

Technische uitgangspunten regionale waterkeringen HDSR

Te gebruiken bij toetsing, buitengewoon onderhoud en ontwerp



Colofon

Titel:	Technische uitgangspunten regionale waterkeringen HDSR
Ondertitel:	Te gebruiken bij toetsing, buitengewoon onderhoud en ontwerp
Registratie:	DM#1644441
Versie:	1.01
Datum:	14 september 2022
Opgesteld door:	Orin van Loon Marloes Remmerswaal Martijn Heemink Robin van Alphen
Beheerder:	Tactisch team waterkeringen

Inhoudsopgave

1. Inleiding.....	6
1.1. Aanleiding	6
1.2. Doelstelling	6
1.3. Afbakening	6
1.4. Versiebeheer	7
1.5. Leeswijzer	7
2. Instrumentarium	8
2.1. Vigerende normen en leidraden	8
2.2. Software	8
3. Belastingen en hydraulische randvoorwaarden	9
3.1. Belastingssituaties	9
3.1.1. Schematisatie freatische lijn hoogwater	10
3.1.2. Schematisatie freatische lijn droogte	10
3.1.3. Schematisatie freatische lijn bij val van de waterstand	10
3.2. Stijghoogte	11
3.2.1. Waterspanningsverloop	11
3.3. Verkeersbelasting	11
4. Uitgangspunten kadegeometrie	13
4.1. Geometrie op het land	13
4.2. Geometrie onder water	13
4.3. Bodemdaling	13
4.4. Keuze profiel	14
5. Veld- en laboratoriumonderzoek	15
5.1. Strategie grondonderzoek (fasering)	15
5.1.1. Onderzoek afstemmen op doel	16
5.1.2. Gefaseerde uitvoering	17
5.2. Vooronderzoek (fase 0)	17
5.3. Verkennend onderzoek (fase 1)	18
5.3.1. Veldonderzoek	18
5.3.2. Laboratoriumonderzoek	19
5.4. Gedetailleerd onderzoek (fase 2 en fase 3)	19
5.4.1. Veldonderzoek	19
5.4.2. Laboratoriumonderzoek	20
5.5. Geotechnische parameters	20
5.5.1. Proevenverzameling	20
6. Toetsspoor hoogte	22
6.1. Toetsing	22
6.1.1. Methode eenvoudige toetsing	22
6.1.2. Overloop en overslag	22
6.1.3. Bekleding	23

6.2.	Ontwerp	23
7.	Beoordelingsspoor stabiliteit	24
7.1.	Stabiliteitsfactor	24
7.1.1.	Materiaalfactor	24
7.1.2.	Schematiseringsfactor	24
7.1.3.	Modelfactor	25
7.2.	Keuze glijvlakmodel	25
7.3.	Macrostabiliteit binnentalud	25
7.3.1.	Toetsing	25
7.3.2.	Ontwerp	25
7.4.	Macrostabiliteit buitentalud	25
8.	Beoordelingsspoor piping.....	26
8.1.	Profiel.....	26
8.2.	Belasting	26
8.3.	Schematiseringsfactor	27
8.4.	Eenvoudige beoordeling.....	27
8.5.	Gedetailleerde beoordeling	28
8.5.1.	Veiligheidsfactoren	28
8.5.2.	Weerstand voorland.....	28
8.6.	Geavanceerde beoordeling	29
9.	Overige beoordelingssporen	30
9.1.	Niet waterkerende objecten	30
9.2.	Voorland	30
9.3.	Microstabiliteit	30
10.	Waterkerende constructies	31
10.1.	Uitgangspunten.....	31
10.1.1.	Risicoklassen.....	31
10.1.2.	Levensduur damwand	32
10.2.	Geotechnische randvoorwaarden.....	32
10.2.1.	Grondonderzoek	32
10.2.2.	Grondparameters.....	32
10.2.3.	Terreinbelasting	33
10.2.4.	Bovenbelasting	33
10.2.5.	Bodemprofiel.....	34
10.3.	Verticale stabiliteit en horizontale verplaatsingen	34
10.4.	Roestvorming/corrosie.....	34
10.5.	Toepassing van factoren	34
10.6.	Verankering	35
10.7.	Infiltratievoorziening.....	35
10.8.	Beoordeling bestaande constructies	35
10.9.	Type constructies.....	35

11.	Specifieke aspecten toetsing, ontwerp en uitvoering	37
11.1.	Toetsing	37
11.1.1	DAM	37
11.1.2.	Beheerdersoordeel	37
11.2.	Ontwerp	37
11.3.	Uitvoering	38
12.	Definities en begrippen	39
13.	Referentielijst	40

1. Inleiding

1.1. Aanleiding

Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden (HDSR) is de beheerder van 330 kilometer genormeerde regionale keringen. Als onderdeel van het beheer dienen deze onderhouden, getoetst en indien onvoldoende beoordeeld, conform de vigerende normen en leidraden verbeterd te worden.

Voorliggend document beschrijft de technische uitgangspunten ten aanzien van toetsing en buitengewoon onderhoud van regionale keringen binnen het beheergebied van HDSR. Dit document is, in afstemming met afdeling WB, opgesteld door een werkgroep binnen afdeling IB.

De vigerende leidraden en normen bieden veel vrijheid ten aanzien van methodiek en het detailniveau waarop de technische toets en het ontwerp worden uitgewerkt. Daarnaast is de methodiek voor enkele belangrijke aspecten nog niet in detail uitgewerkt. Om binnen toetsing en buitengewoon onderhoud tot een eenduidige aanpak te komen zijn aanvullende richtlijnen noodzakelijk.

1.2. Doelstelling

HDSR stelt zich ten doel dat projecten voor toetsing en buitengewoon onderhoud van regionale waterkeringen goed en efficiënt worden uitgevoerd met betrokkenheid van de omgeving. Dit document draagt daaraan bij door:

- Handvaten en uitgangspunten te bieden voor (startende) technische medewerkers bij IB;
- Helderheid te verschaffen aan ingehuurd ingenieurbureaus en aannemers over technische uitgangspunten en aanpak;
- Standaarden vast te leggen zodat (interne) opdrachtgever en opdrachtnemer helder hebben welke technische uitgangspunten er gelden in een project;
- Inzicht te geven aan stakeholders in hoe wij op technisch vlak ons werk doen. Hierdoor wordt getracht de samenwerking te verbeteren. Bij projecten die samen met andere partijen worden uitgevoerd zal dit document ter informatie worden gedeeld.

Deze doelstellingen dragen bij aan de wettelijke taak van HDSR; zorgdragen voor veilige waterkeringen.

De waterkeringen in het beheergebied van HDSR variëren sterk in opbouw en medegebruiksfuncties en daarom bevat deze richtlijn een heldere uitvoeringsstandaard met mogelijkheid om hier gemotiveerd van af te wijken.

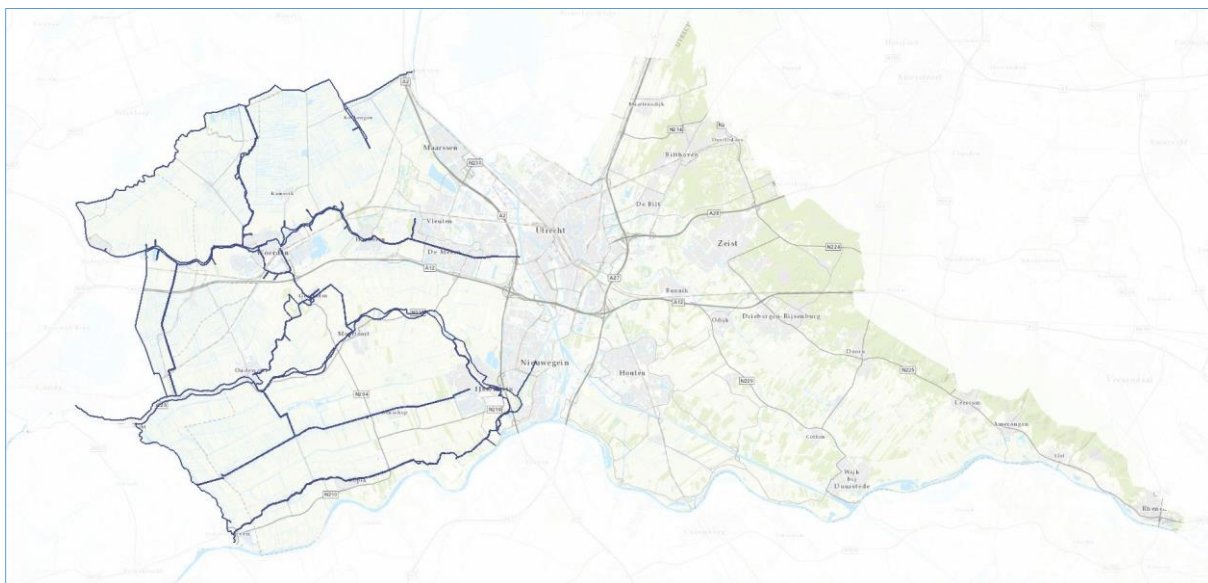
1.3. Afbakening

Deze ontwerp- en uitvoeringsrichtlijnen zijn bedoeld voor toetsing en buitengewoon onderhoud van regionale waterkeringen en richten zich op het project van voorbereiding tot overdracht aan WB.

HDSR heeft in de werkwijzer projecten uitgebreid beschreven hoe projecten worden aangepakt. Om inconsistenties te voorkomen beperkt dit document zich tot technische uitgangspunten.

Voor overige zaken wordt verwezen naar andere binnen HDSR opgestelde rapporten en documenten zoals:

- De werkwijzer projecten (<https://hdsr.mavimcloud.com>)
- Duurzaam opdrachtgeverschap (<https://intranet.ad.hdsr.nl/werk/duurzaam>)
- Basisspecificatie regionale waterkering (DM#1563572)
- Keur (<https://www.hdsr.nl/vergunningen/subsidies/regelgeving>)



Overzichtskaat regionale keringen van HDSR

De volgende zaken worden in dit stuk niet behandeld:

- Primaire en overige waterkeringen;
- Kunstwerken;
- Dagelijks onderhoud.

1.4. Versiebeheer

Dit is het document waarin de technische uitgangspunten voor regionale keringen voor HDSR staan beschreven. Deze is opgesteld door beschikbare informatie, zowel intern als van andere waterschappen, te beoordelen en de relevante informatie in dit document op te nemen.

Als er aanleiding is voor om zaken anders op te schrijven, denk aan projectervaringen, maar ook ontwikkelingen vanuit onderzoek en/of wetgeving, dan zal er nieuwe versie verschijnen.

Het is aan de lezer van dit stuk om te verifiëren of de voorliggende versie vigerend is.

Vragen en opmerkingen zijn welkom bij de beheerders van dit stuk (zie colofon).

1.5. Leeswijzer

Dit document beschrijft de technische richtlijnen voor regionale keringen in het beheergebied van HDSR ten aanzien van:

- De in te zetten instrumenten (H2)
- De te hanteren belastingen en hydraulische randvoorwaarden (H3)
- De uitgangspunten voor de geometrie van de kade (H4)
- De zaken die horen bij de uitvoering van veld- en laboratoriumonderzoek (H5)
- Het toetsspoor hoogte (H6)
- Het beoordelingsspoor stabiliteit (H7)
- Het beoordelingsspoor piping (H8)
- De overige beoordelingssporen (H9)
- De waterkerende constructies (H10)
- De specifieke aspecten bij toetsing, ontwerp en uitvoering (H11)
- De gehanteerde definities en begrippen (H12)
- De referentielijst (H13)

2. Instrumentarium

De inhoud van dit uitgangspuntendocument is gebaseerd op actuele kennis over veiligheid van regionale waterkeringen gekoppeld aan bestaande handreikingen, richtlijnen en leidraden. Het is zeker dat kennisontwikkeling leidt tot nieuwe inzichten en daardoor vraagt om een nieuwe aanpak van regionale waterkeringen.

2.1. Vigerende normen en leidraden

Bij de uitgangspunten wordt op diverse plaatsen in dit document verwezen naar voorschriften, leidraden en technische rapporten. Deze kunnen door voortschrijdende kennis en technieken in de loop van de tijd worden aangepast en verbeterd. Verwijzingen betreffen steeds de versies van dato van dit document.

Voor de toetsing en het ontwerp van boezemkaden zijn een grote hoeveelheid leidraden, richtlijnen, factsheets en protocollen van toepassing. De belangrijkste zijn:

- Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale Waterkeringen (LTVRW) [STOWA, Rapport W15, 2015]
- Handreiking Ontwerpen & Verbeteren Boezemkaden [STOWA, ORK 2009-06]
- Eurocode met nationale NL-bijlagen
- TR17 – Klei voor dijken (TAW, 1996) met update uit 2017
- TR26 – Waterspanningen bij dijken (TAW, 2004)
- CUR166 – Damwandconstructies
- CUR162 – Construeren met grond

Voor de regionale waterkeringen van HDSR zijn de bovengenoemde documenten leidend. Dit document beschrijft specifieke aanvullingen en afwijkingen per onderdeel.

Algemeen wordt opgemerkt dat de gebruiker op de hoogte dient te zijn en blijven van nieuwe ontwikkelingen en/of aanpassingen in nieuwe versies van de rapporten waar naar wordt verwezen.

2.2. Software

De basissoftware voor het toetsen en ontwerpen van regionale waterkeringen bestaat uit GIS en de D-serie van Deltares. Voor het controleren van de stabiliteit van kadeverbeteringen wordt het programma D-Geo Stability toegepast. Voor het ontwerpen van damwandconstructies in staal, hout of kunststof en het uitrekenen van palen wordt D-Sheet Piling gebruikt.

Damwanden met stabiliteit verhogende functie dienen met een eindige elementen methode zoals Plaxis worden beoordeeld en ontworpen. Op deze manier kan de interactie tussen het scherm en de grondmoot worden berekend.

Aanvullende software pakketten zoals DAM, waarmee de sterkteberekeningen van de dijken en kades geautomatiseerd worden uitgevoerd, worden ook geaccepteerd. Echter beschikt HDSR niet over deze software en dienen te allen tijde de bovengenoemde producten aangeleverd te worden, zodat gegevens uitgelezen en ontsloten kunnen worden.

3. Belastingen en hydraulische randvoorwaarden

De maatgevende hoogwaterstand, ook wel toetspeil, is gelijk aan het maatgevende peil op de boezem. De benodigde toetshoogte is het toetspeil plus lokale toeslagen. In het achterland heerst veelal een ingesteld polderpeil. Daarnaast zijn er soms teensloten aanwezig. De peilen kunnen afwijken. Zowel de oppervlaktewaterstand als het verloop van de grondwaterstand dienen voor geotechnische sommen te worden geschematiseerd.

3.1. Belastingssituaties

De hydraulische randvoorwaarden per boezemkade ^{link1} in het gebied van HDSR zijn in een shape ontsloten. Zowel de streefpeilen op de boezem als de polderpeilen ^{link2} zijn opgenomen in een online omgeving. In de Nota Peilbeheer staan de uitgangspunten die HDSR hanteert bij opstellen van peilbesluiten en watergebiedsplannen (DM#1560513). Deze waterpeilen vormen de basis van de lokale ontwerpwaterstand en hoogte van de regionale waterkeringen.

- | | |
|-------------------------|---|
| • Boezempeil | streefpeil |
| • Maatgevend boezempeil | maalstop + toeslagen scheefstand van bemaling en langsopwaaiing |
| • Toetspeil | maatgevend boezempeil |
| • Toetshoogte | maatgevend boezempeil + toeslagen dwarsopwaaiing en windgolf |
| • Leggerhoogte | vereiste afmetingen verantwoordelijk voor beheer en onderhoud: <ul style="list-style-type: none">- kering met weg: toeslag 10 cm bovenop toetshoogte- groene keringen: toeslag 20 cm bovenop toetshoogte |

Voor de aanleghoogte, waarin zettingen worden meegenomen, wordt verwezen naar paragraaf 6.2.

De maatgevende waterstanden zijn in 2019 opgesteld in het kader van de tweede toetsronde. Deze zijn aansluitend door het bevoegd gezag, de provincies, vastgesteld. Voor de tweede toetsronde geldt peildatum 1 januari 2024. Door de relatief korte periode tussenliggende periode is gekozen om geen klimaatscenario te verwerken in de maatgevende waterstanden. Onder het programma klimaatadaptatie wordt vanaf 2021 integraal gekeken naar de opgave wateroverlast. Daarbij wordt op basis van nieuwe klimaatscenario's een nieuwe set hydraulische randvoorwaarden opgesteld. Deze zullen na gereedkomen als uitwerkkuitgangspunt gelden voor het verbeteren van regionale waterkeringen. In de tussentijd gelden de hierboven genoemde hydraulische belastingen.

De freatische lijn wordt geschematiseerd conform het Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken (2004). Ten behoeve van toetsing en ontwerp wordt voor de geohydrologische schematisatie onderscheid gemaakt in drie situaties, hoogwater, droogte en peilval. Dit geldt als basissituatie. Door inzichten uit peilbuismetingen kunnen de onderstaande schematisaties worden aangepast. Hierbij dient rekening gehouden te worden met en afgestemd worden over:

- Moet er bij gebruik van peilbuisgegevens een veiligheid aanhouden in de hoogste waterstand?
- Zijn de peilbuismetingen voldoende betrouwbaar?
- Moeten ten behoeve van toetsing peilbuizen worden geplaatst?
- Wanneer zijn de (meet)gegevens bruikbaar? Over welke periode dient er een meetreeks te zijn?

Het komt voor dat bij een regionale waterkeringen verschillende polderpeilen in de teen bestaan. In deze situatie wordt met het maatgevende (laagste) polderpeil gerekend.

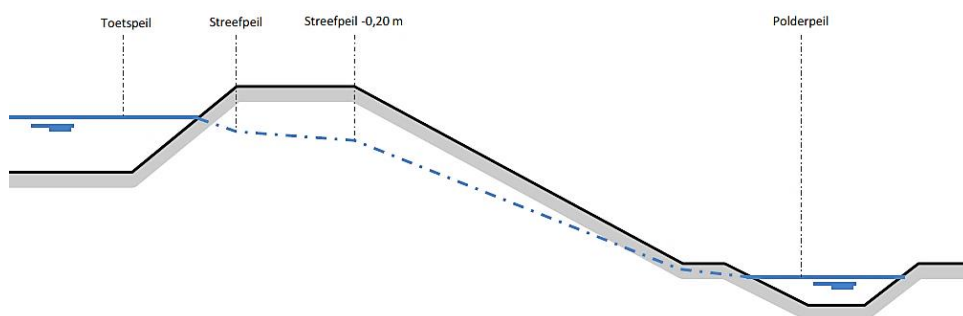
¹ O:\Beheer Waterkeringen\Onderhoud\Regionale waterkeringen\Uitgangspuntendocument_RWK

² <https://hdsr.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=82aa7241868b47a9a7d87af35ecacdc5>

3.1.1. Schematisatie freatische lijn hoogwater

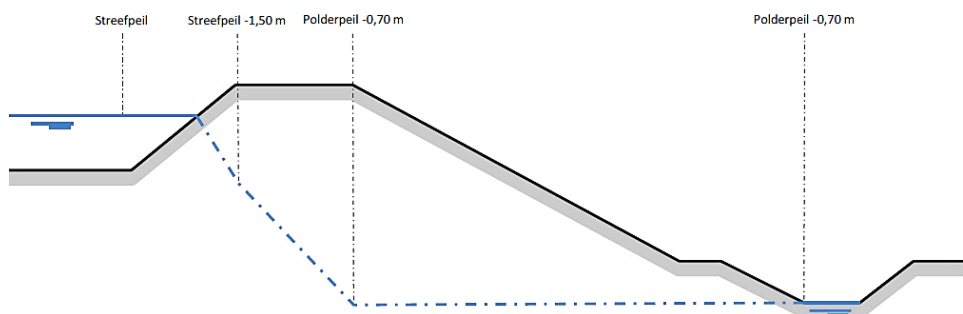
De freatische lijn heeft bij de buitenkruinlijn een niveau gelijk aan streefpeil. Deze zakt vervolgens 0,2 m onder het streefpeil naar de binnenkruinlijn. Vanaf de binnenkruinlijn verloopt de freatische lijn naar de binnenteen van de kade. Indien het punt 'streefpeil -0,20 m' lager ligt dan het polderpeil dient de freatische lijn vanaf de buitenkruin vloeiend te verlopen.

In de uitvoeringssituatie wordt het streefpeil gehanteerd op de boezem. De freatische lijn bevindt zich ter plaatse van de binnenteen onder de laatste ophoogslag op het binnentalud. In de eindfase wordt de stabiliteit gecontroleerd met het maatgevend boezempeil, toetspeil.



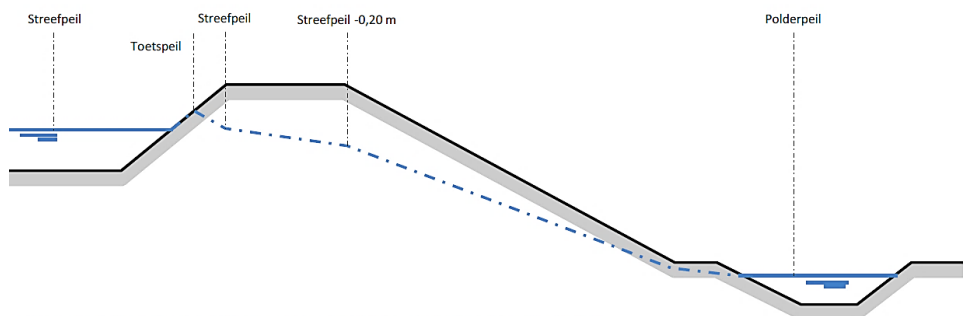
3.1.2. Schematisatie freatische lijn droogte

Een kade is droogtegevoelig wanneer het een veenkade betreft die niet tegen uitdroging is beschermd (afdekkende kleilaag < 0,5 m). In het beheergebied van HDSR zijn dergelijke kades niet aanwezig. Toch dient uit veiligheidsoogpunt de belastingsituatie bij droogte gecontroleerd te worden bij binnenwaartse stabiliteit.



3.1.3. Schematisatie freatische lijn bij val van de waterstand

Bij een IPO klasse > II en de aanwezigheid van een groen buitentalud dient de buitenwaartse stabiliteit gecontroleerd te worden. Reden hiervan is dat de omliggende waterkeringen met een lagere IPO klasse bij falen voor een maatgevende peilval-situatie kunnen zorgen. Voor IPO I keringen wordt val van het toetspeil naar streefpeil uitgesloten, omdat omliggende keringen een lagere faalkans hebben.



Daarnaast dient het buitentalud gecontroleerd te worden bij dagelijkse omstandigheden (streefpeil) en hoogwater (toetspeil). Bij de aanwezigheid van een constructie mag een forbidden line worden mee geschematiseerd op de plaats en tot de diepte van de aanwezige beschoeiing of damwand. Als uitgangspunt geldt dat de constructie (H. 9) ten alle tijden getoetst dient te worden op stabiliteit alvorens deze in de stabiliteitssom wordt meegenomen.

3.2. Stijghoogte

De rekenwaarde voor het verloop van de stijghoogte in het watervoerende pakket wordt bepaald op basis van de stijghoogtekaart ^{link3}. HDSR heeft voor het bepalen van de stijghoogte de waarde uit het Dinoloket gebruikt. Vervolgens is er een stochastisch tijdsreeksmodel afgeleid, is deze reeks verlengd en zijn vervolgens de puntschattingen met geostatistiek opgeschaald tot vlak dekkende gegevens. De uitkomsten sluiten aan bij de informatievraag vanuit de tweede toetsronde en zijn met peilbuizen in het veld gecontroleerd. De waarden komen goed overeen.

Als stijghoogte dient de lokaal gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) in rekening te worden gebracht. Deze stijghoogte wordt slechts minimaal beïnvloed door een T=10 of T=1000 neerslagsituatie. Omdat de kans dat een hoge stijghoogte in het watervoerende pakket samen valt met maatgevende boezemwaterstand klein is gaat HDSR uit van GHG in het eerste watervoerend pakket.

3.2.1. Waterspanningsverloop

Voor de schematisatie van de waterspanningen in de ondergrond gelden de volgende uitgangspunten:

- Voor de bovenste lagen geldt de freatische waterstand;
- De indringingsdiepte dient bepaald of aangenomen te worden omdat bij samendrukbare lagen de invloed van de verhoging van de stijghoogte merkbaar is.
- Indien er tussenzandlagen in de bodemopbouw aanwezig zijn, dient te worden beschouwd of deze in verbinding staan met het pleistocene zand. Indien dit niet het geval is, door afdekkende lagen klei en veen, wordt voor de tussenzandlaag een hydrostatisch verloop gehanteerd. Indien er wel een verbinding is met het pleistocene pakket wordt de stijghoogte van dit pakket gehanteerd. Bij gebrek aan informatie dient de tussenzandlaag gemeten te worden m.b.v. peilbuizen.
- In de pleistocene zandlaag heerst de stijghoogte.

3.3. Verkeersbelasting

In de ontwerp- en toetsberekening van een kade wordt rekening gehouden met verkeersbelastingen.

Type kade	Verkeersbelasting [kN/m ²]	Consolidatiepercentage	
		Hoogwater	Droogte
Groene kade	5	50%	30%
Fietspad op kruin (breedte ≤ 1,5 m)	5	100%	30%
Fietspad op kruin (breedte ≥ 1,5 m)	13	50%	30%
Wegverharding	13	50%	30%

- De verkeersbelasting van 13 kN/m² wordt gemodelleerd over een breedte van 2,5 m, een spreidingshoek van 45 graden en met een consolidatiepercentage voor cohesieve grondsoorten volgens bovenstaande tabel.
- Voor niet-cohesieve grondsoorten is het consolidatiepercentage 100%. De verkeersbelasting van 5 kN/m² wordt gemodelleerd over een breedte van 1,5 m.

³ H:\DATA\HYDROMEDIA\Validatie\GxG_wvp1\

-
- In de situatie met een verharding op de kruin, met uitzondering van een fietspad of wandelpad, wordt een bovenbelasting van 13 kN/m^2 gehanteerd. Deze waarde dekt het reguliere vrachtverkeer met een maximale massa van 50 ton. De spreiding voor- en achter het voertuig wordt niet meegenomen. Er wordt uitgegaan van een rij zware voertuigen achter elkaar. Daarnaast wordt de belasting op de rand van het asfalt gezet, een maatgevende locatie.
 - Ook als er incidenteel zwaarder verkeer over de weg kan rijden gaat HDSR uit van 13 kN/m^2 mede door het gegeven dat de kade al een belasting geschiedenis heeft.
 - Indien er een weg direct naast de kade ligt wordt er uitgegaan van een verkeersbelasting van 20 kN/m^2 .

4. Uitgangspunten kadegeometrie

De combinatie van huidige hoogten en verwachte zettingen en bodemdaling geeft de geometrie van de kering voor het zichtjaar van toetsing of ontwerp. Dit hoofdstuk beschrijft hoe de huidige hoogte zowel boven als onder water bepaald kan worden en welke bronnen er zijn om de bodemdaling tot de peildatum te bepalen. Tevens worden er handreikingen beschreven voor de keuze van reken en ontwerpprofielen.

4.1. Geometrie op het land

Voor het uitvoeren van sterkteberekeningen zijn maaiveldgegevens nodig voor de geometrie op het land. Dit geldt zowel voor toetsing als ontwerp. Voor de toetsing worden de meest actuele AHN gegevens gehanteerd en wanneer beschikbaar revisiegegevens van een project.

Wanneer uit de toetsing blijkt dat een kade onvoldoende hoog en/of stabiel is kan een verbeterproject worden gestart. Om te kunnen ontwerpen dienen puntmetingen uitgevoerd te worden, dit geeft een actuele beeld van de hoogte. Naast handmetingen zijn er ook innovatieve meetwijzen zoals laseraltimetrie. Het gewenste detailniveau neemt van toetsing tot uitvoering toe.

Projectfase	Benodigde detaillering geometrie
Toetsing	Op basis van laatste versie AHN
Verkenning en planfase	Op basis van laatste versie AHN
Contractvoorbereiding en realisatie	Ingemeten profielen op gevoelige locaties

Voor hoeveelheidsbepalingen van aan te brengen grond/klei dienen voldoende dwarsdoorsneden bekend zijn. Deze afweging wordt per project gemaakt.

4.2. Geometrie onder water

Voor de geometrische gegevens onder water wordt uitgegaan van de vaste bodem. Voor een eerste inventarisatie kan de onderhoudsdiepte in de watergang op basis van de Legger oppervlaktewateren 2018 worden gebruikt. Omdat kleinere teensloten vaak minder diep zijn geven inmetingen hier een realistischer beeld.

4.3. Bodemdaling

De kenmerkende veenweidegebieden (met daarin de regionale keringen) in het westen van ons beheersgebied zakken sneller dan de oostelijke gronden. Als richtlijn voor de bodemdaling in het veenweidegebied wordt uitgegaan van 0,5 cm/jaar. Keringen kennen al een lange geschiedenis van ophogen, waardoor het onderliggende veenpakket aanzienlijk is ingeklonken. Het is belangrijk onderscheid te maken tussen de bodemdaling van de kering en de naastliggende polder. Het veenlandschap daalt ook door ontbinding van het veen, als gevolg van drooglegging. Iets wat niet van toepassing is voor het veen onder een kering.

Onderbouwd zal deze waarde geoptimaliseerd moeten worden gebruikmakend van ondergenoemde bronnen op volgorde van betrouwbaarheid.

1. Vergelijken revisiegegevens van vorige werkzaamheden met huidige puntmetingen;
 - Rekening houdend met initiële zetting en klink.
 - Verschil in daling achterland en voorbelaste kruin wordt inzichtelijk.

2. Bodemdaling uit satellietdata, bijvoorbeeld Sensor;
 - Werkt (nog) niet op groene kades, omdat er geen reflecterende objecten aanwezig zijn.
 - Op kades met een weg sterk afhankelijk van 'hoekige' punten zoals verkeersborden, bruggetjes, hekwerken. En die liggen vaak net naast de kade.
 - Lange periode nodig ivm verschil tussen droge en natte jaren.
3. Bodemdalingskaart website klimaateffectatlas;
 - De bodemdaling ter plaatse van de waterkering is vaak anders dan van het achterland (andere historische belasting, andere drooglegging), terwijl het detailniveau niet voldoende hoog is om de kering van het achterland te onderscheiden.
4. Vergelijking AHN met eerdere AHN;
 - Vaak weinig betrouwbaar vanwege systematische fouten in de AHN's en de manier waarop verschillende metingen tot één punt worden samengevoegd.
5. Inschatting op basis van de ondergrond;
 - Vooral nuttig om grote verschillen binnen een kadevak te onderkennen.

Om een goede keuze te maken welke bodemdaling wordt gehanteerd is het belangrijk om verschillende bronnen naast elkaar te leggen en zo een onderbouwde keuze te maken. De gemiddelde bodemdaling dient gehanteerd te worden. Bij puntmetingen of het aftrekken van de hoogtebestanden wordt een minimale periode van 5 jaar aangehouden. Satellietdata is echter nauwkeuriger en sluit weers- en gebiedsinvloeden uit. Hiervoor geldt dan ook geen minimale periode.

De bodemdalingsgegevens worden o.a. gebruikt om op hoogte te toetsen. Hier komt een groot deel van de scope van de verbeteropgave vandaan. De gegevens vanuit de toetsing dienen tevens gebruikt te worden voor de kadeverbeteringen, anders is er direct sprake van een instabiele scope. Zettingen bepalen grotendeels het investeringsvraagstuk, maar ook de mate van ophoging. Een over robuust ontwerp betekent een langere ontwerphorizon.

4.4. Keuze profiel

Voor de veiligheidstoetsing en het basisontwerp van de kade moeten kritische dwarsdoorsneden in beeld zijn. De maatgevende factoren zijn: een lage kruin, een steil talud, de aanwezigheid van een teensloot of brede kopsloot. Voor verschillende faalmechanismen is vaak een verschillend profiel maatgevend. Kadevakken zijn naast geometrie ingedeeld op grondslag, inrichting en omgeving. Algemeen geldt dat één schematisatie niet voor alle faalmechanismen maatgevend is.

De aanpak voor profielen verschilt per traject en is ook mede afhankelijk van de reken methode. Er zijn twee aanpakken te onderscheiden:

- Bij geautomatiseerde berekeningen kan om een bepaalde afstand en profiel doorgerekend worden. Bijvoorbeeld om de 100 meter.
- Wanneer er niet geautomatiseerd gerekend wordt is het vaststellen van een maatgevende doorsnede per vak een betere aanpak om de hoeveelheid werk realistisch te houden. Een vak is te onderscheiden door een strekking met overeenkomende afmetingen en indien van belang overeenkomende ondergrond.

Voor het selecteren van het maatgevende profiel kunnen doorsneden over elkaar geplot worden. Op deze manier kunnen ongewenste uitschieters verwijderd worden.

Voor het spoor hoogte is met name de kruinhoogte van de kering van belang. Aangezien hoogte goed geautomatiseerd beoordeeld kan worden is een aanpak van een profiel elke 100 meter of zelfs elke 50 meter het best. Op deze manier wordt het meest complete beeld gerealiseerd.

5. Veld- en laboratoriumonderzoek

Ten behoeve van de toetsing van de waterkeringen en ten behoeve van de versterking van de waterkeringen worden veld- en laboratoriumonderzoeken uitgevoerd. Het grondonderzoek zal binnen verschillende projecten worden uitgevoerd en door verschillende marktpartijen. Omdat de resultaten van het onderzoek voor meerdere doelen kunnen worden gebruikt is het van groot belang dat:

- het grondonderzoek aan de algemene standaard eisen voldoet;
- op een eenduidige wijze wordt uitgevoerd;
- de gegevens en resultaten voor eenieder beschikbaar zijn.

Dit vergt uniformering van het grondonderzoek, zowel qua uitvoering in het veld als (digitale) oplevering van resultaten van nieuw grond- en labonderzoek. Deze dienen aangeleverd te worden volgens DM#805197 en DM#1674044 aan MID dataleveringen.

Momenteel zijn er 3 verschillende databases beschikbaar waar het vigerende grondonderzoek is te raadplegen. Het doel is deze in de toekomst samen te voegen tot één database. Op de volgende locaties is het grondonderzoek te vinden:

- BRO
Let op dit is een externe bron en wordt door HDSR alleen met nieuw grondonderzoek gevuld, oude grondonderzoeken zijn hier niet altijd ontsloten. Te raadplegen via de volgende link.
<https://www.broloket.nl/ondergrondgegevens>
- Beheerregister
Een database die overeenkomt met het oude dinoloket. Niet alle onderzoeken hebben betrekking op de waterkering. Te raadplegen via de volgende link.
H:\DATA\GEO_informatie\Kaartlagen\Kaartlagen_raadplegen\Bodem_Geologie_Hydrologie\Grondgegevens_DINOloket.lyr
- Grondonderzoek t.b.v. toetsing regionale waterkeringen 2024
Deze database is gemaakt voor de toetsing van de regionale waterkeringen. Hierin zijn alle oude en nieuwe grondonderzoeken opgenomen waarvan een GEF beschikbaar is. Deze data bevat meer features, waaronder een directe link naar de GEF, PDF en indien beschikbaar labgegevens. Te raadplegen via de volgende link.
<H:\DATA\Toetsing RWK\Layerfile Grondonderzoek>

Indien oud grondonderzoek ontbreekt in de bovenstaande databases dient dit aangeleverd te worden op eenzelfde wijze als hierboven beschreven.

5.1. Strategie grondonderzoek (fasering)

Grondonderzoek wordt uitgevoerd om inzicht te verkrijgen in de opbouw van de kade en de bodemopbouw, de waterspanningen en de grondmechanische eigenschappen van de grondlagen. De resultaten kunnen voor verschillende doelen worden gebruikt, bijvoorbeeld voor de gedetailleerde toets op veiligheid, het ontwerpen van een kadeverbetering of het opstellen van de legger.

De aard en de omvang van het grondonderzoek zijn afhankelijk van het doel waarvoor de resultaten worden gebruikt. Niet elke situatie vraagt dezelfde gegevens of om dezelfde resterende onzekerheid.

Gegevens verzameling	In zijn algemeenheid geldt dat bij een grondonderzoek inzicht moet worden verkregen in de opbouw van de kade en de ondergrond. Maar de hoeveelheid gegevens die wordt verzameld is afhankelijk van het doel. Om een versterkingsontwerp voor een kade te maken zijn meer gegevens nodig dan voor het toetsen van de kade. Zowel ten aanzien van het detailniveau (hogere dichtheid vereist, specifiek onderzoek op knelpunten etc.) als het type onderzoek (voor de toetsing zijn de samendrukkingseigenschappen niet belangrijk, voor de uitvoering wel).
Onzekerheid	De onderzoeksresultaten kennen een bepaalde onzekerheid. Dit kan ertoe leiden dat: 1. In de toetsing een verkeerd oordeel over de kade wordt gegeven 2. Een versterkingsontwerp ruimer wordt dan strikt noodzakelijk en in het ergste geval dat onterecht wordt versterkt. 3. In de legger een grotere claim op de ruimte wordt gelegd dan strikt noodzakelijk. De aard van deze gevolgen is verschillend. Ook kan het zo zijn dat het niet erg is dat een versterkingsontwerp wat ruimer wordt gemaakt omdat er ruimte genoeg beschikbaar is. Maar als er op dezelfde locatie een woning staat is het gewenst het ontwerp zo scherp mogelijk te bepalen.

Het doel is om de aard en omvang van het grondonderzoek af te stemmen op het doel dat met de resultaten moet worden bereikt. Het onderscheid betreft dan vooral de vereiste betrouwbaarheid waarmee de bodemopbouw moet worden vastgesteld (en daarmee samenhangend de intensiteit van het grondonderzoek) en de aard van laboratoriumonderzoek. De algemene eisen aan het grondonderzoek zijn universeel (onafhankelijk van het onderzoeksdoel).

5.1.1. Onderzoek afstemmen op doel

Ten behoeve van zowel het ontwerp van de kadeverbetering als de eventuele gedetailleerde toets op veiligheid (en leggerprofiel) dient de opbouw van de kade en de bodemopbouw ter plaatse van de kade en in het gebied dat relevant is voor de veiligheid van de kade (de invloedzone in het voor- en achterland, soms tot wel 50 m uit de teen) bekend te zijn. Bij de uitwerking van het grondonderzoek dient bijzondere aandacht te worden besteed aan lokale variaties in de laagopbouw, zoals bijvoorbeeld:

- met klei opgevulde geulen in het Pleistocene zand;
- tussenzandlagen in een pakket met klei- en veenlagen;
- de aanwezigheid van droogtegevoelige lagen (humeuze klei en veen) in zowel de ondergrond als de kade zelf, inclusief de dikte van de (in de regel aanwezige) toplaag van klei;
- de opbouw van het kadelichaam;
- aanwezigheid van zeer slappe kleilagen met een hoge plasticiteit.

De af- of aanwezigheid van dergelijke grondlagen dient met voldoende zekerheid te worden vastgesteld, zo nodig inclusief relevante variaties in de laagdikten. Met voldoende wordt bedoeld dat de verkregen zekerheid in overeenstemming moet zijn met de invloed van de betreffende grondlaag op de (berekende) veiligheid. Dit wordt bepaald per representatief dwarsprofiel.

5.1.2. Gefaseerde uitvoering

Er wordt voor gekozen om het grondonderzoek gefaseerd uit te voeren. Om een grondonderzoek goed te kunnen uitvoeren zijn namelijk gegevens nodig over de opbouw van de kade en ondergrond. Deze gegevens moeten echter op basis van het uit te voeren onderzoek worden verkregen. Wanneer op voorhand een volledig gedetailleerd onderzoek wordt gepland is de kans groot dat:

- er teveel onderzoek wordt gedaan wat tot onnodige kosten leidt;
- niet het juiste onderzoek wordt gedaan, waardoor de resultaten niet goed bruikbaar zijn.

Door het onderzoek gefaseerd uit te voeren kunnen deze problemen worden voorkomen. Het onderzoek wordt gefaseerd uitgevoerd, van grof naar fijn. Het detailniveau van het onderzoek wordt met iedere fase groter. Er wordt onderscheid gemaakt in 4 fasen:

Fase 0. Vooronderzoek	Het vooronderzoek betreft een inventarisatie van regionale en / of lokale gegevens. Het dient als voorbereiding op het eigenlijke veldonderzoek en resulteert in een onderzoek beschrijving
Fase 1. Verkenkend onderzoek	In deze fase wordt een eerste verkenning van de bodemopbouw uitgevoerd. Op basis van de resultaten wordt een gedetailleerd onderzoeksplan voor het vervolg opgesteld.
Fase 2. Detailonderzoek toetsing	In deze fase wordt de kade gedetailleerd onderzocht. Op basis van de resultaten wordt de toetsing uitgevoerd. Bij een onvoldoende score wordt een voorlopig ontwerp opgesteld.
Fase 3. Detailonderzoek vervolgtoets en/of kadeverbetering	In deze fase wordt op specifieke punten aanvullend gedetailleerd onderzoek uitgevoerd. Voor nadere detaillering van de toetsing (als de kade bijvoorbeeld nog niet voldoet) of voor het uitdetailleren van het ontwerp. <i>Een extra detailleringsslag van de toetsing/VO naar het definitief ontwerp en de uitvoering kan zeer lonend zijn. Maak deze afweging bewust, neem hiervoor budget op en reserveer tijd in de planning!</i>

5.2. Vooronderzoek (fase 0)

Ter voorbereiding op het veldonderzoek wordt begonnen met een vooronderzoek naar beschikbare kennis over de bodemopbouw en grondwaterspanningen in of nabij de kade. Bij deze inventarisatie kan bijvoorbeeld gebruik worden gemaakt van reeds beschikbaar grondonderzoek en regionale data (BWN-studie, geologische kaarten, bodemkaarten, grondwaterkaarten, geulenkaarten), (historische) plattegronden, luchtfoto's, AHN, etc. Hierbij dient speciale aandacht uit te gaan naar:

- globale diepte karakteristieke lagen, in verband met de maximale onderzoek diepte;
- potentiële aanwezigheid stoorlagen (geulen, tussenzand, veen etc.);
- afwijkingen door menselijk handelen of specifieke kennis vanuit gebiedsbeheer.

In het kader van het vooronderzoek worden tevens locaties geselecteerd waar specifiek onderzoek gewenst is, vanwege bijvoorbeeld:

- waarnemingen van faalverschijnselen (wellen, verzakkingen etc.);
- lokale variaties in bijv. maaiveldniveau, geometrie kade, etc;
- aanwezigheid niet-waterkerende objecten, bijzondere waterkerende constructies of kunstwerken.

Door een (regionale) gevoeligheidsanalyse uit te voeren kan de invloed van afwijkingen in de aannamen over de bodemopbouw en eventueel waterspanningen en sterkte-eigenschappen worden vastgesteld. Dit inzicht vormt:

- een belangrijke onderbouwing van de vereiste intensiteit van het (grond-) onderzoek;
- nuttig inzicht in de vereiste nauwkeurigheid bij de schematisering.

Resultaat van fase 0 is een gedetailleerde specificatie van het eerste fase grondonderzoek, in termen:

1. de onderzoekstechnieken;
2. de intensiteit van het sondeer- en booronderzoek;
3. vaststelling of de sonderingen in fase 1 in de kruin of (afwisselend) in de kruin en de binnenteen van de kade worden uitgevoerd
4. specifieke onderzoek locaties (boringen / sonderingen);
5. de einddiepten van de sonderingen en boringen;
6. monsternamen (on-) geroerde grondmonsters (globaal);
7. de vereiste diepte tot waarop kruinsonderingen moeten worden voorgeboord;
8. de locatie van één of meerdere raaien met peilbuizen (te plaatsen in fase 1).

5.3. Verkennend onderzoek (fase 1)

Deze fase betreft een verkennend onderzoek t.b.v. de vaststelling van de globale bodemopbouw. Dit onderzoek bestaat overwegend uit sonderingen en enkele boringen. Zo nodig wordt dit onderzoek voorafgegaan door bijzondere onderzoekstechnieken, zoals geo-elektrisch onderzoek. De sonderingen worden op vaste onderlinge afstanden uitgevoerd, aan de hand van een vaste intensiteit. Aanvullend worden in deze fase al sonderingen en / of boringen uitgevoerd op specifieke locaties, bijv. naar aanleiding van lokale waarneming van faalverschijnselen of onregelmatigheden in het terrein of kadelichaam of de aanwezigheid van niet-waterkerende objecten.

5.3.1. Veldonderzoek

Gekozen is om voor fase 1 van het veldonderzoek een kade-specifieke intensiteit vast te stellen. De intensiteit wordt afgeleid op basis van de (veronderstelde) mate van over dimensionering van de kade in relatie tot de invloed van variaties in de bodemopbouw op de veiligheid en gebiedskennis omtrent de lokaal aanwezige bodemopbouw (in fase 0: vooronderzoek).

De vaste intensiteit bedraagt:

- 1 sondering per 250 m:
voor verondersteld kwetsbare kaden in gebieden met een heterogene ondergrond; of:
- 1 sondering per 500 m:
voor verondersteld weinig kwetsbare kaden in gebieden met een heterogene ondergrond; of:
- 1 sondering per 1000 m:
voor verondersteld weinig kwetsbare kaden in gebieden met een homogene ondergrond.

Deze intensiteit is exclusief de sonderingen op specifieke locaties, die een aanvulling op deze intensiteit vormen. Bij het vaststellen van de vereiste intensiteit zal tevens rekening worden gehouden met het vereiste nauwkeurniveau van de ontwerpberoeeningen en het gewenste / noodzakelijke uitwerkingsniveau van de toets op veiligheid.

Grondwaterstand en waterspanningen

Ten behoeve van het verkrijgen van inzicht in de optredende grondwaterstanden en waterspanningen worden in deze fase reeds enkele peilbuizen en/of waterspanningsmeters geplaatst.

Monsternamen (on-) geroerde grondmonsters

Ten behoeve van het laboratoriumonderzoek dient reeds in fase 1 bij de boringen (on-) geroerde grondmonsters worden genomen. De intensiteit is:

Zandlagen:

1 geroerd monster per onderscheiden zandlaag, als de zandlaag dikker is dan 2 meter moet vervolgens om elke 2 meter een nieuw geroerd monster worden genomen;

Klei- of veenlagen:

indien weinig of dunne klei- of veenlagen worden verwacht: 1 ongeroerd en geroerd grondmonster in de eerste halve meter per onderscheiden klei- of veenlaag, en vervolgens 1 ongeroerd en geroerd monster per 1 meter;

indien veel / dikke klei- of veenlagen worden verwacht: 1 ongeroerd en geroerd monster per onderscheiden klei- of veenlaag in de eerste meter, en vervolgens 1 ongeroerd en geroerd monster per 1,5 meter.

Monsters ten behoeve van laboratoriumonderzoek naar de sterkte van grond dienen te worden gestoken in een mechanische boring.

5.3.2. Laboratoriumonderzoek

Omwillen van de doorlooptijd van het laboratoriumonderzoek kan al in fase 1 laboratoriumonderzoek worden uitgevoerd. Dit betreft overwegend een beperkt onderzoek, bedoeld voor een eerste vulling van de dataset ten behoeve van de afleiding van de sterkte-eigenschappen, de volledige invulling vindt plaats in fase 2.

5.4. Gedetailleerd onderzoek (fase 2 en fase 3)

De omvang van het veld- en laboratoriumonderzoek in deze fase is afhankelijk van de resultaten uit de vorige onderzoeksfase. De opdrachtnemer dient hiertoe een onderbouwd voorstel te doen, ten aanzien van zowel de omvang van het veldonderzoek en details daarvan (locaties peilbuizen en monsternamen) als de omvang van het laboratoriumonderzoek.

5.4.1. Veldonderzoek

In deze fase worden zowel sonderingen als boringen uitgevoerd. Aanbevolen wordt om in deze fase vooral boringen uit te voeren, inclusief de plaatsing van peilbuizen en het nemen van grondmonsters ten behoeve van het laboratoriumonderzoek.

Om onderzoek te doen naar de grondwaterstand en waterspanningen kunnen hiervoor peilbuizen worden geplaatst. En er dient een toereikend aantal (en van het juiste type) grondmonsters te worden genomen, zodat voldoende laboratoriumonderzoek kan worden uitgevoerd.

De eisen met betrekking tot het aantal, de locatie en meetreeks van de peilbuizen die geplaatst worden zullen per situatie apart bepaald moeten worden.

De grondlagen worden geclassificeerd aan de hand van uitgevoerde boringen. Dit wordt gedaan op basis van de volumegewichten.

5.4.2. Laboratoriumonderzoek

Algemeen geldt dat in fase 2 voldoende proeven moeten worden uitgevoerd, zodanig dat de afleiding (statistisch) van de karakteristieke waarde niet onnodig nadelig beïnvloed wordt door een te beperkt aantal proeven. Het totaal aantal proeven dient specifiek per project te worden vastgesteld op basis van het aantal aangetroffen grondlagen, rekening houdend met beschikbare resultaten in de proevenverzameling en eventuele wensen van HDSR uit oogpunt van de regionale proevenverzameling (aanvulling database voor specifieke grondlagen).

5.5. Geotechnische parameters

De huidige proevenverzameling is opgesteld in 2017. In DM#1343097 staat de huidige proevenverzameling. Sindsdien is deze niet meer bijgewerkt met nieuw grond- en labonderzoek. Ook worden de uitgangspunten van deze set als te conservatief ervaren met name voor de toegekende waarde van cohesie.

5.5.1. Proevenverzameling

Om in de toekomst aan te kunnen sluiten bij de mogelijke overgang naar ongedraineerde schuifsterkte parameters en om in lijn te blijven met de laatste inzichten op het gebied laboratoriumonderzoek zijn er ongedraineerde anisotrope schuifsterkteproeven uitgevoerd.

Conform de LTVRW dienen de gedraineerde schuifsterkte parameters afgeleid te worden bij een rekniveau tussen 2% en 5%. Dit geldt voor een isotroop geconsolideerde proef. Bij de afleiding van de ongedraineerde schuifsterkte parameters, in overeenstemming met de inzichten uit het WBI 2017, wordt daarentegen juist gekeken naar hoge rekniveaus. Er wordt namelijk uitgegaan van de sterkte onder critical state condities en van anisotrope proeven. De critical state waarde kan omschreven worden als de eindwaarde van de schuifsterkte wanneer bij doorgaande schuifvervorming geen verandering van de schuifsterkte en/of het volume meer optreedt. Omdat deze constante waarde regelmatig niet wordt bereikt en dan vaak een afnemende trend van de schuifsterkte zichtbaar blijft, wordt als praktische waarde de eindwaarde van de schuifsterkte genomen. In de praktijk betekent dit de eindsterkte bij 25% rek (triaxiaalproeven) en circa 40% rek (DSS-proeven).

Gedraineerde schuifsterkte parameters kunnen uit anisotroop geconsolideerde proeven bij grote rekken afgeleid worden. Op dit moment zijn er alleen nog geen partiële veiligheidsfactoren opgesteld voor parameters die bij dergelijke grote rekken zijn afgeleid.

De hoeveelheid monsters en laboratoriumproeven waarop de eigenschappen van de grondsoorten veen, kleiig en klei, humeus zijn gebaseerd is beperkt. Voor het opstellen van de proevenverzameling zijn monsters gestoken verspreid over het hele beheergebied van HDSR.

Op het moment wordt er gewerkt aan een nieuwe parameterset. Zolang deze niet in werking is getreden geldt het volgende. Lokale parametersets vormen hier een uitzondering op.

grondsoort	verzadigd volumegewicht	materiaalfactor		rekenwaarde	
	γ_{verz} [kN/m ³]	$\gamma_{m;\tan(\varphi')}$ [-]	$\gamma_{m;c'}$ [-]	φ_d' [°]	c_d' [kPa]
Veen, mineraalarm	10,2	1,20	1,50	21,8	0,47
Veen, kleiig	11,5	1,20	1,50	19,1	0,60
Klei, humeus	12,6	1,15	1,20	35,2	0,54
Klei, siltig	15,8	1,15	1,20	29,2	0,50
Klei, zandig	17,5	1,15	1,20	29,8	0,50
Zand	20,0	1,15	-	29,0	0,00

Materiaalfactoren en rekenwaarden schuifsterkte parameters

grondsoort	aantal monsters	γ_{verz}	C'_p	C_p	C'_s	C_s	c_v	POP
Kolom STOWA database			234	231	243	240	257	-
Veen, mineraalarm	32	10,2	6,4	25,2	38,8	160,4	7,4 ^{e-8}	12
Veen, kleiig	11	11,5	7,0	25,4	89,9	174,0	4,8 ^{e-8}	24
Klei, humeus	16	12,6	9,1	31,5	56,5	211,6	1,1 ^{e-8}	22
Klei, siltig	58	15,8	18,1	58,1	167,8	392,4	2,6 ^{e-8}	28
Klei, zandig	21	17,5	28,1	63,3	268,7	595,5	5,5 ^{e-8}	43
Zand	-	20,0	400	1600	∞	∞	>>	-

γ_{verz}	verwachtingswaarde volumiek gewicht van de verzadigde grond	[kN/m ³]
C'_p	primaire samendrukkingsconstante boven de grensspanning	[-]
C'_s	secundaire samendrukkingsconstante boven de grensspanning	[-]
C_p	primaire samendrukkingsconstante beneden de grensspanning	[-]
C_s	secundaire samendrukkingsconstante beneden de grensspanning	[-]
c_v	verticale consolidatiecoëfficiënt (trap 5, methode Taylor)	[m ² /s]
POP	Pre Overburden Pressure	[kPa]

Samendrukkingsparameters voor zettingsberekeningen (verwachtingswaarde)

Voor ophoogmateriaal zijn de volgende sterkteparameters en volumegewichten bepaald:

Materiaal	γ_{dr}	γ_{sat}	C'_d	φ_d'
	[kN/m ³]	[kN/m ³]	[kN/m ²]	[°]
Schoon zand	18,0	20,0	0,0	24,8
Siltig zand	18,0	20,0	0,0	20,5
Ophoogklei	17,0	17,0	2,1	23,0
Stro of veen	11,0	11,0	1,4	8,0

Rekenwaarden sterkteparameters en volumegewichten voor ophoogmateriaal.

6. Toetsspoor hoogte

De veiligheid van een regionale waterkering wordt beoordeeld ten aanzien van meerdere faalmechanismen. De beoordeling per faalmechanisme geschiedt op basis van een toetsspoor. Hoogte is er daar een van. De wijze van beoordeling is beschreven in de Leidraad Toetsing op Veiligheid Regionale Waterkeringen (LTVRW). Het beoordelingsspoor hoogte richt zich op de weerstand tegen faalmechanismen overloop en overslag.

6.1. Toetsing

De benodigde hoogte van de keringen wordt volgens de LTVRW getoetst op overloop en overslag. Eenvoudig gesteld bestaat de hoogtetoets uit een vergelijk van de verwachte kruinhoogte op een bepaalde datum en de vereiste kruinhoogte op diezelfde datum. Als de verwachte hoogte hoger is dan de vereiste hoogte krijgt de kering het oordeel voldoende. Bij een te lage hoogte volgt het oordeel onvoldoende. In de LTVRW wordt bij de beoordeling gesproken over 'kruinhoogte'. HDSR toetst de hoogte binnen de zone van het waterstaatswerk, ofwel over de gehele breedte. De vereiste hoogte moet op peildatum boven de toetshoogte liggen over een breedte van minimaal 1,5 m om aan de eis te voldoen. De vereiste hoogte (zie 3.1) van de kade is gelijk aan:

De toetshoogte + een toeslag voor zetting en klink.

De toeslag bestaat uit de verwachte kruindaling tussen de meetdatum van het dwarsprofiel en de periode waarvoor de toetsing geldt. Inmeten gebeurt volgens paragraaf 4.1.

In de figuur zijn de relevante aspecten voor bepaling van de minimaal vereiste hoogte vermeld volgens de LTVRW. Bij de hoogtetoets wordt uitgegaan van de minimaal benodigde hoogte bij een maximaal overslagdebiet van 0,1 l/m/s. Het overslagdebiet is verdisconteert in de vastgestelde hydraulische randvoorwaarden.

6.1.1. Methode eenvoudige toetsing

De hoogtetoets vindt volledig plaats in ArcMap en Microsoft Excel. Op basis van basisbestanden als de meest actuele AHN en de Legger worden de volgende stappen doorlopen. Het resultaat is een hoogteoordeel gebaseerd op een analyse van de volledige breedte van de kering. De benodigde producten voor de hoogtetoets:

1. Dwarsprofielen gegenereerd uit het AHN3 (met grondfilter) per 25 meter in lengterichting
2. Kniklijnen van de regionale waterkering, te weten binnenkruin, buitenkruin en binnenteen
3. Maximale hoogte over een minimum van 1,5 m in dwarsrichting (binnen de begrenzing van de zone waterstaatswerk) wordt gehanteerd als kruinhoogte
4. Toetsing van aanwezige kruinhoogte aan de toetshoogte
5. Bepalen restlevensduur dwarsprofielen voor faalmechanisme hoogte op basis van bodemdaling
6. Toetsoordeel op peildatum
→ Afkeur op hoogte betekend geen verdere (stabiliteit) toetsing, er is direct een veiligheidsopgave.

6.1.2. Overloop en overslag

Bij het toetsspoor hoogte horen de faalmechanisme overloop en overslag. Hierbij is voornamelijk de waterstand van belang. Scheefstand en opwaaiing spelen hier ook mee. Voor het beoordelingsspoor overslag is de maatgevende belasting gerelateerd aan zowel een extreme waterstand als een golfbelasting. In de huidige legger regionale waterkeringen 2011 is voldoende toeslag meegenomen om overloop en overslag te voorkomen.

Beheersmaatregelen zijn alleen van belang indien de veiligheid in het geding is. De LTVRW onderscheidt overloop en dan overslag. HDSR neemt deze vorm van toetsen niet over! Vanuit de beheerorganisatie is een eis gesteld aan het overslagdebiet van 0,1 l/m/s. Zo wordt het onderdeel beheersmatige gevolgen uit de LTVRW ook niet meegenomen. Onderstaand figuur laat zien hoe de bovengenoemde componenten zijn verwerkt in de toetshoogte. Zodoende hoeft er niet apart getoetst te worden op overloop en overslag.



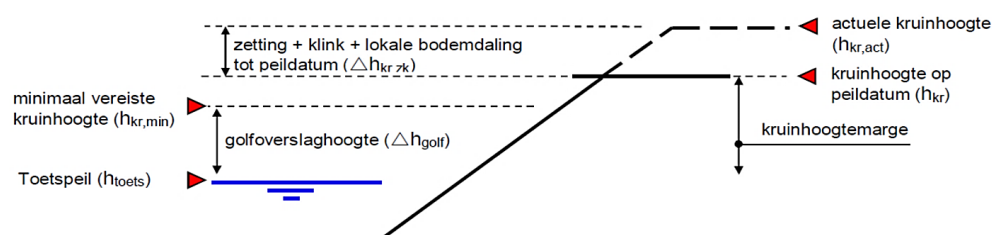
6.1.3. Bekleding

Het falen van de buitenwaartse bekleding is voornamelijk afhankelijk van golfbelastingen. Bij de beoordeling is de combinatie van de duur en hoogte van de waterstand en golven van belang. Door de ligging en oriëntatie van de kades binnen het watersysteem van HDSR zijn deze componenten niet dominant aanwezig. Uit proeven is gebleken dat overslag, waar een maximum van 0,1 l/m/s voor geldt, niet snel tot schade aan de binnenwaartse grasbekleding zal leiden. Zodoende hoeft de erosiebestendigheid van de grasbekleding niet getoetst te worden!

6.2. Ontwerp

Alvorens een kade kan worden opgehoogd moet zeker worden gesteld dat de kade met inbegrip van de geplande ophoging voldoet aan stabiliteitseisen. Als ingreepmaat geldt dat de kruinhoogte ten opzichte van de minimaal vereiste kruinhoogte voldoende marge moet hebben voor een 10 jaar onderhoudsvrije groene kering. Voor een kering met weg geldt een ontwerphorizon van 20 jaar conform de BSD. De wegen binnen het beheersgebied zijn veelal in eigendom en beheer van de gemeentes, waardoor afstemming met deze partijen nodig is over ontwerphorizon en periode van uitvoering werk. Een gecombineerde uitvoering van verschillende werkzaamheden heeft hierbij de voorkeur.

De aanleghoogte van de kade is gelijk aan de toetshoogte vermeerderd met een overhoogte als gevolg van toekomstige zettingen. De minimale overhoogte betreft 0,15 m; bestaat uit 0,10 m bodemdaling (uitgaand van 1 cm/jaar) + initiële zetting (inklinken na aanleg) van circa 0,05 m. Afwijken van de richtlijn is mogelijk indien aantoonbaar minder zetting wordt verwacht, zie hiervoor ook H4.3. Voor klink wordt 10% van de ophoging gehanteerd. Belangrijk is te vermelden dat wordt getoetst op enkele centimeters hoogte tekort. Verbeteren wordt echter voor een langere tijd gedaan. Hierom is gekozen voor een minimale ophoging van 0,15 m, toegelicht in onderstaand figuur.



7. Beoordelingsspoor stabiliteit

Voor de beoordeling van de stabiliteit dient eerst de eis te worden vastgesteld en vervolgens de daadwerkelijke stabiliteit te worden berekend. Dit is in de hoofdstuk nader onderbouwd. De maatgevende belastingen kunnen per mechanisme verschillen daarom dienen altijd alle combinaties uitgerekend te worden om op deze manier de maatgevende situatie in beeld te krijgen.

7.1. Stabiliteitsfactor

De veiligheidsfactor wordt getoetst aan de ondergenoemde eis.

- stabiliteitsfactor berekend bij rekenwaarden $\geq$ vereiste stabiliteitsfactor γ_R
- vereiste stabiliteitsfactor $\gamma_R = \gamma_n \cdot \gamma_m \cdot \gamma_b \cdot \gamma_d$

De schadefactor is opgebouwd uit verschillende deelfactoren, zoals in de tabel beschreven

Schadefactor = γ_n	Materiaalfactoren = γ_m	Schematiseringsfactor = γ_b	Modelfactor = γ_d
IPO-klasse: I - V Faalkans: 1/10 - 1/1000 SF: 0,80 - 1,00	Handreiking ontwerpen & verbeteren boezemkaden tabel 2	Toets: Standaard 1,10 of Bijlage 2 LTVRW Ontwerp: Excel Stowa	Afhankelijk van toegepast model 0,95 - 1,10

Functionele eis: het risico op falen van de kade moet kleiner dan, of gelijk aan, zijn aan het aanvaardbare risico, zoals dat is vastgelegd volgens de IPO-norm. Uit de IPO norm volgt voor de veiligheid van de waterkering: een overschrijdingskans voor de waterstand met toeslagen, een schadefactor voor het deelmechanisme macrostabiliteit, een veiligheidsklasse voor stabiliteitsconstructies.

7.1.1. Materiaalfactor

Voor de toetsing en het ontwerp van boezemkaden worden de partiële materiaalfactoren voorgeschreven in de Handreiking Ontwerpen en Verbeteren Boezemkaden (Stowa, 2009). Dit om te voorkomen dat bij een kadeverbetering met andere partiële materiaalfactoren gerekend moet worden dan bij de toetsing.

7.1.2. Schematiseringsfactor

De minimale schematiseringsfactor is 1,01 en de maximale 1,20. Voor de bepaling van de schematiseringsfactor wordt verwezen naar Bijlage II van de LTVRW. Bij een project moet de schematiseringsfactor opnieuw worden bepaald.

Voorheen rekende HDSR met een waarde van 1,2. Omdat zowel het grond- als labonderzoek beter inzichtelijk zijn geworden neemt de onzekerheid af. HDSR kan deze factor daarom optimaliseren naar de dichtheid van het aanwezige grond- en labonderzoek. Om zodoende de slappe laag diktes, volumieke gewichten en bijvoorbeeld stijghoogte bepalen. Daarnaast kan door het uitvoeren van extra inmetingen onzekerheid wegnemen.

Let op: het toepassen van conservatieve uitgangspunten in combinatie met een schematiseringsfactor van 1,2 resulteert veelal in een onterechte afkeuring en/of een overgedimensioneerd ontwerp. Als voor de ontwerpuitgangspunten al met zeer conservatieve uitgangspunten gerekend wordt, dan wordt aangeraden de schematiseringsfactor lager te kiezen. Algemeen geldt dat de kans klein moet zijn dat in het veld een slechtere situatie aanwezig is dan geschematiseerd, als deze een significante negatieve invloed heeft op de stabiliteit. Drie belangrijke factoren zijn onzekerheden in de schematisatie, de kans dat een onzekerheid optreedt en de invloed van de afwijking op de stabiliteit.

De onzekerheden zijn dus groot. Advies is per project deze onzekerheden te minimaliseren en onderbouwd een lagere schematiseringsfactor te bepalen.

Op basis van schematiseringsfactor of gevoeligheidsanalyse kan worden bepaald welke parameters grote invloed hebben op het resultaat/oordeel. Op basis hiervan moet afweging worden gemaakt tussen aanscherpen of robuust uitvoeren, afhankelijk van bijvoorbeeld de impact van een maatregel.

7.1.3. Modelfactor

In de LTVRW worden modelfactoren voorgeschreven die afhankelijk zijn van het rekenmodel, toegepaste grondgedrag en condities met betrekking tot opbarsten en opdrijven van de deklaag in het achterland.

7.2. Keuze glijvlakmodel

Het controleren van de stabiliteit van een kering gebeurt conform LTVRW. De LTVRW wijst erop dat de keuze van het glijvlakmodel afhankelijk is van de te beschouwen situatie. De glijvlakken dienen wel een representatieve diepte en locatie te bevatten. HDSR is bezig met het opstellen van een stroomschema waarin duidelijk wordt welk glijvlakmodel er moet worden gekozen.

7.3. Macrostabiliteit binnentalud

7.3.1. Toetsing

HDSR volgt hierin de LTVRW. De toetsing regionale waterkeringen 2024 kan de aanpak van dit onderwerp veranderen.

7.3.2. Ontwerp

Het beoordelen en ontwerpen van een regionale waterkering betreft het zo goed mogelijk bepalen van de verwachte sterkte van een waterkering op de peildatum en het vergelijken daarvan met de optredende belastingen behorende bij de vastgestelde norm. Het eindoordeel geeft aan of de sterkte voldoet.

Let op: voor ieder dwarsprofiel en iedere waterkerende constructie dient per faalmechanisme de juiste maatgevende belastingsituatie te worden geschematiseerd. Algemeen geldt dat één schematisatie niet voor alle faalmechanismen de maatgevende situatie geeft

Er zijn verschillende versterkingsmogelijkheden zoals bijvoorbeeld het verbeteren in grond, of de keuze voor het maken van een constructief element. In dit uitgangspunten rapport wordt de keuze van de versterking en de eisen die hieraan gesteld worden zoals bijvoorbeeld de geometrie niet benoemd omdat dit sterk locatie afhankelijk is.

7.4. Macrostabiliteit buitentalud

HDSR volgt hierin de LTVRW. De toetsing regionale waterkeringen 2024 kan de aanpak van dit onderwerp veranderen.

8. Beoordelingsspoor piping

Het faalmechanisme piping bestaat uit drie sub-mechanismen: opbarsten, heave en terugschrijdende erosie. Piping kan alleen plaatsvinden wanneer alle drie deze sub-mechanismen optreden. Wanneer één van de sub-mechanismen uitgesloten wordt, zal het gehele faalmechanisme dus goedgekeurd worden.

Voor regionale keringen zijn er drie niveaus voor de beoordeling van piping:

1. Eenvoudig, dit is met name een controle of het mechanisme piping relevant is voor (het gedeelte van) de kering.
2. Gedetailleerd, dit is het niveau waarop piping wordt beoordeeld volgens de voorgeschreven methode.
3. Geavanceerd, op dit niveau kunnen specifieke methoden of bijzondere kenmerken van de kering worden toegevoegd aan de beoordeling.

8.1. Profiel

Het is niet mogelijk om voor alle faalmechanismen één generiek maatgevend profiel te kiezen. Bij elk faalmechanisme moet voor de gedetailleerde beoordeling een profiel gekozen worden specifiek vanuit het oogpunt van dat faalmechanisme. Het maatgevende profiel voor piping moet geselecteerd worden door middel van een afweging op basis van de volgende uitgangspunten:

- Het grootste verval over de kering (verschil tussen boezempeil en polderpeil).
- Dikte en gewicht van de deklaag (maaiveld tot onderkant deklaag). Dit is met name relevant voor opbarsten en heave.
- Aanwezigheid van piping gevoelige laag (dikte, doorlatendheid en korrelgrofheid van deze laag zijn van belang).
- Kortste kwelweglengte (afstand tussen intrede en uittredepunt). Hierbij moet rekening gehouden worden met weerstand in het voorland indien aanwezig.

8.2. Belasting

Voor het beoordelingsspoor piping is de maatgevende belasting gerelateerd aan een extreme waterstand. Deze is bij regionale keringen vaak gelimiteerd door een maalstop als maximale waterstand. Voor de bepaling van het inleidende mechanische opbarsten is ook de ontwikkeling van de waterspanningen van belang. Deze ontwikkeling is o.a. afhankelijk van de duur en het verloop van de buitenwaterstand. Bij de beoordeling van het mechanisme piping speelt tijdsafhankelijkheid dus wel een rol bij de bepaling van de waterspanningen, maar de verdere beoordeling van de kans op piping op basis van het kritieke verval mechanisme piping is niet tijdsafhankelijk.

Het is mogelijk dat tijdens extreme droogte de veiligheid tegen opbarsten juist lager is dan tijdens hoogwater. Wanneer de kering tijdens deze situatie water keert dan zal nagegaan moeten worden of dit de maatgevende situatie voor piping is. Voor deze situatie dient te worden uitgegaan van een waterstand met een overschrijdingsfrequentie van eens per jaar (1/1 per jaar). Deze overschrijdingsfrequentie is af te leiden uit historische waterstandsgegevens.

In sommige gevallen is er slechts een beperkte rol van de buitenwaterstand op de stijghoogte in de zandondergrond binnenwaarts. Dit is bijvoorbeeld het geval als er een slecht doorlatende laag tussen het te keren water en het watervoerende pakket aanwezig is. In dit geval is het aannemelijk dat regionale grondwaterstroming een grotere invloed heeft. Dit zal betekenen dat door hogere waterstanden geen toename in grondwaterstroming onder de kade zal optreden. Vervolgens zal er dus ook geen piping kunnen optreden. Het is daarom in de meeste gevallen noodzakelijk om een geohydrologische analyse uit te voeren en/of peilbuis metingen te faciliteren.

8.3. Schematiseringsfactor

De schematiseringsfactor is een partiële veiligheidsfactor die de onzekerheden in de schematisering van een waterkering verdisconteert en terugbrengt naar een gewenst of vereist veiligheidsniveau. Voor regionale keringen met IPO klasse I of II kan ervoor worden gekozen om minder aandacht aan de nauwkeurigheid van de schematisering worden gegeven omdat in veel gevallen de ontwerpbelasting regelmatig optreedt. Voor IPO klasse III en hoger moet er wel gewerkt worden met een schematiseringsfactor. In paragraaf 7.1.2. staat beschreven hoe HDSR omgaat met de schematiseringsfactor. Over het algemeen wordt er een waarde van 1,1 gehanteerd. Voor meer informatie over het bepalen van de schematiseringsfactor wordt verwezen naar Bijlage 2 van de LTVRW.

8.4. Eenvoudige beoordeling

De beoordeling op eenvoudig niveau gaat met name in op de piping gevoeligheid van de bodemopbouw en opbouw van de kade. Het mechanisme piping is niet relevant wanneer wordt voldaan aan één van onderstaande voorwaarden:

- a. Er is sprake van een zand op zand situatie. Dat wil zeggen een kade van zand op een zand ondergrond zonder daartussen een slecht doorlatende laag. Aandachtspunt hierbij is dat de slecht doorlatende laag ook niet lokaal aanwezig mag zijn.
- b. Het intredepunt is niet aanwezig. Dit betekent dat er geen direct contact is tussen het waterpeil in de boezem en de watervoerende zandlaag.
- c. Het uittredepunt is afwezig. Het ontstaan van een uittredepunt kan uitgesloten worden wanneer de deklaag in het achterland niet opbarst. In veel gevallen zullen meerdere locaties in de doorsnede getoetst moeten worden met betrekking tot opbarsten.
- d. Heave (verticaal zandtransport) kan uitgesloten worden. Dit kan wanneer het verticaal verhang over het kanaal kleiner is dan het kritieke verhang. De nodige formules zijn opgenomen in paragraaf 1.3 van LTVRW Module D.

Aan punt B kan alleen worden voldaan als aan elk van de volgende voorwaarden wordt voldaan:

- a. De afdekkende laag tussen de bodem van de boezem en het watervoerende pakket heeft ten minste een dikte van 1,5 m. Dit is inclusief de marge van baggerwerkzaamheden. Bij het bepalen van deze dikte moet uitgegaan worden van de onderhoudsdiepte van de boezem/kanaal bodem.
- b. Het materiaal van de afdekkende laag is voldoende slecht doorlatend. Hiervoor gelden de volgende materiaal eisen: het lutumgehalte bedraagt meer dan 20% en het zandgehalte bedraagt minder dan 35%.
- c. Er moet worden aangetoond dat de afdekkende laag niet zal opdrijven. Dit is nader beschreven in paragraaf 1.2 van LTVRW Module C.
- d. Hydraulische kortsluiting kan worden uitgesloten. Dit is nader beschreven in paragraaf 1.4 van LTVRW Module B.

Het is noodzakelijk dat de aanwezigheid van een slecht doorlatende laag moet worden aangetoond met behulp van lokaal grondonderzoek. Volgende grondonderzoeksmethoden kunnen worden toegepast:

- Ondiepe boringen/sonderingen vanaf het water.
- Geohydrologisch onderzoek naar de stijghoogte in de zandlagen. Deze methode kan tevens gebruikt worden voor het vaststellen van hydraulisch contact tussen buitenwater en de watervoerende zandlaag.
- Doormiddel van geofysische onderzoekstechnieken.

Bij de eenvoudige methode moet voor de beschouwing van de voorwaarden C en D de stijghoogte in de zandondergrond gelijk worden verondersteld aan het toetspeil. Er wordt dus uitgegaan van een volledige respons van de stijghoogtepotentiaal in de gehele watervoerende laag. Dit is een conservatieve benadering en daarom mag een opdrukveiligheid van 1,0 worden gehanteerd.

8.5. Gedetailleerde beoordeling

Wanneer de eenvoudige beoordeling aangeeft dat piping een relevant mechanisme dient als vervolgstap een gedetailleerde beoordeling te worden uitgevoerd. De volgende stappen worden doorlopen voor de gedetailleerde beoordeling:

- a. Nagaan of er sprake is van opbarsten van de deklaag wanneer de stijghoogte gedetailleerd wordt vastgesteld. In de meeste gevallen volstaat een algemeen volumiek gewicht van de grondsoort die op locatie aanwezig is in de deklaag. Indien er sterke twijfel bestaat over de aanwezige grondsoort of het volumiek gewicht bij een kleine afwijking sterke invloed heeft op de resultaat van de berekening wordt extra labonderzoek aangeraden.
- b. Nagaan of er sprake is van heave wanneer de stijghoogte gedetailleerd wordt berekend.
- c. Bepalen of de kade aan het Sellmeijer criterium voldoet voor terugschrijdende erosie.

Bij het vaststellen van de stijghoogte moet er onderscheid gemaakt worden tussen de situatie met hydraulische kortsluiting en de situatie zonder hydraulische kortsluiting. Wanneer er geen hydraulische kortsluiting optreedt zal het stijghoogteverloop bepaald worden door peilbuismetingen of standaard schematisatie (stijghoogtekaart). Indien hydraulische kortsluiting niet uitgesloten kan worden moet de stijghoogte en de opwaartse druk gecorrigeerd worden tot maximaal het maatgevende hoogwater. Dit kan aangescherpt worden door een geohydrologische analyse.

De toets op opbarsten van de deklaag ter plaatse van een teensloot kan worden aangescherpt door rekening te houden met extra druk van het sloottalud dankzij belastingspreiding. Zie voor de bepaling van de effectieve laagdikte voor opbarsten bij een sloot het TR Waterkerende Grondconstructies (TAW, 2001).

8.5.1. Veiligheidsfactoren

De herziene rekenregel Sellmeijer heeft een normafhankelijke veiligheidsfactor. De partiële veiligheidsfactor is afgeleid voor regionale keringen. De afleiding is gebaseerd op een groot aantal kalibraties met verschillende waarden van de veiligheidsfactor (Deltares, STOWA, 2015).

Normklasse	Geen of dunne deklaag binnenwaarts (Dikte < 2 meter)	Met deklaag binnenwaarts (Dikte ≥ 2 meter)
1/10 – 1/100	1,2	1,1
1/300 en 1/1000	1,4	1,3

8.5.2. Weerstand voorland

Bij aanwezigheid van een slecht doorlatend pakket in het voorland zal in eerste instantie getoetst worden of het intredepunt uitgesloten kan worden. Wanneer het intredepunt niet uitgesloten mag worden is het wel mogelijk om de aanwezigheid van het voorland en waterbodembodem in rekening te brengen bij de nadere beschouwing van opbarsten. Dit kan op twee verschillende manieren, die niet beide tegelijk toegepast kunnen worden:

- Opnemen als effectieve kwelweglengte in het voorland.
- Reduceren van aanwezige verval over de waterkering.

8.6. Geavanceerde beoordeling

Wanneer er bij de gedetailleerde beoordeling geen positief oordeel gegeven kan worden met betrekking tot piping moet een geavanceerde beoordeling worden uitgevoerd. Binnen de geavanceerde beoordeling kunnen specifieke en lokaal aanwezige kenmerken worden meegenomen in de beoordeling. Hieronder volgen een aantal voorbeelden van rekenmethoden die deze lokale kenmerken kunnen meenemen:

- Niet stationair (tijdsafhankelijk) berekenen van de grondwaterspanningen.
- Oordeel aanscherpen door middel van bewezen sterkte.
- 3D grondwaterstromingsberekeningen bijvoorbeeld door gebruik te maken van een eindig elementen rekenmodel (D-Geo Flow of PlaxFlow).

9. Overige beoordelingssporen

9.1. Niet waterkerende objecten

Aanvullend dient de invloed van aanwezige niet-waterkerende objecten (NWO's) op de veiligheid van de kade te worden beoordeeld. Dit gaat o.a. over bomen, kabels en leidingen, bebouwing en wegen. Voor alsnog volgt HDSR hierin LTVRW, behalve op het onderdeel bomen. Wij keuren bomen <5 m goed. Voor toetsen geldt, als de waterkering niet voldoet zonder rekening te houden met NWO's is het niet benodigd de NWO's te beoordelen. Bij verbeteren dienen NWO's alsnog te worden getoetst om een duidelijke scope te garanderen.

9.2. Voorland

Binnen HDSR is geen direct benoemd voorland aanwezig, wel verzorgd hoog boezemland op diverse plekken de functie van voorland. In de eenvoudige toetsing zal het 'voorland' binnen de restbreedte worden uitgefilterd. De kade voldoet bij aanwezigheid van dergelijk voorland aan de veilige afmetingen. Voorland wordt binnen HDSR niet apart getoetst!

9.3. Microstabiliteit

Voor het beoordelingsspoor microstabiliteit is de maatgevende belasting gerelateerd aan een extreme waterstand. De stijging van de freatische lijn in de kade als gevolg van een hoge buitenwaterstand is tijdsafhankelijk. Het merendeel van onze keringen bevindt zich in een watersysteem waarin de waterstanden constant worden gehouden. We kunnen deze sturen, dus zal er nooit sprake zijn van langdurige grote waterstandsverschillen. Het beoordelingsspoor microstabiliteit wordt binnen HDSR niet getoetst!

10. Waterkerende constructies

Dit hoofdstuk heeft zowel betrekking op constructies in het buitentalud als het binnentalud of de teen van de kering. In het buitentalud kan naast extra stabiliteit de golfoploop worden beperkt en kans op piping worden verkleind. Dit hoofdstuk beperkt zich tot langconstructies in de kruin of teen van de kade, kunstwerken worden uitgesloten.

10.1. Uitgangspunten

Voor toetsen en ontwerpen van oeverconstructies gelden de volgende uitgangspunten:

- geotechnische stabiliteit van het omringende grondlichaam;
- stabiliteit van grondkerende constructies (sterkte constructie).

Ontwerp van dergelijke constructies waarbij deze deel uit maken van een kering wordt in behandeling genomen in dit document. Bij oeverconstructies waarbij de constructie deel uit maakt van de regionale waterkering, is de LTVRW leidend.

10.1.1. Risicoklassen

Damwanden en beschoeiingen worden ontworpen en getoetst aan de hand van CUR166. CUR 166 gaat bij het ontwerp uit van risicoklassen RC0, RC1, RC2 en RC3. Hoe hoger de risicoklasse, hoe zwaarder de constructie moet worden ontworpen. RC0 is voor eenvoudige constructies, waarbij er geen denkbare risico's kunnen plaatsvinden. Te denken aan beschoeiingen en damwanden die als oeverconstructie langs overige watergangen zijn aangebracht.

Conform NEN-EN 1990 worden de volgende 3 veiligheidsklassen beschouwd:

RC1:	geringe gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens en/of kleine of verwaarloosbare economische of sociale gevolgen voor de omgeving; bijvoorbeeld een ondiepe bouwput en een kademuur met een beperkte kerende hoogte (max. 5 m);
RC2:	middelmatige gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens en/of aanzienlijke economische of sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving; bijvoorbeeld een diepe bouwput in binnenstedelijke gebied, een damwand lang een binnenwater en een kadewand met een grote kerende hoogte (> 5m);
RC3:	grote gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens (enkele tientallen) en/of zeer grote economische of sociale gevolgen voor de omgeving; bijvoorbeeld bij bijzondere constructies en (damwandwanden in) een primaire waterkering.

Voor damwanden, die bij falen relatief geringe schade geven en geen persoonlijke veiligheidsrisico's inhouden, kunnen lagere eisen gelden dan voor de laagste veiligheidsklasse (RC1). Dergelijke lage eisen kunnen bijvoorbeeld gelden voor beschoeiingen. Mede afhankelijk van de eisen van de opdrachtgever, kunnen dergelijke damwanden worden berekend uitgaand van een betrouwbaarheid index $\beta = 2,5$, ook wel RC0 genoemd.

RC0:	Relatief eenvoudige constructies, geen persoonlijke veiligheidsrisico's bij falen, relatief geringe schade bij falen, bijvoorbeeld een beschoeiing.
------	---

De uiteindelijke keuze van de klasse wordt per project op basis van een afweging van risico's ten aanzien van mensenlevens en economie gemaakt.

Vrijwel alle damwandconstructies en beschoeiingen behoren minimaal tot veiligheidsklasse RC1 volgens NEN-EN 1990. Een lagere risicoklasse is afwijkend en dient onderbouwd te worden. De grondkerende constructie die als type II constructie dient te worden ontworpen in de veiligheidsklasse RC1.

Voor een IPO classificatie IV en V moet er voldaan worden aan RC2. In geval er sprake is van een IPO classificatie I, II of III moet de constructie voldoen aan RC1. RC3 is alleen van toepassing op primaire keringen

10.1.2. Levensduur damwand

Een stalen damwandconstructie (warmgewalst/koudgewalst) wordt ontworpen met een levensduur van 100 jaar. Een houten/kunststof constructie wordt ontworpen met een levensduur van minimaal 30 jaar.

De aanleghoogte voor de beschoeiing dient in overleg met opdrachtgever te worden bepaald. Om zettingen te compenseren dienen de damwanden hoger aangelegd te worden dan de vereiste ontwerphoogte.

10.2. Geotechnische randvoorwaarden

10.2.1. Grondonderzoek

Het grondonderzoek zal moeten bestaan uit minimaal sonderingen conform NEN-9997. De samenstelling van de ondergrond is een belangrijke parameter bij het dimensioneren van de damwand, daarom is het van belang om voldoende sonderingen (en boringen) te maken. Voor sonderingen dient er worden uitgegaan van een interval van maximaal 100m. De sonderingen dienen ten minste tot enkele meters in de draagkrachtige zandlaag te worden doorgezet en heeft een minimale lengte van 8 meter.

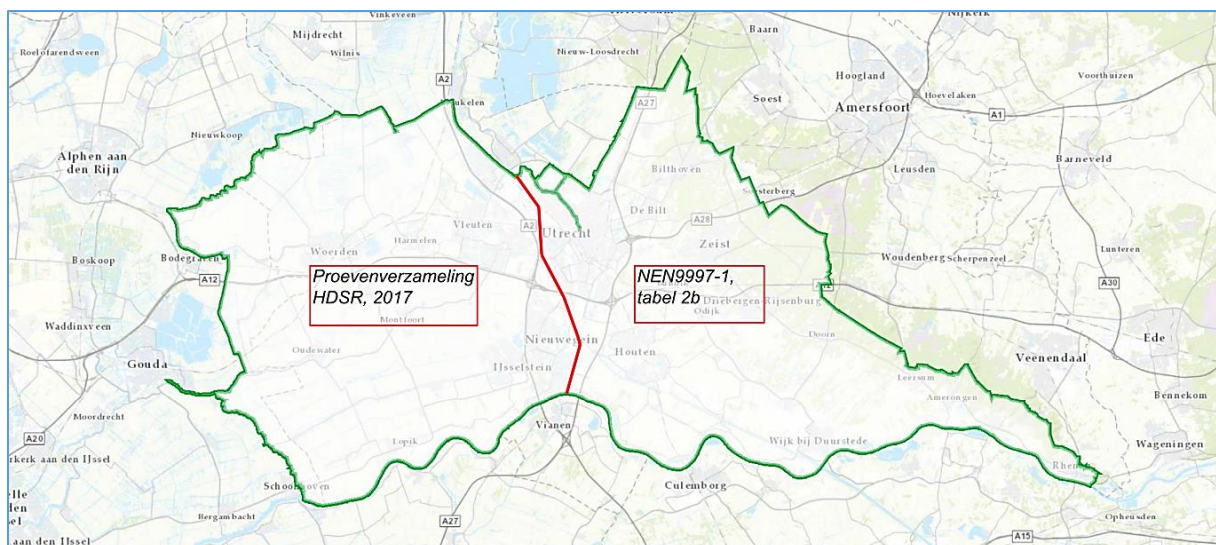
10.2.2. Grondparameters

Damwandberekeningen als oeverbeschermingen kunnen worden uitgevoerd met behulp van twee verschillende parametersets. Dit betreft de landelijke parameterset uit NEN9997, tabel 2b en de regionale parameterset van HDSR. HDSR heeft binnen haar gebied proeven verzameld en op basis daarvan een parameterset opgesteld. Deze set is opgesteld om de regionale waterkeringen te kunnen toetsen en ontwerpen. Echter dient hier opgemerkt te worden dat deze set zich enkel heeft gericht op slappe/cohesieve grondlagen ten westen van het Amsterdam-Rijnkanaal, daar waar de regionale waterkeringen van HDSR zich voornamelijk bevinden.

De voorwaarde voor toepassing van de regionale proevenverzameling van HDSR is: de locatie van aanbrengen van de damwand/beschoeiing ten westen van de "rode lijn" van figuur 1 is gelegen; er geen hooggelegen/ondiepe zandlagen worden aangetroffen. De parameters voor zand in de proevenverzameling van HDSR is afgeleid mits een diep gelegen zandlaag die fungeert als inbeddingslaag. Zie onderstaande figuur voor gebruik van een proevenverzameling, locatie gebonden.

grondsoort	volume gewicht verzadigd	volume gewicht vochtig	hoek van inwendige wrijving	cohesie	lage horizontale bedding constanten		
	$\gamma_{\text{verz,kar}}$ [kN/m ³]	$\gamma_{\text{av,kar}}$ [kN/m ³]	ϕ' [°]	c'	$k_{h,1}$ [kN/m ³]	$k_{h,2}$ [kN/m ³]	$k_{h,3}$ [kN/m ³]
Veen, mineraalarm	10,00	10,00	15,1	1,00	1.000	500	250
Veen, kleilig	10,85	10,85	14,0	1,00	1.000	500	250
Klei, humeus	12,80	12,80	34,8	1,00	2.000	800	500
Klei, siltig	15,95	15,95	30,7	2,41	3.000	1.500	750
Klei, zandig	17,65	17,65	32,7	1,64	4.000	2.000	800
Zand	21,00	19,00	32,5	0,00	12.000	6.000	3.000

Grondparameters voor ontwerp van damwanden en beschoeiingen (karakteristieke waarden)



Toepassen proevenverzameling afhankelijk van de locatie

10.2.3. Terreinbelasting

De verticale oever dient bestand te zijn tegen de bovenbelasting van de achterliggende oever. Hieronder vallen terreinbelastingen en belastingen door funderingen en dergelijke. Als grondregel moet de rekenwaarde van de bovenbelasting worden aangehouden. Verticale oevers dienen bestand te zijn tegen een bovenbelasting van 5 kN/m². Als er onzekerheid bestaat over de terreinbelasting aan de actieve zijde moet in ieder geval een gelijkmatig verdeelde belasting van ten minste 10 kN/m² worden aangehouden. Voor bepalen van het terreinbelasting dient tabel 3.1 van CUR166, 6e druk, deel 2 te worden gehanteerd.

10.2.4. Bovenbelasting

Verkeersbelasting dient conform CUR166 worden toegepast. Een verkeersbelasting dient in alle tijden minimaal 13 kN/m² groot over 2,5m breedte te worden geschematiseerd met een maximale grootte van 20 kN/m² indien er zwaar verkeer kan komen. Dit speelt bijvoorbeeld bij bedrijven die via het water transporteren en daarom met zwaar verkeer gebruik maken van de kade. De belasting mag niet gespreid worden en moet altijd op de meest maatgevende locatie van de kade komen te staan.

10.2.5. Bodemprofiel

Een nauwkeurige bepaling van het niveau van de bodem en onderwatertalud is van belang voor het ontwerp van de damwandconstructie. Het maatgevende bodemprofiel waarmee gerekend moet worden, wordt bepaald aan de hand van een ingemeten dwarsprofiel. De verticale oever dient te worden gedimensioneerd met maatgevende diepte conform de leggerdiepte en leggerbreedte van het vaarwegprofiel.

De grondwaterstand in de kade en/of oever wordt in de berekening gelijk aan streefpeil gehouden.

10.3. Verticale stabiliteit en horizontale verplaatsingen

Verplaatsingen kunnen maatgevend zijn in de uiterste grenstoestand of de bruikbaarheids-grenstoestand. De toelaatbare horizontale damwandverplaatsing dient te zijn vastgesteld middels CUR166. Eisen volgens richtlijn CUR166 horizontale vervormingen in de BGT:

- de toelaatbare horizontale vervorming van definitieve damwanden (in het zicht) is 1/200 van de maximaal te keren hoogte in alle bouwfasen met een maximum van 100 mm;
- voor tijdelijke damwanden is de toelaatbare vervorming afhankelijk van de situatie. Als goede vuistregel kan worden aangehouden 1/100 van de maximaal te keren hoogte met een maximum van 150 mm. Deze situatie kan bijvoorbeeld voorkomen bij calamiteitensituaties zoals peilval.

Bovenstaande eisen gelden voor de bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT) voor damwanden van bouwputten, grondkeringen en dergelijke (constructies in veiligheidsklasse II, komt overeen met RC1).

Voor relatief eenvoudige constructies waar een veiligheidsklasse RC0 geldt, dient een toelaatbare vervorming met een maximum van 100 mm worden aangehouden. Het maximale zettingsverschil in een tijdsperiode van 10 jaar mag niet meer bedragen dan 5 cm over een afstand van 25 m.

10.4. Roestvorming/corrosie

Voor stalen (onderdelen van) constructies wordt rekening gehouden met corrosie over de ontwerplevensduur (meestal 100 jaar). Hierbij wordt onderbouwd afgeweken van de corrosiewaarden die vermeldt staan in CUR 166 tabel 9.2. Voor de corrosiewaarden worden de waarden uit het onderzoek van Rijkswaterstaat 'Afronding onderzoek vermindering corrosietoeslag damwanden' gebruikt. Uit dit onderzoek is gebleken dat de corrosiewaarden uit de CUR166 aan de conservatieve kant zijn. De stalen onderdelen van een constructie onder de laagste grondwaterstand hebben een corrosiewaarde van 2,4 mm voor beide zijden samen en voor een levensduur van 100 jaar wordt voorgeschreven. Voor de gedeelten boven de grondwaterstand wordt een waarde van 4,4 mm voor beide zijden en voor een levensduur van 100 jaar voorgeschreven. De reductiefactoren dienen hierop te worden aangepast. Het rapport van Rijkswaterstaat sluit de gereduceerde corrosiewaarden voor buispalen, trekstangen, ankerconstructies of koudgewalste damwanden uit. Daarom worden bij deze constructies de waarden uit de CUR166 gebruikt.

10.5. Toepassing van factoren

In geval van een gestaffelde damwand en/of combiwand, dient er gewerkt te worden met schelffactoren. HDSR gaat uit van de volgende schelffactoren:

- Ve en slappe / organische / humeuze klei: 1,3 [-]
- Klei siltig/zandig: 1,5 [-]
- Zand: 2,0 [-]

De wrijving tussen de damwand en het grond wordt beschreven met de wandwrijvingshoek. De wandwrijvingshoek is te bepalen door middel van een schuifproef. Omdat dergelijke proeven vaak moeilijk uit te voeren zijn en de betrouwbaarheid laag is, mag conform CUR166 worden uitgegaan van $\delta = 0$ voor veen. Voor klei $\delta = 1/3 \phi$ en voor zand $\delta = 2/3 \phi$.

10.6. Verankering

Verankering in een waterkering heeft nooit de voorkeur. Bij wijze van uitzondering kan in overleg met HDSR voor deze methode worden gekozen. In sommige gevallen kan er op economische of locatie specifieke redenen worden gekozen om een lichtere damwand met verankering te kiezen in plaats van een zware onverankerde damwand. Ankers dienen in principe grondverdringend te worden aangebracht. De krachtoverdracht van het anker naar de grondconstructie dient buiten de plastische zones plaats te vinden. Indien er wordt gekozen voor een verankering moeten dezelfde corrosiewaarden worden toegepast zoals in H10.4 staan vermeld. Eventueel kan er worden gekozen om dijkvernageling toe te passen.

10.7. Infiltratievoorziening

Om verdroging, zetting en mogelijk wegspoelen van grond achter de damwand te voorkomen dient bij een dichte damwandconstructie voorziening getroffen te worden om infiltratie van water de achterliggende grond niet te belemmeren.

10.8. Beoordeling bestaande constructies

Om de sterkte van bestaande constructies te kunnen bepalen dienen de volgende stappen te worden ondernomen:

1. Geometrie en leeftijd van de constructie in kaart brengen. Indien beschikbaar oude tekeningen/documentatie verzamelen;
2. Gedeelte van een houten beschoeiing/damwand verwijderen om de staat te bekijken;
3. Voor een stalen damwand een meting uit laten voeren wat de dikte van de damwand is om op deze manier de corrosie vast te kunnen stellen. Daarnaast kan met een sondering met magnetometing worden vastgesteld hoelang de damwanden zijn.
4. Beheerdersoordeel.

De beoordeling van de constructie zal dan plaatsvinden door middel van een sterktereductie in de berekening mee te nemen.

10.9. Type constructies

Er zijn verschillende type kerende constructies mogelijk afhankelijk van de sterkte die benodigd is. Deze staan hieronder opgesomd:

- Houten beschoeiing;
- Kunststof (Prolock);
- Palenrij (naaldhout of Cloeziana);
- Damwand (kunststof, hout, staal)

Als er voor een stalen damwand wordt gekozen, verdient het de voorkeur om te kiezen voor warmgewalst in plaats van koudgewalst staal. (DM#1620888)

Voor koudgewalste damwanden wordt uitgegaan van de afroesting die in de CUR166 staat. Dit leidt bij een ontwerp (type 1) levensduur van 100 jaar voor stalen damwanden bij de keuze voor koud gevormde ipv warm gevormde damwanden meestal niet tot een economische of milieutechnische optimalisatie. Tevens is het bekend dat de hoekprofielen en sloten van koud gevormde damwanden afwijkend zijn ten

opzicht van warm gewalste damwanden en op deze plekken een nogal onvoorspelbaar gedrag vertonen op het vlak van corrosie, uit het slot lopen en plooi gevoeliger zijn tijdens de uitvoering.

Wanneer een constructie in binnentalud wordt ontworpen of getoetst wordt er eerst een stabiliteitsberekening gemaakt. Hieruit volgt hoe lang de 'forbidden line' moet worden. Vervolgens wordt met de krachten die optreden op deze 'forbidden line' bepaald. Deze krachten worden vervolgens met drie aangrijppunten als horizontale krachten in een D-Sheet Piling berekening ingevoerd.

11. Specifieke aspecten toetsing, ontwerp en uitvoering

11.1. Toetsing

11.1.1 DAM

DAM (Dijksterkte Analyse Module) is een softwarepakket, waarmee geotechnische sterkteberekeningen voor dijken en kades geautomatiseerd worden uitgevoerd. DAM maakt het mogelijk om geautomatiseerd Macrostabieliteit en Piping door te rekenen voor lange strekkingen. De sterkte wordt berekend op basis van onderliggende software, zoals D-Geo Stability. Invoer- en uitvoergegevens worden via een GIS-omgeving ontsloten. Diverse waterschappen maken reeds gebruik van DAM.

Het inzetten van DAM is een onderdeel van het verder professionaliseren en digitaliseren van de toetsing van de regionale keringen. Op lange termijn is het mogelijk om continue te kunnen toetsen en de toetsing als centrale spil voor de andere werkprocessen van de zorgplicht centraal te stellen. Dit betekent dat b.v. eenvoudig de implicaties van vergunningsaanvragen kunnen worden doorgerekend met DAM, maar ook dat er via 'DAM live' inzicht kan worden gegeven in de actuele sterkte van de dijken en kades voor het werkproces calamiteiten. Ook effecten van NWO's kunnen snel via batch-berekeningen worden geanalyseerd. Door het continue verzamelen en gedisciplineerd en gestructureerd bijhouden van gegevens, kan een volgende toetsronde meer efficiënt en goedkoper worden uitgevoerd.

Een lacune van DAM is dat de er geen onderscheid in grondlagen kan worden gemaakt onder en naast de kade. Hierdoor is het voor meer detail noodzakelijk om over te stappen op een traditionele wijze van toetsen waarbij wordt gewerkt met een vak-indeling en representatieve profielen. Bij DAM is het wel mogelijk om in meer detail per profiel schematiseringen voor het freatisch vlak of stijghoogten op te stellen, maar vanwege het grote aantal rekenpunten wordt er vaak voor gekozen om hier standaard aannamen voor te doen.

Gebruik DAM dus alleen voor het globaal doorrekenen van strekkingen.

11.1.2. Beheerdersoordeel

Per toetsspoor wordt het technisch oordeel (TO) voorgelegd aan de beheerorganisatie. Deze geeft vanuit de ervaring een reactie op het TO, zijnde het beheerdersoordeel (BO).

In het ene geval zijn het TO en het BO vergelijkbaar en versterken deze elkaar. In het andere geval geven deze verschillende signalen en zal in een in gezamenlijk overleg bepaald moeten worden wat de werkelijke staat van de kering is.

11.2. Ontwerp

Balans tussen eenheid en uitgekiend ontwerpen. Een uniform ontwerp heeft zowel vanuit het oogpunt van esthetiek (landschappelijk) als vanuit het oogpunt van beheer (toetsing, inspectie, vervangen van constructies, etc.) de voorkeur. Bij twijfel samen met beheer beslissing nemen.

Oplossingen in grond hebben de voorkeur. Bij twijfel LCC uitvoeren over >100 jaar en samen met beheer de beslissing nemen.

Overige aspecten:

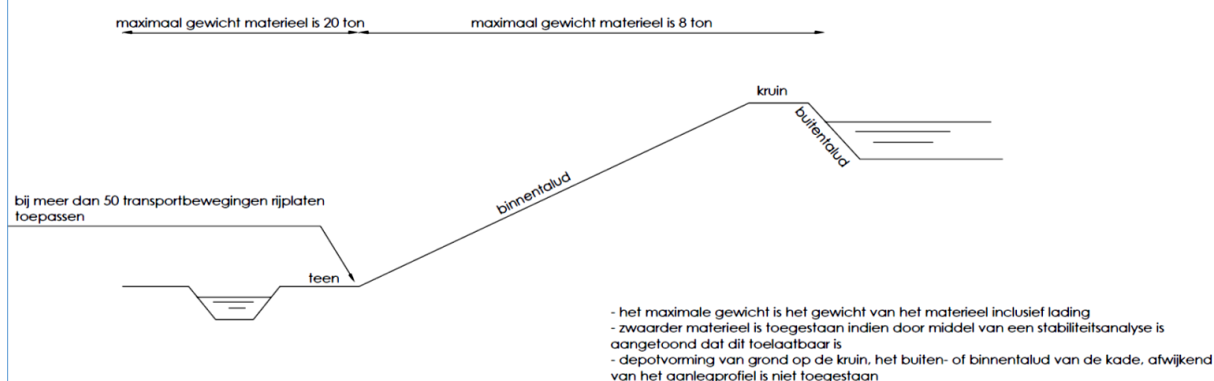
- Bekleding buitentalud dient te bestaan uit klei met erosieklasse II of een beschoeiing.
- Levensduur voor hoogte gelijk aan levensduur wegconstructie.
- Bij groene kades indien mogelijk levensduur voor hoogte zo lang als realistisch mogelijk (niet standaard voor 10 jaar gaan). Aandachtspunt is effect ophoging op stabiliteit (binnen en buiten).
- Voor zettingsberekeningen en de uitvoeringsstabiliteit wordt uitgegaan van zomerpeil in de polder.

11.3. Uitvoering

Voor in te zetten bouwmaterieel geldt in beginsel dat voor de uitvoering op de kade geen zwaarder materieel is toegestaan dan een 8-tons-kraan op rupsbanden. De aannemer dient voor aanvang van de werkzaamheden een stabiliteitsberekening te maken waarin staat onderbouwd dat de huidige stabiliteit van de waterkering niet in het geding komt. Als ontwerpbelasting voor de 8-tons kraan moet worden uitgegaan van 5 kN/m² over 2,5 m, of een kleinere breedte indien de werkelijke breedte van de kade smaller is.

Zwaarder materieel mag worden toegepast indien kan worden aangetoond dat deze niet tot schade leidt. Daarbij mag de veiligheidsfactor (stabiliteit) tijdelijk worden verlaagd naar 0,85 voor alle IPO klassen. Materieel en materiaal van de aannemer dient buiten werktijd van het waterstaatswerk afgevoerd te worden. Dit betekent dat er geen voertuigen en/of bijvoorbeeld depots op de waterkering achter mogen blijven. Het risico bestaat namelijk dat indien de deze belasting langdurig aanwezig is er instabiliteit op kan treden.

Kade belasting in te zetten materieel:



12. Definities en begrippen

Begrip	Definitie
Beleidsregel	Een bij besluit vastgestelde algemene regel over de afweging van belangen, de vaststelling van feiten of de uitleg van wettelijke voorschriften bij het gebruik van een bevoegdheid van HDSR. De beleidsregels bij de Keur staan vermeld in DM#1447198.
Beschermingszone	Aan een waterstaatswerk grenzende zone, die als zodanig in de legger is opgenomen, waarin ter bescherming van dat waterstaatswerk voorschriften krachtens deze keur van toepassing zijn.
Boezemkade	Een langs een boezemwater gelegen waterkering die moet voorkomen dat bij hoog water het boezemwater het achtergelegen land binnenstroomt.
Keur	De regelgeving van HDSR ten behoeve van het uitvoeren van haar wettelijk taak. De legger en de keur vormen één geheel.
Kwelsloot	Een sloot aan de binnenzijde van de waterkering die tot doel heeft kwelwater op te vangen en af te voeren.
Langsconstructie	Een in de grond ingebedde constructie die is opgebouwd uit relatief dunne (gekoppelde) constructieve elementen die door ankers en/of passieve gronddruk worden ondersteund.
Legger	Het openbaar register van de beheerder, waarin onderhoudsplicht en de gewenste of vereiste (onderhoud)toestand van wateren, waterkeringen en andere waterhuishoudkundige werken en voorzieningen staan aangegeven, alsmede de keurbegrenzingsen. De legger en de keur vormen één geheel.
Niet-waterkerend object	Een object op of in de waterkering dat geen waterkerende functie heeft. Voorbeeld: leidingen, woningen, gemalen en bomen
Onderhoud (buitengewoon)	Het onderhoud van waterkeringen en bijbehorende voorzieningen om ze weer te laten voldoen aan de eisen van de leggers. Voorbeeld: het opnieuw op hoogte en breedte brengen van de waterkering
Onderhoud (gewoon)	Het onderhoud van waterkeringen en bijbehorende voorzieningen om deze werkend te houden. Voorbeeld: het herstellen van scheuren en/of gaten in de waterkering
Uitvoeringsregel	Een afspraak waarin is beschreven welke regels er gelden bij het uitvoeren van werkzaamheden aan een regionale waterkering De uitvoeringsregels bij de Keur staan vermeld in DM#1487960.
Verheelde waterkering	Een waterkering waarbij in de zone van 50 meter breedte, gerekend vanaf de referentiekruinlijn, een strook grond aanwezig is van 12 meter breedte met een hoogte van tenminste 0,20 meter boven de leggerhoogte.
Waterstaatswerk	Een oppervlaktewaterlichaam, bergingsgebied, waterkering of ondersteunend kunstwerk, dat als zodanig in de legger is aangegeven.
Watersysteem	Een samenhangend geheel van een of meer oppervlaktewaterlichamen met bijbehorende bergingsgebieden, waterkeringen en ondersteunende kunstwerken en grondwaterlichamen.

13. Referentielijst

- ✚ Legger HDSR
- ✚ Keur HDSR
- ✚ CUR 162 'Construeren met grond'
- ✚ CUR 166 'Damwandconstructies'
- ✚ Handreiking ontwerpen & verbeteren boezemkaden [STOWA, ORK 2009-06]
- ✚ Leidraad Toetsen op Veiligheid regionale waterkeringen [STOWA, 2015]
- ✚ Leidraad toetsen regionale keringen voor piping [STOWA, ORK 2007-02]
- ✚ Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen [Deltares, 2012]
- ✚ TR17 – Klei voor dijken (TAW, 1996) met update uit 2017
- ✚ TR26 – Waterspanningen bij dijken (TAW, 2004)
- ✚ Werk piping bij dijken [Min. I&M, 2014]
- ✚ Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies [Helpdesk Water, P-DWW-2001-045]