemde minimale bodemdiepte. Hoger gelegen bodems zullen tijdens de gebruikssituatie daarmee niet meer bestaan.

Veiligheidsklasse / gevolgklasse:	CC 2 conform Eurocode
Levensduur:	50 jaar (eis 25)
Betrouwbaarheid β :	3.8 conform Eurocode
Minimale bodemdiepte:	NAP -5,76 m (eis 23)
Bodemdiepte spreiding Blauwverlaat:	NAP -6,0 m tot NAP -5,0 m
Bodemdiepte spreiding Ald Skou:	NAP -5,7 m tot NAP -3,2 m
Bodemdiepte spreiding Spannenburg:	NAP -5,7 m tot NAP -4,1 m
Bodemdiepte spreiding Uitwellingerga:	NAP -5,7 m tot NAP -4,2 m
Maatgevende bodemdiepte Blauwverlaat:	NAP -6,0 m
Maatgevende bodemdiepte Ald Skou:	NAP -5,76 m
Maatgevende bodemdiepte Spannenburg:	NAP -5,76 m
Maatgevende bodemdiepte Uitwellingerga:	NAP -5,76 m
Maatgevend hoogwaterstand (MHWS):	NAP -0,29 m (eis 24)
Streefpeil:	NAP -0,52 m (eis 24)
Maatgevend laagwaterstand (MLWS):	NAP -0,66 m (eis 24)

Vaarweg klasse:	Va (eis 12)
Maatgevend schip type:	M8 (eis 15)
Maatgevend schip lengte:	110 m (eis 15)
Maatgevend schip breedte:	11,4 m (eis 15)
Maatgevend schip diepgang:	3,5 m (eis 15)
Maatgevende schip laadvermogen:	3300 ton conform RVW tabel 8
Maatgevende waterverplaatsing:	3795 ton conform ROK p. 68

Vaarsnelheid aanvaring geleidewerk:	6,5 km/u (eis 36)
Hoek geleidewerk ten opzichte van vaarweg:	9,5 graden (1:6) (eis RVW-8)
Hoek aanvaring ten opzichte van vaarweg:	5 graden, (eis 38)
Hoek aanvaring geleidewerk (afgerond):	15 graden

Vaarsnelheid aanvaring beschermepaal frontaal:	2,5 km/u (eis 21)
Vaarsnelheid aanvaring beschermepaal onder hoek:	6,5 km/u (eis 38)
Hoek aanvaring beschermepaal:	5 graden (eis 38)
Afstand beschermepaal tot geleidewerk minimaal:	2 m (eis 19)

Overige uitgangspunten:

- Buispalen dienen uitgevoerd te worden middels een langsnaad gelaste verbinding. (eis 26)
- Beschermepaal mag als verende, scheepvaarntonvriendelijke constructie ontworpen worden, met als definitie geclassificeerd is in de ROK. (eis 18)
- Beschermepaal dient aanvaring onder hoek zonder plastische vervormingen te kunnen weerstaan. Een kopse aanvaring mag met plastische energie dissipatie worden berekend, mits de doorsnedeklassificatie dit mogelijk maakt. Dit in afwijking van de ROK. (eis 17, 18 en 40)
- Geleidewerk dient bij uitbuiging schade aan de brug en schip te voorkomen, conform de RVW paragraaf 5.9.5.
- Er dient gerekend te worden met tweezijdige corrosie van de buispalen. Dit om voldoende robuustheid in het ontwerp te garanderen. Indien er sprake is van agressieve grondlagen met grote afroesting aan de buitenzijde, mag in die lagen de corrosie aan de binnenzijde gereduceerd worden tot 50% van de waarde aan de buitenzijde. (eis 42 en 43)
- In afwijking van de ROK zijn voor de buispalen hogere staalkwaliteiten dan S355 toegestaan, mits laswerk onder geconditioneerde omstandigheden in de fabriek wordt uitgevoerd. Indien gekozen wordt voor een hogere staalkwaliteit, dient aangetoond te worden hoe dit zich verhoudt tot het nutten van de plastische capaciteit. (eis 39)
- In overleg tussen de opdrachtnemer en de opdrachtgever is in een secundair stadium besloten een oplossing uit te werken gebruikmakende van doorsnedeklasse 2, waarbij plastisch gerekend mag worden voor aanvaring categorie b. Hierin wordt plastische vervorming gedoogd tot $1,7 \delta_{el}$, op basis van de literatuurstudie Bruijn. Hierbij dient rekening gehouden te worden met een ontwerpfactor, gelijk aan 1.25.
- Voor de kopse aanvaring dient de materiaalfactor voor staal gelijkgesteld te worden aan 1,0. Ook dient gerekend te worden met representatieve grondparameters (zonder grondfactoren). Dit is conform de Eurocode indien gerekend wordt in een calamiteiten scenario. De kopse aanvaring is gedefinieerd als calamiteitsituatie aanvaring 'categorie b', zoals gedefinieerd in de ROK.

- Voor de schampaanvaring dienen de materiaal- en grondfactoren meegenomen te worden zoals vereist wordt voor aanvaringen van 'categorie a', zoals gedefinieerd in de ROK.

2.5 Aan project gerelateerde documenten

Als basis voor de berekening is gebruik gemaakt van de volgende documenten:

Document	Uitgave	ref
Geleidewerken vaarweg Lemmer – Delfzijl: Sonderingen	24 september 2020	[D.1]

2.6 Rekenprogrammatuur

De volgende computerprogramma's zullen, indien nodig, worden gebruikt.

- Spreadsheetprogramma Excel versie 2013
- Eindige-Elementen-Programma Scia Engineer versie 19.1.2030.32
- D-Sheet Piling versie 18.2 (Build 1.20477)
- Python versie 3.8.3 64-bit
- Spyder versie 4.1.5
- Standaard spreadsheets Antea Group
- Project specifieke spreadsheets

Standaard spreadsheets Antea Group

Standaard spreadsheets opgesteld binnen Antea Group zijn intern geverifieerd en worden bij gebruik enkel getoetst op de juiste toepassing ervan. Deze spreadsheets zijn te herkennen aan de koptekst per blad waarop een versienummer vermeld wordt.

Project specifieke spreadsheets

Deze spreadsheets zijn speciaal voor dit project opgesteld en zijn binnen Antea Group nog niet geverifieerd. Bij deze spreadsheets wordt door de opsteller extra zorg besteed aan de verduidelijking en controle van de spreadsheet. Deze spreadsheet hebben geen voettekst met versienummer.

3 Ontwerp van de constructies

3.1 Algemeen

Geleidewerken

De zes geleidewerken die gerealiseerd dienen te worden te Blauwverlaat, worden gesplitst in drie typen. Verschil wordt gevonden in de relatieve locatie van de funderingspalen, en of de gordingen zich aan een enkele zijde of aan beide zijden bevinden. Het ontwerp is uitgevoerd middels twee funderingspalen, welke verbonden zijn aan hun bovenzijde met een liggerbuis. Een stalen hekwerk bestaande uit HEB liggers en RHS kokers, wordt verbonden met connectiebuisen aan de liggerbuis. Visuele representatie van de constructie wordt gevonden in sectie 3.2. De constructies worden geplaatst op de locatie zoals hieronder aangegeven.



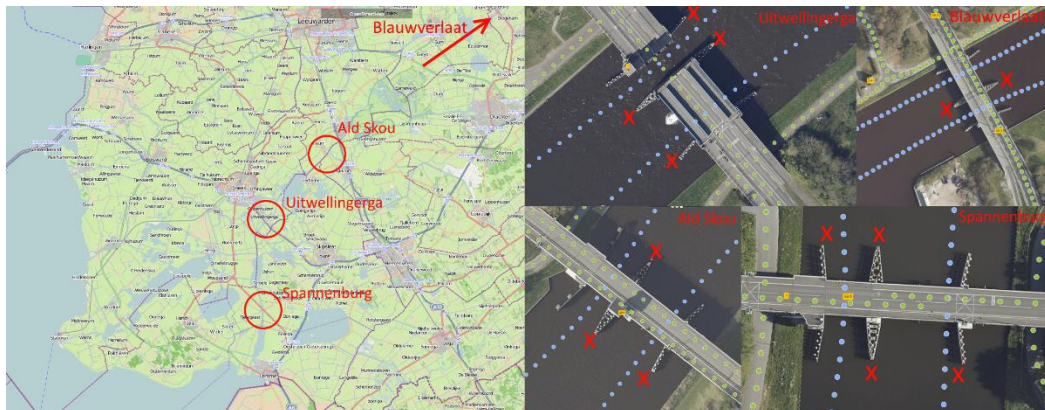
Figuur 3. Locatie geleidewerken te Blauwverlaat (Bron: Street Smart, 2020)

Beschermpalen

Bij de vier genoemde locaties zullen in totaal 13 beschermipalen worden geplaatst, verdeeld zoals hieronder samengevat.

- 2 beschermipalen bij brug Blauwverlaat
- 3 beschermipalen bij brug Ald Skou
- 4 beschermipalen bij brug Spannenburg
- 4 Beschermipalen bij brug Uitwellingerga

Deze beschermipalen dienen de brugpijlers te beschermen voor de komende jaren. De beschermipalen zullen voor beide vaarrichtingen, langs beide kanten van de tussenpijler aan stuurboordzijde geplaatst worden, ten minste twee meter voor het reeds bestaande geleidewerk. Bij de tussenpijler dient de paal in de hartlijn van de tussenpijler te staan, aan de kant van de oever zal de dagzijde van de paal in lijn liggen met de dagzijde van de doorvaart. De situatie bij Blauwverlaat vormt een uitzondering, waarbij de twee beschermipalen in lijn liggen met de geleidewerk in het midden van de vaart. Te Ald Skou zal één beschermipaal minder worden geplaatst, vanwege de recent vervangen geleidewerk. Alle beschermipalen worden omringt met kunststof wrijfijstijlen, ten behoeve van de scheepvaartvriendelijkheid van de constructie.



Figuur 4. Locaties beschermipalen te Ald Skou, Uitwellingerga, Spannenburg en Blauwverlaat (Bron: Street Smart, 2020)

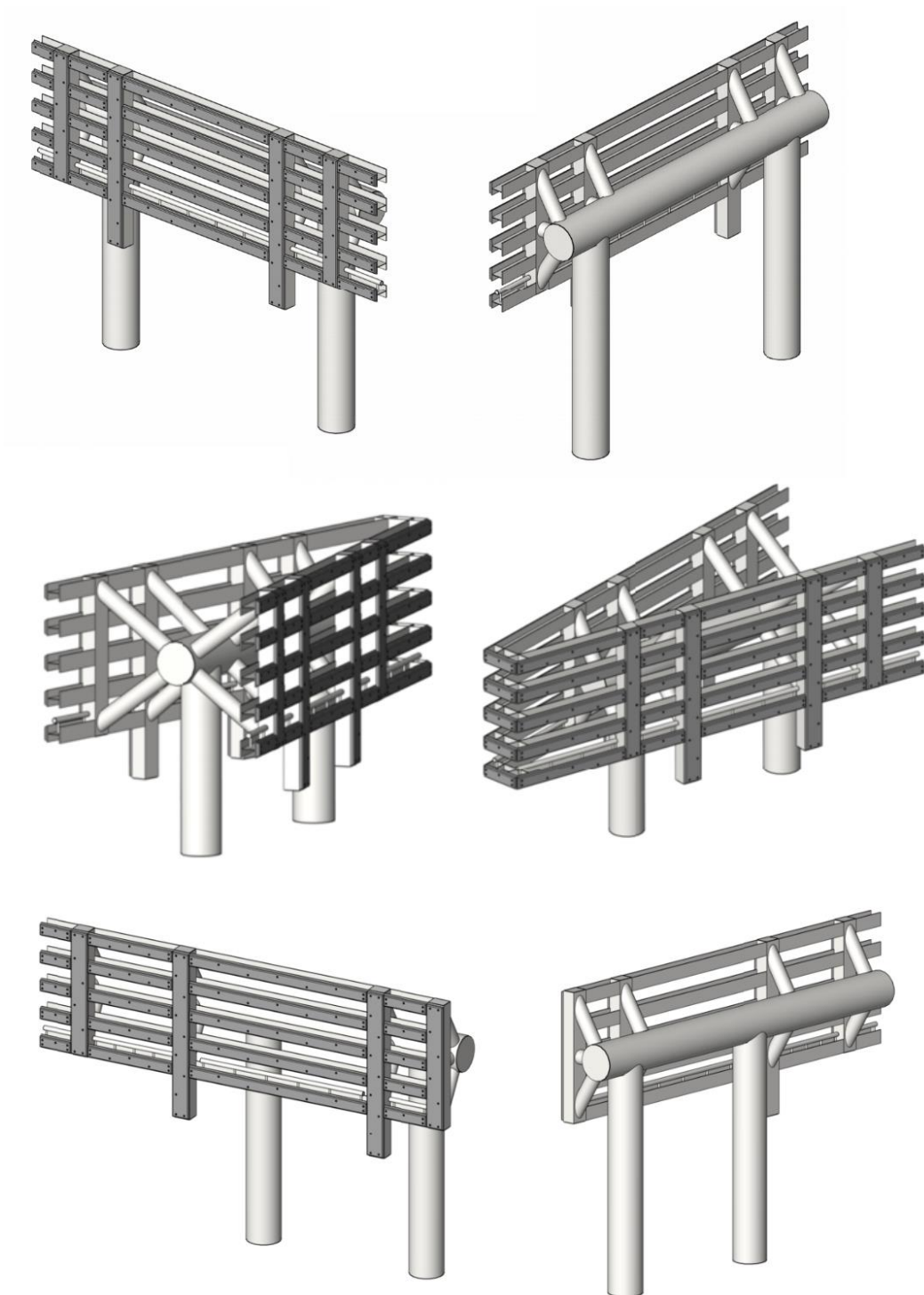
3.2 Overzicht constructies

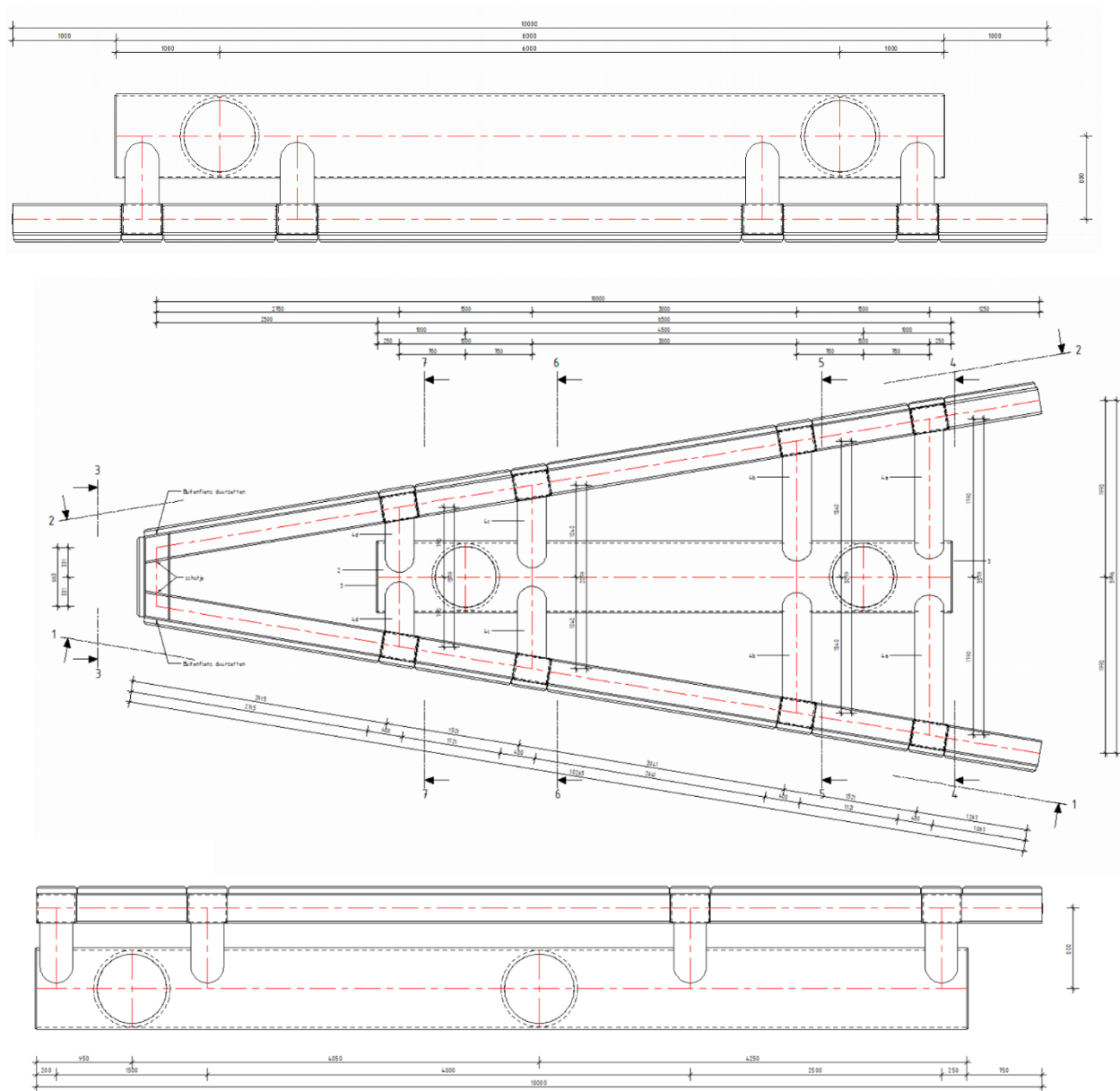
Onderstaande afbeeldingen betreffen de ontwerpen van de constructies welke in dit rapport zijn uitgewerkt. De geleidewerken worden uitgevoerd in drie typen:

1. Het enkelzijdige geleidewerk (aantal: 3)
2. Het dubbelzijdige geleidewerk (aantal: 2)
3. Het unieke geleidewerk (aantal: 1)

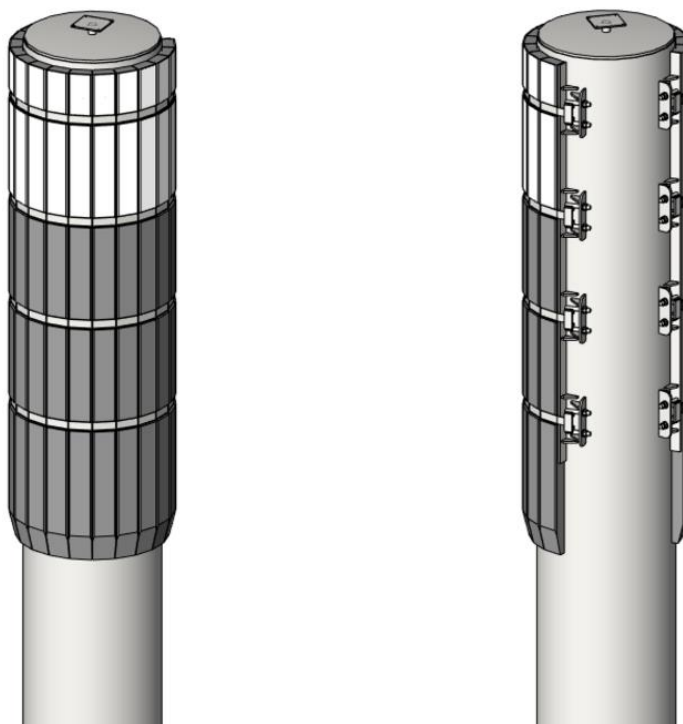
Type 1 en 3 bevinden zich aan de zijkanten van de vaarweg, waarbij type 3 gevonden wordt bij de nok van de brugconstructie. Dit vereist een alternatief palenplan en daarmee een alternatieve constructie. Type 2 wordt gevonden in het midden van de vaarweg, welke de tussenpijler beschermd.

De beschermipalen zijn in vier uitvoeringen uitgewerkt in dit rapport, waarbij de verschillen worden gevonden bij de vier verschillende bruggen. Het ontwerp principe is gelijk, echter zullen afmetingen verschillen. Bij alle beschermipalen, behalve bij Uitwellingerga, wordt een verjonging toegepast om materiaal en kosten te besparen. Daarnaast biedt het een constructief voordeel doordat doorbuigingen vergroot worden, wat leidt tot reductie in aanvaarkracht (en daarmee scheepshuidbelasting). Bij Uitwellingerga bleek dit niet mogelijk omdat de verjonging te dicht bij het wateroppervlakte zou liggen, waardoor de verjonging beschadigd kan raken als gevolg van aanvaring. Er is gebruikgemaakt van de praktische wens dat de verjonging altijd dieper dan de diepgang moet liggen ten tijde van laag water.

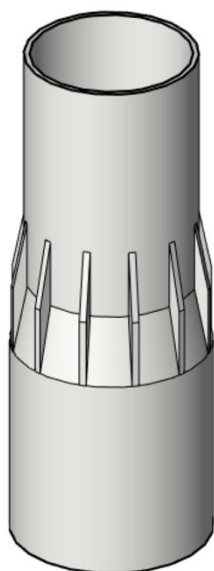




Figuur 5. Ontwerp van de drie type geleidewerken



Figuur 6. Ontwerp beschermipalen. Afmetingen verschillen per projectlocatie.



Figuur 7. Verjonging in de beschermipalen (niet toegepast bij Uitwellingerga)

4 Materiaal- en grondgegevens

4.1 Materiaalgegevens

Voor de materiaaleigenschappen van de verschillende constructieonderdelen zijn de onderstaande gegevens aangehouden:

Staalsoort funderingspalen: S460
Staalsoort overige onderdelen: S355

Tabel 1. Gegevens betreffende gebruikte staalsoorten

	Vloegrens	Treksterkte	Gewicht	E-modulus	Veiligheidsfactor
Staalsoort	f _y [MPa]	f _u [MPa]	γ [kN/m ³]	E [MPa]	γ _{M0}
S355	355	510	78,5	210.000	1,00
S460	460	550	78,5	210.000	1,00

De staalconstructie is ingedeeld in uitvoeringsklasse EXC3 conform NEN-EN 1993-1-1 tabel C.1 met aanvullingen uit de nationale bijlage en ROK1.4. De staalconstructie dient te worden gefabriceerd conform NEN-EN 1090-2.

4.2 Grondgegevens

De sonderingen (zie bijlage 2) laten zien dat grote variabiliteit wordt gevonden tussen de verschillende bruggen. Verschillende sonderingen bij een specifieke brug zijn wel vergelijkbaar, maar tonen ook lichte spreiding, met name bij Spannenburg. In bijlage 3 zijn voor de maatgevende sonderingen de grondlagen gedefinieerd met de gemiddelde conusweerstand per laag. Op basis van de gegevens uit die bijlage worden in het vervolg van dit hoofdstuk de relevante grondparameters nader uitgewerkt die als input dienen voor de berekeningen. De maatgevende sonderingen zijn bepaald aan de hand van onderstaande methode.

Wanneer spreiding gevonden wordt in de sonderingen, dienen twee scenario's gepresenteerd te worden: het scenario met de meest stijve grond en het scenario met de minst stijve grond. De stijfheid van de grond is getoetst met een D-Sheet Piling model, waarbij in elke grondsamenstelling een paal is gezet met fundering op NAP -20 m, een horizontale ballast op maaiveld niveau, en de verplaatsingen worden geëvalueerd als functie van een constante kracht. Op basis hiervan kunnen grondparameters van de verschillende sonderingen kwantitatief met elkaar vergeleken worden. De grondsamenstelling met de meeste en minste verplaatsing zijn respectievelijk de minst stijve en meest stijve scenario's. Wanneer deze twee scenario's geïdentificeerd zijn kunnen de definitieve rekenmodellen gecreëerd worden met de daadwerkelijk optredende krachten per model en scenario.

4.2.1 Spannenburg

Meest stijve scenario (DKM001):

Geschematiseerde bodemopbouw

	laag dikte	Gewicht grond		cohesie	phi	beta	conus	dyn factor	Elast. Mod.
		γ_{dr}	γ_{sat}	c' / c_u	ϕ'	β	q_c		E_{rem}
model	m	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ²	gr	-	N/mm ²	-	kN/m ²
Bodem = -5,76									
1 klei, schoon, slap	2,49	14,0	14,0	25,0	0,0	3,0	0,5	3,00	4500
				40,0	0,0			3,00	5850
				15,6	0,0			3,00	3462
2 zand, schoon, vast	1,25	19,0	21,0	0,0	35,0	0,7	40,0	2,00	56000
				0,0	39,4			2,00	72800
				0,0	30,8			2,00	43077
3 zand, sterk ziltig, kleilig	0,50	18,0	20,0	0,0	25,0	1,0	9,0	2,00	18000
				0,0	28,7			2,00	23400
				0,0	21,6			2,00	13846
4 zand, schoon, vast	7,00	19,0	21,0	0,0	35,0	0,7	24,0	2,00	33600
				0,0	39,4			2,00	43680
				0,0	30,8			2,00	25846
5 zand, sterk ziltig, kleilig	0,75	18,0	20,0	0,0	25,0	1,0	9,0	2,00	18000
				0,0	28,7			2,00	23400
				0,0	21,6			2,00	13846
6 zand, schoon, matig	1,50	18,0	20,0	0,0	32,5	0,8	14,0	2,00	22400
				0,0	36,8			2,00	29120
				0,0	28,5			2,00	17231
7 zand, schoon, vast	1,25	19,0	21,0	0,0	35,0	0,7	40,0	2,00	56000
				0,0	39,4			2,00	72800
				0,0	30,8			2,00	43077
8 teem, zwak zandig, vast	3,50	21,0	21,0	200,0	0,0	1,0	5,0	2,50	12500
				320,0	0,0			2,50	16250
				125,0	0,0			2,50	9615

Minst stijve scenario (DKM003):

Geschematiseerde bodemopbouw

	laag dikte	Gewicht grond		cohesie	phi	beta	conus	dyn factor	Elast. Mod.
		γ_{dr}	γ_{sat}	c' / c_u	ϕ'	β	q_c		E_{rem}
model	m	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ²	gr	-	N/mm ²	-	kN/m ²
Bodem = -5,76									
1 klei, schoon, slap	1,74	14,0	14,0	25,0	0,0	3,0	0,5	3,00	4500
				40,0	0,0			3,00	5850
				15,6	0,0			3,00	3462
2 zand, schoon, matig	1,00	18,0	20,0	0,0	32,5	0,8	16,0	2,00	25600
				0,0	36,8			2,00	33280
				0,0	28,5			2,00	19692
3 klei, zwak zandig, vast	0,75	20,0	20,0	120,0	0,0	1,5	3,0	3,00	13500
				192,0	0,0			3,00	17550
				75,0	0,0			3,00	10385
4 zand, schoon, matig	5,25	18,0	20,0	0,0	32,5	0,8	16,0	2,00	25600
				0,0	36,8			2,00	33280
				0,0	28,5			2,00	19692
5 klei, zwak zandig, vast	0,75	20,0	20,0	120,0	0,0	1,5	3,0	3,00	13500
				192,0	0,0			3,00	17550
				75,0	0,0			3,00	10385
6 zand, schoon, matig	2,00	18,0	20,0	0,0	32,5	0,8	16,0	2,00	25600
				0,0	36,8			2,00	33280
				0,0	28,5			2,00	19692
7 klei, zwak zandig, vast	6,00	20,0	20,0	120,0	0,0	1,5	3,0	3,00	13500
				192,0	0,0			3,00	17550
				75,0	0,0			3,00	10385
8 zand, schoon, vast	26,75	19,0	21,0	0,0	35,0	0,7	50,0	2,00	70000
				0,0	39,4			2,00	91000
				0,0	30,8			2,00	53846

4.2.2 Uitwellingerga

Meest stijve scenario (DKM006):

Geschematiseerde bodemopbouw

	laag	Gewicht grond		cohesie	phi	beta	conus	dyn	Elast. Mod.	
		dikte	γ_{dr}							γ_{sat}
	model	m	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ²	gr	-	N/mm ²	-	kN/m ²
Bodem = -5,76										
1 klei, schoon, matig	1)repr,dyn 2)hoog,dyn 3)laag,dyn	0,49	17,0	17,0	50,0 80,0 31,3	0,0 0,0 0,0	2,5	1,0	3,00 3,00 3,00	7500 9750 5769
-6,25										
2 leem, zwak zandig, vast	1)repr,dyn 2)hoog,dyn 3)laag,dyn	1,50	21,0	21,0	200,0 320,0 125,0	0,0 0,0 0,0	1,0	3,0	2,50 2,50 2,50	7500 9750 5769
-7,75										
3 klei, schoon, matig	1)repr,dyn 2)hoog,dyn 3)laag,dyn	5,75	17,0	17,0	50,0 80,0 31,3	0,0 0,0 0,0	2,5	1,0	3,00 3,00 3,00	7500 9750 5769
-13,50										
4 zand, sterk ziltig, kleilig	1)repr,dyn 2)hoog,dyn 3)laag,dyn	2,25	18,0	20,0	0,0 0,0 0,0	25,0 28,7 21,6	1,0	8,0	2,00 2,00 2,00	16000 20800 12308
-15,75										
5 klei, schoon, matig	1)repr,dyn 2)hoog,dyn 3)laag,dyn	0,75	17,0	17,0	50,0 80,0 31,3	0,0 0,0 0,0	2,5	1,0	3,00 3,00 3,00	7500 9750 5769
-16,50										
6 zand, schoon, matig	1)repr,dyn 2)hoog,dyn 3)laag,dyn	9,75	18,0	20,0	0,0 0,0 0,0	32,5 36,8 28,5	0,8	15,0	2,00 2,00 2,00	24000 31200 18462
-26,25										
7 zand, schoon, vast	1)repr,dyn 2)hoog,dyn 3)laag,dyn	3,25	19,0	21,0	0,0 0,0 0,0	35,0 39,4 30,8	0,7	23,0	2,00 2,00 2,00	32200 41860 24769
-29,50										
8 zand, sterk ziltig, kleilig	1)repr,dyn 2)hoog,dyn 3)laag,dyn	2,50	18,0	20,0	0,0 0,0 0,0	25,0 28,7 21,6	1,0	8,0	2,00 2,00 2,00	16000 20800 12308
-32,00										
9 zand, schoon, vast	1)repr,dyn 2)hoog,dyn 3)laag,dyn	18,00	19,0	21,0	0,0 0,0 0,0	35,0 39,4 30,8	0,7	23,0	2,00 2,00 2,00	32200 41860 24769
-50,00										

Minst stijve scenario (DKM005)

Geschematiseerde bodemopbouw

	laag	Gewicht grond		cohesie	phi	beta	conus	dyn	Elast. Mod.	
		dikte	γ_{dr}							γ_{sat}
	model	m	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ²	gr	-	N/mm ²	-	kN/m ²
Bodem = -5,76										
1 klei, schoon, matig	1)repr,dyn 2)hoog,dyn 3)laag,dyn	6,24	17,0	17,0	50,0 80,0 31,3	0,0 0,0 0,0	2,5	1,0	3,00 3,00 3,00	7500 9750 5769
-12,00										
2 leem, zwak zandig, vast	1)repr,dyn 2)hoog,dyn 3)laag,dyn	3,50	21,0	21,0	200,0 320,0 125,0	0,0 0,0 0,0	1,0	4,0	2,50 2,50 2,50	10000 13000 7692
-15,50										
3 zand, schoon, matig	1)repr,dyn 2)hoog,dyn 3)laag,dyn	6,25	18,0	20,0	0,0 0,0 0,0	32,5 36,8 28,5	0,8	14,0	2,00 2,00 2,00	22400 29120 17231
-21,75										
4 zand, schoon, vast	1)repr,dyn 2)hoog,dyn 3)laag,dyn	4,50	19,0	21,0	0,0 0,0 0,0	35,0 39,4 30,8	0,7	23,0	2,00 2,00 2,00	32200 41860 24769
-26,25										
5 zand, schoon, matig	1)repr,dyn 2)hoog,dyn 3)laag,dyn	23,75	18,0	20,0	0,0 0,0 0,0	32,5 36,8 28,5	0,8	14,0	2,00 2,00 2,00	22400 29120 17231
-50,00										
6	1)repr,dyn 2)hoog,dyn 3)laag,dyn	0,00	0,0	0,0	0,0 0,0 0,0	0,0 0,0 0,0	0,0	0,0	0,00 0,00 0,00	0 0 0
-50,00										
7	1)repr,dyn 2)hoog,dyn 3)laag,dyn	0,00	0,0	0,0	0,0 0,0 0,0	0,0 0,0 0,0	0,0	0,0	0,00 0,00 0,00	0 0 0
-50,00										
8	1)repr,dyn 2)hoog,dyn 3)laag,dyn	0,00	0,0	0,0	0,0 0,0 0,0	0,0 0,0 0,0	0,0	0,0	0,00 0,00 0,00	0 0 0
-50,00										

4.2.3 Ald Skou

Bij Ald Skou zijn de sonderingen zeer overeenstemmend, dus wordt maar één grondsamenstelling beschouwd.

Geschematiseerde bodemopbouw

model	laag dikte m	Gewicht grond		cohesie		phi	beta	conus	dyn	Elast. Mod.
		γ_{dr} kN/m ³	γ_{sat} kN/m ³	c' / c_u kN/m ²	ϕ' gr	β -	q_c N/mm ²	factor -	E_{min} kN/m ²	
1 klei, schoon, matig	1,49	17,0	17,0	50,0	0,0	2,5	1,0	3,00	7500	
2)hoog,dyn				80,0	0,0			3,00	9750	
3)laag,dyn				31,3	0,0			3,00	5769	
2 leem, zwak zandig, vast	6,25	21,0	21,0	200,0	0,0	1,0	4,0	2,50	10000	
2)hoog,dyn				320,0	0,0			2,50	13000	
3)laag,dyn				125,0	0,0			2,50	7692	
3 leem, zwak zandig, matig	1,00	20,0	20,0	100,0	0,0	1,5	2,0	2,50	7500	
2)hoog,dyn				160,0	0,0			2,50	9750	
3)laag,dyn				62,5	0,0			2,50	5769	
4 zand, schoon, vast	7,00	19,0	21,0	0,0	35,0	0,7	50,0	2,00	70000	
2)hoog,dyn				0,0	39,4			2,00	91000	
3)laag,dyn				0,0	30,8			2,00	53846	
5 zand, schoon, vast	8,50	19,0	21,0	0,0	35,0	0,7	25,0	2,00	35000	
2)hoog,dyn				0,0	39,4			2,00	45500	
3)laag,dyn				0,0	30,8			2,00	26923	
6 leem, zwak zandig, vast	20,00	21,0	21,0	200,0	0,0	1,0	4,0	2,50	10000	
2)hoog,dyn				320,0	0,0			2,50	13000	
3)laag,dyn				125,0	0,0			2,50	7692	
7	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0	
2)hoog,dyn				0,0	0,0			0,00	0	
3)laag,dyn				0,0	0,0			0,00	0	
8	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0	
2)hoog,dyn				0,0	0,0			0,00	0	
3)laag,dyn				0,0	0,0			0,00	0	

4.2.4 Blauwverlaat

Bij Blauwverlaat zijn de sonderingen erg overeenstemmend, maar kleine spreiding wordt gevonden in de zes sonderingen. De laagste en hoogste conusweerstand die in een grondlaag zijn gevonden zijn hier naast elkaar gelegd voor de meest stijve en minst stijve scenario's.

Meest stijve scenario:

Geschematiseerde bodempopbouw

	laag dikte	Gewicht grond		cohesie	phi	beta	conus	dyn	Elast. Mod.
		γ_{dr}	γ_{sat}	c' / c_u	ψ	β	q_c	factor	E_{men}
model	m	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ²	gr	-	N/mm ²	-	kN/m ²
1 klei, schoon, matig Bodem = -6,00	1,75	17,0	17,0	50,0	0,0	2,5	1,0	3,00	7500
				80,0	0,0			3,00	9750
				31,3	0,0			3,00	5769
2 zand, schoon, los -7,75	4,75	17,0	19,0	0,0	30,0	1,0	9,0	2,00	18000
				0,0	34,2			2,00	23400
				0,0	26,2			2,00	13846
3 zand, schoon, matig -12,50	6,00	18,0	20,0	0,0	32,5	0,8	12,0	2,00	19200
				0,0	36,8			2,00	24960
				0,0	28,5			2,00	14769
4 zand, schoon, matig -18,50	5,00	18,0	20,0	0,0	32,5	0,8	14,0	2,00	22400
				0,0	36,8			2,00	29120
				0,0	28,5			2,00	17231
5 zand, schoon, matig -23,50	26,50	18,0	20,0	0,0	32,5	0,8	14,0	2,00	22400
				0,0	36,8			2,00	29120
				0,0	28,5			2,00	17231
6 -50,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0
				0,0	0,0			0,00	0
				0,0	0,0			0,00	0
7 -50,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0
				0,0	0,0			0,00	0
				0,0	0,0			0,00	0
8 -50,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0
				0,0	0,0			0,00	0
				0,0	0,0			0,00	0

Minst stijve scenario:

Geschematiseerde bodempopbouw

	laag dikte	Gewicht grond		cohesie	phi	beta	conus	dyn	Elast. Mod.
		γ_{dr}	γ_{sat}	c' / c_u	ψ	β	q_c	factor	E_{men}
model	m	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ²	gr	-	N/mm ²	-	kN/m ²
1 klei, schoon, matig Bodem = -6,00	1,75	17,0	17,0	50,0	0,0	2,5	1,0	3,00	7500
				80,0	0,0			3,00	9750
				31,3	0,0			3,00	5769
2 zand, schoon, los -7,75	4,75	17,0	19,0	0,0	30,0	1,0	6,0	2,00	12000
				0,0	34,2			2,00	15600
				0,0	26,2			2,00	9231
3 zand, schoon, matig -12,50	6,00	18,0	20,0	0,0	32,5	0,8	8,5	2,00	13600
				0,0	36,8			2,00	17680
				0,0	28,5			2,00	10462
4 zand, schoon, matig -18,50	5,00	18,0	20,0	0,0	32,5	0,8	9,0	2,00	14400
				0,0	36,8			2,00	18720
				0,0	28,5			2,00	11077
5 zand, schoon, matig -23,50	26,50	18,0	20,0	0,0	32,5	0,8	7,0	2,00	11200
				0,0	36,8			2,00	14560
				0,0	28,5			2,00	8615
6 -50,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0
				0,0	0,0			0,00	0
				0,0	0,0			0,00	0
7 -50,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0
				0,0	0,0			0,00	0
				0,0	0,0			0,00	0
8 -50,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0
				0,0	0,0			0,00	0
				0,0	0,0			0,00	0

4.3 Corrosie

De funderingspalen van beide type constructies zullen blootgesteld zijn aan tweezijdige corrosie, overeenstemmend met de besluitvorming met de opdrachtgever (eis 42 en 43). Deze corrosie zal reductie in profieldikte behoeven, door afroesten van het materiaal. Dit zal conform CUR166 deel 2 artikel 5.2.2 uitgevoerd worden. De gordingen en overige constructieonderdelen van de geleidewerken zullen beschermd moeten worden tegen corrosie met behulp van een coating.

5 Belastingen

5.1 Permanente belasting

Vanwege de geringe verticale belasting ten opzichte van de horizontale aanvaarbeasting, zal de permanente belasting niet in acht genomen worden voor de constructieve validatie van zowel de geleidewerken als de beschermipalen.

5.2 Veranderlijke belasting

Aanvaarbeasting (schamp) conform ROK 1.4

Overige veranderlijke belastingen zoals windbelasting, golfbelasting en stromingsbelasting zijn van verwaarloosbare magnitude. Daarom zullen deze belastingen niet verder beschouwd worden. Voor een nadere uitwerking wordt verwezen naar hoofdstukken 6 en 7.

5.3 Buitengewone belasting

Aanvaarbeasting (frontaal) conform ROK 1.4

Dit type belasting zal alleen aanwezig zijn bij de beschermipalen. Voor een nadere uitwerking wordt verwezen naar hoofdstuk 6.

5.4 Vermoeiing

Vermoeiing speelt geen rol in de constructies, omdat het aantal aanvaringen gering behoort te zijn.

5.5 Belastingfactoren en belastingcombinaties

Er worden bij de sterkteoetsing geen belastingfactoren toegepast. De veiligheid wordt ingebouwd door de rekenwaarden van de weerstanden bij normaal manoeuvreren extra te reduceren met een factor 0,7. Ofwel, in plaats van de representatieve waarde van de belasting te verhogen met een belastingfactor is de moment- en dwarskrachtweerstand gereduceerd met een ontwerpfactor op basis van ROK 1.4, 5.10 (1.6). Er moet dan gelden:

- $M_{Ed} < 0,7 * M_{Rd}$
- $V_{Ed} < 0,7 * V_{Rd}$

Voor een calamiteitenscenario wordt bovenstaande reductiefactor niet in acht genomen, en dient volledig gerekend te worden met representatieve grondparameters. Conform ROK 1.4, 5.10 (1.6), dient de verplaatsing (BGT) van de buispaal berekend te worden in een model met representatieve waarden voor de grondparameters.

6 Berekening beschermipalen

6.1 Opzet van de berekening

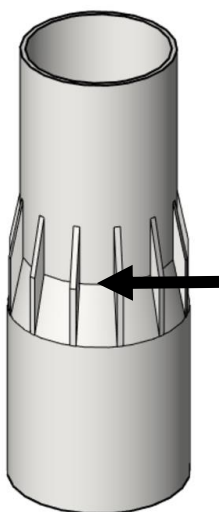
De berekeningen van de 13 beschermipalen zullen opgesplitst worden. Sectie 6.2 beschrijft welke sonderingen voldoende overeenstemmend zijn, opdat berekening en uitvoering zoveel mogelijk gebundeld kunnen worden. Variabiliteit in bodemdiepte, waterstand en geotechnische parameter spreiding zal meegenomen worden in een stijf en slap scenario.

Twee type aanvaarbelastingen zullen voor deze scheepvaartonvriendelijke constructie worden beschouwd: de schamp- en de frontale aanvaarbelasting. De aanvaarenergieën die bij de twee types horen zullen voor de beschermipalen identiek zijn. Echter, de krachten en verplaatsingen zullen verschillen door variatie in stijfheid van grond en buispaal. Er zal gebruikgemaakt worden van een lineair F-u diagram om de verplaatsing en krachten juist te beschouwen voor de normale aanvaring (schamp aanvaring). De calamiteit (frontale aanvaring) laat plastische doorbuiging toe en bevat daarmee een complexer F-u diagram. Alle belastingen die niet de aanvaarbelasting zijn kunnen verwaarloosd worden, zoals beschreven in hoofdstuk 5.

Voor de uitvoering van deze berekening zal een SCIA model hier niet van toepassing hoeven te zijn. Dit kan om de constructie bekeken kan worden als een uitkragende ligger, opgelegd aan één zijde op stijve rotatie- en translatie veren. Wel zal D-Sheet Piling gebruikt moeten worden om de verplaatsing gegeven een kracht te vinden. De combinatie van deze twee parameters kan gebruikt worden om de arbeid te berekenen, welke gelijk moet zijn aan de aanvaarenergie.

Met bovenstaande evenwichtsvoorwaarde kan vervolgens gekeken worden naar de sterkte en stabiliteit van de beschermipalen, waarna vervolgens ook de doorbuiging gecontroleerd wordt.

In onderstaande afbeelding is het verjongingsdetail nogmaals gepresenteerd. In het rapport zal de kleinere buis de "smalle sectie" genoemd worden, de grotere buis de "brede sectie". In de modellen zal de overgang gerepresenteerd worden als een abrupte overgang, welke plaatsvindt ter hoogte van de pijl. Wat voor effecten dit heeft wordt onderzocht in sectie 6.10.



Figuur 8. Verjonging in de beschermipalen (niet toegepast bij Uitwellingergera)

6.2 Groepering van de constructies

De berekeningen van de beschermipalen zullen geclusterd worden per brug. Dit resulteert in vier situaties:

- Situatie A: Spannenburg
- Situatie B: Uitwellingerga
- Situatie C: Ald Skou
- Situatie D: Blauwverlaat

De verschillende sonderingen binnen de individuele situaties zijn afdoende overeenstemmend om deze groepering toe te staan. Verschillende bruggen gelijk beschouwen is niet aanbevolen, omdat de sonderingen dermate verschillend zijn. De sonderingen zijn toegevoegd in bijlage 2.

6.3 Bepaling aanvaarbelastingen

De aanvaarbelastingen worden gesplitst in twee type aanvaringen: de schamp en de frontale aanvaring. Deze worden apart behandeld.

Conform NEN-EN 1991-1-7 artikel 4.6.2 zal de stootbelasting gespreid worden over een hoogte van $0,05L$, wat leidt tot de volgende hoogte van de verdeelde belasting:

$$h_{stoot} = L_{schip} * 0,05 = 110 * 0,05 = 5,5 \text{ m}$$

Echter, deze aanvaarhoogte kan niet voorkomen met het gekozen ontwerp. De maximale aanvaarhoogte wordt gelimiteerd door de hoogte van de contactelementen; welke 2,5 meter betreft. Als conservatieve hoeveelheid is 2000 mm genomen. De aanvaarbreedte is vastgesteld op 300 mm.

Hierbij is conform de nationale bijlage van desbetreffend artikel gegeven dat de puntlast genomen moet worden op 1,5 meter boven het waterniveau. Bij hoogwater (maatgevend scenario) zal dit leiden tot:

$$H_{stoot} = MHWS + 1,5 \text{ m} = NAP - 0,29 \text{ m} + 1,5 \text{ m} = NAP + 1,21 \text{ m}$$

6.3.1 Schamp aanvaring

De schamp aanvaringsenergie voor de beschermipalen zijn uitgerekend met de Antea Group standaardspreadsheet welke hieronder is gerapporteerd. Twee varianten worden beschouwd:

1. Hoge waterstand (NAP -0,29 m) met lage bodemniveau (NAP -5,76 m)
2. Lage waterstand (NAP -0,66 m) met hoge bodemniveau (NAP -5,76 m)

De berekening is hieronder uitgewerkt gebruikmakende van een variant op de standaard spreadsheet. Omdat er geen spreiding zit in het meegenomen bodemniveau, en de waterstanden gelijk zijn voor alle beschouwde locaties, resulteert dit in slechts twee berekeningen. Door de relatief kleine diepgang ten opzichte van de waterdiepte, resulteert de berekening in dezelfde aanvaarenergie voor variant 1 en 2, namelijk 12,1 kNm.

blad 1
 project nr. 463688



Bepaling botsenergie op beschermepaal - BGT (vol schip)

(volgens EAU 2012)

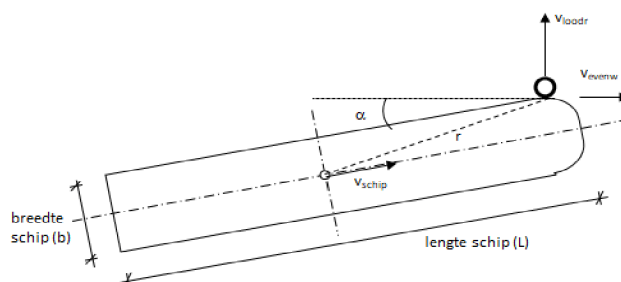
Uitgangspunten

Uitgangspunt is een vaarbeweging waarbij het schip onder een hoek tegen het beschermepaal vaart. Het schip zal de beschermepaal nabij de boeg als eerste raken. Bij de botsing wordt de haaks aangeboden (uitwendige) energie opgenomen door inwendige arbeid en verdwijnt de snelheidscomponent in deze richting. Wat overblijft is de snelheidscomponent evenwijdig aan de beschermepaal. Ofwel: door de botskracht zal het schip bijdraaien en onder een andere hoek (nagenoeg evenwijdig aan de beschermepaal) verder varen.

Randvoorwaarden

Berekening volgens EAU 2012:
 - Er wordt uitgegaan van de vereenvoudigde formule met kleine draaiing van het schip, waarbij $\omega = 0$
 (conform ROK 5.10 (art 1.6))

Schema



Uitgangspunten m.b.t. scheepvaartklasse

Scheepvaartklasse		CEMT	Va
L = lengte schip		=	110,00 m
b = breedte schip		=	11,40 m
d = diepgang schip		=	3,50 m
G = waterverplaatsing schip		=	3795 ton

Uitgangspunten m.b.t. geometrie

WS = Waterstand t.o.v. NAP		=	-0,29 m
h _{bodem} = Bodemniveau t.o.v. NAP		=	-5,76 m
t = kielvrijheid	(= 0,6 * diepgang)	=	1,97 m
C _M = Massafactor voor meebewegende watermassa (hydrodynamische massa)		=	1,1 -
C _S = Stijfheidsfactor [constante]		=	1,0 -
k = Massatraagheidsradius van het schip	0,25 * L	=	27,5 m
B _b = Lengte van massazwaartepunt van het schip tot trefpunt	0,45 * L	=	49,5 m
r = Afstand van massazwaartepunt van het schip tot trefpunt	$\sqrt{(\frac{1}{2}b)^2 + B_b^2}$	=	49,8 m
C _E = Excentriciteitsfactor	$k^2 / (k^2 + r^2)$	=	0,23 -
C _C = Dempingsfactor		=	1,00 -

Uitgangspunten m.b.t. snelheid (conform ROK)

V _{v,max} = maximale vaarsnelheid schip per scheepsklasse volgens tabel 5-4 ROK		=	5,50 m/s
V _{v,toeg} = Eventueel aanwezige vaarsnelheidsbeperking =	6,50 km/u	=	1,81 m/s
V _{20%} = Verhoging van toegestane snelheid met 20% i.v.m. handhaving		=	0,00 m/s
V _{v,werk} =		=	1,81 m/s
V _{v,max} = De kleinste waarde van de maximale en de toegestane vaarsnelheid		=	1,81 m/s
V _s = eventuele toeslag voor stroomsnelheid van het water (bijv. in rivier)		=	0,00 m/s
V _t = In rekening te brengen totale vaarsnelheid		=	1,81 m/s

blad 1
 project nr. 463688



Bepaling botsenergie op bescherm paal - BGT (vervolg)

Ontbinden van de snelheid

Voor het bepalen van de aangeboden energie op de constructie wordt de vaarsnelheid op het punt van aanvaren ontbonden in een snelheid haaks op de bescherm paal en een snelheid evenwijdig aan de bescherm paal. Zie ook ROK art 5.10 (1.6).

(Achtergrond: snelheid heeft een vector, energie is scalar)

$$\alpha = \text{hoek tussen as schip en bescherm paal, zie grafische bepaling} = 5,00^\circ$$

$$v_{\text{loodr}} = \text{totale vaarsnelheid, loodrecht op de bescherm paal} = v_{\text{schip}} \cdot \sin \alpha = 0,16 \text{ m/s}$$

(conform ROK 5.10 (art 1.6))

Bepaling van de energie

$$E_{\text{uitw}} = \text{Energie schip} = 0,5 \cdot G \cdot v_{\text{loodr}}^2 \cdot C_E \cdot C_M \cdot C_S \cdot C_C = 12,1 \text{ kNm}$$

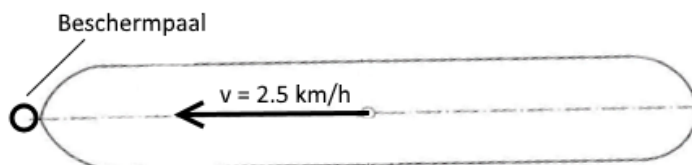
(conform EAU 6.15.4)

Figuur 9. Berekening aanvaarenergie bij schampanvaring met 6,5 km/h onder hoek van 5 graden

6.3.2 Frontale aanvaring

De frontale aanvaringsenergie wordt beschreven met de onderstaande berekening, gebaseerd op ROK 1.4 sectie 4.6.2 (1). Voor visuele interpretatie van de berekening, zie afbeelding hieronder. Voor de waterverplaatsingstonnage is de 3300 ton zoals weergegeven in de Richtlijn Vaarwegen vermenigvuldigt met factor 1,15 zoals de ROK op pagina 68 vereist.

Parameter	symbool	waarde	eenheid	opmerkingen	Formule	Uitwerking
Waterverplaatsingstonnage	m	3795	ton	Behorende bij M8, inclusief factor 1,15	$=3300 \cdot 1,15$	$=3300 \cdot 1,15$
Snelheid frontale aanvaring	v	2,5	km/h	Gegeven door OG	$=2,5$	$=2,5$
Snelheid frontale aanvaring	v	0,69	m/s		$=v/3,6$	$=2,5/3,6$
Kinetische energieniveau	E	1006,6	kNm		$=0,55 \cdot m \cdot v^2$	$=0,55 \cdot 3795 \cdot 0,69^2$



Figuur 10. Frontale aanvaring van M8 schip met snelheid van 2,5 km/h op een bescherm paal

Door het ronde karakter van de buis, is het niet van belang wat de richting van de aanvaarenergie is. Daarom kan geconcludeerd worden dat de frontale belasting met een aanvaarenergie van 1006,6 kNm de maatgevende situatie is voor doorbuiging. Echter, verschil wordt gevonden in de mogelijke plastische capaciteitsbepaling die toegepast mag worden voor de frontale aanvaring, indien er geschikte doorsnedeklassen gekozen worden voor de buizen. Dit leidt tot verschillende sterktecontroles voor de verschillende scenario's: de schampanvaring en de frontale aanvaring.

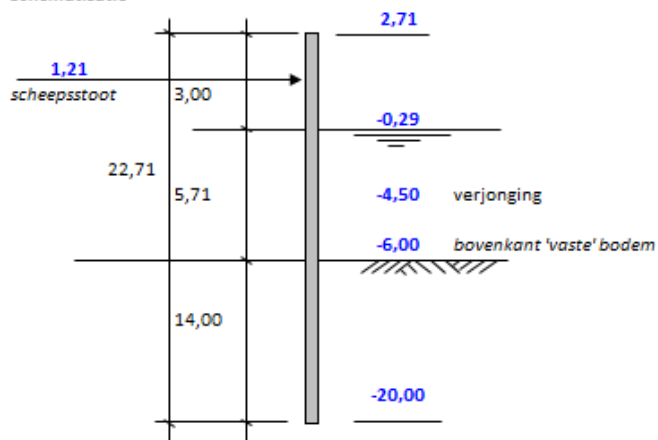
6.4 Gekozen constructieve elementen

In bijlage 5 zijn alle berekeningen uitgewerkt, waarbij verwezen wordt naar de D-Sheet Piling berekeningen in bijlage 4. In de volgende paragrafen zal de berekening van Blauwverlaat worden toegelicht. De andere berekeningen zijn op eenzelfde manier uitgevoerd. De resultaten per categorie zullen wel kort toegelicht worden in deze rapportage. Aan het einde van elke volledige berekening in bijlage 5 staat een samenvatting van alle relevante controles.

De constructieve elementen benodigd voor de realisatie van de beschermepalen is samengevat in onderstaande tabel. Een schematisatie is daaronder weergegeven voor de situatie te Blauwverlaat.

Situatie	Fundering niveau	Buisprofiel	Verjonging niveau	Buisprofiel	Staalsoort
A: Spannenburg	NAP -21,00 m	CHS1420x40	NAP -5,50 m	CHS1220x40	S460
B: Uitwellingerga	NAP -20,00 m	CHS1220x40	-	-	S460
C: Ald Skou	NAP -16,50 m	CHS1420x40	NAP -5,00 m	CHS1220x40	S460
D: Blauwverlaat	NAP -20,00 m	CHS1220x40	NAP -4,50 m	CHS1016x36	S460

Schematisatie



Figuur 11: Schematisatie beschermepaal Blauwverlaat

Voor de verschillende buispalen worden de capaciteiten gepresenteerd met behulp van onderstaande tabel, waarbij gebruik is gemaakt van 50 jaar dubbelzijdige corrosie.

Profiel	Staalsoort	Elastische moment capaciteit	Plastische moment capaciteit	Dwarskracht capaciteit
CHS1016x36	S460	11675 kNm	15374 kNm	14227 kN
CHS1220x40	S460	18917 kNm	24852 kNm	19100 kN
CHS1420x40	S460	25986 kNm	33990 kNm	22337 kN

Drie maatgevende scenario's zullen behandeld worden voor de vier situaties:

- Scenario 1: Schampaanvaring onder verhoogde grondparameters
- Scenario 2: Schampaanvaring onder verlaagde grondparameters
- Scenario 3: Frontale aanvaring onder representatieve grondparameters.

Uit de berekening blijkt dat de invloed van variatie in waterstand, tussen de laagste en hoogste waterstand, op de resultaten verwaarloosbaar is.

6.5 Controle sterkte schampaanvaring

Voor elk maatgevend scenario moet gelden dat de inwendige arbeid gelijk gesteld wordt aan de aanvaarbeasting. Voor de schampbelasting is deze gelijkgesteld aan 12,1 kNm zoals eerder genoemd. Hieronder is de uitwerking van de toets gepresenteerd voor Blauwverlaat. Afwijkingen van maximaal 2 procent worden toegestaan in de analyse.

Belastingssituatie 1: dynamische schampbelasting in de BGT (verhoogde grondparameters) Gebruikmakende van sondering 76429 DKM013 Hoog
 De belasting uit een aanvaring wordt bepaald door de botsenergie van het schip. Deze energie dient o.b.v. de wet van behoud van energie te worden opgenomen door de inwendige arbeid van de paal.

Het bepalen van de maatgevende krachtsverdeling gebeurt door in D-Sheet Single pile te itereren met een (eenheids)kracht tot de evenwichtsvoorwaarde is bereikt: $A_{inwendig} = E_{uitwendig}$ waarbij $A_{inw} = 0,50 * F_{eenheid} * \delta_{hor}$

In de situatie met evenwicht in energie en arbeid wordt de maatgevende moment-, dwarskracht- en vervormingslijn gevonden.

Met behulp van D-Sheet Single pile is geïtereerd met eenheidskracht tot de inwendige arbeid gelijk is aan uitwendige energie.

$F_{E_{schp}}$	=	Eenheidskracht, door iteratie bepaald totdat $A_{inw} = E_{uitw}$	=	446,0 kN
$\delta_{E_{schp}}$	=	optredende verplaatsing t.h.v. kracht	=	54,5 mm
$M_{E_{schp},s}$	=	optredend moment - smalle sectie	=	2546,7 kNm
$V_{E_{schp},s}$	=	optredende dwarskracht - smalle sectie	=	446,0 kN
$M_{E_{schp},b}$	=	optredend moment - brede sectie	=	3505,3 kNm
$V_{E_{schp},b}$	=	optredende dwarskracht - brede sectie	=	591,7 kN

Controle evenwichtsvoorwaarde $E_{uitw} = A_{inw}$

$A_{uitw,schp}$	=	inwendige arbeid BGT	=	$0,5 * F_{E_{schp}} * \delta_{schp}$	=	12,2 kNm
$E_{uitw,schp}$	=	Zie belastingen	=		=	12,1 kNm

akkoord

Belastingssituatie 2: dynamische schampbelasting in de BGT (verlaagde grondparameters) Gebruikmakende van sondering 76429 DKM013 Laag
 De belasting uit een aanvaring wordt bepaald door de botsenergie van het schip. Deze energie dient o.b.v. de wet van behoud van energie te worden opgenomen door de inwendige arbeid van de paal.

Het bepalen van de maatgevende krachtsverdeling gebeurt door in D-Sheet Single pile te itereren met een (eenheids)kracht tot de evenwichtsvoorwaarde is bereikt: $A_{inwendig} = E_{uitwendig}$ waarbij $A_{inw} = 0,50 * F_{eenheid} * \delta_{hor}$

In de situatie met evenwicht in energie en arbeid wordt de maatgevende moment-, dwarskracht- en vervormingslijn gevonden.

Met behulp van D-Sheet Single pile is geïtereerd met eenheidskracht tot de inwendige arbeid gelijk is aan uitwendige energie.

$F_{E_{schp}}$	=	Eenheidskracht, door iteratie bepaald totdat $A_{inw} = E_{uitw}$	=	385,0 kN
$\delta_{E_{schp}}$	=	optredende verplaatsing t.h.v. kracht	=	63,2 mm
$M_{E_{schp},s}$	=	optredend moment - smalle sectie	=	2198,4 kNm
$V_{E_{schp},s}$	=	optredende dwarskracht - smalle sectie	=	385,0 kN
$M_{E_{schp},b}$	=	optredend moment - brede sectie	=	3212,8 kNm
$V_{E_{schp},b}$	=	optredende dwarskracht - brede sectie	=	455,5 kN

Controle evenwichtsvoorwaarde $E_{uitw} = A_{inw}$

$A_{uitw,schp}$	=	inwendige arbeid BGT	=	$0,5 * F_{E_{schp}} * \delta_{schp}$	=	12,2 kNm
$E_{uitw,schp}$	=	Zie belastingen	=		=	12,1 kNm

akkoord

Figuur 12: Controle sterkte schampaanvaring op beschermepaal te Blauwverlaat

De dwarskrachten en momenten vallen ruim onder de limieten gepresenteerd op de vorige pagina. Hieronder zijn de resultaten gepresenteerd met zowel de moment- en krachtenheden, als de bijbehorende unity checks.

Situatie	Smalle sectie - moment	Smalle sectie - dwarskracht	Brede sectie - moment	Brede sectie - dwarskracht
A: Spannenburg	3422 kNm UC = 0,26	510 kN UC = 0,04	4404 kNm UC = 0,24	764 kN UC = 0,06
B: Uitwellingergera	-	-	3450 kNm UC = 0,26	450 kN UC = 0,03
C: Ald Skou	3279 kNm UC = 0,25	528 kN UC = 0,04	4173 kNm UC = 0,23	649 kN UC = 0,04
D: Blauwverlaat	2547 kNm UC = 0,31	446 kN UC = 0,04	3505 kNm UC = 0,26	592 kN UC = 0,04

6.6 Controle sterkte frontale aanvaring

De frontale aanvaarbelasting wordt getoetst op het punt waarbij het optredend moment in de brede buis gelijk is aan het vloeimoment van de desbetreffende doorsnede. Afwijkingen van maximaal 2 procent worden toegestaan in de analyse. Op basis van onderzoek van Bruijn (2004), wordt de plastisch opneembare energie geschaald aan de elastisch opneembare energie. Hierbij wordt een ontwerpfactor van 1,25 geïntroduceerd.

Met behulp van D-Single pile is geïtereerd met eenheidskracht tot het optredende moment gelijk is aan het vloeimoment.

F_{vloei}	=	Eenheidskracht, door iteratie bepaald totdat $A_{nvw} = E_{vloe}$	=	1855,0 kN
$\delta_{E,vloei}$	=	optredende verplaatsing t.h.v. kracht	=	583,6 mm
$M_{E,np,s}$	=	optredend moment - smalle sectie	=	10592,1 kNm
$V_{E,np,s}$	=	optredende dwarskracht - smalle sectie	=	1855,0 kN
$M_{E,np,b}$	=	optredend moment - brede sectie	=	18898,3 kNm
$V_{E,np,b}$	=	optredende dwarskracht - brede sectie	=	3758,4 kN

Controle $M_{E,d} = M_{v,d}$

$M_{E,np}$	=	optredende moment	=	18898,3 kNm
$M_{v,d}$	=	vloeimoment	=	18917,4 kNm

akkoord

Uit literatuur (Bruijn, 2004 -TU Delft) blijkt de totale energie opname capaciteit afhankelijk van de verhouding D/t .

Voor de gekozen buispaal geldt:

D	=	1016 mm		
t	=	36 mm	D/t	= 28 -

Analoog aan het voorbeeld van Bruijn geldt globaal:

F_{vloei}	=		=	1855 kN
F_{pl}	\cong	0,22 * F_{vloei}	=	402 kN
F_u	\cong		=	2257 kN
δ_{vloei}	=		=	584 mm
δ_{pl}	\cong	0,70 * $\delta_{el,vloei}$	=	407 mm
δ_{bot}	\cong		=	990 mm

Toetsing opneembare energie

A_{nvw}	\cong	0,5 * 1855 + 1,0 * 1855 + 0,5 * 402	=	1378 kNm
-----------	---------	-------------------------------------	---	----------

In overleg met de OG dient de veiligheid te worden gevonden in een reductie van de sterkte met = 1,00 -

De verhoudingswaarden uit de literatuur zijn geen absolute waarden, maar berekende waarden voor een specifieke situatie.

Om deze waarden toch veilig te kunnen gebruiken wordt tevens een extra ontwerp onzekerheidsfactor gehanteerd:

$A_{nvw,d}$	=	1378 * 1,00 / 1,25	=	1102 kNm
-------------	---	--------------------	---	----------

Figuur 13: Controle sterkte beschermepaal bij frontale aanvaring Blauwverlaat

Uit de analyse, hierboven gepresenteerd voor Blauwverlaat, wordt aangetoond dat de opneembare plastische aanvaarenergie gelijk is aan de volgende waarden, waarbij elk scenario de vereiste 1006 kNm overstijgt en de buigende momenten afdoende opgenomen kunnen worden.

Situatie	Opneembare energie	Uitnutting
A: Spannenburg	1081 kNm	UC = 0,93
B: Uitwellingerga	1183 kNm	UC = 0,85
C: Ald Skou	1107 kNm	UC = 0,91
D: Blauwverlaat	1102 kNm	UC = 0,91

De smalle sectie dient nu nog getoetst te worden op basis van de gepresenteerde limieten in paragraaf 7.5. Beide criteria voldoen afzonderlijk. Combinaties dienen niet meegenomen te worden omdat de dwarskracht minder dan 50 procent betreft van de weerstand, zoals wordt voorgeschreven door 1991-1-1 artikel 6.2.8. De bijbehorende unity checks zijn erbij gegeven.

Situatie	Smalle sectie - moment	Smalle sectie - dwarskracht
A: Spannenburg	15701 kNm UC = 0,84	2340 kN UC = 0,12
B: Uitwellingerga	-	-
C: Ald Skou	18102 kNm UC = 0,96	2915 kN UC = 0,15
D: Blauwverlaat	10592 kNm UC = 0,92	1855 kN UC = 0,14

6.7 Controle stabiliteit buispaal

De stabiliteit van de buispaal is gevalideerd met behulp van de D-Sheet Piling modellen, waarbij instabiliteit wordt aangeduid in de software wanneer deze aanwezig is. Met de gekozen parameters is de berekening stabiel geacht.

6.8 Controle vervorming

De vervorming wordt door eis 19 gelimiteerd op 2000 mm. De doorbuigingen in de verschillende situaties zijn gevonden op:

Situatie	Horizontale verplaatsing
A: Spannenburg	770 mm
B: Uitwellingerga	872 mm
C: Ald Skou	633 mm
D: Blauwverlaat	990 mm

6.9 Controle scheepshuidbelasting

Voor scenario 1 en 2 dient de scheepshuidbelasting getoetst te worden. Zoals eerder aangegeven wordt de belasting gespreid voer een oppervlakte van 2,5 m bij 0,3 m. De toetsing te Blauwverlaat is hieronder gepresenteerd. De scheepshuidbelastingen voor alle scenario's worden vervolgens gepresenteerd in onderstaande tabel. Hierbij is 1000 kN/m² de toelaatbare scheepshuidbelasting.

Toetsing aanvaardacht in belastingsituatie 1 + 2 (schampaanvaring)

De scheepsstoot mag niet zo groot zijn dat dit leidt tot schade aan het schip of de afmeervoorziening

$F_{E,d}$	=	maatgevende optredende stootkracht	=	446 kN
A	=	Oppervlak van het contactvlak	0,30 * 2,00	= 0,60 m ²
$P_{E,d}$	=	Rekenwaarde van opredende scheepshuidbelasting	=	743 kN/m ²
$P_{k,d}$	=	Toelaatbare scheepshuidbelasting conform ROK 1.4	=	1000 kN/m ²

voldoet

Figuur 14. Controle scheepshuidbelasting te Blauwverlaat

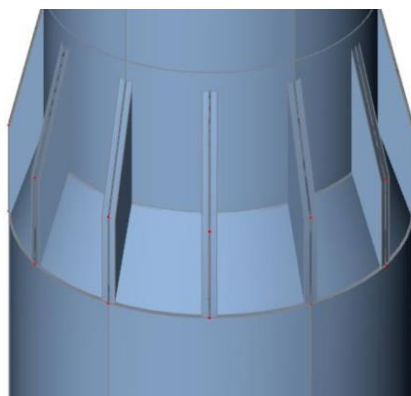
Situatie	Scheepshuidbelasting
A: Spanenburg	850 kN/m ²
B: Uitwellingerga	750 kN/m ²
C: Ald Skou	880 kN/m ²
D: Blauwverlaat	743 kN/m ²

6.10 Controle verjonging

6.10.1 Ontwerp van het verjongingsdetail

De verjonging wordt uitgevoerd onder een hoek van 1:5. Door deze verandering in geometrie zullen spanningen lokaal extremer zijn. Deze paragraaf kwantificeert deze verhoging en doet onderzoek naar het detail benodigd om de verjonging te laten voldoen. Het ontwerpprincipe is zoals afgebeeld in de figuur hieronder. Hierbij dienen zowel de schetsplaten als het kegelvormige overgangsstuk volledig doorgelast uitgevoerd te worden. De schetsplaten zijn parallelogrammen met de één zijde 500 mm, en de ander vijfmaal de reductie in de straal door de verjonging (500 mm voor de verjonging van 1420 naar 1220, 505 voor de verjonging van 1220 naar 1016).

In de analyse is gesteld dat het verlopende buissegment de dikte heeft van de smalle buis. Voor de 1220 naar 1016 verjonging zijn de schetsplaten 30 mm dik gekozen, voor de verjonging van 1420 naar 1220 zijn deze 50 mm dik.



Figuur 15. Ontwerp principe verjonging

6.10.2 Effect op de doorbuiging

Uit een analyse in SCIA Engineer, welke uitgewerkt is in bijlage 6, blijkt dat de schematisatie van de verjonging zoals die is uitgevoerd in D-Sheet Piling conservatief is voor de doorbuiging van de constructie. Dit is getoetst door twee modellen op te stellen, één versimpelde weergave waarin de elementen in 1D zijn ingevoerd en de verjonging abrupt overgaat van de brede naar de smalle buis, en één complexe weergave waarin de gehele geometrie is uitgewerkt met behulp van schalen. Door beide modellen onderin vast te klemmen en beide te belasten met een puntlast, kan de doorbuiging vergeleken worden.

De doorbuigingen van de vier modellen zijn hieronder gepresenteerd, welke laten zien dat de simpele modellen minder doorbuigen dan de uitgebreide modellen. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het simpele model een conservatieve weergave is van de krachten in de constructie. Doorbuigingen zullen echter iets groter zijn dan gepresenteerd in sectie 6.8. Desalniettemin zal dat niet de vervormingslimieten doen overschrijden, omdat de desbetreffende unity checks bepaald in sectie 6.8 zich onder de 0,50 bevinden.

Verjonging	Simpel model	Uitgebreid model
1220x40-1016x36	98,2 mm	101,0 mm
1420x40-1220x40	107,4 mm	109,5 mm

6.10.3 Sterktetoetsing

De spanningen zijn met dit model geëvalueerd voor de locaties Blauwverlaat en Ald Skou. Spannenburg is niet beschouwd omdat de buigende momenten in de verjonging minder groot zijn dan bij Ald Skou, terwijl dezelfde doorsnede gebruikt wordt. De spanningen die optreden in het model voor Blauwverlaat zijn onder de 460 MPa, daarmee voldoet de doorsnede elastisch. Voor Ald Skou wordt een kleine piekspanning van 471,5 MPa gevonden. Echter, dit is het gevolg van een singulariteit die optreedt bij het uiteinde van de schetsplaten. Deze piek kan daarom genegeerd worden. Voor de overige knopen in de eindige elementen simulatie zijn spanningen afdoende onder de toegestane 460 MPa.

6.11 Aanvaring bij hogere aanvaarsnelheden en grotere aanvaarhoeken

Een schamp aanvaring met een snelheid van 9 km/u, welke de maximale vaarsnelheid in de vaarweg betreft, gecombineerd met een hoek van 5 graden, leidt tot een aanvaarenergie van 23,1 kNm. Een aanvaring onder deze omstandigheden kan scheepshuidvriendelijk worden opgenomen, wanneer wordt uitgegaan van een spreidingsoppervlak van de aanvaarbeasting op de paal van 0,3 x 2,5 m (b x h). Bij grotere snelheden of grotere aanvaarhoeken zal een elastisch opneembare kracht mogelijk zijn tot de limieten hieronder aangegeven. Echter, de aanvaring zal snel scheepshuidonvriendelijk worden onder scenario's extremer dan gepresenteerd in dit rapport.

Situatie	Elastisch opneembare energie
A: Spannenburg	531 kNm
B: Uitwellingerga	581 kNm
C: Ald Skou	544 kNm
D: Blauwverlaat	541 kNm

7 Berekening geleidewerken

7.1 Opzet van de berekening

De berekening van de geleidewerken zal gedeeltelijk opgesplitst moeten worden voor de zes individuele constructies welke zich bevinden aan weerszijde van de brug en vaarwegen. Drie varianten zullen doorgerekend worden, zoals die uitgewerkt zijn in sectie 7.2. Er zal rekening gehouden worden met de variabiliteit in bodemdiepte, waterstand en geotechnische parameter spreiding voor het bepalen van de krachten in deze scheepsvaartvriendelijke constructie. Uiteraard wordt ook variabiliteit gevonden in de drie verschillende constructies zoals beschreven in hoofdstuk 3.

Voor elk geleidewerk zal dezelfde aanvaarbelasting gelden, wanneer deze is uitgedrukt in aanvaarenergie. Deze aanvaarenergie zal vervolgens voor elke unieke berekening omgezet moeten worden in F-u diagram, waarin de integraal gebonden tussen nul en de doorbuiging gelijk is aan de arbeid. Wanneer de arbeid gelijk is aan de aanvaarenergie, is de doorbuiging juist beschouwd. Overige belastingen kunnen verwaarloosd worden, zoals besproken in hoofdstuk 5.

Op basis van een combinatie van een SCIA Engineer model rustende op veren en een D-Sheet Piling model per funderingspaal, wordt een inschatting gemaakt van de doorbuiging gegeven een kracht. Wanneer de doorbuigingen en krachten in het model SCIA model overeenstemmen met wat gevonden wordt in de D-Sheet Piling, is de berekening afgerond.

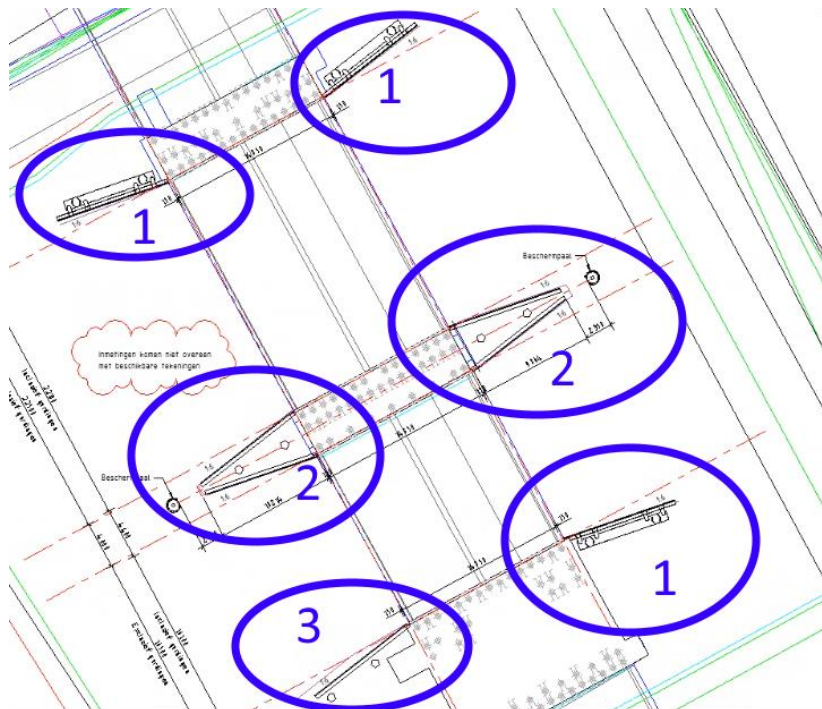
Wanneer bovenstaande energievergelijking is voltooid, zullen de sterkte en stabiliteit van de staanders en liggers gecontroleerd worden. De sterkteberekening van de funderingspalen zal volgen uit de momenten en dwarskrachten gevonden in het D-Sheet Piling model, de overige sterkte verificaties zijn gebaseerd op resultaten gevonden in de SCIA Engineer modellen. Hierbij zal ook gekeken moeten worden naar de doorbuiging van de gehele constructie, de detaillering en of de aanvaring niet een te grote scheepshuidbelasting veroorzaakt.

7.2 Groepering van de constructies

Zoals aangegeven worden drie typen geleidewerken geëvalueerd:

1. Het enkelzijdige geleidewerk
2. Het dubbelzijdige geleidewerk
3. Het unieke geleidewerk

In de afbeelding hieronder is indicatief aangegeven welk type geleidewerk waar komt.



Figuur 16. Indicatie locatie type geleidewerken

7.3 Bepaling aanvaarbelastingen

De aanvaarenergie die uitgeoefend wordt op de geleidewerken is uitgerekend met de Antea Group standaardspreadsheet welke hieronder is gerapporteerd. Twee varianten worden beschouwd:

1. Hoge waterstand (NAP -0,29 m) met lage bodemniveau (NAP -6,0 m)
2. Lage waterstand (NAP -0,66 m) met hoge bodemniveau (NAP -5,76 m)

Voor het geleidewerk wordt overeenstemmend met de ROK aangenomen dat het schip een ongunstige aanvaarhoek van 5 graden ten opzichte van de vaarweg bevat. Gegeven het feit dat de hoek van het geleidewerk 9,5 graden is (1:6), leidt dit tot een aanvaarhoek van afgerond 15 graden. De aanvaarenergie is hieronder uitgewerkt gebruikmakende van een standaard spreadsheet.

Bepaling botsenergie op geleidewerk - BGT (vol schip)

(volgens EAU 2012)

Uitgangspunten

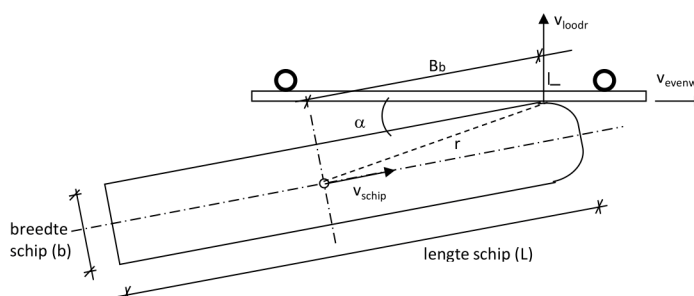
Uitgangspunt is een vaarbeweging waarbij het schip onder een hoek tegen het geleidewerk vaart. Het schip zal het geleidewerk nabij de boeg als eerste raken. Bij de botsing wordt de haaks aangeboden (uitwendige) energie opgenomen door inwendige arbeid en verdwijnt de snelheidscomponent in deze richting. Wat overblijft is de snelheidscomponent evenwijdig aan het geleidewerk. Ofwel: door de botskracht zal het schip bijdraaien en onder een andere hoek (nagenoeg evenwijdig aan het geleidewerk) verder varen.

Randvoorwaarden

Berekening volgens EAU 2012:

- Er wordt uitgegaan van de vereenvoudigde formule met kleine draaiing van het schip, waarbij $\omega = 0$ (conform ROK 5.10 (art 1.6))

Schema



Uitgangspunten m.b.t. scheepvaartklasse

Scheepvaartklasse		CEMT	Va
L	= lengte schip	=	110,00 m
b	= breedte schip	=	11,40 m
d	= diepgang schip	=	3,50 m
G	= waterverplaatsing schip	=	3795 ton

Uitgangspunten m.b.t. geometrie

WS	= Waterstand t.o.v. NAP	=	-0,29 m
h_{bodem}	= Bodemniveau t.o.v. NAP	=	-6,00 m
t	= kielvrijheid (= 0,6 * diepgang)	=	2,21 m
C_M	= Massafactor voor meebewegende watermassa (hydrodynamische massa)	=	1,1 -
C_S	= Stijfheidsfactor [constante]	=	1,0 -
k	= Massatraagheidsradius van het schip	$0,25 * L$	= 27,5 m
B_b	= Lengte van massazwaartepunt van het schip tot trefpunt	$0,45 * L$	= 49,5 m
r	= Afstand van massazwaartepunt van het schip tot trefpunt	$\sqrt{(\frac{1}{2}b)^2 + B_b^2}$	= 49,8 m
C_E	= Excentriciteitsfactor	$k^2 / (k^2 + r^2)$	= 0,23 -
C_C	= Dempingsfactor		= 1,00 -

Uitgangspunten m.b.t. snelheid (conform ROK)

$v_{v,\text{max}}$	= maximale vaarsnelheid schip per scheepsklasse volgens tabel 5-4 ROK	=	5,50 m/s
$v_{v,\text{toeg}}$	= Eventueel aanwezige vaarsnelheidsbeperking =	6,50 km/u	= 1,81 m/s
$v_{20\%}$	= Verhoging van toegestane snelheid met 20% i.v.m. handhaving	=	0,00 m/s
$v_{v,\text{werk}}$		=	1,81 m/s
$v_{v,\text{max}}$	= De kleinste waarde van de maximale en de toegestane vaarsnelheid	=	1,81 m/s
v_s	= eventuele toeslag voor stroomsnelheid van het water (bijv. in rivier)	=	0,00 m/s
v_t	= In rekening te brengen totale vaarsnelheid	=	1,81 m/s

blad 1
project nr. 463688



Bepaling botsenergie op geleidewerk - BGT (vervolg)

Ontbinden van de snelheid

Voor het bepalen van de aangeboden energie op de constructie wordt de vaarsnelheid op het punt van aanvaren ontbonden in een snelheid haaks op het geleidewerk en een snelheid evenwijdig aan het geleidewerk. Zie ook ROK art 5.10 (1.6).
(Achtergrond: snelheid heeft een vector, energie is scalar)

$$\begin{aligned}\alpha &= \text{hoek tussen as schip en geleidewerk, zie grafische bepaling} &= & 15,00^\circ \\ v_{t,loodr} &= \text{totale vaarsnelheid, loodrecht op het geleidewerk} = v_{\text{schip}} * \sin \alpha &= & 0,47 \text{ m/s} \\ & & & (\text{conform ROK 5.10 (art 1.6)})\end{aligned}$$

Bepaling van de energie

$$\begin{aligned}E_{\text{uitw}} &= \text{Energie schip} = 0,5 * G * v_{t,loodr}^2 * C_E * C_M * C_S * C_C &= & 106,4 \text{ kNm} \\ & & & (\text{conform EAU 6.15.4})\end{aligned}$$

Figuur 17. Berekening aanvaarenergie geleidewerk

Door de relatief kleine diepgang ten opzichte van de waterdiepte, resulteren de berekeningen voor variant 1 en 2 in dezelfde aanvaarenergie: 106,4 kNm.

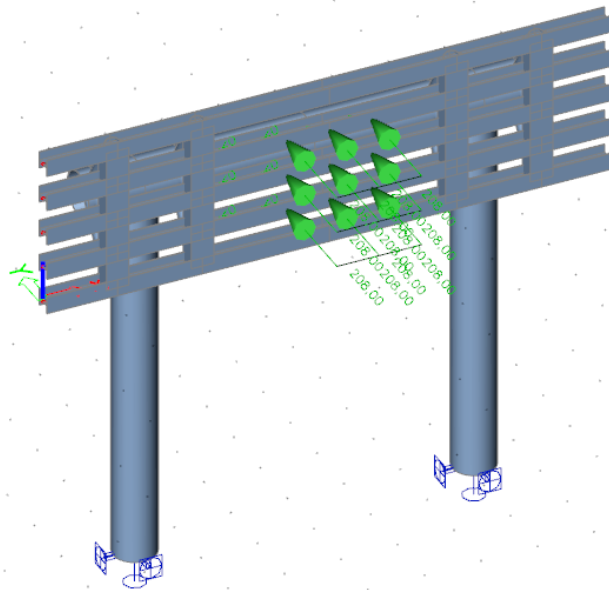
7.4 Controle sterkte geleidewerk type 1: enkelzijdig

7.4.1 Modelling

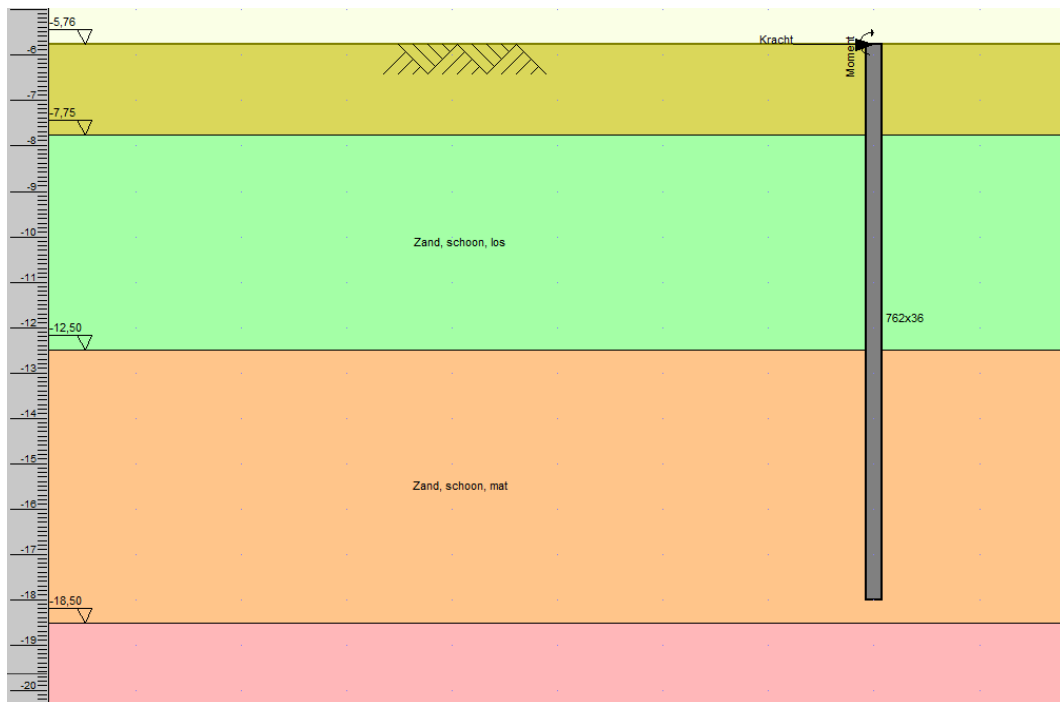
Om de geleidewerken te dimensioneren is gebruik gemaakt van een drie dimensioneel raamwerk in SCIA Engineer, waarbij de constructie in het water en de lucht wordt gepresenteerd. Het gedeelte van de constructie dat zich in de grond bevindt, is niet weergegeven in dit model. Dit is omdat SCIA engineer niet een geschikt programma is om invloeden van grond te kwantificeren. Een uitermate geschikt softwarepakket hiervoor is D-Sheet Piling. In dit programma wordt dan ook het gedeelte van de constructie geschematiseerd dat zich in de grond bevindt. Met deze keuze in schematisatie wordt de constructie gesplitst in twee modellen, waarin het raakvlak van de twee modellen in zowel krachten als verplaatsingen gelijk moet zijn.

In het D-Sheet Piling model is gebruik gemaakt van de verhoogde grondparameters, omdat deze maatgevend zijn voor het vinden van de maximale aanvaarkrachten. De input in het D-Sheet Piling model zijn de funderingskrachten berekend in het SCIA Engineer model. In het D-Sheet Piling model kunnen vervolgens rotaties en translaties uitgelezen worden, welke dan als veren de input vormen voor het SCIA model. Deze niet-lineaire koppeling is geïtereerd opdat de gezochte aanvaarkracht de aanvaarenergie van 106,4 kNm beschrijft. Hierin worden afwijkingen van maximaal 2 procent gedoogd, om het iteratief proces te beëindigen. Deze afwijking van 2 procent heeft ruim minder dan 1 procent effect op de gevonden krachten.

Hieronder staan twee schematisaties afgebeeld welke gebruikt zijn in de berekening van het enkelzijdige geleidewerk. Omdat het geleidewerk gefundeerd staat op twee palen, zullen er dus twee D-Sheet Piling modellen benodigd zijn voor het juist bevinden van de krachtoverdracht.



Figuur 18. Aanvaring op enkelzijdig geleidewerk, op de middelste drie gordingen tussen de palen



Figuur 19. Input van één van de palen in D-Sheet Piling

De constructieve elementen kunnen samengevat worden met de volgende tabel:

Element	Profiel	Opmerking
Funderingspaal	CHS762x36	Gefundeerd op NAP -18 m
Liggerbuis	CHS813x14,2	
Connectiebuizen	CHS323,9x12,5	
Hekwerk liggers	HEB300	
Hekwerk staanders	RHS400x300x16	

7.4.2 Energiebeschouwing

Drie locaties van aanvaringen worden geëvalueerd: een aanvaring op de linkerhoek, een aanvaring op de rechterhoek, en een aanvaring exact tussen de funderingspalen. Voor de drie aanvaarloccaties zullen grondstijfheden van de palen apart beschouwd moeten worden. De berekening van de aanvaring op het midden van de constructie zal uitvoerig worden beschreven in dit berekeningsrapport, de hoekaanvaringen zullen worden samengevat in tabelvorm. De volledige berekening valt te vinden in bijlage 8.

In de berekeningen wordt aangenomen dat de aanvaarbreedte 1500 mm betreft en dat de aanvaring gespreid wordt over drie gordingen. Wederom zal de aanvaring anderhalve meter boven het wateroppervlak plaatsvinden, wat betekent dat voor alle waterstanden de middelste drie gordingen geraakt worden. Op basis van dit gegeven zullen de funderingspalen gedimensioneerd worden. De overige elementen zullen ook getoetst worden met krachten op de onderste drie en bovenste drie gordingen, waarbij de aanvaarkracht gelijk is genomen aan de kracht op de middelste drie gordingen. Voor alle aanvaringen zal ook een wrijvingskracht worden meegenomen, welke 40 procent betreft van de loodrechte kracht (op basis van de Nationale Bijlage van norm 1991-1-7 4.6.2).

Krachten en momenten worden het grootst wanneer de grondparameters verhoogd worden meegenomen. Daarom is de diepte van de overgang tussen de twee modellen hier zo hoog mogelijk gekozen: namelijk NAP -5.76 m. Dit leidt tot de meest stijve combinatie van parameters. De eigenschappen van de grondlagen zijn reeds uitgewerkt in sectie 4.2.

Bij een aanvaarbeasting op het midden van de constructie, waarbij de middelste drie gordingen geraakt worden (op basis van 1500 mm boven de mogelijke waterstanden, afgerond naar de dichtstbijzijnde gordingen), convergeert de energiebeschouwing naar een aanvaarbeasting van 208 kN/m. Deze beasting, verdeeld over 3 gordingen van 1500 mm breed, vertoont een gemiddelde verplaatsing van 228 mm (zie afbeelding hieronder). De opgenomen energie die hier bij hoort is daarmee 106,7 kNm, welke binnen de geaccepteerde afwijking (2 procent) valt ten opzichte van de optredende aanvaarenergie van 106,4 kNm.

$$E = \frac{3 \cdot 208 \cdot 1,5 \cdot 0,228}{2} = 106,7 \text{ kNm}$$

Op eenzelfde manier is de aanvaring op zowel de linker- als de rechterhoek van het geleidewerk beschouwd. Resultaten worden hieronder weergegeven in tabelvorm.

5.7. Verplaatsing plek aanvaring

5.7.1. 1D-ervormingen; u_y

Waardes: u_y
 Lineaire berekening
 Belastinggeval: BG2
 Assenstelsel: Staaf
 Extreme 1D: Snede
 Selectie: S15, S16



Figuur 20. Verplaatsing gordingen bij aanvaring op het midden van de constructie

Aanvaring	Aanvaarkracht	Verplaatsing	Energie
Links	138 kN/m	341 mm	105,8 kNm
Midden	208 kN/m	228 mm	106,7 kNm
Rechts	131,5 kN/m	355 mm	105,1 kNm

7.4.3 Vergelijking modellen D-Sheet Piling en SCIA Engineer

Nu zullen voor de twee modellen de verplaatsingen worden vergeleken voor de drie type aanvaringen op het enkelzijdige geleidewerk. Verticale krachten worden genegeerd vanwege de kleine krachten ten opzichte van de dragende capaciteit. De gepresenteerde waarden zijn de waarden in diagonale richting, waarbij krachten en verplaatsingen in x- en y-richting zijn opgeteld volgens de methode van Pythagoras.

In onderstaande tabel zijn ook de krachten gepresenteerd die gevonden werden in de opleggingen van het SCIA model, welke als input te vinden zijn in het D-Sheet model. Ten slotte zijn de veerstijfheden gepresenteerd, welke te berekenen zijn door de kracht (of moment) te delen door de verplaatsing (of rotatie) gevonden in het D-Sheet model. Deze wordt door SCIA als input gebruikt om de verplaatsingen en rotaties te vinden in de opleggingen van het desbetreffende model. Bij een groot aantal iteraties zullen de doorbuigingen en rotaties in de modellen convergeren.

De gepresenteerde waarden zullen kleine afwijkingen hebben van de gepresenteerde input/output in de bijlagen, vanwege het afbreken van het iteratieve proces. Echter, het iteratieproces werd gestopt wanneer verschillen van minder dan één procent in iteraties werden gevonden wanneer men de opgenomen energie beschouwt. Daarmee worden de overige waarden als afdoende geconvergeerd beschouwd. De resultaten zijn per rij voor beide palen gegeven.

Aanvaring op paal 1 en paal 2	Verplaatsing D-Sheet / SCIA [mm]	Rotatie D-sheet / SCIA [mrad]	Kracht naar D-Sheet [kN]	Moment naar D-Sheet [kNm]	Translatie-veerstijfheid naar SCIA [MN/m]	Rotatie-veerstijfheid naar SCIA [MNm/rad]
Links	9,9 / 9,0	4,3 / 4,1	176	986	17,7	229
	80,2 / 80,7	24,2 / 24,3	724	3471	9,0	143
Midden	58,2 / 58,4	19,7 / 19,7	549	3432	9,4	174
	45,1 / 45,1	16,5 / 16,5	460	3205	10,2	194
Rechts	84,9 / 85,5	25,2 / 25,3	750	3515	8,8	140
	9,0 / 9,1	3,7 / 3,8	211	730	23,4	197

7.4.4 Toetsingen

7.4.4.1 Scheepshuidbelasting

De aanvaarkrachten (welke maximaal van 208 kN/m betreft) worden gespreid over een hoogte van 300 mm, de hoogte van één gording. Dit geeft een scheepshuidbelasting van 693 kN/m², welke onder de toelaatbare 1000 kN/m² ligt. Hiermee voldoet het ontwerp aan de scheepshuideis.

7.4.4.2 Funderingspalen

De funderingspalen zullen getoetst worden op de gevonden maximale momenten en dwarskrachten vanuit het D-Sheet model. De maatgevende waarden worden gevonden met een buigend moment van 4431 kNm en een dwarskracht van 962 kN, beide in het model met de aanvaring rechts. De capaciteit wordt hieronder bepaald, met behulp van een maximaal toelaatbare spanning gelijk aan 70 procent van de vloeispanning (zoals vereist door de ROK 1.4 pagina 68) bij normaal manoeuvreren. Interactie tussen de krachten dient niet getoetst te worden wanneer de dwarskracht minder dan 50 procent van de opneembare dwarskracht betreft. Op basis van dit gegeven kan geconcludeerd worden dat de doorsnede voldoet, met een UC's van 0,99 en 0,13 voor respectievelijk het buigend moment en de dwarskracht.

$$UC_{moment} = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{4431 \text{ kNm}}{4437 \text{ kNm}} = 0,99$$

$$UC_{dwarskracht} = \frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{962 \text{ kN}}{7378 \text{ kN}} = 0,13$$

Invoer profielgegevens afmeerpaal		Ronde stalen buispaal *		Materiaalkeuze	
D_{uitw}	=	762 mm		S460	▼
t	=	36 mm		$f_{y;d}$	= 460 N/mm ²
W_{el}	=	14.234 *10 ³ mm ³		$\tau_{u;d}$	= 266 N/mm ²
W_{pl}	=	18.990 *10 ³ mm ³		E_{rep}	= 210.000 N/mm ²
I_y	=	542.299 *10 ⁴ mm ⁴		G	= 645 kg/m ¹
A	=	821 *10 ² mm ²			
Reductiefactor corrosie					
T	=	referentieperiode			= 50 jaar
Omgeving t.p.v. maximaal moment:		Ongerode, schone bodem			
a_c	=	corrosie per zijde (conform tabel 9.2 en 9.3 van CUR 166 deel 1)			= 0,60 mm
a_{tot}	=	totale optredende corrosie	corrosie aan de binnen- en buitenzijde paal		= 1,20 mm
t_{dmw}	=	lijfdikte buispaal na corrosie			= 34,8 mm
D_{cor}	=	buitendiameter na corrosie			= 760,8 mm
E_{cor}	=	210.000 * 524.138 *10 ⁴ mm ⁴			= 1.100.690 kNm ²
Bepalen capaciteit buispaal, rekening houdend met plooi conform NEN-EN 1993-1-6					
$D_{uitw;corr}$	=	760,8 mm		r_{corr}	= 363 mm
t_{corr}	=	34,8 mm		D_{corr} / t_{corr}	= 22 -
$f_{y;d}$	=	460 N/mm ²		50* ϵ^2	= 26 -
E_{rep}	=	210.000 N/mm ²		70* ϵ^2	= 36 -
				90* ϵ^2	= 46 -
				doorsnedeklasse 1	
$M_{R;corr;d}$	=	460 * 13.779 *10 ³ mm ³	* 0,7		= 4.437 kNm
$V_{R;d;cor}$	=	266 * 794 *10 ² mm ²	* 0,50 * 0,7		= 7.378 kN

Figuur 21. Weerstand van funderingspaal

7.4.4.3 Overige constructie onderdelen

De overige elementen zullen getoetst worden op basis van de Von Mises stress, welke direct uit SCIA uitgelezen kan worden. De Von Mises methode wordt toegelicht in 1993-1-1 artikel 6.2.1 sectie 5. De toetsing neemt aan dat er geen corrosie plaats vindt in de elementen. Zoals eerder genoemd zal de berekende aanvaarkracht ook getoetst worden bij aanvaring op de andere gordingen. Resultaten zijn als volgt:

Element	Spanning aanvaring links	Spanning aanvaring midden	Spanning aanvaring rechts
Liggerbuis	228 MPa	146 MPa	241 MPa
Connectiebuizen	237 MPa	211 MPa	217 MPa
Hekwerk liggers	124 MPa	161 MPa	184 MPa
Hekwerk staanders	69 MPa	63 MPa	86 MPa

De maximaal toegestane spanning is wederom 70 procent van de vloeispanning: 248,5 MPa. De constructieonderdelen voldoen daaraan. Voor de liggers van het hekwerk dient een reductie toegepast te worden, vanwege het gegeven dat bij de staanders van het hekwerk het profiel iets

minder dik is. Dit kan lineair geschaald worden tot 209,3 MPa met behulp van onderstaande berekening. De verbindingen dienen allemaal volledig doorgelast te zijn, betekenende dat deze niet maatgevend kan zijn.

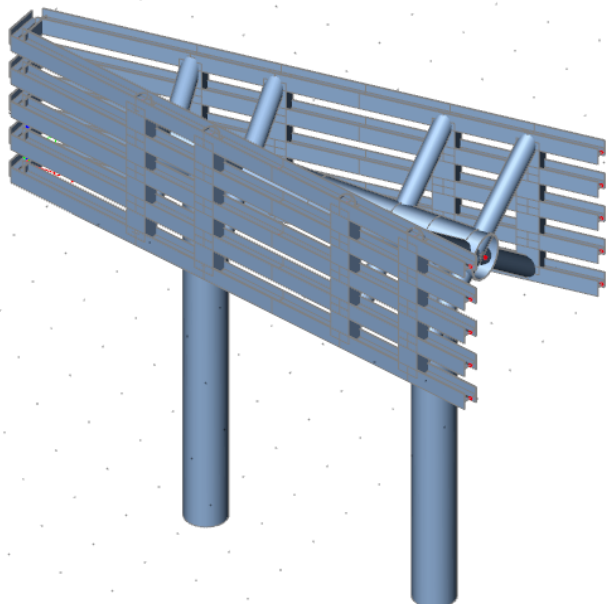
$$f_{max,red} = f_{max} \cdot \frac{t_{RHS}}{t_{HEB}} = 248,5 \text{ MPa} \cdot \frac{16 \text{ mm}}{19 \text{ mm}} = 209,3 \text{ MPa}$$

7.5 Controle sterkte geleidewerk type 2: dubbelzijdig

7.5.1 Modelling

De sterkte controle van het dubbelzijdige geleidewerk is op eenzelfde manier uitgevoerd als geleidewerk type 1. De volledige uitwerking valt te vinden in bijlagen 7 en 8. De resultaten zullen kort besproken worden. De constructie kan samengevat worden gebruikmakende van de volgende constructieve elementen, welke visueel daaronder gepresenteerd zijn.

Element	Profiel	Opmerking
Funderingspaal	CHS762x36	Gefundeerd op NAP -18 m
Liggerbuis	CHS813x20	
Connectiebuizen	CHS355,6x16	
Hekwerk liggers	HEB300	
Hekwerk staanders	RHS400x300x16	



Figuur 22. Overzicht dubbele geleidewerk

7.5.2 Energiebeschouwing

De aanvaarkrachten, verplaatsingen en bijbehorende energieën zijn voor de drie type aanvaringen hieronder gepresenteerd.

Aanvaring	Aanvaarkracht	Verplaatsing	Energie
Links	122 kN/m	395 mm	108,4 kNm
Midden	212,5 kN/m	224 mm	107,1 kNm
Rechts	128 kN/m	365 mm	105,1 kNm

7.5.3 Vergelijking modellen D-Sheet Piling en SCIA Engineer

Wederom zullen de D-sheet Piling modellen en het SCIA Engineer model naast elkaar gelegd worden, om de resultaten te vergelijken en relevante parameters te identificeren. Wederom zijn krachten, momenten, verplaatsingen en rotaties uitgelezen in het diagonale vlak. Kleine afwijkingen worden gedoogd vanwege het iteratief proces, welke is afgebroken toen de aanvaarenergie convergeerde naar minder dan een procent afwijking over een iteratie.

Aanvaring op paal 1 en paal 2	Verplaatsing D-Sheet / SCIA [mm]	Rotatie D-sheet / SCIA [mrad]	Kracht naar D-Sheet [kN]	Moment naar D-Sheet [kNm]	Translatie-veerstijfheid naar SCIA [MN/m]	Rotatie-veerstijfheid naar SCIA [MNm/rad]
Links	11,1 / 10,9 80,8 / 79,9	4,2 / 4,5 23,6 / 23,2	339 800	610 3097	30,5 9,9	146 131
Midden	65,3 / 67,2 37,3 / 35,8	21,0 / 21,2 14,3 / 13,9	628 419	3352 2956	9,6 11,2	159 206
Rechts	84,1 / 83,9 12,3 / 12,3	24,3 / 24,5 4,7 / 4,6	821 346	3103 753	9,8 28,2	128 161

7.5.4 Toetsingen

7.5.4.1 Scheepshuidbelasting

De aanvaarbelasting gepresenteerd in de paragraaf betreffende de energiebeschouwing is lager dan bij geleidewerk type 1, daarmee wordt ook hier voldaan aan het criteria betreffende de scheepshuidbelasting.

7.5.4.2 Funderingspalen

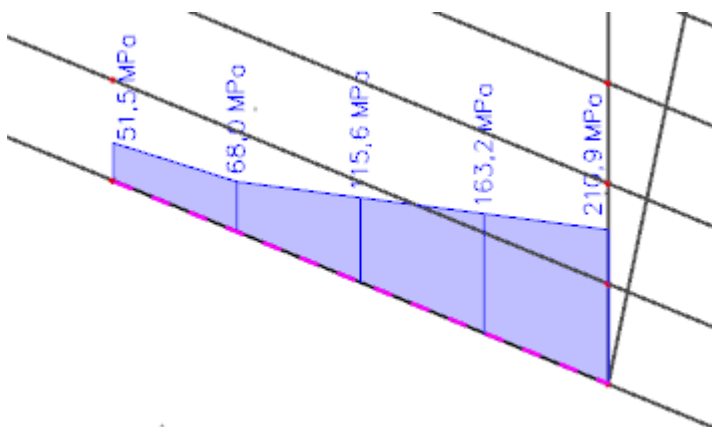
De maximale momenten en krachten in de funderingspalen zijn met behulp van D-Sheet Piling vastgesteld op 4224 kNm en 927 kN (aanvaring rechts). Op basis van de eerder gepresenteerde capaciteiten voldoen de funderingspalen, aangezien dezelfde palen gebruikt worden voor deze constructie.

7.5.4.3 Overige constructieonderdelen

De overige onderdelen zullen wederom op basis van de Von Mises spanning getoetst worden.

Element	Spanning aanvaring links	Spanning aanvaring midden	Spanning aanvaring rechts
Liggerbuis	219 MPa	155 MPa	232 MPa
Connectiebuizen	203 MPa	178 MPa	240 MPa
Hekwerk liggers	198 MPa	136 MPa	211 MPa
Hekwerk staanders	81 MPa	102 MPa	115 MPa

Ook hier voldoen de overige constructieve onderdelen aan het limiet dat op 248,5 MPa gesteld is. De liggers overschrijden het genoemde lineair geschaalde limiet van 209,3 MPa lichtelijk (zie paragraaf 7.4.4.3). Echter, wanneer kijkende naar de spanningen in de materialen dient gekeken te worden naar de locatie 200 mm zijwaarts, waar de hekwerk profielen samenkomen. Ter plaatse van dit punt wordt een spanning van 186 MPa gevonden, welke het limiet van 209,3 MPa niet doet overschrijden.



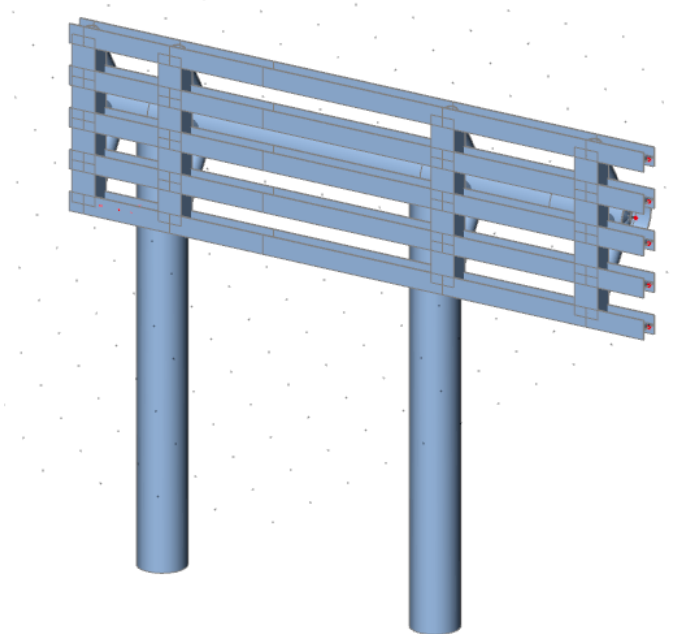
Figuur 23. Lineaire interpolatie ter bevinding spanning koppeling profielen

7.6 Controle sterkte geleidewerk type 3: uniek

7.6.1 Modelling

De sterkte controle van het unieke geleidewerk is wederom op eenzelfde manier uitgevoerd. De volledige uitwerking valt te vinden in bijlagen 7 en 8. De resultaten zullen kort besproken worden. De constructie kan samengevat worden gebruikmakende van de volgende constructieve elementen, welke visueel daaronder gepresenteerd zijn.

Element	Profiel	Opmerking
Funderingspaal	CHS762x36	Gefundeerd op NAP -18 m
Liggerbuis	CHS813x20	
Connectiebuizen	CHS323,9x12,5	
Hekwerk liggers	HEB300	
Hekwerk staanders	RHS400x300x16	



Figuur 24. Overzicht unieke geleidewerk

7.6.2 Energiebeschouwing

De aanvaarkrachten, verplaatsingen en bijbehorende energieën zijn voor de drie type aanvaringen hieronder gepresenteerd.

Aanvaring	Aanvaarkracht	Verplaatsing	Energie
Links	160 kN/m	290 mm	104,4 kNm
Midden	208 kN/m	227 mm	106,2 kNm
Rechts	95 kN/m	475 mm	104,7 kNm

7.6.3 Vergelijking modellen D-Sheet Piling en SCIA Engineer

Wederom zullen de D-sheet Piling modellen en het SCIA Engineer model naast elkaar gelegd worden, om de resultaten te vergelijken en relevante parameters te identificeren. Wederom zijn krachten, momenten, verplaatsingen en rotaties uitgelezen in het diagonale vlak. Kleine afwijkingen worden gedoogd vanwege het iteratief proces, welke is afgebroken toen de aanvaarenergie convergeerde naar minder dan een procent afwijking over een iteratie.

Aanvaring op paal 1 en paal 2	Verplaatsing D-Sheet / SCIA [mm]	Rotatie D-sheet / SCIA [mrad]	Kracht naar D-Sheet [kN]	Moment naar D-Sheet [kNm]	Translatie-veerstijfheid naar SCIA [MN/m]	Rotatie-veerstijfheid naar SCIA [MNm/rad]
Links	14,7 / 14,4 76,3 / 76,8	6,8 / 6,8 23,2 / 23,3	161 717	1762 3354	10,9 9,4	260 144
Midden	60,3 / 60,3 43,4 / 43,6	20,2 / 20,0 16,1 / 16,3	561 446	3460 3173	9,3 10,3	171 197
Rechts	78,2 / 78,2 8,9 / 8,9	23,2 / 23,7 3,0 / 2,0	774 357	3132 207	9,9 40,4	135 70

7.6.4 Toetsingen

7.6.4.1 Scheepshuidbelasting

De aanvaarbelasting gepresenteerd in de paragraaf betreffende de energiebeschouwing is lager dan bij geleidewerk type 1, daarmee wordt ook hier voldaan aan het criteria betreffende de scheepshuidbelasting.

7.6.4.2 Funderingspalen

De maximale momenten en krachten in de funderingspalen zijn met behulp van D-Sheet Piling vastgesteld op 4186 kNm en 908 kN (model aanvaring links). Op basis van de eerder gepresenteerde capaciteiten voldoen de funderingspalen, aangezien dezelfde palen gebruikt worden voor deze constructie.

7.6.4.3 Overige constructieonderdelen

De overige onderdelen zullen wederom op basis van de Von Mises spanning getoetst worden.

Element	Spanning aanvaring links	Spanning aanvaring midden	Spanning aanvaring rechts
Liggerbuis	181 MPa	123 MPa	238 MPa
Connectiebuizen	190 MPa	171 MPa	171 MPa
Hekwerk liggers	81 MPa	129 MPa	168 MPa
Hekwerk staanders	50 MPa	71 MPa	56 MPa

De liggers hebben een spanning van ruim onder de 209,3 MPa. De overige constructieve onderdelen voldoen aan het limiet dat op 248,5 MPa gesteld is.

7.7 Controle stabiliteit funderingspalen

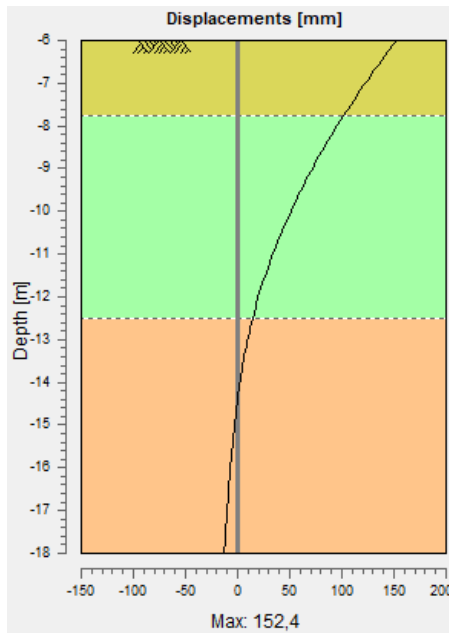
Op basis van de berekeningen in 7.4 tot en met 7.6 kan geconcludeerd worden dat de aanvaring op de rechterzijde van het enkelzijdige geleidewerk de maatgevende situatie is betreffende de krachten in de fundering. Daarom zal enkel dat scenario op stabiliteit getoetst worden. Wanneer is aangetoond dat die voldoet, voldoen de andere scenario's ook.

Om de stabiliteit te controleren zullen nieuwe D-Sheet Piling en SCIA Engineer modellen opgesteld moeten worden, om de krachten en doorbuigingen opnieuw te itereren. De methode hiervoor is identiek aan wat beschreven is in sectie 7.3. De uitwerking van de volledige berekening is getoond in bijlage 9. Omdat in deze berekening gezocht wordt naar een scenario met zo min mogelijk stijfheid, wordt de bodemdiepte hier ook genomen op NAP -6 m, in tegenstelling tot de NAP -5,76 m dat werd gebruikt in de vorige paragrafen. Bovendien worden de verlaagde grondparameters gebruikt. Hieronder zal een samenvatting van de gevonden waarden volgen voor de energiebeschouwing en de vergelijking van de twee modellen.

Aanvaring	Aanvaarkracht	Verplaatsing	Energie
Rechts	103 kN/m	462 mm	107,0 kNm

Aanvaring op paal 1 en paal 2	Verplaatsing D-Sheet / SCIA [mm]	Rotatie D-sheet / SCIA [mrad]	Kracht naar D-Sheet [kN]	Moment naar D-Sheet [kNm]	Translatie-veerstijfheid naar SCIA [MN/m]	Rotatie-veerstijfheid naar SCIA [MNm/rad]
Rechts	152,4 / 152,7 13,6 / 13,8	30,8 / 30,7 4,9 / 5,0	587 173	2425 882	3,9 12,7	79 180

De verplaatsing als functie van hoogte gevonden bij de input van krachten zoals hierboven weergegeven is met een D-Sheet Piling simulatie gezet op:



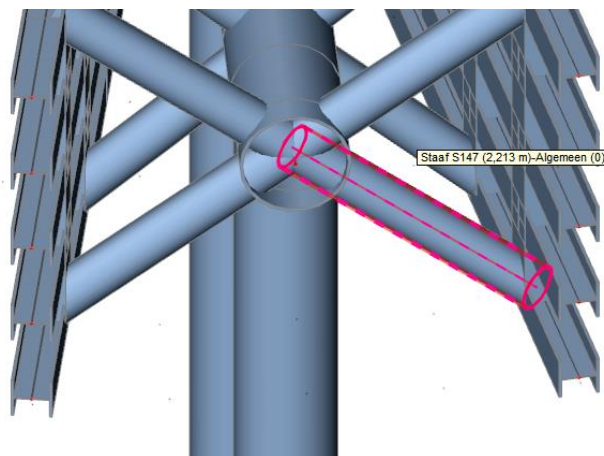
Figuur 25. Doorbuiging stabiliteitstoets

Uit bovenstaande afbeelding blijkt dat de grond niet volledig is bezweken met de ingevoerde kracht. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de paal voor dit uiterste scenario, en daarmee alle andere scenario's, stabiel is.

7.8 Controle knikkrachten

De connectiebuisen worden in enkele scenario's onder drukkrachten belast. Echter, knik kan hier niet optreden. De langste connectiebuis aanwezig in de drie type geleidewerken is 2213 mm lang (hart op hart afstand, door afmetingen van liggerbuis en HEB300 profiel in realiteit korter). Bij het volledig benutten van de toelaatbare spanning van 70 procent van het vloeimoment enkel en alleen door normaalspanningen wordt bij de slankste connectiebuis (CHS323,9x12,5), een drukkracht gevonden van:

$$N = A \cdot \sigma = 12229 \text{ mm}^2 \cdot 0,7 \cdot 355 \text{ MPa} = 3039 \text{ kN}$$



Figuur 26. Maximale lengte connectiebuis

Bij een koudgeformde constructie (knik curve c) kan de knikkraft getoetst worden met behulp van onderstaande vergelijkingen. Hier wordt aangetoond dat zelfs als de doorsnede volledig belast is op druk en de knikvorm aangenomen wordt als twee maal de systeemplengte, de constructie nog steeds niet kan knikken. Daarmee is elke mogelijke connectiebuis niet knik gevoelig.

Kniktoets Staaf belast op druk			
Invoer			
F =	3039	kN	
f_y =	355	MPa	
E =	210000	MPa	
ν_{MI} =	1		
α =	0,49		
A =	12228,6494	mm ²	
I_z =	148465296	mm ⁴	
I_y =	148465296	mm ⁴	
L_{buc} =	4400	mm	
Knik z-richting			
N_z =	15894,2	kN	$= \pi^2 \cdot 210000 \cdot 148465296 / 4400^2 \cdot 10^{-3}$
$\bar{\lambda}$ =	0,5		$= \sqrt{(12228,6494 \cdot 355 \cdot 10^{-3} / 15894,2)}$
ϕ =	0,7		$= \frac{1}{2} \cdot (1 + 0,49 \cdot (0,5 - 0,2) + 0,5^2)$
χ =	0,83		$= 1 / (0,7 + \sqrt{0,7^2 - 0,5^2})$
$N_{z,Rd}$ =	3604,3	kN	$= 0,83 \cdot 12228,6494 \cdot 355 / 1 \cdot 10^{-3}$
u.c. =	0,84		$= 3039 / 3604,3$
Knik y-richting			
N_y =	15894,2	kN	$= \pi^2 \cdot 210000 \cdot 148465296 / 4400^2 \cdot 10^{-3}$
$\bar{\lambda}$ =	0,5		$= \sqrt{(12228,6494 \cdot 355 \cdot 10^{-3} / 15894,2)}$
ϕ =	0,7		$= \frac{1}{2} \cdot (1 + 0,49 \cdot (0,5 - 0,2) + 0,5^2)$
χ =	0,83		$= 1 / (0,7 + \sqrt{0,7^2 - 0,5^2})$
$N_{y,Rd}$ =	3604,3	kN	$= 0,83 \cdot 12228,6494 \cdot 355 / 1 \cdot 10^{-3}$
u.c. =	0,84		$= 3039 / 3604,3$

Figuur 27. Toetsing knik bij volledig benutten in druk

8 Controle

8.1 Eigen controles

In dit hoofdstuk worden extra controles gepresenteerd waar versimpelde en theoretische modellen naast de berekende waarden in de vorige hoofdstukken worden gelegd. Uiteraard zijn er ook controleslagen geweest tijdens de berekeningen uitgevoerd in hoofdstuk 6 en 7, waarbij krachten en doorbuigingen tussen de SCIA Engineer en D-Sheet Piling modellen vergeleken zijn.

8.1.1 Controle geleidewerken – doorbuiging bij aanvaring met simpel model

De accuraatheid van het complexe model dat zowel D-Sheet Piling als SCIA Engineer gebruikt kan getoetst worden met behulp van een eenvoudig model in enkel en alleen D-Sheet Piling. Bij een aanvaring op het midden van de constructie bij de enkelzijdige en dubbelzijdige constructie kan afgeschat worden dat de krachtverdeling in de twee palen gelijk moet zijn. Bij de enkelzijdige constructie werd aangetoond dat een aanvaarbeasting van 208 kN/m resulteert in de vereiste aanvaarenergie. De totale aanvaarkracht kan worden berekend met onderstaande vergelijking, welke gebruikmaakt van het gegeven dat de kracht gespreid wordt over een breedte van 1500 mm op drie gordingen.

$$F_L = 208 \cdot 3 \cdot 1,5 = 936 \text{ kN}$$

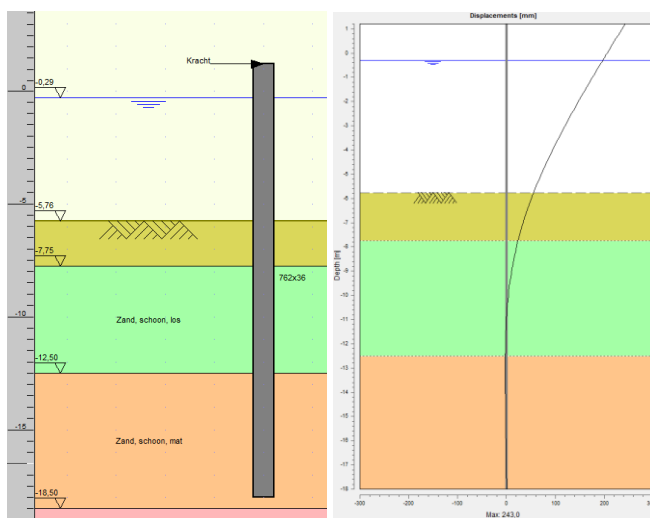
De wrijvingskracht die hier bij hoort is:

$$F_W = 936 \cdot 0,4 = 374,4 \text{ kN}$$

Dit leidt tot een diagonale kracht van:

$$F = \sqrt{936^2 + 374,4^2} = 1008,1 \text{ kN}$$

Deze kracht, welke wordt verspreid over 2 palen, kan op onderstaande manier in een D-Sheet Piling model worden gezet.



Figuur 28. Schematisatie simplificatie van geleidewerk model bij aanvaring op het midden

D-Sheet Piling toont aan dat de verplaatsing ter locatie van de puntkracht 243 mm betreft. Wanneer deze ontbonden wordt in de loodrechte richting op het geleidewerk vindt men:

$$u_L = 243 \cdot \frac{936}{\sqrt{936^2 + 374,4^2}} = 232,1 \text{ mm}$$

In de uitgebreide berekening werd een doorbuiging van 228 mm gevonden. De aanvaarenergie opgenomen in deze doorbuiging staat dan gelijk aan:

$$E = \frac{1}{2} \cdot 0,2321 \cdot 936 = 108,6 \text{ kNm}$$

In het uitgebreide model werd een aanvaarenergie van 106,7 kNm gevonden. De methodes vertonen vergelijkbare getallen. Daarmee is aangetoond dat de uitgebreide methode juist is uitgevoerd.

Controles voor aanvaring op de hoek van de geleidewerken kunnen op vergelijkbare methode worden uitgevoerd. Echter maakt de ongelijke verdeling van krachten, plus de secundaire effecten van de grote rotatie van de constructie de berekening minder eenvoudig om hier kort te presenteren.

8.1.2 Controle geleidewerken – veerstijfheden en verplaatsingen in D-Sheet Piling

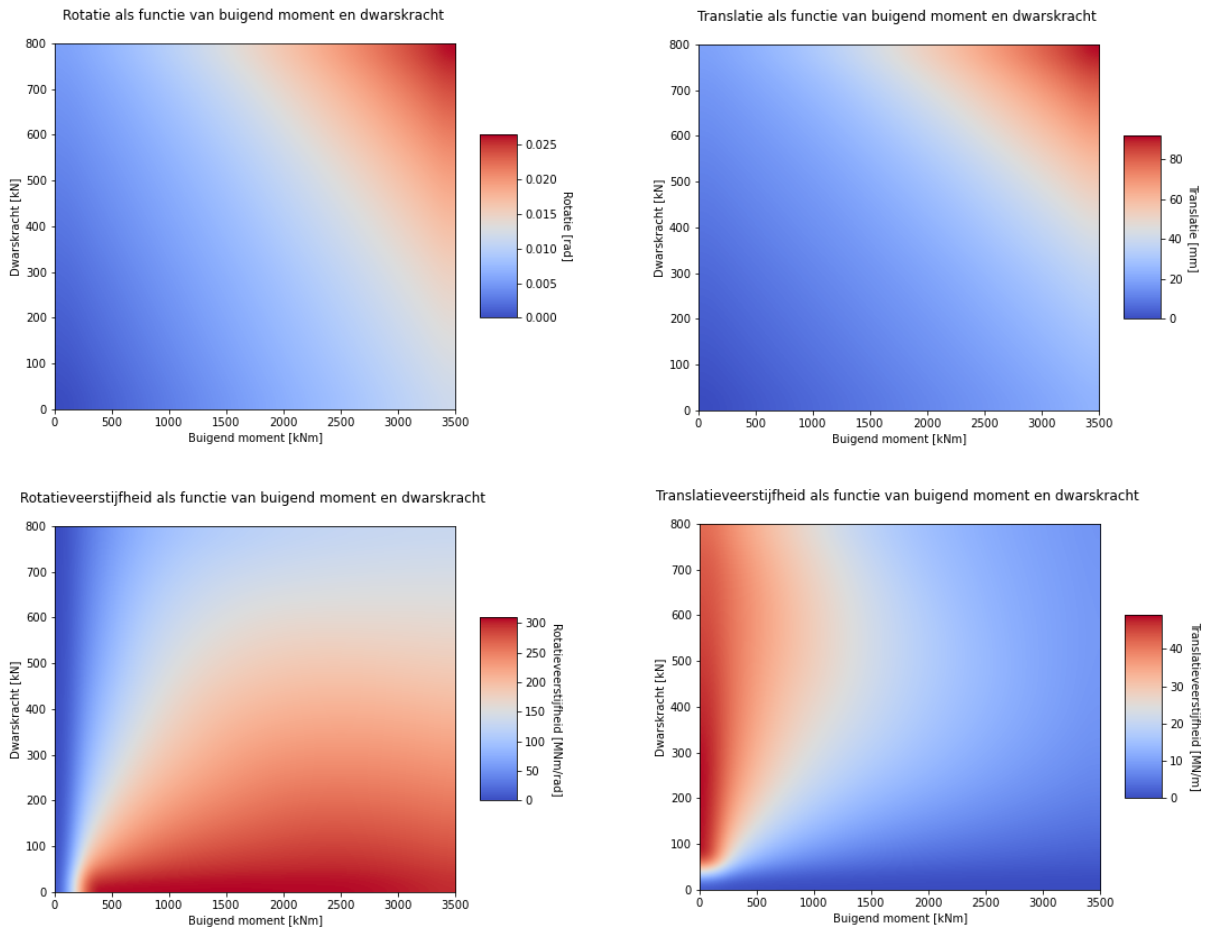
Grond is uitermate niet-lineair, met dalende veerstijfheden bij toenemende krachten. In de berekening voor de geleidewerken is meermalig gebruik gemaakt van representatieve grondveerstijfheden bij de overgang tussen de twee modellen: het model in SCIA Engineer en het model in D-Sheet Piling. Deze paragraaf zal controleren of de verwachte patronen in stijfheden ook terug te vinden zijn in het gebruikte D-Sheet Piling model.

Vier karakteristieken zullen gepresenteerd worden, als functie van zowel de dwarskracht als het buigend moment in de overgang tussen de twee modellen. De controle is uitgevoerd in een 20x20 grid, waarna de gevonden waarden vervolgens geïnterpoleerd zijn gebruikmakende van kwadratische interpolatie. De randwaarden links bij de rotatiestijfheid en onder bij de translatiestijfheid moeten genegeerd worden vanwege singulariteiten. De vier karakteristieken zijn:

1. Rotatie van paal bij overgang
2. Translatie van paal bij overgang
3. Representatieve rotatieveerstijfheid van paal bij overgang
4. Representatieve translatieveerstijfheid van paal bij overgang

In de resultaten valt te zien dat verhoging van het buigend moment rotaties niet-lineair doet toenemen, en dat de rotatieveerstijfheid onder dit scenario flink doet afnemen. Dezelfde conclusies kunnen getrokken worden kijkende naar de invloed van de dwarskracht op de translatie en translatieveerstijfheid. De contouren vallen daarmee in de lijn der verwachtingen.

Verder dient opgemerkt te worden dat gevonden opleggingskrachten, opleggingsverplaatsingen en opleggingsstijfheden die gevonden zijn in de verschillende geleidewerk sterkte-berekeningen, in lijn liggen met de hierboven gepresenteerde data.



Figuur 29. Controle rotatie(veren) en translatie(veren) in D-Sheet Piling

Ter illustratie, hieronder zijn de resultaten van één van de palen voor de aanvaring op het unieke geleidewerk met de aanvaring op de linkerzijde nogmaals gepresenteerd. Gegeven de kracht en het buigend moment, vallen de andere vier parameters uit te lezen uit bovenstaande figuren.

Aanvaring op paal 1	Verplaatsing D-Sheet [mm]	Rotatie D-sheet [mrad]	Kracht naar D-Sheet [kN]	Moment naar D-Sheet [kNm]	Translatie-veerstijfheid naar SCIA [MN/m]	Rotatie-veerstijfheid naar SCIA [MNm/rad]
Links	14,7	6,8	161	1762	10,9	260

8.2 Controle door controleur

Voor de controle door de controleur wordt verwezen naar het verificatieformulier in bijlage 10.

9 Conclusie en aandachtspunten

9.1 Conclusie

Uit het voorliggende berekeningsrapport volgt dat het ontwerp van de beschermipalen en geleidewerken voldoet aan het vereiste veiligheidsniveau en de contractuele eisen indien uitgevoerd conform beschreven in dit rapport.

In totaal worden er 13 beschermipalen aangebracht op vier locaties, verdeeld als volgt:

- 2 beschermipalen bij brug Blauwverlaat
- 3 beschermipalen bij brug Ald Skou
- 4 beschermipalen bij brug Spannenburg
- 4 Beschermipalen bij brug Uitwellingerga

Verder worden er zes geleidewerken aangebracht bij Blauwverlaat, waarvan:

- 3 enkelzijdige geleidewerken
- 2 dubbelzijdige geleidewerken
- 1 uniek geleidewerk

Omdat de beschermipalen bij de genoemde locaties verschillen per locatie, en de geleidewerken bestaan uit 3 type constructies, zal hier geen samenvatting volgen van de constructieonderdelen, maar wordt verwezen naar de desbetreffende paragrafen van het berekeningsrapport of de bijbehorende tekeningen.

9.2 Aandachtspunten

De volgende punten dienen nader beschouwd/uitgewerkt te worden in de volgende fase:

- Detaillering en toetsen van alle lussen. Uitgangspunt is dat alle onderdelen van de hoofdconstructie volledig worden doorgelast of worden gelast met dubbele hoeklassen waarbij de gezamenlijke keeldoorsnede groter of gelijk is aan de kleinste plaatdikte: $2a \geq t_{\min}$;
- Afwijkingen in definitieve keuze voor buisprofielen dienen rekenkundig te worden beoordeeld. Alternatieve profielen met grotere sterkte en/of hogere materiaalkwaliteit zijn niet per definitie gelijkwaardig.
- Er dient rekening gehouden te worden met de afstand tussen brug en funderingspaal bij het aanbrengen van de funderingspalen, opdat de brug niet beschadigd raakt bij het aanbrengen van de palen. De aanwezige rand tot rand afstand zou afdoende moeten zijn voor het veilig aanbrengen van de constructieonderdelen.

Bijlage 1 Eisen

Bijlage 1 Eisen

De eisen zijn te vinden in een aparte bijlage, vanwege het afwijkende formaat van de paginas.

Bijlage 2 Sonderingen

Bijlage 2 Sonderingen

Vanwege de hoeveelheid sondering is deze bijlage in een apart document te vinden.

Bijlage 3 Grondeigenschappen

Bijlage 3 Grondeigenschappen

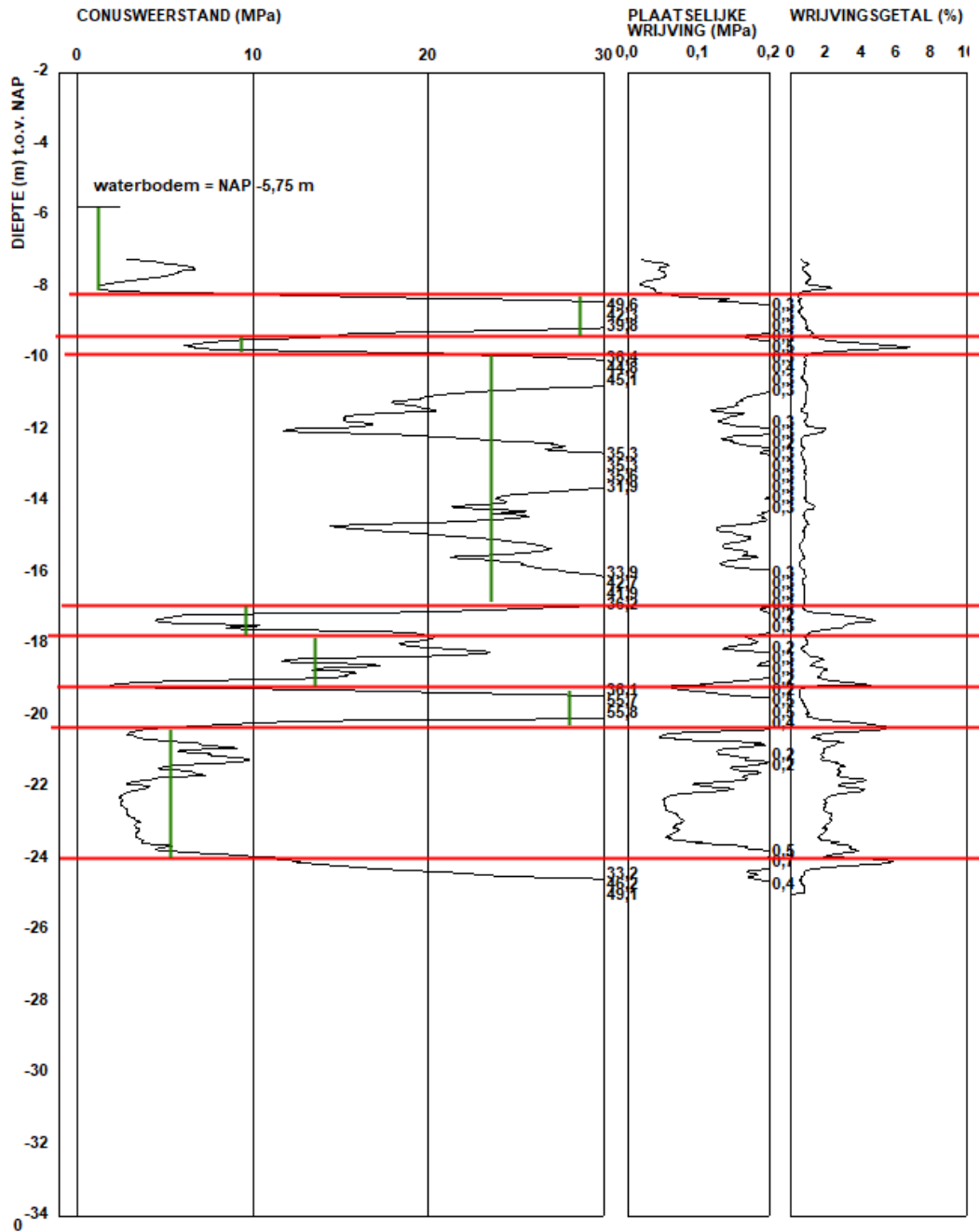
Op basis van tabel 2.b van NEN 9997-1, zijn de materiaaleigenschappen van de sonderingen bepaald. Voor de bepaling van de rekenwaarden van de grondparameters gelden de volgende materiaalfactoren (conform NEN 9997-1, bij RC2)

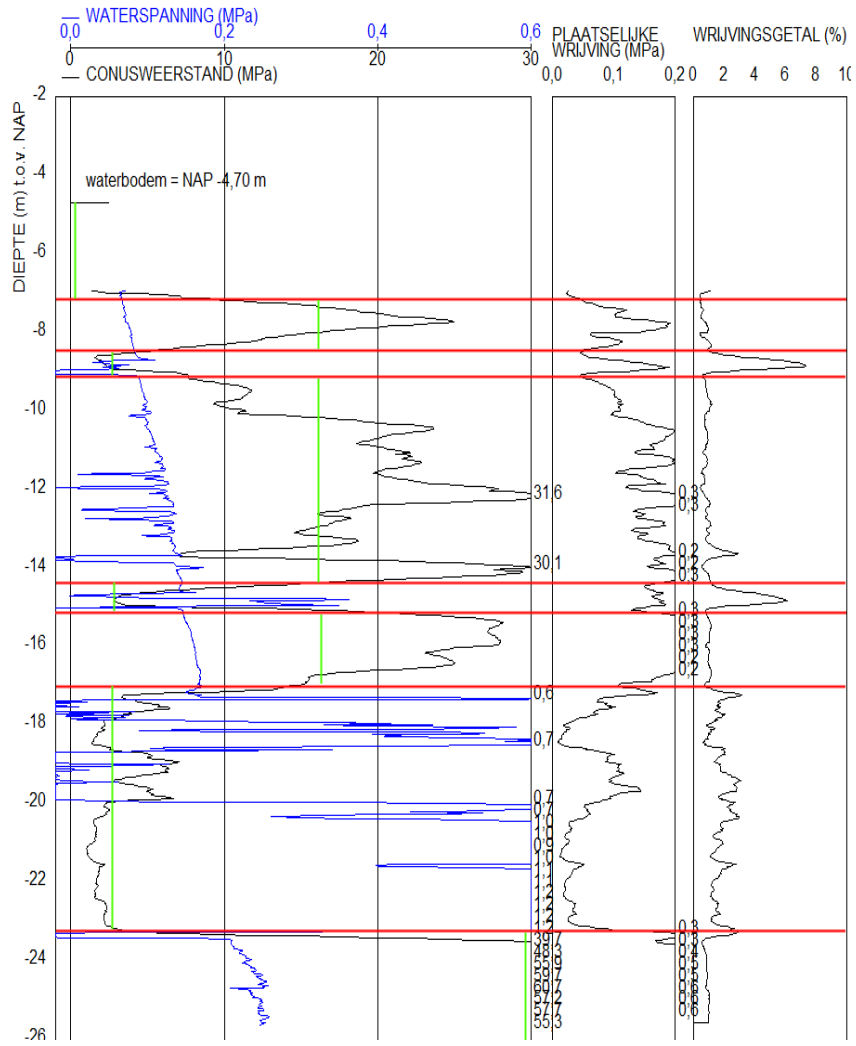
γ_c'	=	1,25 -
γ_{cu}	=	1,60 -
γ_{φ}'	=	1,175 - (geldt voor $\tan \varphi'$)
γ_Y	=	1,0 -
γ_E	=	1,3 -

Afhankelijk van het model (hoog of laag) wordt de representatieve waarde vermenigvuldigd met de factor ofwel gedeeld door de factor. De interpretatie van de gepresenteerde sonderingen in deze bijlage wordt verder uitgewerkt in de berekeningen.

Spannenburg:

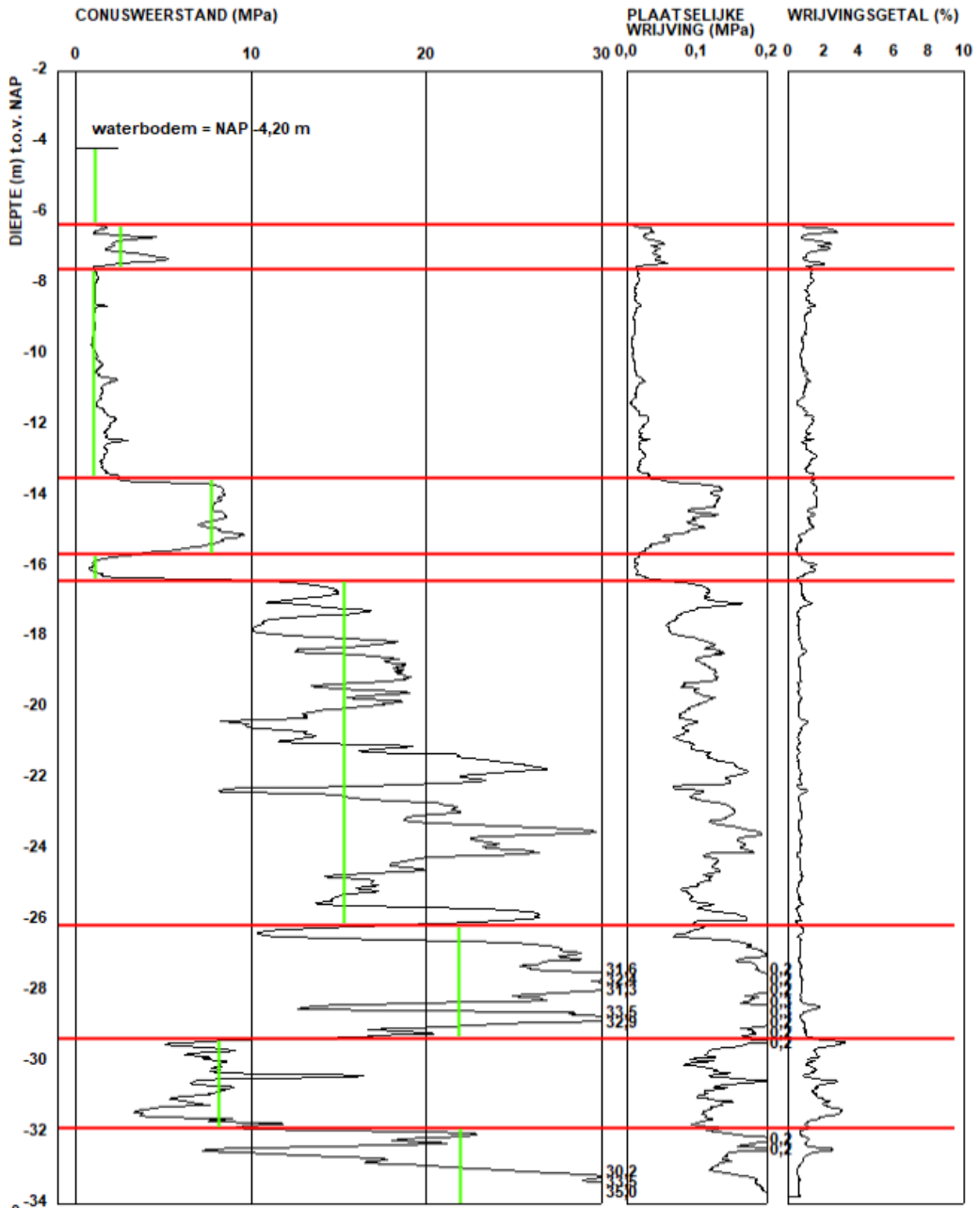
De drie sonderingen zijn geanalyseerd en er is vastgesteld met behulp van D-Sheet Piling dat de onderstaande twee grondeigenschappen respectievelijk de stijve (DKM001) en slappe (DKM003) variabiliteit van de grond representeren.

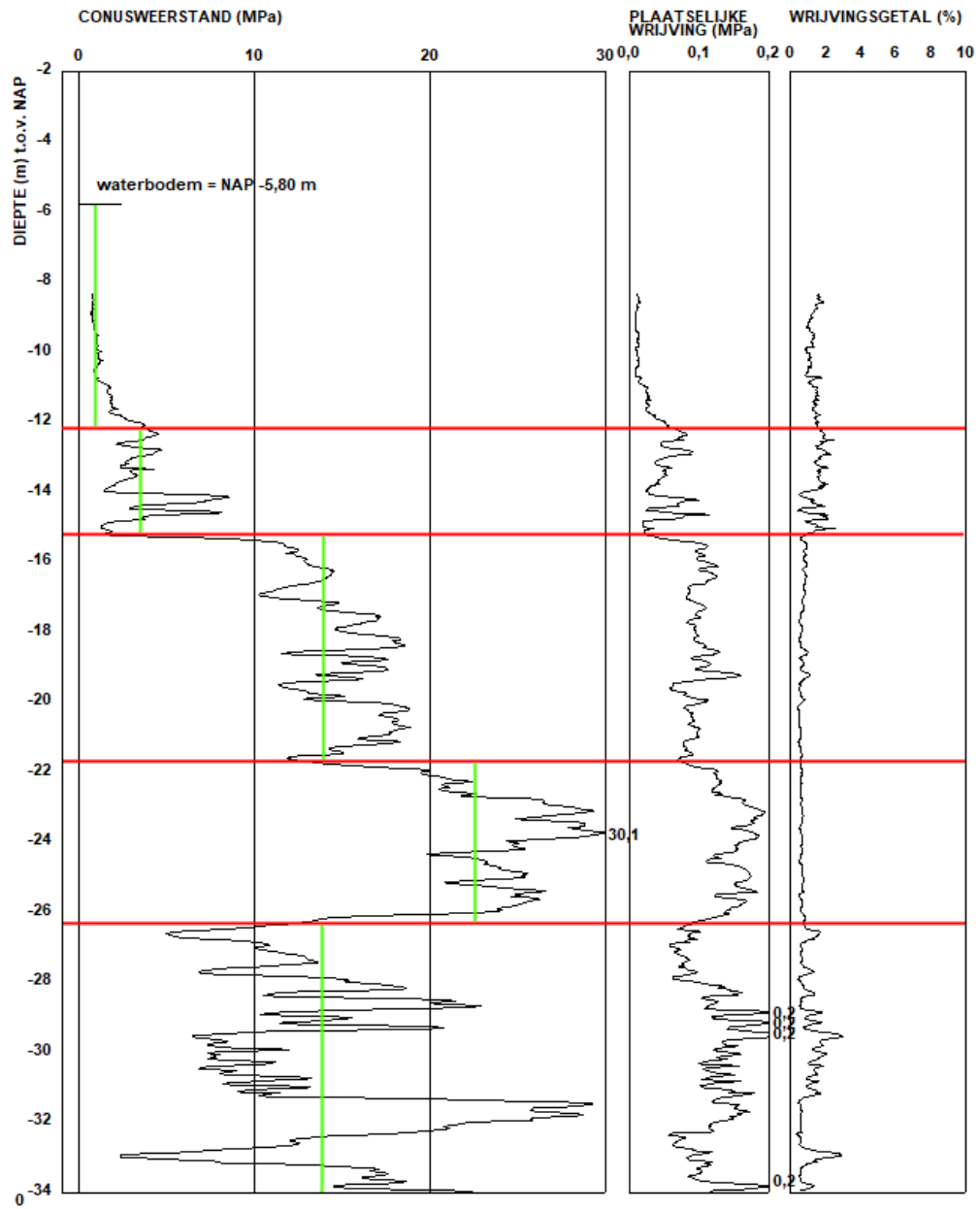




Uitwellingerga:

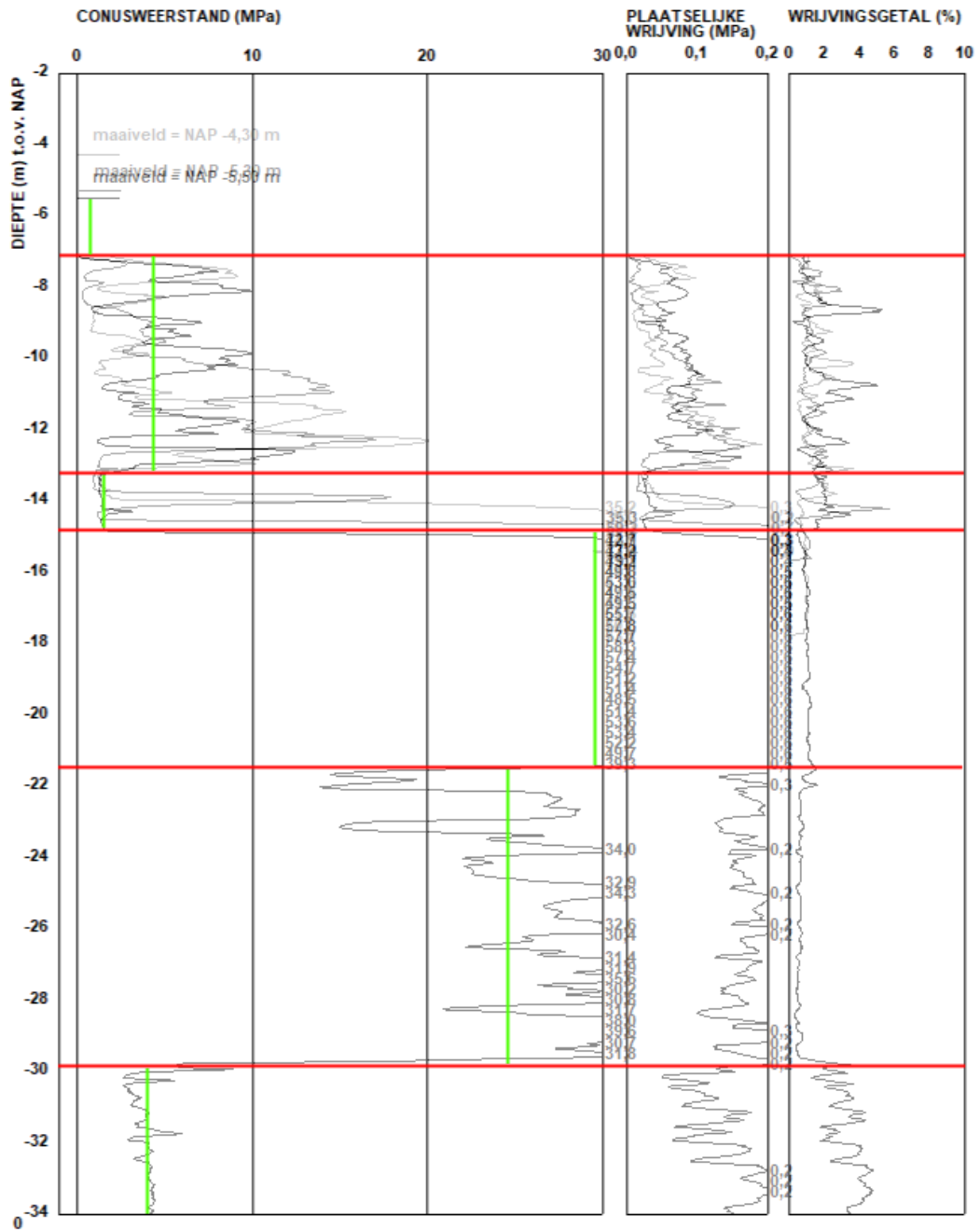
De drie sonderingen zijn geanalyseerd en er is vastgesteld met behulp van D-Sheet Piling dat de onderstaande twee grondeigenschappen respectievelijk de stijve (DKM006) en slappe (DKM005) variabiliteit van de grond representeren.





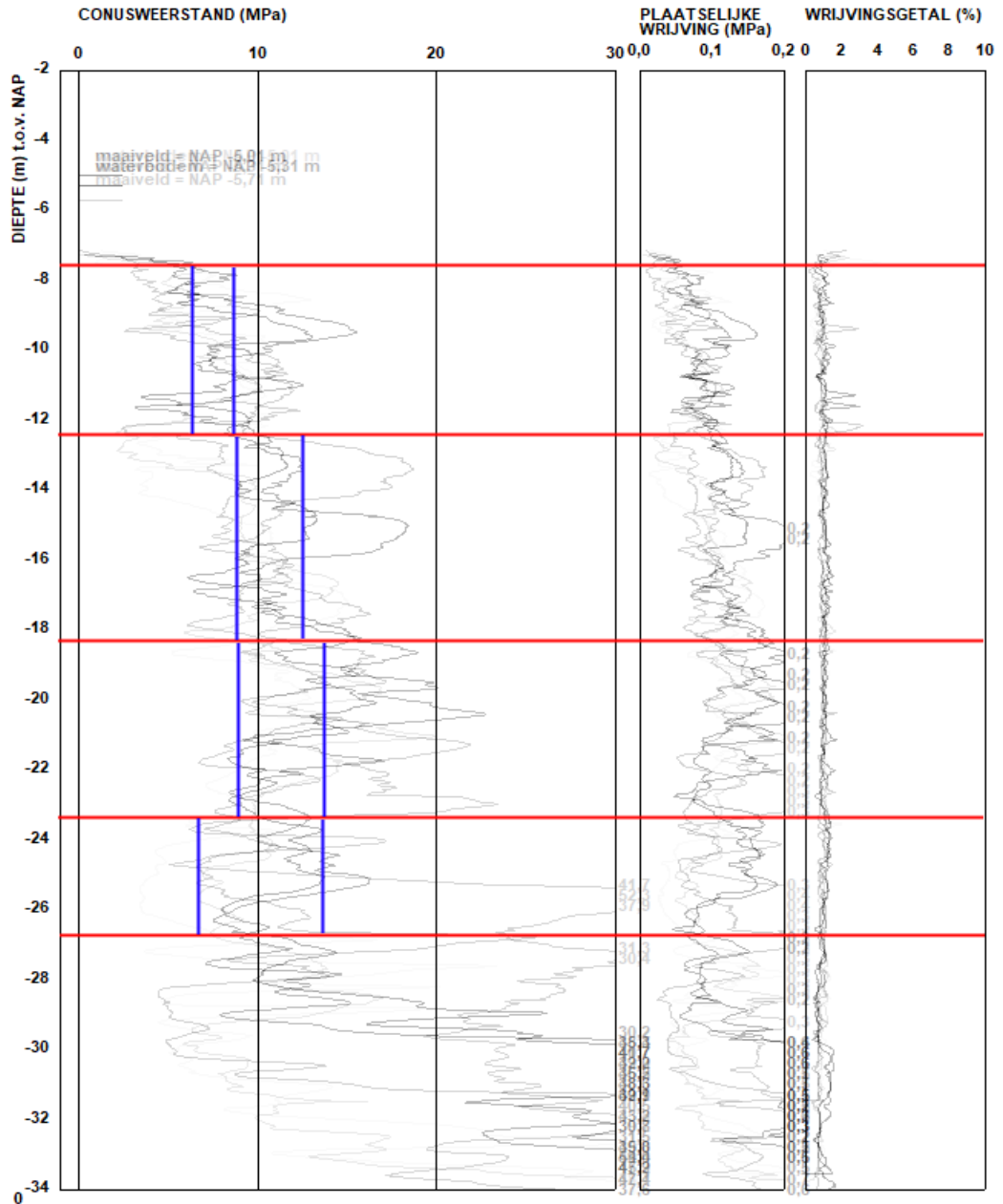
Ald Skou:

De sonderingen komen dermate overeen dat een enkel model afdoende is om de grond te representeren.



Blauwverlaat:

De sonderingen te blauwverlaat zijn gesplitst in een stijf-scenario en een slap-scenario. De identificatie is als volgt:



Bijlage 4 D-Sheet modellen beschermipalen

Bijlage 4 Berekeningen beschermipalen

Vanwege de hoeveelheid relevante modellen is deze bijlage in een apart document te vinden. De berekeningen zullen gepresenteerd worden in de volgorde:

1. Spannenburg
2. Uitwellingerga
3. Ald Skou
4. Blauwverlaat

Bijlage 5 Berekeningen beschermipalen

Bijlage 5 Berekeningen beschermipalen

Vanwege de hoeveelheid relevante modellen is deze bijlage in een apart document te vinden. De berekeningen zullen gepresenteerd worden in de volgorde:

5. Spannenburg
6. Uitwellingerga
7. Ald Skou
8. Blauwverlaat

Bijlage 6 Verjongingen beschermipalen

Bijlage 6 Verjongingen beschermipalen

Deze bijlage is te vinden in een apart document. Hierin worden de twee verjongingen (van 1220 naar 1016 en van 1420 naar 1220) uitgewerkt in twee varianten: een simpel model en een uitgebreid model. Het uitgebreide model wordt gebruikt om de spanningen te toetsen. Vervolgens worden beide modellen gebruikt om te toetsen of de doorsnede de doorbuiging niet hindert.

Bijlage 7 Sterktetoets geleidewerken D-Sheet

Bijlage 7 Sterktetoets geleidewerken D-Sheet

Vanwege de hoeveelheid relevante modellen is deze bijlage in een apart document te vinden. De presentatie is gesplitst in drie categorieën:

1. Geleidewerk type 1: enkelzijdig
2. Geleidewerk type 2: dubbelzijdig
3. Geleidewerk type 3: uniek

Voor elk type geleidewerk worden drie varianten uitgewerkt:

- a) Aanvaring op de linker hoek
- b) Aanvaring tussen de palen
- c) Aanvaring op de rechter hoek

Omdat de geleidewerken gefundeerd zijn op twee palen, zal bij elke variant twee D-Sheet Piling modellen behoren.

Bijlage 8 Sterktetoets geleidewerken SCIA

Bijlage 8 Sterktetoets geleidewerken SCIA

Vanwege de hoeveelheid relevante modellen is deze bijlage in een apart document te vinden. De presentatie is gesplitst in drie categorieën:

1. Geleidewerk type 1: enkelzijdig
2. Geleidewerk type 2: dubbelzijdig
3. Geleidewerk type 3: uniek

Voor elk type geleidewerk worden drie varianten uitgewerkt:

- a) Aanvaring op de linker hoek
- b) Aanvaring tussen de palen
- c) Aanvaring op de rechter hoek

Bijlage 9 Stabiliteitstoets geleidewerken

Bijlage 9 Stabiliteitstoets geleidewerken

In een aparte bijlage valt de uitwerking van de maatgevende stabiliteits-scenario te vinden. Hierin wordt eerst het SCIA Engineer model gepresenteerd, gevolgd door de D-Sheet Piling

Bijlage 10 Verificatieformulier

Bijlage 10 Verificatieformulier

Vanwege het formaat van het verificatieformulier is deze te vinden in een aparte bijlage.

Over Antea Group

Van stad tot land, van water tot lucht; de adviseurs en ingenieurs van Antea Group dragen in Nederland sinds jaar en dag bij aan onze leefomgeving. We ontwerpen bruggen en wegen, realiseren woonwijken en waterwerken. Maar we zijn ook betrokken bij thema's zoals milieu, veiligheid, assetmanagement en energie. Onder de naam Oranjewoud groeiden we uit tot een allround en onafhankelijk partner voor bedrijfsleven en overheden. Als Antea Group zetten we deze expertise ook mondiaal in. Door hoogwaardige kennis te combineren met een pragmatische aanpak maken we oplossingen haalbaar én uitvoerbaar. Doelgericht, met oog voor duurzaamheid. Op deze manier anticiperen we op de vragen van vandaag en de oplossingen van de toekomst. Al meer dan 60 jaar.

Contactgegevens

Tolhuisweg 57
8443 DV HEERENVEEN
Postbus 24
8440 AA HEERENVEEN

www.anteagroup.nl

Copyright © 2019

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar worden gemaakt door middel van druk, fotokopie, elektronisch of op welke wijze dan ook, zonder schriftelijke toestemming van de auteurs.