

LEIDRAAD TOETSEN OP VEILIGHEID REGIONALE WATERKERINGEN



2015
-15

MODULE D:
BEOORDELING
VEILIGHEID

COLOFON

LEIDRAAD TOETSEN OP VEILIGHEID REGIONALE WATERKERINGEN - MODULE D

UITGAVE	Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer Postbus 2180 3800 CD Amersfoort
STOWA	STOWA 2015-15
COPYRIGHT	De informatie uit dit rapport mag worden overgenomen, mits met bronvermelding. De in het rapport ontwikkelde, dan wel verzamelde kennis is om niet verkrijgbaar. De eventuele kosten die STOWA voor publicaties in rekening brengt, zijn uitsluitend kosten voor het vormgeven, vermenigvuldigen en verzenden.
DISCLAIMER	Dit rapport is gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteurs en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit dit rapport.

MODULE D: BEOORDELING VEILIGHEID

1.	BEOORDELINGSSPOREN	3
1.1.	ALGEMEEN - FAALMECHANISMEN	3
1.2.	HOOGTE	3
1.3.	PIPING / HEAVE	10
	1.3.1. Eenvoudige beoordeling	10
	1.3.2. Gedetailleerde beoordeling	13
	1.3.3. Geavanceerde beoordeling	15
1.4.	MACROSTABILITEIT BINNENTALUD	15
	1.4.1. Eenvoudige beoordeling	15
	1.4.2. Gedetailleerde beoordeling	16
	1.4.3. Beoordeling op geavanceerd niveau	18
1.5.	MACROSTABILITEIT BUITENTALUD	19
	1.5.1. Eenvoudige beoordeling	20
	1.5.2. Gedetailleerde beoordeling	20
	1.5.3. Geavanceerde beoordeling	20
	1.5.4. Grondkerende constructies in het buitentalud	20
1.6.	MICROSTABILITEIT	21
1.7.	BEKLEDINGEN	22
	1.7.1. Buitentalud	22
	1.7.2. Kruin- en binnentalud	23
1.8.	STABILITEIT VOORLAND	23
	1.8.1. Eenvoudige beoordeling	23
	1.8.2. Gedetailleerde / geavanceerde beoordeling	23

REFERENTIES

1. BEOORDELINGSSPOREN

1.1. Algemeen - faalmechanismen

De sterkte van de waterkerende functie van een waterkering wordt bepaald door de hoogte en stabiliteit van de waterkering. Bij een te lage kruinhoogte kan door overloop of golfoverslag te veel water in de polder komen, of kunnen kruin en binnentalud door erosie of verweking worden aangetast waardoor mogelijk een waterkering doorbreekt. Verder kan de stabiliteit van een kering worden aangetast door:

- het optreden van zandmeevoerende wellen (piping) of heave;
- het afschuiven van het binnentalud en/of het buitentalud;
- het uitspoelen van gronddeeltjes uit de kering op het binnentalud of het afdrukken van deze toplaag (micro-instabiliteit);
- aantasting van de bekleding;
- het optreden van een afschuiving of een zettingsvloeiing van de vooroever.

De beoordelingssporen voor deze faalmechanismen zijn beschreven in deze module.

De aanwezigheid van niet-waterkerende objecten in, op of langs de kering kan invloed hebben op de veiligheid. In module E wordt nader ingegaan op de beoordeling van deze invloed.

Tenslotte zijn waterkerende kunstwerken in een waterkering van belang bij de beoordeling van de veiligheid. De werkwijze voor de toetsing is beschreven in de Leidraad waterkerende Kunstwerken in regionale keringen. Module F presenteert enkele aanvullingen op die Leidraad.

1.2. Hoogte

Het beoordelingsspoor Hoogte richt zich primair op de kruinhoogte en de weerstand van de kruin en het binnentalud tegen overslag.

Voorafgaand aan de werkelijke beoordeling moet worden vastgesteld of de hoogte van de kering volgens een eerdere toetsing voldeed aan de norm, of dat een verbetering van de hoogte is ontworpen en uitgevoerd, waarbij:

- die toetsing of het ontwerp is uitgevoerd volgens vigerende, gelijkwaardige of conservatievere rekenregels; EN:
- de hydraulische belasting en overige belastingen niet ongunstiger zijn geworden; EN:
- overige uitgangspunten en kenmerken (norm, geometrie, etc.) nog actueel zijn, of tenminste niet ongunstiger zijn geworden.

Als niet aan bovenstaande voorwaarden wordt voldaan, wordt vervolgd met de werkelijke beoordeling.

Beoordeling

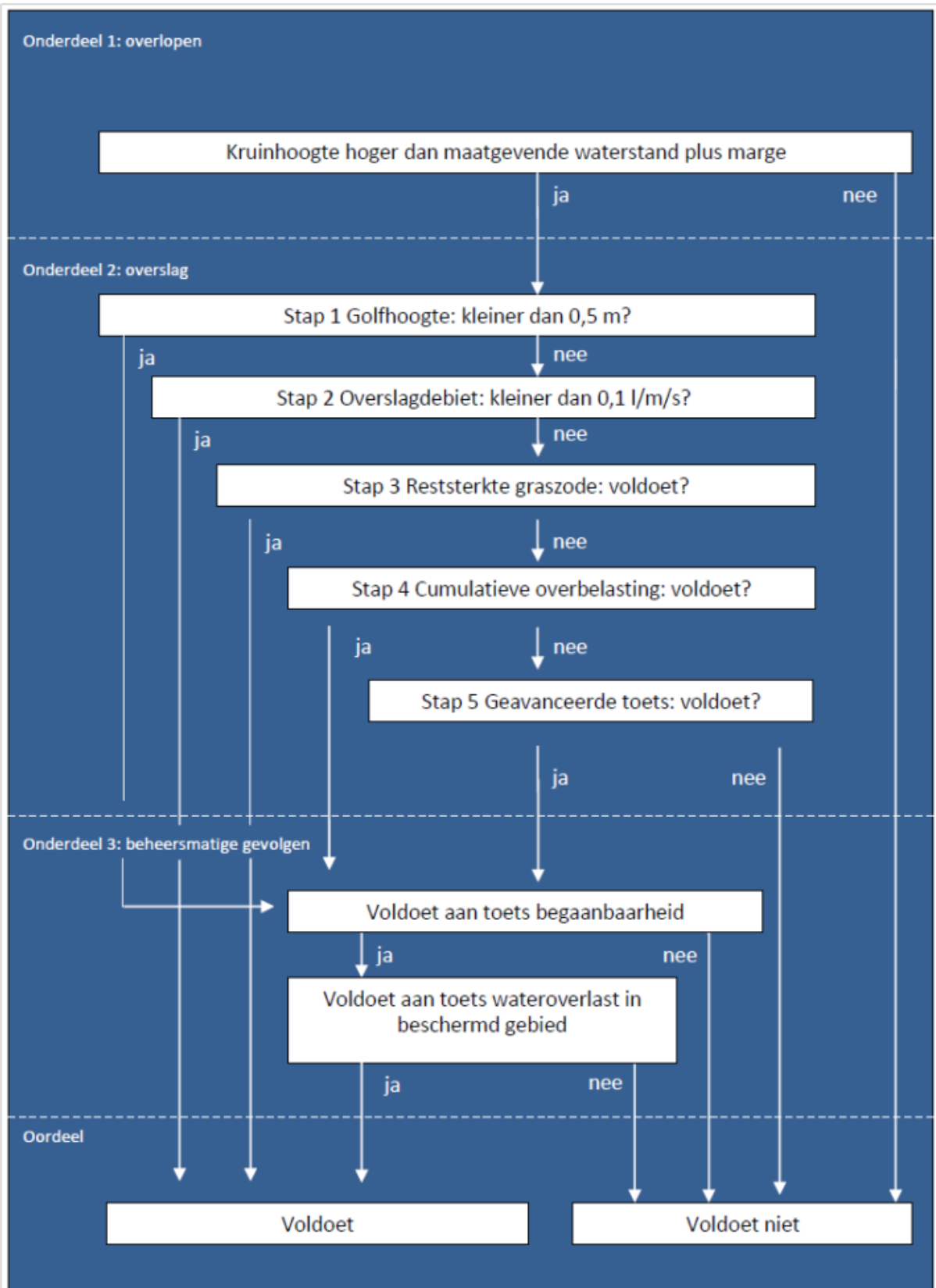
De beoordeling van de hoogte van een waterkering omvat de volgende onderdelen:

- onderdeel 1: beoordeling op overlopen;
- onderdeel 2: beoordeling op overslag;
- onderdeel 3: beoordeling van de beheersmatige gevolgen van overslag.

Indien niet wordt voldaan aan de eis ten aanzien van overlopen, resulteert direct het oordeel 'voldoet niet'. Indien wel wordt voldaan moet de beoordeling worden vervolgd met de beoordeling op overslag.

Indien niet wordt voldaan aan de eisen ten aanzien van overslag, resulteert het oordeel 'voldoet niet'. Indien wel wordt voldaan moet de beoordeling worden vervolgd met de beoordeling van de beheersmatige gevolgen van overslaand water.

Het toetschema is gepresenteerd in figuur D.1. De beoordelingswijze voor de genoemde onderdelen en de bijbehorende stappen worden onderstaand nader beschreven.



Figuur D.1: Schema hoogtetoets

Onderdeel 1: Beoordeling op overlopen

In dit onderdeel wordt gecontroleerd of sprake kan zijn van het overlopen van de kering. De beoordeling op overlopen betreft een vergelijking van de verwachte kruinhoogte op peildatum met de vereiste kruinhoogte op basis van de maatgevende hoogwaterstand, vermeerderd met een marge. De hoogte van de kering uit oogpunt van overlopen is voldoende indien de verwachte kruinhoogte op peildatum hoger is dan de maatgevende hoogwaterstand plus een marge.

De vereiste marge is van belang omdat de beoordelingswijze voor overslag (onderdeel 2) kan leiden tot het oordeel 'voldoet' bij een zeer gering verschil tussen de maatgevende hoogwaterstand en de verwachte kruinhoogte. De toets op hoogte is zodoende kwetsbaar voor onzekerheden in de afleiding van de hydraulische belastingen. Bij de beoordeling op overlopen gelden daarom minimum eisen voor deze marge.

De vereiste marge is beschreven in tabel D.1. De marge is afhankelijk van de (veronderstelde) beheersbaarheid van de maximum waterstand. De waarden gelden indien de maatgevende hoogwaterstand voldoende betrouwbaar (of conservatief) is afgeleid en de aanwezige kruinhoogte voldoende nauwkeurig is gemeten. Het voldoende betrouwbaar en nauwkeurig zijn kan niet worden gekwantificeerd. Hierbij geldt het oordeel van de beheerder.

Tabel D.1 Vereiste marge tussen maatgevende hoogwaterstand en kruinhoogte

Situatie	Marge [m]
Kaden langs boezems, kanalen en meren met een beheerste maximale waterstand	0,1
Kaden langs boezems, kanalen en meren met een beperkt beheerste waterstand (vrije afvoer)	0,2
Keringen langs regionale rivieren, wateren met een onbeheerste waterstand	0,3
Compartimenteringskeringen	0,5

Volledigheidshalve zijn ook meren genoemd in deze tabel. Vanwege de grote golfhoogten op meren zal echter onderdeel 2 naar verwachting maatgevend zijn voor de beoordeling van de hoogte.

De waarden in tabel D.1 mogen worden aangepast, waarbij zowel een verlaging als een verhoging van de marge mogelijk is. Aanleiding voor een aanpassing is bijvoorbeeld de mate van (on-) zekerheid in de afleiding van de maatgevende waterstanden of aanwezige kruinhoogten. Het is evident dat de betrouwbaarheid van de maatgevende waterstanden bij een grotere overschrijdingskans (= lager beveiligingsniveau) in het algemeen hoger zal zijn dan bij een kleinere overschrijdingskans. Een onderbouwing van een aanpassing kan bijvoorbeeld zijn een minimum waakhoogte op basis van een overslagdebiet van 10 l/m/s (op locaties met een maximale golfhoogte van 0,5 m) (zie onderdeel 2). Naast het overslagdebiet kunnen ook andere overwegingen van belang zijn, zoals de begaanbaarheid van de kruin voor inspecties.

De beheerder moet een gekozen marge motiveren. Bij de motivatie dient tenminste aandacht te worden besteed aan de betrouwbaarheid van de afleiding van de maatgevende hoogwaterstand en de nauwkeurigheid van de (verwachte) kruinhoogte op peildatum. De motivatie dient te worden overlegd met het bevoegd gezag, en beschreven in de rapportage.

Onderdeel 2: beoordeling op overslag

De beoordeling op overslag betreft een controle van de erosie van de bekleding van de kruin en het binnentalud en controle op de stabiliteit van de bekleding op het binnentalud bij overslag. De wijze van deze beoordeling is afhankelijk van bekledingskenmerken op de kruin en het binnentalud (zie par. D 1.7).

De beoordeling op erosie van de bekleding kent een aantal stappen, op verschillende niveaus:

- eenvoudig niveau:
 - o stap 1: beoordeling op basis van een veilige golfhoogte;

- o stap 2a: beoordeling op basis van een veilige waarde voor de golfoverslaghoogte
- gedetailleerd niveau
 - o stap 2b: beoordeling op basis van een berekende waarde voor de golfoverslaghoogte;
 - o stap 3: beoordeling op basis van de sterkte van de grasbekleding;
 - o stap 4: beoordeling op basis van een toetsing van een cumulatieve overslagbelasting aan kritische overslagbelastingswaarde
- geavanceerd niveau
 - o stap 5: nadere afleiding cumulatieve overslagbelasting en kritische overslagbelastingswaarde

Stap 1: beoordeling op basis van een veilige golfhoogte

Deze beoordeling betreft een controle of de golfhoogten op het watersysteem kleiner zijn dan 0,5 m. De beoordeling mag uitsluitend worden toegepast indien sprake is van een open of gesloten graszode. Indien sprake is van een fragmentarische zode of kale grond, dient de beoordeling te worden vervolgd met stap 2.

Bij golfhoogten kleiner dan 0,5 m en een gesloten graszode kan de veiligheid uit oogpunt van overslag als voldoende worden beoordeeld. Bij dergelijk kleine golfhoogten leidt het overslaand water namelijk niet tot erosie van de grasbekleding, omdat de frontsnelheid van het overslaand water de kritische snelheid voor erosie van de grasbekleding niet overschrijdt.

Voor de bepaling van de benodigde golfhoogten kan gebruik worden gemaakt van de volgende mogelijkheden:

1. schatting op basis van de maximale breedte van het water. Op regionale wateren die minder dan 100 m breed zijn, komen invallende golven met een golfhoogte groter dan 0,5 m niet voor;
2. afleiding uit de tabellen in bijlage 5 met golfhoogten;
3. berekening op basis van golfgroeiformules (zie paragraaf B 1.2).

Indien wordt voldaan aan deze eis, kan worden vervolgd met onderdeel 3: controle van de beheersmatige aspecten van het optredende overslagdebiet.

Indien niet wordt voldaan aan deze eis, dient te worden vervolgd met stap 2.

Stap 2: Beoordeling op basis van de benodigde golfoverslaghoogte

Deze beoordeling bestaat uit het toetsen of de kruinhoogte op peildatum hoger is dan de minimaal benodigde kruinhoogte gegeven een maximaal toelaatbaar gemiddeld overslagdebiet. De minimaal benodigde kruinhoogte wordt vastgesteld als het toetspeil vermeerderd met de golfoverslaghoogte.

Stap 2a: beoordeling op basis van een conservatief bepaalde golfoverslaghoogte

In deze stap kan eerst gebruik worden gemaakt van een evident veilige waarde voor de golfoverslaghoogte bij een gemiddeld overslagdebiet van minder dan 0,1 l/m/s. Deze golfoverslaghoogte is eenvoudig af te leiden uit de grafieken en tabellen in bijlage 5.

Indien de verwachte kruinhoogte op peildatum hoger is dan de minimaal vereiste kruinhoogte voldoet de kruinhoogte van de waterkering. Een verdere beoordeling (onderdeel 3) is dan niet nodig. Indien de kruinhoogte niet voldoet aan deze eis, wordt de beoordeling vervolgd met stap 2b.

Stap 2b: beoordeling op basis van gedetailleerd berekende golfoverslaghoogte

In deze stap wordt de benodigde golfoverslaghoogte specifiek berekend op basis van de lokale kenmerken van de kade, het watersysteem en de maatgevende windsnelheid. Bij de bepaling van de benodigde kruinhoogte wordt voor niet – afvoer gedomineerde wateren (veel boezems en kanalen) bij voorkeur gebruikt gemaakt van probabilistisch bepaalde hydraulische randvoorwaarden (met behulp van een Promotor [STOWA, 2010]). Een probabilistische aanpak heeft de voorkeur omdat die voor deze wateren minder conservatief is dan een deterministische aanpak, doordat rekening wordt gehouden met:

- de kans van het gelijktijdig voorkomen van hoge waterstanden en hoge windsnelheden (verdeeld over de verschillende windrichtingen);
- het realiteitsgehalte van een scheefstand en een hoge windsnelheid uit een bepaalde windrichting.

Indien de verwachte kruinhoogte op peildatum hoger is dan de minimaal vereiste kruinhoogte voor een maximaal gemiddeld overslagdebiet van 0,1 l/m/s heeft de waterkering een voldoende veilige kruinhoogte. Met dit debiet wordt direct voldaan aan de controle op de beheersmatige aspecten van het overslagdebiet, zodat een verdere beoordeling (onderdeel 3) niet benodigd is. Het oordeel is 'voldoet'.

Indien het gemiddelde overslagdebiet meer dan 0,1 l/m/s bedraagt is een verdere beoordeling benodigd waarbij eisen worden gesteld aan de kwaliteit van de grasbekleding (stap 3 van dit onderdeel).

Stap 3: Beoordeling op basis van de sterkte van de grasbekleding

In deze stap wordt de eventuele sterkte van de aanwezige grasbekleding betrokken in de beoordeling. In geval van enige sterkte van de grasbekleding is een hoger overslagdebiet toelaatbaar. De beoordeling is gebaseerd op de kwaliteit van de graszode. Hierbij zijn drie kwaliteitsniveaus van de graszode onderscheiden:

1. fragmentarisch;
2. open;
3. gesloten.

Voor een toelichting van de definities van de graszode en de bepaling wordt verwezen naar het Handreiking Grasbekleding [Min. I&M, 2012].

Ad. 1 Een fragmentarische zode beschikt niet over enige sterkte, waardoor het oordeel 'voldoet niet' resulteert.

Ad. 2 Een open zode beschikt over voldoende sterkte indien wordt voldaan aan deze eisen:

- het overslagdebiet is kleiner of gelijk aan 1 l/m/s; en:
- de toplaag bestaat niet uit zand; en:
- de deklaag is tenminste 0,4 m dik indien graverij door mollen, muizen, muskusratten of konijnen wordt verwacht.

Ad. 3 Een gesloten zode beschikt over voldoende sterkte indien wordt voldaan aan de eis:

- het overslagdebiet is kleiner of gelijk aan 1 l/m/s; of:
- het overslagdebiet is kleiner of gelijk aan 5 l/m/s en:
 - o de kleilaag is dikker dan 0,4 m of de taludhelling is flauwer dan 1:4; en:
 - o de grootte van objecten (open plekken) is kleiner dan 0,15 x 0,15 m²; met:
 - maximaal 2 objecten en beschadigingen per m²; en:
 - maximaal gemiddeld 25 objecten en beschadigingen per 25 m²; en:
 - o de significante golfhoogte is kleiner dan 3 m.

Indien wordt voldaan aan de eisen resulteert het oordeel 'voldoet'. Indien niet wordt voldaan aan deze eisen wordt de toets voortgezet met stap 4.

Stap 4 Beoordeling op basis van een cumulatieve overslagbelasting

In deze stap wordt de cumulatieve overslagbelasting getoetst aan een kritische waarde van 1000 m²/s². De grasbekleding voldoet indien de optredende cumulatieve overslagbelasting de kritische waarde niet overschrijdt.

De cumulatieve overslagbelasting kan worden afgeleid uit onderstaand figuur D.2, op basis van de volgende kenmerken:

1. de kritische stroomsnelheid;
2. de golfhoogte;
3. het overslagdebiet.

De figuur presenteert de cumulatieve overbelasting per uur. Voor het verkrijgen van de cumulatieve

¹⁶ De eis betreffende de significante golfhoogte is volledigheidshalve overgenomen uit de Handreiking (Min. I&M, 2012), maar is niet relevant voor regionale wateren.

overbelasting gedurende een storm moet de overbelasting worden gesommeerd voor de gehele stormduur. De gesommeerde overbelasting mag de kritische waarde niet overschrijden.

Ad.1 Als veilige schatting van de kritische stroomsnelheid u_c mag een waarde van 4 m/s worden aangenomen, indien wordt voldaan aan de volgende voorwaarden:

- De graszode moet gesloten zijn, een open of fragmentarische graszode is niet toegestaan. Ruigte begroeiing en tuintjes voldoen hier zeker niet aan.
- Bij een taludhelling steiler dan 1:4 moet een kleilaag aanwezig zijn van minimaal 0,4 m dikte om uitspoeling van zand van onder de kleilaag door graverij te voorkomen.
- In de stroming mogen geen objecten of beschadigingen staan groter dan 0,15 x 0,15 m², met:
 - o maximaal 2 objecten en beschadigingen per m²;
 - o maximaal gemiddeld 25 objecten en beschadigingen per 25 m²;
- De taludhelling mag niet steiler zijn dan 1:2,3. Dit is de grens van de taludhelling waarbij met golfoverslagproeven ervaring is opgedaan. Opgemerkt wordt dat het bij steilere taluds lastiger zal zijn om te voldoen aan de eis van een 'gesloten zode' en dat ook het mechanisme evenwijdig afschuiven van de bekleding mogelijk dominant wordt.

Ad. 2 De golfhoogte kan eenvoudig worden afgeleid uit de tabellen (zie bijlage 5), of worden berekend met behulp van golfgroeiformules. Voor een beschrijving van de werkwijze wordt verwezen naar de Handreiking Grasbekleding [Min. I&M, 2012].

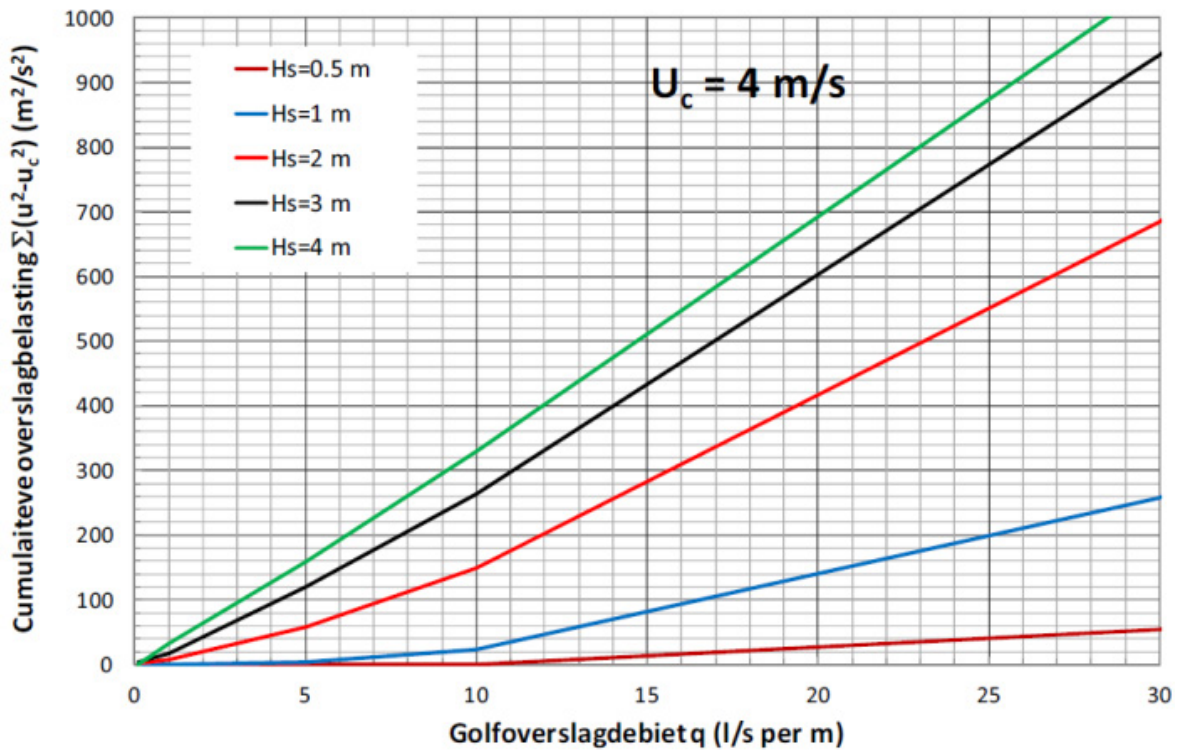
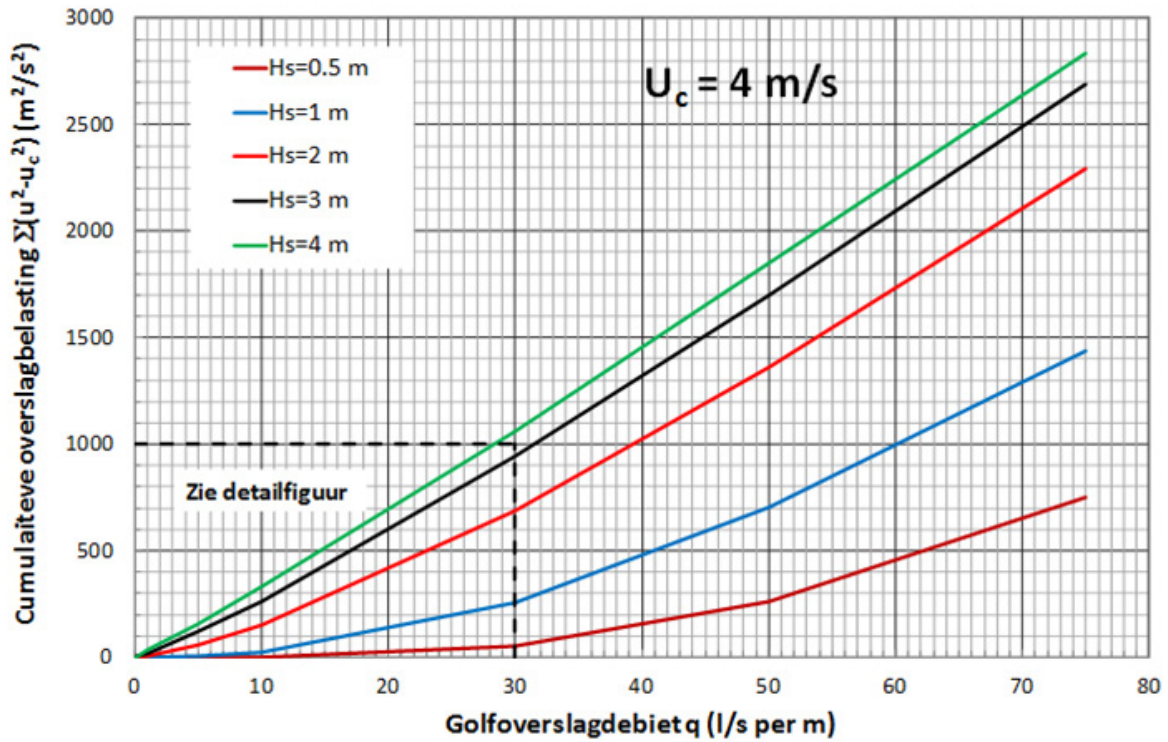
Bij deze beoordeling is tevens de duur van de belasting van belang. Het gaat daarbij om de duur van de periode waarin golfoverslag plaatsvindt. Stormduren en het verloop van de hoge windsnelheid gedurende een storm is voor regionale wateren landelijk niet vastgesteld, vanwege het lokale karakter van deze kenmerken en de verschillen hiervan in de regio's van het land. Een veilige waarde voor de stormduur is 48 uur, met het volgende verloop:

- Van 0 tot 23 uur: toename windsnelheid van nihil tot maatgevend hoge windsnelheid;
- 23 – 25 uur: constante windsnelheid gelijk aan maatgevend hoge windsnelheid;
- 25 – 48 uur: afname windsnelheid van maatgevend hoge windsnelheid naar nihil.

Zo nodig kunnen de beheerder en toezichthouder lokaal een minder conservatieve stormduur en - verloop vaststellen.

De schade bij een bepaalde overbelasting is als volgt gedefinieerd:

- Begin van schade: $\sum (u^2 - u_c^2) = 500 \text{ m}^2/\text{s}^2$
- Meerdere kalen plekken: $\sum (u^2 - u_c^2) = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$
- Bezwijken toplaag: $\sum (u^2 - u_c^2) = 3500 \text{ m}^2/\text{s}^2$



Figuur D.2 en D.3 Cumulatieve overslagbelasting

De figuur presenteert de cumulatieve overslagbelasting per uur als functie van het gemiddeld golfoverslagdebiet voor verschillende golfhogten en een kritische snelheid van 4 m/s [overgenomen uit de Handreiking Grasbekleding, Min. I&M, 2012]. Indien de cumulatieve overbelasting lager is dan de kritische waarde van 1000 m^2/s^2 , resulteert het oordeel 'voldoet'. Indien hier niet aan wordt voldaan wordt de beoordeling vervolgd met een geavanceerde toetsing (stap 5).

Stap 5 geavanceerde analyse

In een geavanceerde analyse kan de rekenmethode voor de beoordeling van een grasbekleding nader worden beschouwd. Daarbij kan bijvoorbeeld worden gekeken of de belastingduur en –intensiteit nauwkeuriger kunnen worden bepaald, of dat onzekerheden over parameters kunnen worden beperkt.

Dit kan door nader (lokaal) onderzoek te doen, bijvoorbeeld naar:

- de belastingduur en -intensiteit;
- de windsnelheid (o.a. meewegen ruwheid landschap);
- een hogere toelaatbare kritische snelheid;
- de aanwezige graskwaliteit;
- samenstelling en opbouw van de ondergrond;
- golfgroeiformule.

Hierbij kan een nuttige optimalisatie worden behaald met een probabilistische afleiding van de hydraulische randvoorwaarden. Tenslotte bestaat de mogelijkheid om proefbelastingen uit te voeren.

Onderdeel 3: Beheersmatige gevolgen van overslag

Bij grote overslagdebieten (10 l/m/s en hoger) moet worden gecontroleerd op de gevolgen ten aanzien van de begaanbaarheid en het ontstaan van wateroverlast.

Begaanbaarheid

Bij een gemiddeld overslagdebiet van 10 l/m/s of hoger is de kruin bij maatgevende omstandigheden niet begaanbaar voor inspecties en/of reparatiewerkzaamheden. De beheerder dient aan te tonen dat het eventueel onbegaanbaar zijn van de kruin geen gevaar voor de veiligheid oplevert. Als het onbegaanbaar zijn van de kruin de veiligheid wel in gevaar brengt, is volgt het oordeel 'voldoet niet'.

Wateroverlast

Beoordeeld moet worden of overslag kan leiden tot onaanvaardbare wateroverlast in het beschermde gebied. Cruciaal daarbij is de vraag of wateroverlast de veiligheid in gevaar kan brengen. Ten aanzien van het toelaatbare waterbezwaar geldt dat het oordeel 'voldoet niet' uitsluitend volgt indien overslag de veiligheid in gevaar kan brengen, bijvoorbeeld door beperkte berging of afvoermogelijkheden. Het oordeel is 'voldoet' indien:

- overslag geen of acceptabele overlast veroorzaakt; of:
- overslag wel leidt tot onacceptabele overlast, maar de veiligheid niet bedreigt.

De acceptatie van overlast kan bijvoorbeeld volgen uit een toetsing ten aanzien van NBW-normen voor wateroverlast (let wel: dit betreffen een ander soort normen). Het niet voldoen aan deze normen kan een reden zijn tot maatregelen ter verlaging van het overslagdebiet.

1.3. Piping / Heave

De beoordeling op piping en heave volgt het algemene schema in figuur D.4. Het toetsproces kent drie niveau's, die hieronder worden toegelicht.

1.3.1. Eenvoudige beoordeling

De beoordeling op eenvoudig niveau betreft een controle of de opbouw van de dijk en ondergrond gevoelig is voor piping. Van belang daarbij is het aan- of afwezig zijn van een afdekkend en samenhangend slecht doorlatend pakket.

Het mechanisme piping is niet relevant indien wordt voldaan aan één van onderstaande voorwaarden:

- A. De dijk is opgebouwd uit zand, en ligt direct op de zandondergrond;
- B. Een intredepunt is afwezig;
- C. Een uittredepunt is afwezig;
- D. Verticaal zandtransport (heave) treedt niet op.

Bij toepassing van de eenvoudige methode kan voor de beschouwing van de voorwaarden C en D de stijghoogte in de zandondergrond eenvoudig gelijk worden verondersteld aan het toetspeil, uitgaande van een volledige

respons van de stijghoogtepotentialiaal in de gehele watervoerende laag. Hierbij mag een opdrukveiligheid van 1,0 worden gehanteerd.

Ad. A: zanddijk direct op zandondergrond

Bij zanddijken direct op de zandondergrond treedt piping niet op. Belangrijk aandachtspunt bij deze voorwaarde is dat zich direct onder de zool van de dijk en in de top van de zandondergrond geen (lokaal aanwezige) slecht doorlatende klei- of veenlagen bevinden. In geval van twijfel over de opbouw van de dijk moet worden uitgegaan van een kleidijk.

Ad B. afwezigheid van een intredepunt

Het intredepunt is het dichtst bij de dijk gelegen punt waar de watervoerende zandondergrond of watervoerende tussenzandlagen in direct contact staan met het oppervlaktewater. Specifiek voor boezem- en kanaalkaden geldt dat een boezem of kanaal soms beperkte breedte heeft. Indien over de volledige breedte op de waterbodem een slecht doorlatend pakket met voldoende hydraulische weerstand altijd aanwezig is, is een intredepunt afwezig. In dat geval bestaat geen gevaar voor piping.

Ten aanzien van dit slecht doorlatend pakket op de waterbodem geldt dat:

1. dit een dikte van tenminste 1,5 m moet hebben;
2. dit voldoende slecht doorlatend is cq. voldoende hydraulische weerstand heeft;
3. moet worden aangetoond dat het niet (gedeeltelijk) zal opdrijven;
4. het optreden van hydraulische kortsluiting kan worden uitgesloten.

Ad.1: de dikte van het slecht doorlatende pakket van 1,5 meter is een minimumeis. Deze dikte is inclusief een marge in verband met de (on-) nauwkeurigheid van baggerwerkzaamheden. Bij de bepaling van de dikte geldt als voorwaarde dat moet worden uitgegaan van de onderhoudsdiepte van de boezem of het kanaal (Leggerprofiel), een eventuele sliblaag ten gevolge van achterstallig baggeronderhoud mag niet worden meegenomen bij de bepaling van de dikte.

Ad.2: hiervoor gelden de volgende eisen aan de textuur:

- het lutumgehalte bedraagt meer dan 20%;
- het zandgehalte bedraagt minder dan 35%.

Ad.3: beoordeeld moet worden of het betreffende pakket kan opdrijven (zie par C 1.2). Deze beoordeling kan worden gecombineerd met de beoordeling van de kans op hydraulische kortsluiting.

Indien een gedeelte van het pakket kan opdrijven moet worden beoordeeld of de resterende dikte voldoet aan bovengenoemde eisen 1 en 2. Indien niet wordt voldaan aan de eisen is sprake van een intredepunt.

Indien de afdekkende slecht doorlatende deklaag geheel kan opdrijven is per definitie sprake van een intredepunt. De controle op aanwezigheid van een intredepunt dient uit te gaan van de dikte van de slecht doorlatende deklaag / waterbodem na eventueel opdrijven. Indien een (na opdrijven resterende) slecht doorlatende laag niet voldoet aan deze eisen, mag bij de beoordeling op gedetailleerd niveau wel rekening worden gehouden met de hydraulische weerstand van deze laag (zie ook Module C).

¹⁷ In deze situatie kan de stijghoogte in de zandondergrond leiden tot een extra hoge freatische grondwaterstand in het dijklichaam. Hiermee dient goed rekening te worden gehouden bij beschouwing van de overige faalmechanismen.

Ad.4 Zie paragraaf B 1.4.

De aanwezigheid van een slecht doorlatend pakket moet worden aangetoond met behulp van lokaal grondonderzoek. Dit kan bestaan uit:

1. direct: bepaling van de bodemopbouw door middel van ondiepe boringen en / of sonderingen vanaf het water;
2. indirect: geohydrologisch onderzoek naar de stijghoogte in de (tussen-) zandlagen, op basis van de stijghoogte kan eveneens een uitspraak worden gedaan over het eventuele hydraulische contact tussen het boezem- of kanaalwater en de watervoerende zandlagen;
3. geofysisch: de aanwezigheid van een slecht doorlatend pakket kan worden aangetoond met geofysische onderzoekstechnieken .

De beheerder dient aan te tonen dat het slecht doorlatende pakket aanwezig blijft.

Ad.C: afwezigheid uittredepunt

Indien in het achterland de deklaag niet opbarst en ook niet anderszins geperforeerd is, is een uittredepunt niet aanwezig. Het uittredepunt ligt in het algemeen bij de binnenteen of een teensloot (indien aanwezig). Bij een aflopend of onregelmatig maaiveld kan het uittredepunt verder van de binnenteen liggen. In dergelijke situaties dient voor meerdere locaties te worden gecontroleerd of sprake is van opbarsten. Wanneer voor elke locatie binnendijks uit deze controle blijkt dat de veiligheid tegen opbarsten voldoende is, en de deklaag niet anderszins geperforeerd is, mag worden aangenomen dat een uittredepunt niet aanwezig is.

Ad.D: geen verticaal zandtransport

Indien wel sprake kan zijn van het opbarsten van een afdekkend slecht doorlatende pakket, of wanneer dit pakket anderszins geperforeerd is, bestaat geen gevaar voor piping indien verticaal zandtransport niet kan optreden. Verticaal zandtransport door een opbarstkanaal of perforatie treedt pas op als het verticaal verhang over het kanaal groter is dan het kritieke verhang. Aan de hand van een beoordeling op heave kan worden gecontroleerd of verticaal zandtransport kan optreden.

Deze controle kan uitgevoerd worden door het kritieke verhang (ic) te berekenen met de volgende formule [Deltares, 2012]:

¹⁸ Hierbij dient zo nodig gecorrigeerd te worden voor de eventuele aanwezigheid van een sliblaag op de waterbodem ten gevolge van achterstallig baggerwerk

¹⁹ In [STOWA, 2015] worden ter informatie enkele technieken beschreven

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{(1-n)(\gamma_p - \gamma_w)}{\gamma_w} \geq \frac{\varphi_o - h_p}{x}$$

Hierin is:

- γ' het ondergedompeld volumegewicht van de grond [kN/m³]
- γ_w het volumegewicht van het (grond)water [kN/m³]
- φ_o de stijghoogte ter plaatse van de onderkant van het kwelscherm [m ten opzichte van referentie] waar het uittreeverhang maximaal is.
- h_p het polderpeil (vrije waterspiegel of maaiveld) [m ten opzichte van referentie]
- n de porositeit [-] in de zandlaag
- γ_p het volumegewicht van het korrelmateriaal [= 26 kN/m³]
- x afstand waar het uittreeverhang maximaal is [m]

Het heave criterium luidt:

$$i_{optr} = \left(\frac{\varphi_o - h_p}{D} \right)_{optr} \leq i_{toel}$$

Waarin i_{optr} het optredend verhang is en i_{toel} een veilige toelaatbare waarde van het verhang. De veilige waarde bedraagt 0,5 [-]. Voor nadere info en mogelijkheden om de toelaatbare waarde aan te passen wordt verwezen naar het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen [Deltares, 2012].

Deze voorwaarde betreffende de afwezigheid van verticaal zandtransport geldt niet voor een situatie met horizontaal uittredende grondwaterstroming, zoals in het talud van een teensloot.

1.3.2. Gedetailleerde beoordeling

Indien uit de eenvoudige beoordeling blijkt dat piping een relevant mechanisme is, dient een gedetailleerde beoordeling te worden uitgevoerd. De gedetailleerde beoordeling betreft een nadere controle op opbarsten en heave op basis van een gedetailleerde bepaling van de stijghoogte, en vervolgens een beoordeling op piping aan de hand van de nieuwe rekenregel Sellmeijer zoals beschreven in het onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen [Min. I&M, 2012]. Benadrukt wordt dat de methode Bligh niet is toegestaan.

De gedetailleerde beoordeling betreft de volgende stappen:

- bepaling of sprake kan zijn van heave indien de stijghoogte gedetailleerd wordt berekend;
- bepaling of sprake kan zijn van opbarsten van de afdekkende laag in het achterland indien de stijghoogte gedetailleerd wordt berekend;
- controle of de dijk aan de toetsingsregel voldoet.

Nadere toelichting bij de stappen.

Bij de bepaling van de stijghoogte voor de controle op heave en / of opbarsten is het van belang onderscheid te maken tussen de situatie zonder en met optreden van hydraulische kortsluiting. Indien het optreden van

hydraulische kortsluiting:

- met voldoende waarschijnlijkheid kan worden uitgesloten vormt de geohydrologische uitgangssituatie de basis voor de vaststelling van de maatgevende waarde de stijghoogte en de opwaartse waterdruk;
- niet uitgesloten kan worden dient de stijghoogte en de opwaartse druk te worden gecorrigeerd, tot maximaal de maatgevende hoogwaterstand (deze stijghoogte kan veelal aanzienlijk worden aangescherpt, bijv. door in een nadere geohydrologische analyse de intredeweerstand in rekening te brengen).

Voor criteria wanneer het optreden van kortsluiting als weinig waarschijnlijk mag worden verondersteld, wordt verwezen naar paragraaf B 1.4.

Verder geldt dat de invloed van hydraulische kortsluiting op de stijghoogte in de zandondergrond sterk verschilt per situatie, vooral afhankelijk van de transmissiviteit van de zandpakket. Vooral bij een lage transmissiviteit is de invloed groot.

Uitgangspunten aangaande onzekerheden (zoals diepe grondwateronttrekking, ontgravingen in het voorland, aanleg van nevengeulen, ingrepen in de vaargeul, etc.) moeten in overleg met de beheerder worden vastgesteld.

De controle op opbarsten van de deklaag ter plaatse van de 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].

Veiligheidsfactoren bij controle op piping

De herziene rekenregel Sellmeijer voor de controle op piping kent 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, in STOWA, 2015]. Uit de resulterende indruk van de betrouwbaarheid (de faalkans) op dwarsdoorsnedeniveau, is door experts de veiligheidsfactor gekozen. Onderstaande tabel presenteert de waarden van de veiligheidsfactor die gehanteerd moet worden.

Een situatie met horizontale uittreding valt onder "geen deklaag binnendijks".

Tabel D.2 Veiligheidsfactor γ piping

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

Ten aanzien van deze waarden gelden enkele opmerkingen.

Faalkansbegroting

Bij de afleiding van deze waarden is uitgegaan van de vigerende faalkansbegroting, daarin is 5% van de faalkansruimte voor stabiliteit toegekend aan piping. Dit is betrekkelijk streng, ter vergelijking: voor primaire keringen wordt in het Ontwerpinstrumentarium 24% toegekend aan piping. Door toekenning van een faalkansruimte van 5% resulteren betrekkelijk hoge waarden voor de partiële veiligheidsfactoren.

Aanwezigheid deklaag binnendijks

De aanwezigheid en dikte van een deklaag binnendijks hebben significante invloed op de berekende faalkans. Dit volgt uit de zgn. 0,3d regel bij de bepaling van het kritieke verval, bij grote dikten van de deklaag heeft deze component een forse invloed op het kritieke verval. Bij de bepaling van de waarde van de veiligheidsfactor is daarom onderscheid gemaakt in het al of niet aanwezig zijn en dikte van de deklaag.

Lengte effect

Een veiligheidsfactor voor het lengte-effect is niet geïntroduceerd, dit wijkt af van de beoordelingswijze voor de primaire keringen. Het verwaarlozen van het lengte-effect heeft als consequentie dat bij de controle op piping veel zorg moet worden besteed aan de selectie van het maatgevende dwarsprofiel. Zie ook module C hierover.

Bewezen sterkte

Uit de kalibratie-berekeningen blijkt dat met name (variaties in) de sterkte van een kering invloed heeft op de betrouwbaarheid. Dit hangt samen met de betrekkelijk geringe variatie in de belasting (zelfs voor keringen langs regionale rivieren). De grote invloed van de sterkte maakt dat de toepassing van een aanpak met bewezen sterkte kansrijk is voor een verbetering van het toetsoordeel. De bewezen sterkte kan zich daarbij richten op de beoordeling op het mechanisme piping zelf, als op bewezen sterkte betreffende gerelateerde verschijnselen (opbarsten deklaag) of uitgangspunten (metingen van de stijghoogte). Deze aanpak behoort tot het geavanceerde niveau, en wordt niet in deze Leidraad beschreven.

Voor aanwijzingen betreffende de beoordeling van heave en opbarsten wordt verwezen naar [Deltares, 2012].

Ten aanzien van de gedetailleerde beoordeling van piping en de bepaling van de stijghoogte gelden de aanwijzingen voor optimalisatie van de uitgangspunten / schematisering zoals opgenomen in module C.

1.3.3. Geavanceerde beoordeling

Indien na een gedetailleerde beoordeling het gevaar voor piping niet kan worden uitgesloten, dient een geavanceerde beoordeling te worden uitgevoerd. In deze beoordeling kan aanvullend rekening worden gehouden met specifieke, al dan niet lokaal aanwezige, kenmerken. Voorbeelden van dergelijke kenmerken zijn:

- niet-stationaire berekening van de grondwaterspanningen, ten behoeve van de controle op opbarsten en heave;
- bewezen sterkte;
- 3D grondwaterstromingsberekeningen.

1.4. Macrostabieliteit binnentalud

In het beoordelingsschema van stabiliteit zijn drie niveaus van toetsing onderscheiden:

- Eenvoudige beoordeling: op dit niveau kan zonder uitgebreid rekenwerk tot een oordeel worden gekomen op basis van een geometrische toets, eerdere toetsresultaten of op basis van een gehanteerde ontwerpmethodode;
- gedetailleerde beoordeling: een beoordeling aan de hand van rekenmodellen zoals beschreven in de vigerende leidraden en technische rapporten, op basis van een (meer of minder uitgebreide) gegevensverzameling;
- geavanceerde beoordeling: toetsing op basis van de nieuwste kennis over het faalmechanisme, met geavanceerde rekenmodellen, aanscherping van uitgangspunten, andere benaderingen (reststerkte of bewezen sterkte) of een probabilistische aanpak.

1.4.1. Eenvoudige beoordeling

De beoordeling start met de vraag of de stabiliteit van de kering volgens een eerdere toetsing voldeed aan de norm of een verbetering van de stabiliteit is ontworpen, waarbij:

- die toetsing of het ontwerp²⁰ is uitgevoerd volgens vigerende of gelijkwaardige rekenregels; EN:
- de hydraulische belasting en overige belastingen niet ongunstiger zijn geworden; EN:
- overige uitgangspunten en kenmerken (norm, geometrie, etc.) nog actueel zijn, of tenminste niet ongunstiger zijn geworden.

²⁰ De aanleg van de kering conform het ontwerp moet daarbij worden aangetoond

Indien de kering niet voldoet op basis van eerdere toetsing en/of het ontwerp, betreft de eenvoudige toetsing een aanpak met een beoordeling van de stabiliteit op basis van veilige afmetingen. Een beoordeling op dit niveau is alleen interessant voor keringen die (sterk) zijn overgedimensioneerd.

Globale opzet van zo'n beoordeling is:

1. het bepalen van zgn. veilige afmetingen of een beoordelingsprofiel. Dit beoordelingsprofiel betreft de vereiste geometrie van de kade op basis van de lokaal aanwezige kenmerken, waarbij de stabiliteit van het binnentalud juist voldoet aan de norm;
2. het bepalen of de geometrie van de kering voldoet aan deze veilige afmetingen op de peildatum van de toetsing.

Een generieke methode is niet ontwikkeld, onder andere omdat specifieke kenmerken van de regionale keringen verspreid in het land maken dat een kering al snel buiten het toepassingsgebied van zo'n generieke methode valt of dat zo'n methode te conservatief is en lokale aanscherping wenselijk is. Evident veilige afmetingen dienen zodoende door de waterkeringbeheerder zelf te worden bepaald, waarbij het aanbeveling verdient zo veel mogelijk rekening te houden met de lokale kenmerken van de belasting en sterkte van de betreffende regionale keringen.

Algemeen gesteld dient een methode voor een beoordeling op basis van veilige afmetingen in ieder geval te voldoen aan alle onderstaande eisen:

- Bij het opstellen van de methode is gebruik gemaakt van een volwaardige gedetailleerde toets ter validatie;
- Het is duidelijk welke uitgangspunten in de berekeningen zijn gehanteerd en hoe deze in de berekeningen zijn verdisconteerd. Dit betreft bijvoorbeeld de aanpassingspercentages en belastingspreiding die is aangehouden bij het verrekenen van de verkeersbelasting, ondergrondschematisaties, stijghoogten, etc.;
- Het veilige profiel voor een bepaalde klasse/groep is afgeleid op basis van de meest ongunstige/maatgevende combinatie van uitgangspunten die op de betreffende klasse/groep van toepassing zijn verklaard;
- De methode bevat een duidelijk instructie voor het gebruik, zodat foutief gebruik ten gevolge van onduidelijkheid in het gebruik van de methode (met voldoende zekerheid) uitgesloten kan worden.

Opmerking:

Voor methoden die afwijkend van opzet zijn van bovenstaande eisen wordt de waterkeringbeheerder (in samenwerking met de toezichthouder) de mogelijkheid geboden om de methode te bespreken met STOWA, of (al dan niet via STOWA) in één van de gelieerde expertgroepen of voor advies voor te leggen aan het ENW.

1.4.2. Gedetailleerde beoordeling

De beoordeling op dit niveau betreft een berekening van de stabiliteit aan de hand van rekenmodellen.

Nadere informatie

Veel kennis over de afleiding van de schuifsterkte parameters, de schematisering en de materiaalmodellen en rekenmodellen is beschreven in rapporten die worden samengesteld voor het WTI2017. Deze rapporten zijn op dit moment nog in wording, referenties ontbreken. Algemeen wordt aanbevolen voorafgaand aan een toetsing zich op de hoogte te stellen van alle uitgekomen publicaties. Zie hiervoor bijvoorbeeld de Helpdeskwater: www.helpdeskwater.nl.

De gedetailleerde beoordeling van de macrostabiliteit bestaat uit de volgende stappen:

- Stap 1: vaststellen relevante belasting (-en);
- Stap 2: bepalen veilige schematisering;
- Stap 3: berekenen stabiliteit

- Stap 4: toetsen berekende stabiliteitsfactor aan vereiste stabiliteitsfactor. Onderstaand volgt een toelichting bij de stappen, een nadere toelichting bij enkele specifieke onderdelen van deze stappen is beschreven in deel Sterkte en Schematisering.

Opgemerkt wordt dat het toepassen van een restbreedte benadering (zie bijlage 3 voor een werkwijze) valt onder de gedetailleerde beoordeling. Deze benadering kan alleen worden toegepast bij een beperkt overslagdebiet ($\leq 0,1$ l/m/s).

Stap 1: vaststellen belastingsituatie en belastingen

Vastgesteld moet worden voor welke belastingsituaties de stabiliteit berekend moet worden, en welke overige belastingen daarbij kunnen optreden. Aandachtspunten zijn:

- belastingsituatie hoogwater en eventueel droogte;
- hydraulische kortsluiting;
- overige belastingen: verkeer, etc.;

De situatie hoogwater met toetspeil op het regionaal watersysteem moet voor alle keringen worden beschouwd.

De situatie droogte moet aanvullend worden beschouwd indien een waterkering droogtegevoelig is. Of een waterkering droogtegevoelig is kan worden beoordeeld volgens het schema in paragraaf C 2.3. Beschouwing van de situatie droogte is alleen relevant indien tijdens of kort na een periode met langdurige droogte een waterstand in het regionale watersysteem hoger dan het maaiveldniveau in het achterland kan optreden. Alleen in dat geval wordt de verdroogde waterkering hydraulisch belast, en kan aantasting van de waterkering tot overstroming leiden. Hierbij moet worden uitgegaan van een waterstand met een overschrijdingsfrequentie van 1/1 per jaar. Deze situatie is dus vooral relevant voor boezem- en kanaalkaden. Voor droogtegevoelige waterkeringen dient voor de beoordeling van de stabiliteit tijdens droogte tevens op horizontaal evenwicht te worden gecontroleerd.

Vastgesteld moet worden of hydraulische kortsluiting kan optreden, te beoordelen volgens het schema in module A. Indien hydraulische kortsluiting kan optreden, moet hiermee bij de schematisering van de stijghoogte rekening worden gehouden.

Aanvullend op de belastingsituatie en de hydraulische belastingen daarbij moet worden vastgesteld in welke mate andere belastingen kunnen optreden, zoals genoemd in paragraaf B 1.5 verkeersbelasting, aanvaringen, etc.).

Extreme neerslag hoeft als belastingsituatie niet afzonderlijk te worden beschouwd. Bij de schematisering van de waterspanningen moet wel rekening worden gehouden met neerslag, in een hoeveelheid zoals die tijdens de hoogwatersituatie kan optreden. Aanwijzingen worden beschreven in het TR Waterspanningen bij Dijken [TAW, 2001].

Boezem- en kanaalkaden

Voor boezem- en kanaalkaden kan een verhoogde grondwaterstand door extreme neerslag ook tijdens reguliere waterstanden maatgevend zijn. Deze situatie hoeft niet aanvullend te worden beschouwd.

Tenslotte moet rekening worden gehouden met de grootte van het overslagdebiet. Indien een niet verwaarloosbaar overslagdebiet kan optreden ($> 0,1$ l/m/s) dient hiermee bij de schematisering van de waterspanningen rekening te worden gehouden.

Stap 2: bepalen veilige schematisering

Het opstellen van een maatgevend profiel voor een sectie is een belangrijk onderdeel van de toetsing. Van

belang bij de schematisering is achtereenvolgens een goede inventarisatie van aanwezige onzekerheden in de schematisering en de beschouwing van de invloed daarvan op de beoordeling van de stabiliteit. Onzekerheden die significante invloed op de berekende stabiliteit hebben, dienen in beginsel te worden verkleind door nader (grond-) onderzoek uit te voeren. Diverse algemene aanwijzingen voor de omgang met schematiseringsonzekerheden en de wijze waarop deze kunnen worden gereduceerd of zelfs geëlimineerd door nader (grond-) onderzoek worden onder andere beschreven in het Technisch Rapport Grondmechanische Schematisering bij Dijken [ENW, 2012]. Specifieke aanwijzingen voor de schematisering worden beschreven in de Schematiseringshandleiding Macrostabiliteit bij het WTI2017 [i.o.].

Een grove indeling in secties en een opeenstapeling van verschillende conservatieve kenmerken van bijv. de kerende hoogte, taludhelling, bodemopbouw en waterspanningen geeft een onnodig conservatief maatgevend profiel. Dit kan leiden tot het onnodig afkeuren van grote dijkstrekkingen, en resulteert in een onrealistisch beeld van de veiligheid.

In combinatie met het bepalen van de veilige schematisering wordt de schematiseringsfactor bepaald. Zie stap 4 en een meer gedetailleerde toelichting in deel Sterkte en Schematisering.

Stap 3: berekenen stabiliteit

Voorafgaand aan de daadwerkelijke berekening van de stabiliteit dient het glijvlakmodel. Aanwijzingen voor de keuze zijn beschreven in module C.

Stap 4: toetsen berekende stabiliteitsfactor aan vereiste stabiliteitsfactor

Voor de gedetailleerde stabiliteitsanalyses wordt een semi-probabilistische methode gehanteerd.

Bij toetsing op macrostabiliteit wordt de berekende stabiliteitsfactor getoetst aan een vereiste stabiliteitsfactor. De stabiliteitseis luidt:

$$F / \gamma_n \gamma_d \gamma_s \geq 1,0$$

Waarin:

F	= stabiliteitsfactor berekend bij rekenwaarden van de sterkte [-]
γ_n	= schadefactor [-]
γ_d	= modelfactor [-]
γ_s	= schematiseringsfactor [-]

Deze stabiliteitseis geldt bij het hanteren van rekenwaarden van de sterkte van de grondlagen. Voor de afleiding van de rekenwaarden moeten de karakteristieke waarden worden gedeeld door de materiaalfactor.

Deze partiële veiligheidsfactoren worden gedetailleerd toegelicht in module C.

1.4.3. Beoordeling op geavanceerd niveau

Indien de gedetailleerde toetsing niet leidt tot het oordeel dat de stabiliteit voldoet aan de norm, wordt de toetsing vervolgd op het zgn. geavanceerde niveau. Indien echter aannemelijk kan worden gemaakt dat een geavanceerde toetsing niet kan leiden tot het oordeel dat de stabiliteit van de kering voldoet aan de norm, hoeft een geavanceerde toets niet verder te worden uitgevoerd. Zodoende dient als eerste stap van een geavanceerde toetsing te worden nagegaan of een geavanceerde toetsing zin heeft (en welke methodes in aanmerking komen). Indien een geavanceerde toets geen zin heeft, dient dit te worden gemotiveerd in het toetsrapport.

Voor macrostabiliteit binnenwaarts bestaan verschillende methodes die een scherpere beoordeling mogelijk maken, zoals bijvoorbeeld:

- aanvullend grondonderzoek, gericht op zowel de bodemopbouw als sterkte-eigenschappen en/of waterspanningen;
- gebruik van zgn. eindige elementen methode (EEM), eventueel in combinatie met geavanceerde materiaalmodellen hierbij kan de werkelijke sterkte beter worden benaderd, door bijvoorbeeld het beter in rekening brengen van de afhankelijkheid van sterkte, vervorming en opbouw

- van waterspanningen tijdens vervormen (ongedraineerd gedrag etc.). Bij EEM wordt geen glijvlak opgelegd. Aan het gebruik van dergelijke modellen dient een zorgvuldige parameteranalyse vooraf te gaan;
- het beoordelen van de macrostabiliteit op basis van bewezen sterkte; aanwijzingen voor deze beoordeling worden gegeven in [ENW, 2009];
 - het nauwkeuriger voorspellen van het freatisch vlak in de waterkering; dit kan vooral zinvol zijn voor dijken met een relatief kortdurend hoogwater;
 - het beter voorspellen van de stijghoogte in watervoerende lagen vooral relevant in geval van opdrijf- of opbarstgevoelige situaties. Hierbij kan worden gedacht aan niet-stationaire grondwaterstromingsmodellen voor situaties waarbij de duur van hoogwater relatief kort is (getijdengebied) of ruimtelijke grondwaterstromingsmodellen (driedimensionaal of quasi driedimensionaal) voor situaties waarbij de geometrie of laagopbouw niet uniform is in de richting van de waterkering of loodrecht op de waterkering;
 - voor droogtegevoelige kaden: het optimaliseren van de schematisering van verdroging de generieke aanwijzingen voor de schematisering van verdroging (gericht op niveau freatische grondwaterstand en volumiek gewicht onverzadigde zone) zijn conservatief. Lokaal is optimalisatie van de schematisering denkbaar, speciaal wanneer de kade een lage veiligheidsnorm heeft.
 - het aanscherpen / optimaliseren van de partiële veiligheidsfactoren het afstemmen van de partiële veiligheidsfactoren op de lokale situatie en de mate waarin onzekerheden invloed hebben op de berekende stabiliteit van de beschouwde waterkering (vooruitlopend op een eventuele landelijke aanpassing van deze factoren voor de regionale waterkeringen);
 - het uitvoeren van een probabilistische stabiliteitsanalyse.

1.5. Macrostabiliteit buitentalud

In het beoordelingsschema van stabiliteit zijn drie niveaus van toetsing onderscheiden:

- Eenvoudig niveau: waarop zonder uitgebreid rekenwerk tot een oordeel kan worden gekomen;
- gedetailleerde niveau: een beoordeling aan de hand van rekenmodellen zoals beschreven in de vigerende leidraden en technische rapporten;
- geavanceerde niveau: toetsing op basis van geavanceerde rekenmodellen, aanscherping van uitgangspunten, andere benaderingen (reststerkte of bewezen sterkte) of een redenatie betreffende het niet van belang zijn van dit mechanisme voor de veiligheid van de betreffende waterkering.

De maatgevende situatie voor dit mechanisme vormt de combinatie van een daling van de buitenwaterstand en een hoge freatische grondwaterstand in het dijklichaam, door het hoge water en eventueel neerslag en/of overslag. Voor keringen die normaliter geen water keren, zoals veel keringen langs regionale rivieren en compartimenteringskeringen, is dit een voldoende eenduidige situatie. Voor permanent waterkerende boezem- en kanaalkaden kunnen aanvullende belastingsituaties van toepassing zijn, zie paragraaf C 2.1. Het optreden van deze situaties is niet bij alle kadetrajecten of typen waterkeringen realistisch.

Het optreden van een belastingsituatie en het eventueel bezwijken van de kade daardoor hoeft niet altijd te resulteren in een doorbraak van de betreffende kering (zie geavanceerde beoordeling, paragraaf D 1.5.3). Het is zodoende niet noodzakelijk dit faalmechanisme bij alle dijkvakken te beschouwen.

In dat opzicht kan ook worden overwogen bij de beoordeling vroegtijdig het (ontbreken van het) belang van dit mechanisme voor de veiligheid van de waterkering aan te tonen.

Opgemerkt wordt dat voor de beoordeling van de buitenwaartse stabiliteit de hoogwater situatie in beginsel altijd maatgevend zal zijn ten opzichte van de droge situatie. Dit houdt in dat voor droogtegevoelige kaden dit faalmechanisme niet voor de situatie droogte getoetst hoeft te worden.

1.5.1. Eenvoudige beoordeling

De beoordeling start met de vraag of de stabiliteit van de kering volgens een eerdere toetsing voldeed aan de norm of een verbetering van de stabiliteit is ontworpen. Zie voor de uitwerking verder de aanwijzingen bij paragraaf D 1.4.1 (stabiliteit binnenwaarts).

Bij de eenvoudige beoordeling kan ook worden ingegaan op de vraag of macro-instabiliteit van het buitentalud een rol speelt in de veiligheid van de waterkering. Indien aangetoond kan worden dat stabiliteit van het buitentalud niet van belang is, kan het oordeel 'voldoet' worden gegeven. Argumenten bij deze beoordeling zijn bijvoorbeeld:

- de genoemde oorzaken (paragraaf C 2.1) voor instabiliteit van het buitentalud treden niet op (met name van toepassing voor boezem- en kanaalkaden);
- de kans op het optreden van een hoog water binnen een periode waarin het herstel van schade aan een afgeschoven buitentalud mogelijk is, in combinatie met de kans dat daardoor een overstroming optreedt (o.b.v. een beoordeling van de sterkte van het resterende profiel na afschuiving).

1.5.2. Gedetailleerde beoordeling

Voor deze beoordeling gelden ten aanzien van de stabiliteitsberekening dezelfde aanwijzingen als voor de beoordeling van de stabiliteit binnenwaarts.

Belangrijkste verschil betreft de belastingsituatie. Zoals gesteld betreft dit voor alle typen regionale waterkeringen de situatie met een daling van de buitenwaterstand na het optreden van de maatgevend hoogwaterstand. Voor permanent waterkerende boezem- en kanaalkaden kunnen aanvullende belastingen (door andere oorzaken dan een hoogwater) ook leiden tot het moeten beschouwen van de stabiliteit van het buitentalud. Het is daarbij niet uitgesloten dat bij deze analyse meerdere situaties beschouwd moeten worden, afhankelijk van de oorzaken die kunnen optreden.

In geval van een beoordeling aan de hand van het resultaat van een stabiliteitsberekening kan in eerste instantie worden getoetst aan dezelfde stabiliteitsnorm als bij macro-instabiliteit binnentalud (zie paragraaf C 2.5). In veel gevallen zullen de gevolgen van macro-instabiliteit van het buitentalud beperkt blijven, en kan wellicht ook een lagere (afhankelijk van de verwachte schade nader te bepalen) schadefactor worden gehanteerd. Een lagere schadefactor specifiek voor stabiliteit buitenwaarts is niet vastgesteld (vanwege alle overige ontwikkelingen cq. veranderingen rondom macrostabiliteit).

1.5.3. Geavanceerde beoordeling

Indien de gedetailleerde toetsing niet leidt tot het oordeel dat de stabiliteit voldoet aan de norm, wordt de toetsing vervolgd op het zgn. geavanceerde niveau. Indien aannemelijk kan worden gemaakt dat een geavanceerde toetsing niet kan leiden tot het oordeel 'voldoet', hoeft een geavanceerde toets niet verder te worden uitgevoerd.

Voor macrostabiliteit buitenwaarts bestaan enkele werkwijzen die een scherpere beoordeling mogelijk maken, zoals ook genoemd in par. C 2.5 voor stabiliteit binnenwaarts. Specifiek genoemd wordt de mogelijkheid van een restbreedte benadering, bijlage 4 presenteert een restbreedte methode voor het buitentalud. Deze is gebaseerd op de restbreedte methode voor het binnentalud, waarbij een aantal aanpassingen en aanvullingen zijn voorgesteld. Belangrijkste aanpassingen zijn (1) het in rekening brengen van een erosietoeslag op het gereduceerde profiel en (2) de minimaal benodigde kruinbreedte.

1.5.4. Grondkerende constructies in het buitentalud

Grondkerende constructies, met name houten of stalen damwandconstructies, komen in regionale keringen veelal langs de buitenkant van de waterkering voor. Bij de beoordeling van de stabiliteit buitenwaarts is het van belang of het falen van dergelijke constructies kan leiden tot een overstroming. Indien het falen van de constructie:

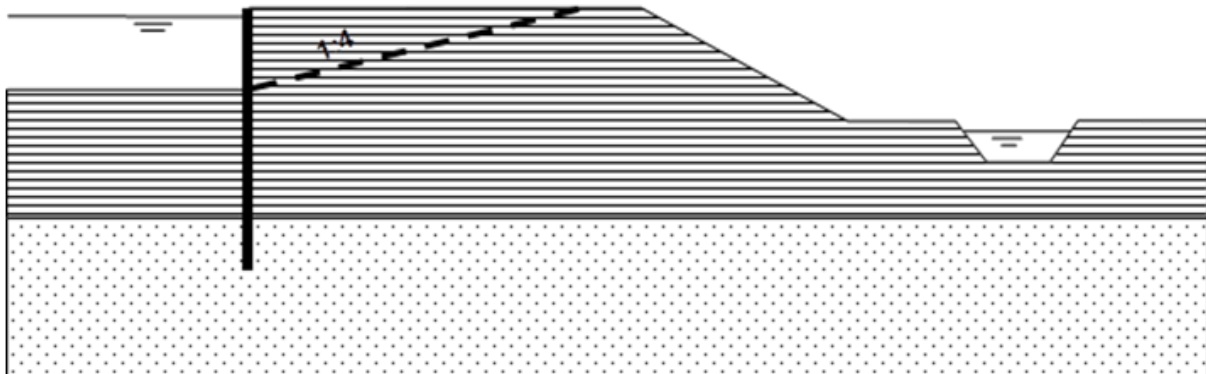
- wel kan leiden tot een overstrooming is de grondkerende constructie nodig voor het waterkerende vermogen van de waterkering, de constructie maakt dan deel uit van de waterkering (als een zgn. bijzondere waterkerende constructie) en dient de sterkte en stabiliteit van de constructie te worden beoordeeld;
- niet kan leiden tot een overstrooming is de grondkerende constructie niet nodig voor het waterkerende vermogen van de waterkering, de constructie maakt dan geen deel uit van de waterkering en hoeft de sterkte en stabiliteit van de constructie niet te worden beoordeeld.

Het falen van een grondkerende constructie leidt niet tot een overstrooming indien ondanks de aantasting van de waterkering de resterende kruinbreedte op het niveau van de vereiste kruinhoogte minimaal 1,5 meter bedraagt. Bij deze beoordeling kan voor de aantasting worden uitgegaan van een afschuiving onder een 1:4 helling, gerekend vanuit het niveau van de waterbodem ter plaatse van de constructie (zie figuur D.5 voor een illustratie). Daarbij geldt ten aanzien van de opbouw van het kadelichaam het volgende:

- indien het kadelichaam is opgebouwd uit klei waarvan de ongedraineerde schuifsterkte c_u [in kPa] groter is dan 3,5 maal de kerende hoogte [in meters], mag worden uitgegaan van een helling van 1:2;
- indien het kadelichaam is opgebouwd uit zand wat niet goed verdicht is, dient in verband met verweking een helling van 1:7 te worden gehanteerd;
- indien sprake is van een heterogeen opgebouwd kadelichaam dient te worden uitgegaan van de maatgevende grondsoort.

Bij deze restbreedte is geen reserve aanwezig ter compensatie van verdere erosie door golfaanval of langsstroming, zodat rekening moet worden gehouden met het treffen van (nood-) maatregelen.

Deze werkwijze kan niet worden toegepast indien bij de beoordeling op macrostabiliteit binnenwaarts een restbreedte – benadering of zonering is toegepast en onvoldoende kruinbreedte resteert.



Figuur D.4 Geometrische controle waterkerende veiligheid na falen damwandconstructie

1.6. Microstabiliteit

Onder micro-instabiliteit wordt verstaan het uitspoelen van zand uit het binnentalud van de kering door uittredend grondwater. Hierdoor wordt het profiel van de kering aangetast. Bij microstabiliteit komt de bedreiging voor de stabiliteit van binnenuit, veroorzaakt door een hoge freatische lijn in het grondlichaam. Bij dit mechanisme wordt gelet op zeer plaatselijke instabiliteit die echter ook een inleiding tot bezwijken van de gehele waterkering vormt.

Ten gevolge van grondwaterstroming kunnen de volgende vormen van micro-instabiliteit optreden:

- Afdrukken van binnentaludbekleding door waterdrukken in de kern van het dijklichaam bij een minder doorlatende toplaag op een doorlatende kern, bijvoorbeeld een toplaag van klei op een kern van zand.
- Evenwijdig afschuiven van de binnentaludbekleding als gevolg van het stijgen van de freatische lijn in de kering. Uitgegaan wordt van een uniforme opbouw van het dijklichaam (zandkern met een zandige toplaag) en horizontaal uittredend grondwater bij taluds boven water en loodrecht uittredend grondwater bij taluds onder water.
- Uitspoelen van grondeeltjes uit het binnentalud door uittredend grondwater bij een toplaag van ongeveer dezelfde doorlatendheid als de kern van het dijklichaam, bijvoorbeeld bij een zandige toplaag op een zandkern.

Bij deze beoordeling moet worden uitgegaan van het toetspeil in combinatie met een hoge ligging van de freatische lijn.

Voor deze beoordeling wordt verwezen naar het Voorschrift Toetsen op Veiligheid [MVenW, 2007]. Voor inhoudelijke informatie over de beoordeling wordt verwezen naar het TR Waterkerende Grondconstructies [TAW, 2001], en voor aanvullingen betreffende het afschuiven van de deklaag naar de Handreiking Grasbekleding bij Dijken [Deltares, 2012].

1.7. Bekledingen

1.7.1. Buitentalud

Bekledingstype van het buitentalud van regionale waterkeringen betreft overwegend grasbekleding. Op strekkingen waarop een grotere golfaanval voorkomt (windgolven op grotere wateroppervlakten en/of zwaardere golfaanval door scheepvaart) komen ook wel steenbestortingen, steenzettingen of oeverconstructie met damwanden voor. Voor nadere informatie hierover wordt verwezen naar het Technisch Rapport Steenzettingen [TAW, 2003a].

Op enkele regionale kanalen komt zware scheepvaart voor. Verondersteld wordt dat dit, onder reguliere omstandigheden, niet tot aantasting van de bekleding leidt (goed onderhoud). Bij de toetsing van de bekleding tijdens maatgevende omstandigheden dient alleen rekening te worden gehouden met de golfslag door zware scheepvaart indien tijdens deze omstandigheden geen scheepvaartverbod geldt.

De bekleding van het buitentalud kan worden getoetst conform de beoordeling weergegeven in het VTV 2006. Voor aanpassingen specifiek voor de toetsing van grasbekleding wordt verwezen naar de Handreiking Grasbekleding [Deltares, 2012].

Uit proeven [Deltares, 2012] blijkt dat tot een golfhoogte van 0,5 m golfklappen geen erosie van een grasmat veroorzaken, mits sprake is van een gesloten graszode. Dit criterium mag bij de toetsing worden gehanteerd.

Bij de beoordeling van een grasbekleding worden in sommige situaties eisen gesteld aan de samenstelling van de dek- of toplaag. Indien de toetsing niet kan worden uitgevoerd vanwege een hoog gehalte zand en/of organische stof, dan mag de eindscore volledig worden gebaseerd op het beheerdersoordeel. Uitgangspunt voor het beheerdersoordeel "voldoet" is dat op de kruin en het binnen- en buitentalud een open of gesloten grasmat aanwezig is. Nuttige informatie over de onderbouwing van het beheerdersoordeel is te vinden in het STOWA-rapport 'Grond voor kaden' [STOWA, 2008]. Volgens dit rapport is, op basis van een inventarisatie van de schade bij boezemkaden, gebleken dat bij aanwezigheid van een open of gesloten grasmat geen schade aan de kade optreedt die een gevaar zou vormen voor het waterkerend vermogen.

Indien de samenstelling van de top- of deklaag en de kwaliteit van de grasmat beide onvoldoende zijn, dient de beheerder in de rapportage van de toetsing aan te geven welke beheersmaatregelen genomen worden om toch in te kunnen staan voor de veiligheid. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan het toepassen van noodmaatregel tijdens maatgevende omstandigheden.

1.7.2. Kruin en binnentalud

De erosiebestendigheid van de bekleding van kruin en binnentalud zijn bepalend voor het toelaatbaar overslagdebiet over de waterkering. Uitgangspunt is dat de bekleding van kruin en het binnentalud in 'goede staat van onderhoud' worden gehouden. Is dit niet het geval dan moet apart bekeken worden of deze aanleiding geeft het vastgestelde toelaatbare overslagdebiet te verlagen. Indien het overslagdebiet kleiner of gelijk is aan 0,1 l/m/s, hoeft de bekleding niet te worden getoetst omdat het geringe debiet geen gevaar vormt voor de bekleding. Bij een hoger overslagdebiet dient de bekleding te worden getoetst.

De beoordeling van bekleding op de kruin en het binnentalud is beschreven in het VTV 2006. Deze beoordeling is aangepast voor grasbekleding, op basis van het Technisch Rapport Grasbekleding [Deltares, 2012]. De aangepaste beoordelingswijze voor grasbekleding is beschreven in par. D 1.2.

De uiteindelijke score dient te zijn afgestemd met de gehanteerde uitgangspunten bij de toetsing van de hoogte van de kering, in casu het gemiddeld overslagdebiet.

1.8. Stabiliteit voorland

De beoordeling van de stabiliteit van het voorland richt zich op twee mechanismen: afschuiving en zettingsvloeiing.

1.8.1. Eenvoudige beoordeling

De toetsing op basis van een eenvoudige beoordeling bestaat uit de stappen:

1. beoordeling of op basis van een eenvoudige vuistregel kan worden gesteld dat zettingsvloeiing en afschuiving zijn uit te sluiten.
2. nagaan in hoeverre op basis van geometrische criteria kan worden uitgesloten dat het eventueel optreden van het mechanisme de waterkering in gevaar kan brengen (schadelijkheids criterium). Hierbij zijn de diepte van de geul en de afstand tot aan de waterkering van belang.

Vervolgens dient:

- indien wel kan worden uitgesloten dat het mechanisme de waterkering kan bedreigen: op basis van het zgn. bestortingscriterium (stap 3) te worden gecontroleerd of de constructie op lokaal niveau van ontwerp kwaliteit is.
- indien niet kan worden uitgesloten dat het mechanisme de waterkering kan bedreigen: op basis van voornamelijk geometrische criteria worden nagegaan of het mechanisme ook werkelijk op kan treden (optredingscriterium).

Stap 1 is voor beide mechanismen hetzelfde, de uitwerking van stap 2 en 4 verschilt voor de beide mechanismen.

1.8.2. Gedetailleerde / geavanceerde beoordeling

Als op basis van geometrische criteria geen eindscore 'voldoet' kan worden toegekend, is een geotechnische toetsing nodig.

Voor de geotechnische toetsing op Afschuiving bestaat een methode op gedetailleerd niveau. Hierna kan zo nodig de toetsing op geavanceerd niveau worden uitgevoerd.

Voor de geotechnische toetsing op Zettingsvloeiing is alleen een methode op geavanceerd niveau beschikbaar, maar deze beoordeling is alleen nodig als het voorland verwekingsgevoelig materiaal bevat

In navolging van de aanpak bij de verlengde 3de toetsronde voor de primaire keringen geldt voor regionale keringen dat de toepassing van de methodiek in de Handreiking wordt aanbevolen, maar dat de toepassing dient te geschieden als onderdeel van het beheerdersoordeel. Het is daarbij de verwachting dat een beoordeling van het voorland niet vaak nodig zal zijn.

REFERENTIES

- [Deltares, 2012] Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen, Deltares, rapport 1202123-003-GEO-0002, maart 2012.
- [ENW, 2012] Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken. Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, Oktober 2012.
- [Min. I&M, 2012] Handreiking Toetsen Grasbekledingen op Dijken t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde. Min. I&M, RWS Waterdienst, oktober 2012.
- [PZH, 2009] Vuistregels voor het beheerdersoordeel bij de toetsing van niet-waterkerende objecten. Provincie Zuid Holland, mei 2009.
- [STOWA, 2008] Grond voor kaden, monitoring proefvakken op de Kleikade en Doespolderkade, 2008-16
- [STOWA, 2010] Addendum op de leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen betreffende de boezemkaden, ORK2010-22
- [STOWA, 2015] Compendium achtergrondrapportages bij ORK-II, STOWA2015-.
- [TAW, 2001] TRWG, Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies, Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden, TAW richtlijn, juni 2001.
- [TAW, 2003a] Technisch Rapport Steenzettingen achter gronden. TAW richtlijn, 2003.

