

LEIDRAAD TOETSEN OP VEILIGHEID REGIONALE WATERKERINGEN



2015
- 15

MODULE C:
STERKTE

COLOFON

LEIDRAAD TOETSEN OP VEILIGHEID REGIONALE WATERKERINGEN - MODULE C

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 C: STERKTE EN SCHEMATISERING

1.	STERKTE	4
1.1.	HOOGTE	4
1.2.	OPDRIJVEN VAN VEENLAGEN BUITENDIJKS	7
1.3.	PIPING / HEAVE	9
1.4.	MACROSTABILITEIT BINNENTALUD	12
1.5.	MACROSTABILITEIT BUITENTALUD	18
1.6.	STABILITEIT VOORLAND	19
2.	SPECIFIEKE OPMERKINGEN PER TYOPE REGIONALE KERING	21
2.1.	BOEZEM- EN KANAALKADEN	21
2.2.	VEENKADEN	23
2.3.	DROOGTEGEVOELIGE WATERKERINGEN	24
2.4.	KERINGEN LANGS REGIONALE RIVIEREN	26
2.5.	KERINGEN OM WATERBERGINGSGBIEDEN	27
2.6.	COMPARTIMENTERINGSKERING	31
	2.6.1. <i>Belastingcombinaties natte compartimentskeringen</i>	32
	2.6.2. <i>Hydraulische randvoorwaarden</i>	34
	2.6.3. <i>Belastingsituatie droogte</i>	35
	2.6.4. <i>Beoordeling behoud veiligheid - handhaven huidig profiel</i>	35
2.7.	HOGHE GRONDEN	41
2.8.	NIET GENORMEERDE KERINGEN	42

BIJLAGEN

BIJLAGE 1 RAAMWERK PARTIELE VEILIGHEIDSFACTOREN REGIONALE KERINGEN

BIJLAGE 2 AFLEIDING SCHEMATISERINGSFACTOR

BIJLAGE 3 RESTBREEDTE BENADERING STABILITEIT BINNENWAARTS

BIJLAGE 4 RESTBREEDTE BENADERING STABILITEIT BUITENWAARTS

BIJLAGE 5 GOLFHOOGTEN EN GOLFOVERSLAGHOOGTEN

BIJLAGE 6 BEOORDELING BOMEN

BIJLAGE 7 MATRIX WAARNEMINGEN BEHEERDERSOORDEEL DIJKEN

BIJLAGE 8 MATRIX WAARNEMINGEN BEHEERDERSOORDEEL WATERKERENDE KUNSTWERKEN

BIJLAGE 9 KEUZE MAATGEVENDE WIND

BIJLAGE 10 BEOORDELING ONGEDRAINEERDE STABILITEIT VOLGENS CSSM - MODEL

1. STERKTE

1.1. Hoogte

Nieuwe kennis

In het kader van het WTI2011 is nieuwe kennis ontwikkeld over de erosiebestendigheid van een grasbekleding tegen golfoverslag [Deltares, 2012]. Hierbij is op een aantal dijken onderzoek gedaan met een golfoverslagsimulator. Deze kennis is door DGRW beschikbaar gesteld voor toepassing bij het opstellen van het beheerdersoordeel bij de verlengde derde toetsronde.

De oorspronkelijke beoordeling (VTV2006) is gebaseerd op (uitsluitend) het overslagdebiet, een relatie met de golfhoogte wordt daarbij niet gemaakt. Op basis van de ontwikkelde kennis wordt in de nieuwe beoordeling deze relatie wel gelegd. Hierbij wordt tevens rekening gehouden met de verdeling van golfoverslagvolumes in relatie tot het golfoverslagdebiet en de golfhoogte. Daarbij wordt:

- de belasting gekarakteriseerd door de frontsnellheid van een overslaande golf;
- de sterkte gekarakteriseerd door de kritische snelheid;

De beoordeling van de erosiebestendigheid richt zich op de cumulatieve belasting van alle overslaande golven waarbij de kritische snelheid wordt overschreden, gedurende een beschouwde normsituatie.

Deze benadering maakt onderscheid naar de golfhoogte. Daarbij is het gunstig indien een gemiddeld overslagdebiet wordt veroorzaakt door veel overslaande kleine golven in plaats van enkele grote golven. Omdat op regionale wateren overwegend sprake is van beperkte golfhoogten, is deze nieuwe kennis ook van belang voor de beoordeling van regionale keringen. Zodoende is besloten in deze Leidraad gebruik te maken van deze nieuwe kennis. Het toetsspoor is gebaseerd op bovengenoemde nieuwe kennis.

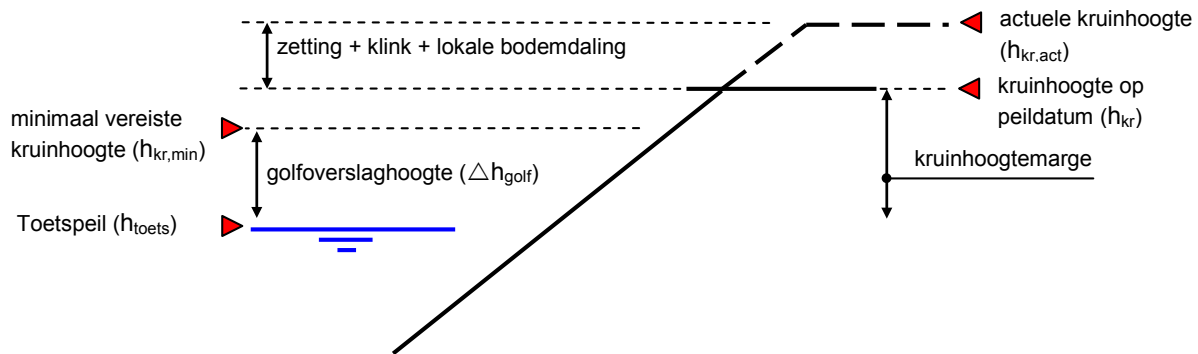
Nadere toelichting

Het beoordelingsspoor Hoogte richt zich primair op de kruinhoogte en de weerstand van de kruin en het binnentalud tegen overslag. Deze weerstand betreft de weerstand tegen erosie en afschuiven van de bekleding. Aanvullend kunnen eisen worden gesteld aan de beheersmatige gevolgen van overslaand water, in verband met mogelijk noodzakelijk ingrijpen onder extreme omstandigheden. De kenmerken van de kering en de aanvullende eisen bepalen in onderlinge samenhang of een kering aan de eisen kan voldoen. Daarbij zijn de beheersmatige gevolgen alleen van belang indien de veiligheid in het geding is.

De wijze van toetsing op erosie en lokaal afschuiven van de bekleding op de kruin en het binnentalud door overslaand water hangt af van het bekledingstype. De stabiliteit van de bekleding van de kruin en het binnentalud wordt apart behandeld in D 1.7.

Grofweg wordt de sterkte bepaald door de dikte en de kwaliteit van de diverse lagen van de bekleding, en de helling van het binnentalud.

Een schematisch overzicht van de belangrijkste begrippen die een rol spelen bij de beoordeling van de kerende hoogte, is weergegeven in Figuur C.1.



Figuur C.1 Definitie begrippen bij beoordeling hoogte

Er geldt:

$$h_{kr} = h_{kr,act} - \Delta h_{kr,zk}$$

$$h_{kr,min} = h_{toets} + \Delta h_{golf}$$

De toets waaraan moet worden voldaan luidt:

$$h_{kr} \geq h_{kr,min}$$

Waarin:

- h_{kr} : verwachte kruinhoogte op peildatum
- $h_{kr,act}$: actuele kruinhoogte (met datum van meting)
- Δh_{zk} : hoogteafname t.g.v. zetting, klink en lokale bodemdaling tot aan peildatum, inclusief momentane verlaging t.g.v. extreme droogte (in geval van veen aan of nabij het oppervlak)
- $h_{kr,min}$: minimaal vereiste kruinhoogte
- h_{toets} : toetspeil
- Δh_{golf} : golfoverslaghoogte

Kruinhoogte

Uitgegaan dient te worden van de verwachte kruinhoogte op peildatum. Hiertoe dient de gemeten kruinhoogte te worden gecompenseerd voor kruindaling gedurende de periode vanaf het inmeten tot de peildatum. Hierbij dient rekening te worden gehouden met zetting (ondergrond), klink en (regionale) bodemdaling (zie paragraaf C 2.6.4, Beoordeling behoud veiligheid). Tijdelijke krimp ten gevolge van droogte is alleen van belang bij droogtegevoelige kaden (zie C 2.3).

Kruindaling droogtegevoelige kaden tijdens droogte

Tijdens droogte kan bij droogtegevoelige kaden sprake zijn van kruindaling door krimp van veen en organische klei. Voor droogtegevoelige kaden moet zodoende tevens de kruinhoogte worden beoordeeld tijdens de situatie droogte. De wijze waarop moet worden beoordeeld of een waterkering droogtegevoelig is, staat beschreven in paragraaf C 2.3. Hierin staat eveneens de kruindaling die moet worden gehanteerd.

Minimale kruinbreedte

De kering moet op het niveau van de vereiste kruinhoogte een kruinbreedte hebben van tenminste 1,5 m. In deze eis zijn aanvullende veiligheidsoverwegingen betrokken, zoals een gewenste onkwetsbaarheid voor zowel langzame aantastingen gedurende het jaar als (on-) voorziene gebeurtenissen tijdens de normsituatie.

Versoepeling van de vereiste breedte voor specifieke situaties en onder strikte voorwaarden is toegestaan. Te denken valt aan situaties waarin de aanvullende veiligheidsoverwegingen minder relevant zijn, bijvoorbeeld bij een geringe kerende hoogte, een flauwe helling van het binnen- en buitentalud, stevig kademateriaal, een beperkte breedte van het regionale water en een hoge frequentie van inspecties op beschadigingen.

Aanscherping vormt een toets op geavanceerd niveau. Aanscherping van de kruinbreedte vergt voldoende motivatie, zulks ter beoordeling van het bevoegd gezag.

Voor overige toepassingen (zoals kadeverbeteringen, ontheffingen / vergunningen, beleid) is aanscherping niet bedoeld, en geldt standaard de minimum eis van 1,5 m kruinbreedte.

Golfoverslaghoogte

Voor de beoordeling van de kruinhoogte van een dijkvak moet de vastgestelde golfhoogte, veelal gekarakteriseerd met de significante golfhoogte, nog worden vertaald naar een minimaal benodigde golfoverslaghoogte. Deze golfoverslaghoogte hangt naast de golfhoogte ook af van de eigenschappen van het buitentalud van de kering, met name de begroeiing / bekleding en de taludhelling.

Ten behoeve van de berekening van de golfrandvoorwaarden is een (maatgevend hoge) windsnelheid benodigd (zie par. B 1.5).

De golfoverslaghoogte kan worden berekend volgens het Technisch Rapport Golfploop en Golfoverslag bij Dijken [TAW, 2002] met PC Overslag, al dan niet probabilistisch met behulp van Promotor. Voor de uitvoering van een eenvoudige beoordeling is een aantal tabellen en grafieken samengesteld waaruit de golfhoogten en golfoverslaghoogte eenvoudig kunnen worden afgelezen (zie bijlage 5). De golfhoogten en golfoverslaghoogten zijn bepaald voor alle combinaties van onderstaand beschreven variatie van de relevante kenmerken:

- | | | |
|----|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 1. | het overslagdebiet: | 0,1 en 1,0 l/m/s; |
| 2. | de maatgevende windsnelheid: | 16, 22, 24, 26, 28, 30 en 32 m/s; |
| 3. | de waterdiepte: | variërend van 2 tot 10 m; |
| 4. | de helling van het buitentalud: | helling 1:2 en 1:3 (V:H); |
| 5. | de breedte van het water (loodrecht): | variërend van 10 tot 5000 m. |

Minimale waakhoogte

Uit proeven is gebleken dat overslag bij kleine golfhoogten niet snel tot schade aan de grasbekleding zal leiden. Op smalle wateren ontstaan geen hoge windgolven, tot een breedte van 25 m bedraagt de golfhoogte maximaal 0,25 m (bij een hoge windsnelheid van ca. 30 m/s). Zodoende voldoet op smallere wateren de kruinhoogte al bij een gering verschil tussen de kruinhoogte en de optredende waterstand tijdens de normsituatie. Bij beperkte kruinhoogte is dan al bijna sprake van overlopen. De beoordeling van de hoogte wordt zodoende kwetsbaar voor onzekerheden in de afleiding van de hydraulische belastingen. Zodoende moet een robuuste minimum eis voor de waakhoogte worden gehanteerd, afhankelijk van de betrouwbaarheid van de afleiding van de hydraulische belasting. Zie verder onderdeel 1 van de beoordeling in paragraaf D 1.2.

Relatie golfoverslag en overslagdebiet met andere faalmechanismen

Op smalle wateren kan bij een betrekkelijk geringe golfhoogte vanuit het oogpunt van erosie een hoog toelaatbaar overslagdebiet resulteren. Een deel van het overslaande water zal in het dijklichaam infiltreren. Dit kan leiden tot verzadiging van het dijklichaam en het ontstaan van een verzadigde topplaag. Bij een hoog overslagdebiet geldt ten aanzien van de beschouwing van de overige faalmechanismen dat:

- beoordeling van de macrostabiliteit binnenwaarts en microstabiliteit rekening moet worden gehouden met een verhoging van de freatische grondwaterstand door infiltrerend water;
- nadrukkelijk gecontroleerd moet worden op evenwijdig afschuiven.

Aanvullend geldt dat bij een hoog overslagdebiet geen gebruik kan worden gemaakt van een benadering op basis van een reststerkte, omdat de resulterende onbedekte grond van de kering door het overslaand water versneld kan eroderen. Dit houdt in dat in combinatie met een overslagdebiet hoger dan 0,1 l/m/s:

- bij de beoordeling van macrostabiliteit binnenwaarts bij toepassing van de restbreedtebenadering en zoneringsmethode aanvullende voorwaarden worden gesteld (tot 1 l/m/s), of deze benaderingen zelfs niet mogen worden toegepast;
- bij de beoordeling van microstabiliteit de benadering met het restprofiel niet mag worden toegepast.

1.2. Opdrijven van veenlagen buitendijks

Indien een voorland overstroomt bij hoge waterstanden kunnen veenpakketten opdrijven. Van waterbodems is bekend dat soms bonken veen losraken en opdrijven, met name na baggeren treedt dit op. Door het opdrijven van veenpakketten of –bonken neemt de hydraulische weerstand van een voorland of waterbodem af, en kan de stijghoogte in zandlagen onder de waterkering toenemen. Een toename van de stijghoogte is van belang voor de beoordeling op opbarsten, piping en macrostabiliteit binnenwaarts.

Opdrijven van veenpakketten in het voorland of uit de waterbodem kan met voldoende waarschijnlijkheid worden uitgesloten als:

- de slecht doorlatende laag in het voorland of waterbodem geen mineraal-arme veenlagen bevat; of:
- aanwezige mineraal-arme veenlagen in de slecht doorlatende laag worden afgedekt met grondlagen (beneden een eventueel onderhouds- of baggerprofiel) met een gezamenlijke gewicht dat voldoende is om een opdrijfvermogen van 1 kN/m³ van de mineraal-arme veenlagen te weerstaan.

Opdrijven over grote oppervlakten lijkt alleen op te kunnen treden bij een niet-natuurlijke oorzaak, bijvoorbeeld indien door baggerwerkzaamheden of verdieping van een vaargeul een mineraalarme veenlaag niet meer wordt bedekt door materiaal met een hoger soortelijk gewicht. Spontaan opgedreven zgn. veenbonken of –eilanden hebben beperkte afmetingen (niet gedocumenteerde ervaringen).

Indien aanwezige mineraal-arme veenlagen kunnen opdrijven dient, bij de berekening van de stijghoogte, de dikte van de slecht doorlatende laag te worden gecorrigeerd. Belangrijk onderscheid is of na opdrijven nog een gedeelte van de slecht doorlatende laag resteert, met:

- A. na opdrijven resteert een gedeelte van de afdekkende slecht doorlatende deklaag;
- B. na opdrijven resteert geen slecht doorlatende deklaag.

Ad. A: Hiervan kan sprake zijn indien tussen de opgedreven mineraal-arme veenlaag en de zandondergrond zich nog slecht doorlatende (klei-) lagen bevinden.

**Uitgangspunt hierbij is dat eventueel baggerwerk nauwkeurig wordt uitgevoerd. Indien baggerwerk niet nauwkeurig wordt uitgevoerd (afwijking > 0,25 m), dan dient voor deze analyse als uitgangspunt voor de bodemdikte het baggerprofiel te worden gecorrigeerd met de nauwkeurigheidsmarge van het baggerwerk.*

Ad.B: Hiervan kan sprake zijn indien de zandondergrond zich direct onder de mineraal-arme veenlaag bevindt.

Het opdrijven van veenlagen uit een voorland of de waterbodem met beperkte afmeting leidt tot een geringe toename van de stijghoogte in de zandondergrond onder de dijk (zie kader). Zodoende wordt ten aanzien van het (kunnen) opdrijven van een veenlaag twee situaties onderscheiden:

- het opdrijven van een geheel pakket over een grote oppervlakte;
- het opdrijven van een geheel pakket over een kleine oppervlakte.

Bij de berekening van de stijghoogte gelden de aanwijzingen uit tabel C.1 voor het rekening houden met lokaal opdrijven van veenbonken of –eilanden. Deze aanwijzingen zijn gebaseerd op het veronderstelde effect van lokaal opdrijven, en zijn zodoende afhankelijk van het verschil tussen het toetspeil en de (aanwezige) stijghoogte in de ondergrond.

Tabel C.1 aanwijzingen voor het rekening houden met lokaal opdrijven van veenbonken of –eilanden.

Verskil tussen het toetspeil en de aanwezige stijghoogte in de zandondergrond	Effect lokaal opdrijven op stijghoogte onder de waterkering	Rekening houden met het lokaal opdrijven van veenbonken / -eilanden
< 1 m	Verwaarloosbaar	Nee
Tussen 1 en 2 meter	Verwaarloosbaar bij beperkte afmetingen van een opdrijvende veenbonk / -eiland	Nee, mits aangetoond wordt dat eventuele veenbonken / –eilanden een maximale afmeting van 10 x 10 (L x B, m2) hebben
> 2 meter	Niet zonder meer verwaarloosbaar	Wel rekening mee houden

Indien rekening moet worden gehouden met lokaal opdrijven kan de invloed op de stijghoogte worden berekend met een 2-dimensionale grondwaterstromingsmodel. Dit is een conservatieve aanpak, omdat hierbij wordt uitgegaan van een oneindig brede veenbonk / -eiland. Voor een minder conservatieve aanpak kunnen 3-dimensionale grondwaterstromingsberekeningen worden uitgevoerd.

Gat in afdekkende slecht doorlatende pakket met beperkte omvang

In 3-dimensionale grondwaterstromingsberekeningen is door Acacia [zie STOWA 2015] bepaald in welke mate de stijghoogte in de zandlaag onder en achter de dijk toeneemt bij verschillende afmetingen van een gat in het afdekkende slecht doorlatende pakket.

Deze berekeningen zijn gemaakt bij betrekkelijk ongunstige aannamen, zoals:

1. het gat bevindt zich direct bij de buitenteen van de dijk, waardoor de invloed op de stijghoogte onder dijk het grootst is (ten opzichte van een grotere afstand);
2. een hoge weerstand van het slecht doorlatende pakket (1000 dagen), waardoor een gat een relatief grote toename van de infiltratie van oppervlaktewater heeft;
3. een weerstandsvrij contact tussen het oppervlaktewater en de zandondergrond, de vorming van sliblaag met enige hydraulische weerstand is verwaarloosd.

Uit deze berekeningen blijkt dat de stijghoogte bij een gat met een afmeting tot (L x B) 10 x 10 m² slechts beperkt stijgt (de toename bedraagt minder dan 5 tot 10% van het verschil tussen de oorspronkelijke stijghoogte en de waterstand. Bij grotere afmetingen neemt de toename van de stijghoogte toe. Bij zeer grote afmetingen (60 x 20 m²) bedraagt de toename ca. 45% van het oorspronkelijke verschil.

⁹ Een rekenmethode hiervoor ontbreekt, het aantonen dient te geschieden op basis van (geregistreeerde) afmetingen van waargenomen veenbonken / -eilanden.

NOOT: het eventuele effect van een spleet langs een doorgaande oeverconstructie kan op basis van bovenstaande resultaten niet zonder meer worden verwaarloosd. Wel geeft dit aanleiding te veronderstellen dat het effect in veel situaties gering zal zijn. Een methode om de eventuele lengte van een spleet langs de oeverconstructie te bepalen ontbreekt echter, waardoor in dit geval geen maximale lengte kan worden afgeleid. Zodoende dient voor een spleet (ondanks de beperkte breedte) toch rekening te worden gehouden met het effect daarvan op de stijghoogte. Uitsluitend indien sprake is van een lokale oeverconstructie met een geringe lengte (kleiner dan 10 m) mag het effect van een spleet op de stijghoogte worden verwaarloosd. Voor overige situaties is het effect van een spleet op de stijghoogte met een 2-dimensionale grondwaterstromingsberekening te bepalen.



Foto C.1 Opgedreven veenbonk (foto Hoogheemraadschap Schieland & de Krimpenerwaard)

1.3. Piping / Heave

Het toetsproces van de beoordeling op piping en heave kent drie niveau's. In het eerste (eenvoudige) niveau wordt gecontroleerd of het mechanisme piping voor het betreffende kering relevant is. Op het tweede (gedetailleerde) niveau wordt het gevaar voor piping beoordeeld volgens een vastgestelde methode. Op een derde (geavanceerd) niveau wordt het gevaar voor piping beoordeeld op basis van specifieke methoden of bijzondere (lokale) kenmerken van de belasting en sterkte van de kering.

Voor een beschrijving van beide mechanismen wordt verwezen naar het onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen [Deltares, 2012]. Nuttige informatie bij de uitwerking van dit beoordelingsspoor is beschreven in de zgn. Werkwijzer Piping bij Dijken [Min. I&M, 2014] en in de Schematiseringshandleiding die in het kader van het WTI wordt opgesteld.

Droogte

Voor sommige kaden geldt dat de opbarstveiligheid tijdens extreme droogte lager kan zijn dan tijdens de (standaard) beschouwde hoogwater (= natte) situatie. Indien de kering in deze situatie water keert, kan deze situatie uit oogpunt van piping maatgevend zijn ¹⁰. Voor deze kaden dient het gevaar voor piping tevens voor de situatie droogte te worden beoordeeld. Dit betreft kaden:

- I. waar de opbarstveiligheid van het afdekkende pakket afneemt tijdens droogte;
- II. die tijdens perioden van droogte waterkerende zijn.

Ad.II. een kering is waterkerend indien de waterstand tijdens perioden van droogte hoger is dan het maaiveldniveau in het achterland. Voor deze situatie dient te worden uitgegaan van een waterstand met een overschrijdingsfrequentie van eens per jaar (1/1 per jaar).

Voor een realistische beoordeling van het mechanisme piping is een goede en nauwkeurige schematisering van groot belang. Speciaal vanwege het 2-dimensionale karakter van de beoordeling van piping dient een nauwkeurige en zo nodig gedetailleerde indeling in kadetrajecten te worden gemaakt. Grote variaties binnen een kadetraject in bijvoorbeeld het maaiveldniveau in het achterland of de dikte van de deklaag in zowel het achterland als het voorland of de waterbodem dienen te worden voorkomen. Zo nodig kan met een gevoeligheidsanalyse worden vastgesteld:

- in welke mate aanwezige variaties van invloed zijn op het resulterende oordeel; en op basis daarvan:
- welke mate van variaties binnen één schematisering acceptabel zijn cq. welke mate van verfijning van de indeling kadetrajecten nodig is.

Een generieke schematisering van één maatgevend profiel van een kadetraject voor de beoordeling van alle faalmechanismen is niet mogelijk. Bij de gedetailleerde beoordeling op piping dient het maatgevende profiel specifiek uit oogpunt van piping te worden gekozen. Kennis van de beheerder met het gedrag van de kering dient hierbij nadrukkelijk te worden betrokken. Het onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen [Deltares, 2012] noemt enkele aandachtspunten voor veldonderzoek, de selectie en schematisering van een maatgevend dwarsprofiel.

Dit is tevens van belang uit oogpunt van de gekozen veiligheidsfilosofie. Gekozen is namelijk om (op dit moment) geen factor voor het lengte-effect te introduceren bij de beoordeling van piping voor regionale keringen. Deze keuze volgt uit de wens om in deze periode de veiligheidsfilosofie zo min mogelijk te wijzigen. In het kader van de actualisatie van de visie op de regionale keringen (in 2015) zal vooraleerst worden besloten over de aard van de normering (overschrijdingskans of overstromingskans / -risico), waarna een integrale aanpassing van de veiligheidsfactoren zal worden uitgewerkt. Verwaarlozing van het lengte-effect is acceptabel indien met grote zorg een (juist voldoende) veilige schematisering van het maatgevend profiel wordt opgesteld. Van belang daarbij is dat bij de beoordeling op piping het maatgevende profiel specifiek uit oogpunt van piping moet worden geselecteerd. Dit is niet per definitie een generiek gekozen maatgevend profiel. Zo nodig vergt dit een gedetailleerde indeling van een waterkering in kadetrajecten.

Specifiek bij regionale keringen – en speciaal boezem- en kanaalkaden – is een extra aandachtspunt de soms beperkte rol van de buitenwaterstand op de stijghoogte in de zandondergrond. binnendijks. Regionale grondwaterstroming kan een dominante invloed hebben, waardoor het denkbaar is dat bij hoge waterstanden geen (toename van de) grondwaterstroming onder de kade optreedt. Piping kan dan niet optreden. Zodoende wordt voor boezem- en kanaalkaden aanbevolen als onderdeel van de beoordeling op piping een geohydrologische analyse uit te voeren.

Ten aanzien van de gedetailleerde beoordeling van piping en de bepaling van de stijghoogte gelden onderstaande aanwijzingen voor optimalisatie van de uitgangspunten / schematisering.

¹⁰ Opgemerkt wordt dat tijdens perioden van droogte naast een lager gewicht van de deklaag ook sprake kan zijn van een verlaagd polderpeil (deels is dit aan elkaar gekoppeld).

Intredeweerstand voorland of waterbodem

Indien een slecht doorlatend pakket in het voorland of op de waterbodem niet voldoet aan de eisen voor het uitsluiten van een intredepunt, mag de aanwezigheid daarvan wel in rekening worden gebracht bij de nadere beschouwing van opbarsten, heave en piping. Hiertoe bestaan twee mogelijkheden:

- opnemen in de aanwezige kwelweglengte, als een effectieve kwelweglengte in het voorland; het reduceren van het aanwezig verval over de waterkering.

Benadrukt wordt dat deze optimalisaties niet gelijktijdig toegepast mogen worden.

Ad.1 Opnemen in kwelweglengte

Ook bij een geringere dikte heeft zo'n pakket invloed op de controle op piping, doordat het theoretische intredepunt voor de grondwaterstroming in de zandlaag van de dijk af wordt verplaatst (ten opzichte van een situatie zonder voorland cq. verwaarlozing van de aanwezigheid). Hiermee wordt de aanwezige kwelweglengte verlengd. De verlenging kan niet leiden tot een voorlandlengte groter dan de fysiek aanwezige (en beschermde) voorlandlengte.

Bij aanwezigheid van een slecht doorlatende deklaag in het voorland of op de waterbodem kan het intredepunt worden genomen op een afstand $L'1$ van de buitenteen [TAW, 1985]. Deze afstand kan als volgt worden berekend:

$$L'1 = \lambda_1 \tanh(L1/\lambda_1), \text{ met } \lambda_1 = \sqrt{kDc}$$

Met:

- $L1$: lengte voorland waarin afdekkende laag aanwezig is;
- kD de doorlatendheid en dikte van het zandpakket in het voorland;
- c de weerstand van de afdekkende slecht doorlatende laag in het voorland

Ad.2 Door de hydraulische weerstand van de deklaag in het voorland is de stijghoogte in de zandlaag nabij de buitenteen van de dijk lager dan de waarde die resulteert bij een verondersteld weerstandsvrij contact. Hierdoor is eveneens de gradiënt van de stijghoogte in de zandlaag onder de dijk geringer dan de gradiënt die volgt uit het verschil tussen toetspeil en polderpeil of maaiveld binnendijs. Voor de berekening van de stijghoogte in de zandondergrond nabij de buitenteen wordt verwezen naar het Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken [TAW, 2004].

Boezem- en kanaalkaden

Bij de uitwerking van deze mogelijkheid is het nuttig te beschikken over metingen van de stijghoogte in de zandondergrond. Aan de hand van deze metingen kan worden vastgesteld welk stijghoogte verloop onder normale omstandigheden aanwezig is, en welke weerstand de deklaag op de waterbodem of in het voorland biedt. Metingen onder dagelijkse / normale omstandigheden kunnen direct dienen voor afleiding van de weerstand en de gradiënt in de zandondergrond, indien geen afname van de intredeweerstand wordt verwacht (bijv. door erosie, opdrijven of baggeren). Indien wel rekening moet worden gehouden met een afname van de intredeweerstand, kunnen de metingen dienen bij grondwaterstromingsberekeningen.

Speciaal voor waterkeringen langs smalle wateren kan de tweede mogelijkheid interessant zijn, omdat de werkelijk aanwezige breedte van de waterbodem de grootte van de optimalisatie beperkt. In dergelijke gevallen zal de tweede mogelijkheid tot een grotere optimalisatie leiden.

¹¹ Opgemerkt wordt dat deze optimalisatie een ongevalideerde toepassing van de rekenmethode is, in onderzoeken naar piping (SBW – programma in het kader van WT12011) is uitgegaan van een weerstandsvrij contact tussen het oppervlaktewater en het grondwater in de zandlaag.

Onderhoudsprofiel tot in zandondergrond

Bij sommige regionale wateren (m.n. kanalen) reikt het onderhoudsprofiel tot in de zandondergrond. Indien bij de beoordeling van opbarsten, heave en piping de situatie na baggeren wordt beschouwd resulteert een schematisering met een weerstandsvrij contact tussen het boezemwater en het grondwater in de zandondergrond. Dit leidt tot een erg conservatieve schematisering bij de beoordeling op piping, omdat:

1. na baggeren de waterbodem betrekkelijk snel dicht slibt, en zich binnen enkele uren al een hydraulische weerstand vormt;
2. baggerwerkzaamheden normaliter niet worden uitgevoerd tijdens maatgevend hoogwatersituaties.

Ad. 1 De snelheid is onder andere afhankelijk van de hoeveelheid slibdeeltjes in het oppervlaktewater en de aanvoer daarvan, de snelheid van infiltratie, het verschil tussen waterpeil en de stijghoogte in de zandondergrond en de mate waarin het water wordt vertroebeld (bijv. door scheepvaart). Ook de aard van de baggerwerkzaamheden heeft invloed op de vorming van een sliblaag, uit oogpunt van de snelle vorming van een sliblaag is schoon baggeren ongunstig.

Zodoende is voor deze situatie als optimalisatie toegestaan uit te gaan van een waterstand lager dan toetspeil. Deze waterstand dient te zijn onderbouwd met voorwaarden ten aanzien van het baggeren (aan de hand van een waterstand waarbij baggerwerkzaamheden worden stilgelegd).

Indien deze optimalisatie wordt toegepast dient aanvullend op piping te worden gecontroleerd voor de situatie tijdens toetspeil. Bij de berekening van de stijghoogte mag daarbij rekening worden gehouden met een minimale hydraulische weerstand van de waterbodem van 5 dagen.

1.4. Macrostabieliteit binnentalud

Nieuwe kennis

Ten aanzien van de berekening van de macrostabieliteit van waterkeringen is op dit moment sprake van een overgangssituatie. Vigerend (LTV2007, geïnspireerd op het VTV2006) is een gedraineerde stabiliteitsberekening gebaseerd op het Mohr-Coulomb model. Het WT12017 zal waarschijnlijk een nieuw materiaalmodel voor het karakteriseren van het gedrag van grond voorschrijven, gebaseerd op het Critical State Soil Mechanics model (CSSM) en de Stress History And Normalized Soil Engineering Properties (SHANSEP) methode. Voor grondsoorten met een relatief lange hydrodynamische periode in relatie tot de belastingduur dient daarbij de ongedraineerde (bezuig-) sterkte te worden gehanteerd. Voor een nadere toelichting van dit model en de verschillen met de vigerende aanpak wordt verwezen naar [Deltares, 2014a].

Op dit moment is binnen het WT12017 echter nog niet definitief besloten om het huidige Mohr-Coulomb model te vervangen door het nieuwe materiaalmodel. DGRW heeft aangegeven over te willen gaan op het nieuwe materiaalmodel indien wordt voldaan aan enkele voorwaarden die door ENW en WTI coördinatiegroep zijn gesteld. Die voorwaarden betekenen dat een aantal zaken inhoudelijk nog moeten worden uitgewerkt (in 2015), waarna besluitvorming plaats vindt.

Zodoende is het op dit moment niet opportuun om voor de regionale keringen deze overstap al wel te maken. Bovendien ontbreekt hiervoor nog een volledig set partiële veiligheidsfactoren, afgestemd op de veiligheidsfilosofie en de veiligheidsniveau's voor regionale waterkeringen. Een dergelijk set partiële veiligheidsfactoren is voor de primaire keringen in ontwikkeling (geplande oplevering: eind 2015). Definitieve overgang naar het nieuwe materiaalmodel (inclusief een volledige set partiële veiligheidsfactoren) kan voor de regionale waterkeringen waarschijnlijk pas na 2015 plaatsvinden.

Het nieuwe materiaalmodel heeft vergaande consequenties voor de beoordeling van de stabiliteit van een regionale kering. Vooraleerst omdat andere gegevens verzameld moeten worden (andere invulling van het grond- en laboratoriumonderzoek en de parameterbepaling). Maar ook omdat volgens dit model een andere stabiliteitsfactor resulteert. Uit een consequentieanalyse voor primaire keringen is gebleken dat ten opzichte van het Mohr-Coulomb model zowel hogere als lagere stabiliteitsfactor worden berekend [Deltares, 2014a]. Voor boezemkaden worden hogere stabiliteitsfactoren berekend [Geo, 2013]. Deze consequentie analyse betrof echter een beperkt aantal boezemkaden (weliswaar met enige diversiteit), het is zodoende beslist niet zeker dat dit beeld voor alle boezemkaden en de overige regionale waterkeringen geldt.

Het is niet mogelijk om in een beoordelingsschema voor de stabiliteit beide methoden toe te passen, bijv. op de verschillende niveau's van de toetsing. Vooraleerst omdat op voorhand niet zeker is welke methode leidt tot de laagste stabiliteitsfactor. Bovendien dienen verschillende parameters te worden verzameld in het grondonderzoek.

In deze Leidraad blijft vooralsnog de gedraineerde stabiliteitsberekening gebaseerd op het Mohr-Coulomb model vigerend. De sterkte eigenschappen van de grondlagen dienen daarbij te zijn bepaald met triaxiaal- en/of Direct Simple Shear - proeven

Conform ook het advies van het ENW wordt daarbij gewaarschuwd voor de waarschijnlijke overgang naar de methode op basis van de ongedraineerde (bezwijk-) sterkte en het CSSM – model. Vanwege de grote consequenties van een overgang is in deze leidraad een werkwijze voor de beoordeling van de stabiliteit van regionale keringen pragmatisch uitgewerkt. Deze werkwijze vormt geen alternatief voor de nu nog vigerende methode, maar dient om de waterkering beheerder tijdig te informeren over deze ontwikkeling (om desinvesteringen te voorkomen) en eventueel gewenste verkenningen van de consequenties van de nieuwe methode mogelijk te maken met een voorlopig beoordelingsschema. Dit voorlopige beoordelingsschema is beschreven in bijlage 10.

Onderstaand volgt een nadere toelichting bij de stappen 3 en 4 van de gedetailleerde beoordeling, betreffende:

- stap 3:
- keuze glijvlakmodel;
- stap 4:
- Materiaalfactor
- Schadefactor
- Modelfactor
- schematiseringsfactor

Nadere toelichting bij stap 3: keuze glijvlakmodel

Voor de berekening van de stabiliteit van een waterkering kan gebruik worden gemaakt van een analytisch glijvlakmodel of van een eindige elementen methode. In Nederland worden overwegend de glijvlakmodellen Bishop, Lift Van en Spencer - van der Meij toegepast.

Toepassing van een eindige elementen methode kan bijvoorbeeld nuttig zijn indien sprake is van een complexe geometrie van de waterkering met constructieve elementen, of indien gebruik wordt gemaakt van niet-stationair berekende waterspanningen. Bijkomend voordeel van een eindige elementen methode is dat geen glijvlak wordt opgelegd (zoals bij Bishop en UpliftVan), en dat de optredende vervormingen kunnen worden berekend. Aanwijzingen voor de toepassing voor een eindige elementen methode zijn beschreven in het Technisch Rapport Analyse Macro stabiliteit Dijken met Eindige Elementen Methode [Deltares, 2010]. Toepassen van de EEM stelt aanvullende eisen aan de aard en omvang van geotechnische parameters.

Van belang bij een keuze voor een glijvlakmodel is onder andere:

- het opbarsten/opdrijven van een afdekkend pakket slecht doorlatende lagen in het achterland Bishop is dan minder geschikt, en heeft LiftVan en/of Spencer-van der Meij de voorkeur. Indien in deze situatie erg lage veiligheidsfactoren ($<0,5$) resulteren, bijvoorbeeld vanwege de reductie van de sterkte, bestaat echter de kans op een irreëel glijvlak volgens de methode Spencer – van der Meij.
- de aanwezigheid van dunne (relatief) slappe grondlagen Bishop is dan minder geschikt, omdat niet-cirkelvormige glijvlakken door de slappe grondlaag maatgevend kunnen zijn.

Meer informatie over glijvlakmodellen en de keuze daarvan is beschreven in de Schematiseringshandleiding Macrostabiteit (Min. I&M, 2016).

In de modellen Bishop en LiftVan worden niet alle krachten en momenten op de drukstaaf meegenomen. Met name het model Bishop en in mindere mate LiftVan benaderen daardoor de werkelijkheid minder goed dan het model Spencer – van der Meij.

Bij Lift-Van is recentelijk het horizontale- en momentenevenwicht toegevoegd op de drukstaaf. Het gevolg hiervan is dat Lift-Van bij een cirkelvormig glijvlak een andere (veelal lagere) veiligheidsfactor geeft dan Bishop.

Voor de beoordeling van de binnenwaartse stabiliteit van regionale keringen worden de modellen Spencer – van der Meij en UpliftVan aanbevolen. Wanneer twijfel bestaat over de juistheid van een berekening cq. het gevonden maatgevende glijvlak volgens het rekenmodel Spencer – van der Meij, wordt geadviseerd tevens een berekening te doen volgens de methode LiftVan, en visa versa. In dergelijke gevallen verdient het aanbeveling deze uitkomst met een realistisch glijvlak te hanteren als eindresultaat van de stabiliteitsberekening.

Aanwijzingen voor zo'n controle zijn beschreven in [Deltares, 2014b].

Modelkeuze controle op horizontaal evenwicht

Voor de controle van het horizontaal evenwicht van droogtegevoelige waterkeringen moet het glijvlakmodel Spencer – Van der Meij worden gebruikt. Dit model beschouwt voor de afzonderlijke lamellen het volledig krachten- en momentenevenwicht en doet daarmee het meest recht aan de werkelijkheid.

Een analyse op de geschiktheid van de beschikbare rekenmodellen voor de controle op horizontale stabiliteit [Deltares, 2014b] wijst uit dat het rekenmodel Horizontal Balance onvoldoende geschikt is. Het model beschouwt slechts de horizontale waterkrachten en negeert daarbij de gronddrukken (zowel actief als passief) evenals het verticale- en momentenevenwicht. Hierdoor geeft het model een zeer conservatieve ondergrens van de sterkte. Het gebruik van het rekenmodel Horizontal Balance wordt daarom afgeraden voor de controle op het horizontaal evenwicht van regionale waterkeringen.

Nadere toelichting bij stap 4: Materiaalfactor

De materiaalfactor is afhankelijk van de gekozen wijze voor de stabiliteitsanalyse. Onderscheid wordt gemaakt in de vigerende werkwijze conform het Mohr-Coulomb materiaalmodel. Afhankelijk van de gekozen werkwijze moet de juiste set materiaalfactoren worden gehanteerd. Zie hieronder.

Toepassing Mohr-Culomb model met gedraineerde parameters

Op dit moment bestaan verschillende sets materiaalfactoren afgestemd op de gedraineerde stabiliteitsberekeningen volgens het Mohr-Coulomb materiaalmodel. Dit betreft:

1. de groene versie schrijft (gebaseerd op het VTV2006) de materiaalfactoren voor zoals beschreven in het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies [TAW, 2001]. Deze materiaalfactoren zijn inmiddels aangepast, de aangepaste waarden zijn beschreven in een addendum [ENW, 2007];

2. het Addendum Boezemkaden biedt aanvullend de mogelijkheid om uit te gaan van de materiaalfactoren die specifiek voor boezemkaden zijn afgeleid. Toepassing van deze materiaalfactoren is uitsluitend toegestaan in combinatie met het hanteren van een schematiseringsfactor (zie ook verder in deze paragraaf).

Bij toepassing van het Mohr-Coulomb model moeten de volgende materiaalfactoren worden toegepast:

- keringen langs regionale rivieren: tabel C.2 (conform Add. TRWG [= ENW, 2007]);
- compartimenteringskeringen: tabel C.2 (conform Add. TRWG [= ENW, 2007]);
- boezem- en kanaalkaden : tabel C.3 (conform Addendum LTV [STOWA, 2010]).

Gezien de waarschijnlijke overgang naar een nieuwe methode wordt, om onnodig werk te voorkomen, opgemerkt dat eerder geaccepteerde werkwijzen (bijv. voor boezemkaden met materiaalfactoren conform de groene versie) niet per definitie moeten vervallen. In overleg met de toezichthouder kan worden besloten deze resultaten voorlopig te accepteren.

Tabel C.2 Materiaalfactoren regionale waterkeringen uit het Addendum TRWG [ENW, 2007].

Grondsoort en parameter			Variatie-coëfficiënt V	γ_m
volumieke massa nat/droog		(ρ)		1,0
klei	(TP-CU-5%) - cohesie - inwendige wrijving	(c)	0,45	1,25
		($\tan \phi$)	0,20	1,20
veen	(TP-CU-5%) - cohesie - inwendige wrijving	(c)	0,80	1,50
		($\tan \phi$)	0,25	1,25
zand	(TP-CD) - cohesie - inwendige wrijving	(c)	n.v.t.	n.v.t.
		($\tan \phi$)	0,15	1,20

TP-CU-5% = triaxiaalproef, geconsolideerd en ongedraineerd, met 2 à 5% ver-vorming

TP-CD = triaxiaalproef, geconsolideerd en gedraineerd

Bij aantoonbaar lagere variatiecoëfficiënten voor cohesie en inwendige wrijving kunnen aangescherpte materiaalfactoren worden afgeleid. Bijvoorbeeld in het geval van natuurlijke niet-organische klei, waarvoor is aangetoond dat de variatiecoëfficiënten voor cohesie en inwendige wrijving kleiner of gelijk zijn aan respectievelijk $V_c \leq 0,275$ en $V_\phi \leq 0,15$, geldt $\gamma_{m,c} = 1,15$ en $\gamma_m, \tan \phi = 1,15$

¹² Indien de waterstand op een kanaal afvoergedomineerd is, dienen de kanaalkaden als keringen langs een regionale rivier te worden beschouwd, en de bijbehorende materiaalfactoren te worden gehanteerd.

Tabel C.3 Materiaalfactoren voor boezemkaden (uit: Materiaalfactoren boezemkaden [STOWA, 2009])

Grondsoort en parameter			Variatie-coëfficiënt V	γ_m
alle grondsoorten	Volumieke massa nat/droog	(ρ)		1,0
klei	(TP-CU-5%)			
	- cohesie	(c)	0,45	1,20
	- inwendige wrijving	($\tan \phi$)	0,20	1,15
veen	(TP-CU-5%)			
	- cohesie	(c)	0,80	1,35
	- inwendige wrijving	($\tan \phi$)	0,25	1,15
zand	(TP-CD)			
	- cohesie	(c)	n.v.t.	n.v.t.
	- inwendige wrijving	($\tan \phi$)	0,15	1,15

TP-CU-5% = triaxiaalproef, geconsolideerd en ongedraineerd, met 2 à 5% vervorming

TP-CD = triaxiaalproef, geconsolideerd en gedraineerd

Bij aantoonbaar lagere variatiecoëfficiënten voor cohesie en inwendige wrijving kunnen aangescherpte materiaalfactoren worden afgeleid. Bijvoorbeeld in het geval van natuurlijke niet-organische klei, waarvoor is aangetoond dat de variatiecoëfficiënten voor cohesie en inwendige wrijving kleiner of gelijk zijn aan respectievelijk $V_c \leq 0,275$ en $V_\phi \leq 0,15$, geldt $\gamma_{m,c} = 1,10$ en $\gamma_{m,\tan \phi} = 1,10$. Voor veen waarvoor is aangetoond dat de variatiecoëfficiënten voor cohesie en inwendige wrijving kleiner of gelijk zijn aan respectievelijk $V_c \leq 0,45$ en $V_\phi \leq 0,20$, geldt $\gamma_{m,c} = 1,20$ en $\gamma_{m,\tan \phi} = 1,15$.

De materiaalfactor is tevens afhankelijk van de laboratoriumproef. In deze tabellen ontbreekt nog een materiaalfactor voor veen indien de sterkte is bepaald met Direct Simple Shear proeven. Teneinde de toepassing van DSS proeven binnen de vigerende werkwijze mogelijk te maken, zijn materiaalfactoren voor de direct simple shear proeven vastgesteld. De waarden zijn pragmatisch vastgesteld, gebaseerd op overleg met Deltares. De keuze van deze materiaalfactoren (incl. het maximale rekniveau) leidt tot conservatieve (= lage) rekenwaarden van de sterkte-eigenschappen.

Voor de vaststelling van de rekenwaarden van de schuifsterkte parameters voor veen op basis van DSS proeven (bij max. 40% schuifrek) moet worden uitgegaan van de volgende materiaalfactoren:

- cohesie: 1,5
- tangens ϕ : 1,2

Deze waarden zijn gebaseerd op:

- cohesie: NEN 6740
- tangens ϕ : op basis van:
- γ_{m1} voor de beproevingsmethode: gelijk aan 1,0 gesteld.
- γ_{m2} voor de beschrijving van het materiaalgedrag: volgens TAW-Leidraden

Deze waarden zijn relatief conservatief. Voor een specifieke proevenverzameling is aanscherping mogelijk, dit vergt maatwerk en is niet in deze Leidraad beschreven.

Nadere toelichting bij stap 4: Schadefactor

De schadefactor is afhankelijk van het type regionale waterkeringen en de veiligheidsnorm daarvan. Voor

boezemkaden en keringen langs regionale rivieren varieert de waarde van de schadefactor van 0,8 tot 1,0, bij resp. een overschrijdingsfrequentie van 1/10 tot 1/1.000 (zie tabel C.4).

Voor compartimenteringskeringen geldt een (standaard-) waarde 1,0, deze waarde is niet afhankelijk van de norm van de compartimenteringskering ¹³.

In heel bijzondere situaties is aan regionale keringen een veiligheidsnorm van 1/1250 toegekend, voor deze keringen dient een schadefactor van 1,1 te worden gebruikt.

Tabel C.4 Vereiste schadefactor stabiliteit binnentalud – boezemkaden en keringen langs regionale rivieren

Normfrequentie waterkering [1/jaar]	Schadefactor [-]
1/10	0,8
1/30	0,85
1/100	0,9
1/300	0,95
1/1000	1,0
1/1250	1,1

Nadere toelichting bij stap 4: Modelfactor

De modelfactor is afhankelijk van het rekenmodel en het toegepaste model voor grondgedrag. Bij de huidige werkwijze met gedraineerd grondgedrag wordt aanvullend onderscheid gemaakt in het al dan niet optreden van opdrijven/opbarsten van de deklaag in het achterland. Onderstaande tabel presenteert de modelfactoren.

Tabel C.5 Modelfactoren bij toepassing van het Mohr-Coulomb materiaalmodel (gedraineerd grondgedrag)

Rekenmodel / stabiliteitsanalyse	Modelfactor ¹⁴	Bron
Bishop	1,0	VTV2006 (vigerend)
LiftVan	1,05	VTV2006 (vigerend)
EEM – Mohr Coulomb	1,0	VTV2006 (vigerend)
Spencer – Van der Meij zonder opdrukken	0,95	Concept TR Macro stabiliteit (niet vigerend)
met opdrukken	1,05	Concept TR Macro stabiliteit (niet vigerend)

Nadere toelichting bij stap 4: Schematiseringsfactor

De schematiseringsfactor verdisconteert onzekerheden in de gehanteerde veilige schematisering van uitgangspunten bij de stabiliteitsbeoordeling ten aanzien van de geometrie, bodemopbouw en waterspanningen. De waarde varieert tussen 1,2 en 1,0. Bijlage 2 presenteert een werkwijze voor de afleiding van de schematiseringsfactor voor regionale keringen.

De schematiseringsfactor gaat niet over uitgangspunten maar over schematiseringsfouten/-keuzen.

¹³ Deze waarde is gekozen vanwege het betrekkelijk grote belang wat een compartimenteringskering mogelijk beschermt, in combinatie met de aard van het overstromingswater (buitenwater).

¹⁴ Dit betreft de totale rekenmodelfactor, deze waarde is het product van enerzijds onzekerheden in het rekenmodel en anderzijds een 3D-effect.

1.5. Macrostabiliteit buitentalud

Specifiek voor permanent waterkerende boezem- en kanaalkaden gelden de volgende opmerkingen ten aanzien van de aanvullende oorzaken voor instabiliteit van het buitentalud en de schematisering van de belasting.

- Laag water door natuurlijke variatie

Qua waterstand is sprake van een laag boezempeil. Daarbij geldt dat de freatische lijn in het kadelichaam eveneens laag zal zijn indien de lage waterstand wordt veroorzaakt door droogte. Indien de oorzaak afwaaiing betreft dient te worden uitgegaan van een gemiddelde grondwaterstand. Verder dient alleen voor kaden met een verkeersweg een reguliere (= behorende bij de verkeersklasse) verkeersbelasting te worden gehanteerd, met het transport van materiaal / materieel in het kader van noodmaatregelen hoeft geen rekening te worden gehouden. Eventuele maatregelen voor het herstel van de kaden worden verondersteld na afloop van de laagwaterperiode te worden uitgevoerd.

- Laag water door een val van de buitenwaterstand na een calamiteit elders

Qua waterstand is sprake van een extreem laag boezempeil. Dit betreft het boezempeil zoals dat optreedt tijdens de overstroming zelf, en niet de waterstand die zich uiteindelijk weer instelt na het volledig overstroomd van de polder. De grootte van de daling is met name afhankelijk van de afstand van de kade tot de bres. Meest conservatief is uit te gaan van een zeer geringe waterdiepte in de boezem. Het boezempeil tijdens deze situatie kan door een specifieke berekening worden bepaald. Verder dient voor deze situatie worden uitgegaan van een hoge ligging van de freatische lijn in het kadelichaam (meest conservatief, situatie met een calamiteit tijdens een hoogwatersituatie). Met het transport van materiaal / materieel in het kader van noodmaatregelen dient uitsluitend rekening te worden gehouden indien het calamiteitenplan voor de polder waar de calamiteit is opgetreden voorziet in het transport van materiaal / materieel over de beschouwde kade. In de overige gevallen dient de verkeersbelasting conform de verkeersklasse van de weg te worden gehanteerd. Zie voor de schematisering van de verkeersbelasting de aanwijzingen in par. 1.5.1 van module B.

- Zwaar verkeer

Qua waterstand dient te worden uitgegaan van streefpeil. Daarbij moet worden uitgegaan van een hoge ligging van de freatische lijn in het kadelichaam. Voor de schematisering van de verkeersbelasting gelden de aanwijzingen zoals beschreven in par. 1.5.1 van module B.

Ter overweging wordt de waterkeringbeheerder aanbevolen na te gaan of op enigerlei wijze de situatie met een reguliere verkeersbelasting op een kwalitatieve wijze kan worden beoordeeld, bijvoorbeeld op basis van bewezen sterkte (betreffende een verkeersbelasting). Belangrijke voorwaarden voor de kansen op een succesvolle toepassing hiervan zijn:

- o inspectie van de kade toont de langjarige afwezigheid van faalverschijnselen aan;
- o tot de peildatum neemt de sterkte van het buitentalud niet af;
- o tot de peildatum neemt de belasting van het buitentalud niet toe.

Schadefactor

Een differentiatie tussen de binnenwaartse en buitenwaartse stabiliteit is niet gemaakt. Bij het gedetailleerd toetsen van de stabiliteit buitenwaarts gelden dezelfde schadefactoren als voor de stabiliteit binnenwaarts.

1.6. Stabiliteit voorland

Nieuwe kennis

Het belangrijkste resultaat van kennisontwikkeling in het kader van het WTI2017 is een aanvulling van de gedetailleerde en geavanceerde toetsing voor wat betreft het bepalen van de kans op het falen van een dijk ten gevolge van een zettingsvloeiing. Het gaat daarbij zowel om een bepaling van de kans op het optreden van een zettingsvloeiing als de kans dat de inscharingslengte een kritieke waarde overschrijdt. De statistiek bij deze 'kansbepalingen' is vooral ontleend aan ervaringen / waarnemingen uit Zeeland. De werkwijze in de Handreiking is zodoende weinig bruikbaar voor regionale waterkeringen, bijvoorbeeld omdat:

- de dynamiek van de geulen in een getijdegebied afwijken van de dynamiek van een eventuele geul in een regionaal watersysteem;
- de zandgradatie mogelijk afwijkt van het veelal betrekkelijk fijne zand in Zeeuwse vooroevers.

Voor een toepassing van de Handreiking in andere gebieden dient de methode te worden vertaald. De Handreiking noemt daartoe enkele (voorlopige) voorstellen waarmee de gedetailleerde toetsing vertaald kan worden voor situaties die afwijken van de vooroevers langs de Zeeuwse getijdegeulen.

Instabiliteit van het voorland kan de standzekerheid van een waterkering bedreigen, indien dit leidt tot een inscharing tot in of vlakbij de waterkering. Zodoende vormt een beoordeling van het voorland onderdeel van de toetsing op veiligheid van primaire keringen.

Voor de beoordeling van regionale waterkeringen is instabiliteit van het voorland in de meeste gevallen geen relevant beoordelingsaspect, eenvoudigweg omdat:

- een regionaal watersysteem een beperkte breedte en diepte heeft;
- geen diepe geul of ontgraving aanwezig is.

Op voorhand kan instabiliteit van het voorland echter niet worden uitgesloten, bijvoorbeeld door de aanwezigheid van een diepe zandwininput. Zodoende is het voorland toch onderdeel van de toets op veiligheid van regionale keringen.

In veel gevallen zal de beoordeling betrekkelijk eenvoudig zijn, bijvoorbeeld indien (diepe) geulen afwezig zijn, of indien het voorland geen verwekingsgevoelig materiaal bevat. Uitsluitend indien een geul aanwezig is met een diepte die groter is dan 9 meter dient de stabiliteit van het voorland te worden getoetst.

De beoordeling van de stabiliteit van het voorland richt zich op twee mechanismen: afschuiving en zettingsvloeiing. De beoordeling is voor beide mechanismen vergelijkbaar, en betreft achtereenvolgens een beoordeling of het optreden van beide mechanismen:

- op basis van geometrische kenmerken schadelijk kan zijn;
- op basis van geotechnische kenmerken kan worden uitgesloten.

Benadrukt wordt dat in alle gevallen op afschuiving moet worden getoetst, óók als vaststaat dat het voorland verwekingsgevoelig materiaal bevat. Het is namelijk mogelijk dat het mechanisme afschuiving maatgevend is boven het mechanisme zettingsvloeiing.

Indien een voorland ontbreekt dient de stabiliteit van het buitentalud te worden getoetst (zie par. 6.8).

¹⁵ Enkele ervaringen met zandwinputten uit andere delen van het land zijn wel bekend, maar niet gedetailleerd betrokken in de studie

Ten aanzien van de stabiliteit van het voorland is in het kader van het WTI2011 bestaande kennis geschikt gemaakt voor (de ontwikkeling van) een gedetailleerde toetsregel. Deze kennis is gericht op het mechanisme zettingsvloeiing, en is uitgebracht in een handreiking voor het opstellen van het beheerdersoordeel [MVenW, 2012], omdat deze nieuwe kennis destijds nog niet was vastgelegd in een gevalideerd Technisch Rapport. Uiteindelijk is in het kader van het WTI2011 geen nieuw Voorschrift Toetsen op Veiligheid uitgebracht, evenmin is de kennis in een nieuw Technisch Rapport vastgelegd.

Op dit moment is de aanpak in het VTV2006 dus vigerend voor de beoordeling van de stabiliteit van het voorland. Zodoende wordt in deze Leidraad verwezen naar de beschrijving in het VTV2006, met een enkele verwijzing naar de nieuw ontwikkelde kennis.

Het toetsschema voor beide mechanismen kent drie niveau's. Onderstaand volgt een korte samenvatting van de werkwijzen per niveau. Voor een uitgebreide beschrijving van de werkwijze wordt verwezen naar het VTV2006.

2. SPECIFIEKE OPMERKINGEN PER TYPE REGIONALE KERING

2.1. Boezem- en kanaalkaden

Belastingssituatie voor beoordeling stabiliteit buitentalud

Macro-instabiliteit van het buitentalud kent een aantal denkbare oorzaken:

1. extreem laagwater door natuurlijke variatie (bij boezemkaden en rivierkeringen);
2. val van het waterpeil door een calamiteit elders;
3. verdieping van waterbodembodem of vooroever (door baggeren en/of erosie) en schade aan oeverconstructie;
4. extreme verkeersbelasting;
5. extreem laagwater door (tijdelijke) verlaging van de waterstand door menselijke activiteiten.

Deze situaties worden onderstaand nader beschreven.

Extreem laagwater door natuurlijke variatie

Een extreem laagwater door natuurlijke variatie kan voorkomen in perioden met geringe neerslag of droogte, in combinatie met extreme afwaaiing. Omdat dan de steundruk van het water tegen het buitentalud minimaal is kan deze situatie mogelijk maatgevend zijn voor de buitenwaartse macrostabiliteit. Hierbij wordt opgemerkt dat extreme droogte juist ook weer een gunstig effect kan hebben op de macrostabiliteit omdat dit normaal gesproken leidt tot een lagere ligging van de freatische lijn in de waterkering. Aanbevolen wordt om voor de bepaling van het laagwater uit te gaan van een laag waterpeil, met een onderschrijdingsfrequentie van eens per jaar, verminderd met een toeslag voor extreme afwaaiing (deze toeslag dient lokaal te worden bepaald specifiek voor het betreffende watersysteem, door de beheerder).

Deze situatie mag als niet relevant worden beschouwd indien de laagwaterstand minder dan 0,3 m beneden streefpeil is. De onderbouwing (uitsluitend kwalitatief) bij dit criterium is dat bij deze geringe daling:

1. de stabiliteit in enige mate bewezen is, omdat geringe dalingen vaker voorkomen;
2. naar verwachting sprake zal zijn van kleine glijcirkels, en daarmee een geringe aantasting van het waterkerend vermogen van de kade bij een eventuele afschuiving.

Punt 1 is pragmatisch afgeleid. Hierbij is het van belang dat tot de peildatum de sterkte van het buitentalud niet afneemt, en de belasting niet toeneemt. Voorwaarden bij de toepassing zijn zodoende:

- ter plaatse van het buitentalud zijn gedurende meerdere tenminste 5 jaren geen faalverschijnselen waargenomen die duiden op onvoldoende stabiliteit buitenwaarts;
- tot de peildatum wordt geen afname van de sterkte verwacht, zoals bijvoorbeeld een versteiling van het buitentalud of verdieping van de bodem;
- tijdens de extreem laag water situatie is de bovenbelasting niet hoger dan onder normale omstandigheden;
- tot de peildatum wordt geen toename van de bovenbelasting verwacht.

Indien niet aan deze voorwaarden wordt voldaan, dient voor deze oorzaak de stabiliteit wel te worden beschouwd.

Val van het waterpeil door een calamiteit elders

Met een calamiteit elders wordt voornamelijk bedoeld op een dijkbreuk elders. Om de controle van de stabiliteit van het buitentalud na een val door dijkbreuk elders te kunnen maken dient een inschatting te worden gemaakt van de mate waarin het waterpeil na een dergelijke gebeurtenis kan dalen. Indien deze situatie relevant is, zal de waterstandsval door deze oorzaak veelal maatgevend zijn boven die door natuurlijke waterstandsvariatie. Dit is bijvoorbeeld bij boezemkaden het geval als aan dezelfde boezem polders grenzen met een lagere IPO-klasse en als niet of onvoldoende op mogelijkheden tot compartimentering van de boezem kan worden gerekend bij falen.

De stabiliteit van het buitentalud bij een val van de waterstand door een calamiteit elders is alleen relevant indien de val van de waterstand ter plaatse van de kade groot is. Daarbij moet dan tevens de resterende waterstand na de calamiteit een serieuze belasting voor de kade vormen. Dit kan het geval zijn indien:

- in de nabijheid van de beschouwde kade (en aan hetzelfde boezem- / kanaalstelsel) zich kleine waterbergingsgebieden bevinden, of zich kleine polders bevinden met een veiligheidsnorm die tenminste 2 normklassen lager is (een factor 10 in overschrijdingskans); en;
- niet of onvoldoende op mogelijkheden tot compartimentering van de boezem of het kanaal kan worden gerekend.

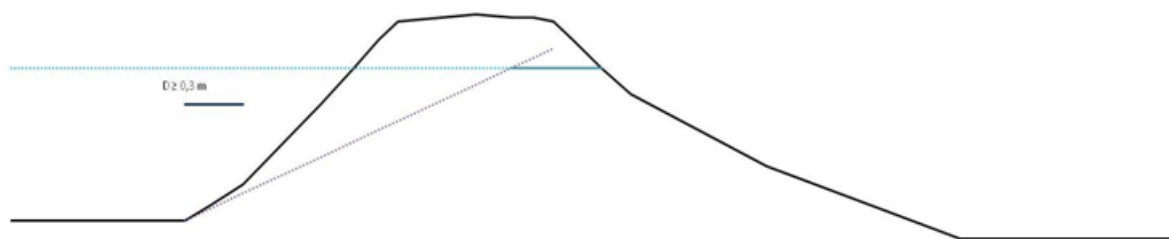
Vertaald in een toetsschema hoeft een val van het waterpeil door een calamiteit elders niet te worden beschouwd indien wordt voldaan aan één van de volgende voorwaarden:

1. aan dezelfde boezem of kanaal bevindt zich geen waterbergingsgebied (of een polder) met een veiligheidsnorm die tenminste een factor 10 lager is;
2. de daling van de waterstand ter plaatse van de beschouwde kade is minder dan 0,3 m, doordat een waterbergingsgebied of een polder met lagere veiligheidsnorm zich op een voldoende grote afstand bevindt;
3. een nabij gelegen waterbergingsgebied of polder met lagere veiligheidsnorm heeft een dusdanig grote waterberging dat na resp. de inzet of overstrooming in het boezemstelsel (inclusief eventuele compartimentering) een voldoende lage waterstand resteert.

Ad.3 Een waterstand is voldoende laag indien deze zich 0,3 m bevindt onder het niveau waarbij de restbreedte van de kade tenminste 1,5 m bedraagt. Het niveau waarop de restbreedte van een theoretische kruin nog juist 1,5 m bedraagt kan worden bepaald aan de hand van een theoretisch profiel met een 1:4 helling van het buitentalud vanaf de buitenteen of eventueel aanwezige oeverconstructie (zie figuur C.2). 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 langsgstroming, zodat rekening moet worden gehouden met het treffen van (nood-) maatregelen.



Figuur C.2 Bepaling toelaatbare lage waterstand

Benadrukt wordt dat met de resterende lage waterstand bedoeld is de waterstand na volledige overstrooming van het waterbergingsgebied of de polder, en niet de waterstand in de boezem tijdens het volstromen van het waterbergingsgebied of de polder.

Verdieping van waterbodem of vooroever

Significante verdieping van de vooroever kan ondermijning van de buitenwaartse macrostabiliteit veroorzaken. Aangenomen mag worden dat dit met een voldoende adequaat beheer wordt voorkomen. Hiermee hoeft zodoende geen rekening te worden gehouden.

Bij een eerste toetsing is het wel van belang hier aandacht aan te besteden. Ook dient monitoring van de waterbodem en het onderwatertalud onderdeel uit te maken van de reguliere inspectie van de waterkering, in het bijzonder op die trajecten waarvan bekend is dat erosie van het onderwatertalud plaatsvindt, bijvoorbeeld door stroming of scheepvaart. Dit houdt in dat inspecties gericht moeten zijn op het onderwatertalud en – bodem, en dat de toetsing aandacht dient te besteden aan de resultaten van dergelijke inspecties. Ofwel, het niet relevant zijn van deze oorzaak dient onderbouwd te worden in de rapportage, aan de hand van metingen en/of verwachte veranderingen van het onderwaterprofiel.

Extreme verkeersbelasting

Bij de beoordeling van de buitenwaartse stabiliteit dient deze belasting niet in rekening te worden gebracht, tenzij door de beheerder wordt aangegeven dat verkeersbelasting ter plaatse tijdens de normsituatie niet uitgesloten kan worden. Aldus geldt ten aanzien van extreme verkeersbelasting:

- algemeen: dat het calamiteitenplan ten behoeve van noodmaatregelen dient te voorzien in alternatieve transportroutes / methoden voor het transport van materieel / materiaal.
- kaden met een verkeersweg: dat tijdens de normsituatie een verkeersverbod moet gelden.

Extreem laagwater door (tijdelijke) verlaging van de waterstand door menselijke activiteiten

Voor bijvoorbeeld onderhoud of kadeverbetering komt het voor dat de waterstand in een boezem of een kanaal tijdelijk wordt verlaagd. Uitgangspunt is dat de eventuele gevolgen van dergelijke ingrepen voor de waterkering worden beoordeeld op basis van het aanvragen van een ontheffing, en dat potentieel schadelijke tijdelijke verlagingen hiermee worden voorkomen. Het optreden van een dergelijke situatie hoeft daarom niet bij de toets op veiligheid te worden beschouwd.

2.2. Veenkaden

Definitie veenkade

Deze Leidraad geeft een aanscherping van de definitie van een veenkade, voor de vaststelling of sprake is van een veenkade. Voorts wordt de mogelijkheid geïntroduceerd om op een meer gedetailleerde wijze te bepalen of een veenkade droogtegevoelig is.

Aangescherpte definitie ‘veenkade’

Kade waarbinnen zich materiaal met een dikte van minimaal 0,5 m bevindt dat kan worden geclassificeerd als veen of als klei met bijbestanddeel ‘sterk humeus’ of bijmenging van veensporen (vastgesteld conform NEN 5104 op basis van de organische stof-lutum-silt+zand-driehoek), waarbij geldt dat het materiaal:

- een verzadigd volumegewicht heeft kleiner dan of gelijk aan 13,5 kN/m³ (conform NEN 5110); OF:
- een watergehalte heeft van meer dan 120%.

In deze definitie blijft de afmeting van kade ongewijzigd, zijnde het grondmassief dat wordt begrensd:

- aan de onderzijde: door het niveau ‘polderpeil minus 1 m’;
- aan de buitenzijde: door de buitenteen;
- aan de binnenzijde: door een kwelsloot, danwel bij ontbreken daarvan door een verticale lijn op een afstand van vier maal de kerende hoogte uit de binnenteen.

Classificatie van veen

Gebleken is dat de toekenning van sterkte-eigenschappen van veen complex is. Daarbij is geconstateerd dat het verstandig is om veen gedetailleerd te classificeren, rekening houdend met de botanische samenstelling en de verweringsgraad. Deze classificatie is beschreven in het Technisch Rapport Geotechnische Classificatie van Veen [TAW, 1996]. Aanbevolen wordt bij grondonderzoek deze gedetailleerde classificatie toe te passen. Bij de uitwerking van de toets op veiligheid (de schematisering van de bodemopbouw en de indeling van een regionale proevenverzameling) is een gedetailleerde indeling in veensoorten geen vereiste.

Sterkte van veen

In de afgelopen periode is veel kennis ontwikkeld omtrent de sterkte van veen en de stabiliteit van dijken op veen, o.a. in opdracht van het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier en Rijkswaterstaat. In het STOWA Veenkaden onderzoek en het Ontwikkelingsprogramma zelf is eveneens aandacht besteed aan de sterkte van veen. In een samenwerking tussen een aantal provincies, waterschappen, de TU Delft en marktpartijen, wordt gestreefd deze nieuwe kennis (en andere inzichten) te valideren in een praktijkproef, door het laten bezwijken van een boezemkade op veen in de Leendert de Boerspolder.

Het verdient aanbeveling de sterkte van veen in het laboratorium te bepalen met zgn. Direct Simple Shear – proeven. Voor een goede uitvoering van deze (en andere) proeven is een protocol voor de uitvoering van dergelijke proeven opgesteld [STOWA, 2015]. Ook is een notitie opgesteld voor waterkeringbeheerders voor een goed begrip van deze proeven [STOWA, 2015].

Veel van deze aanwijzingen zijn, al dan niet geactualiseerd op basis van o.a. de consequentie analyse ongedraineerde stabiliteitsanalyses, overgenomen in de zgn. Schematiseringshandleiding Macrostabiliteit (uit te brengen in het kader van het WTI2017) en de handleiding Parameterbepaling Macrostabiliteit [Deltares/RWS, i.o.].

Tenslotte is een structuur voor een database opgesteld, voor de opslag van resultaten van laboratoriumproeven. Doel van deze database is de gemeenschappelijke opslag en interpretatie van laboratoriumproeven, door verschillende waterkeringbeheerders. Voor nadere informatie over deze database en het gebruik daarvan wordt verwezen naar de Expertgroep Geotechniek (contact STOWA).

2.3. Droogtegevoelige waterkeringen

Normering belastingsituatie droogte

In het Ontwikkelingsprogramma is vastgesteld dat de situatie droogte genormeerd kan worden (incl. indicator, zie ORK, 2015). Echter, voor elke duur van een periode van droogte geldt een andere ernst van de droogte. De berekening van de verdroging van een kade (daling grondwaterstand) kan niet goed worden gekoppeld aan een genormeerde meteorologische droogte, omdat niet duidelijk is welke duur van de droogteperiode moet worden aangehouden. Dit komt voort uit de beperkte inzichten (en meetgegevens) over de snelheid waarmee een droogtegevoelige kade uitdroogt tijdens een periode van droogte. Zodoende is het niet mogelijk een duur van de droogte aan de mate (norm) van droogte te koppelen. Hierdoor kan op dit moment nog niet worden vastgesteld of de verdroging van een kade tijdens een droogte met een kans van optreden van bijvoorbeeld 1/10 of 1/30 per jaar de stabiliteit van een kade kan aantasten.

Ter illustratie: een enkele zeer extreem droge dag (bijv. met een kans van 1/10.000 per jaar) zal een verwaarloosbare verdroging van een kade veroorzaken, terwijl een weinig extreme droogteperiode van 6 maanden (bijv. 1/300 per jaar) dat zeer zeker wel zal doen. Vooralsnog is onbekend welke tijdsduur moet worden gehanteerd. Waarschijnlijk is die tijdsduur ook kadespecifiek, afhankelijk van enkele (geohydrologische) eigenschappen van de kade.

Zodoende dient voor alle droogtegevoelige kaden de situatie droogte te worden beschouwd. Een normafhankelijk differentiatie naar de ernst van de droogte kan daarbij niet worden gemaakt, niet bij de bepaling van de droogtegevoeligheid van een kade en niet bij de schematisering van de uitgangspunten (speciaal: verlaging grondwaterstand en het volumiek gewicht van verdroogde veenlagen) voor beschouwing van de situatie droogte.

Desalniettemin wordt beheerders, bijvoorbeeld als onderdeel van het beheerdersoordeel, aanbevolen voor kaden met een lage veiligheidsnorm zo mogelijk de ernst van de situatie droogte te betrekken in de beoordeling. Het beschikbaar zijn van inzicht in de verlaging van de grondwaterstand tijdens perioden met

droogte is hierbij essentieel. Meting van grondwaterstanden wordt zodoende eveneens aanbevolen.

Droogtegevoelig

Langdurige droogte vormt een belastingsituatie voor veenkaden. Indien een kade volgens bovenstaande definitie als veenkade wordt geclassificeerd, moet vervolgens worden vastgesteld of sprake is van een droogtegevoelige veenkade. In essentie gaat het daarbij om de vraag of de betreffende laag veen of sterk humeuze klei daadwerkelijk verdroogt tijdens langdurige droogte. Een kade is niet droogtegevoelig indien:

1. een deklaag van klei (volumiek gewicht > 13,5 kN/m³) met een dikte van 0,5 m aanwezig is;
2. de laag veen of sterk humeuze klei zich bevindt beneden het niveau tot waar de freatische grondwaterstand tijdens langdurige droogte maximaal daalt.

Ad. 2 Deze voorwaarde vergt goed inzicht in de fluctuatie van de grondwaterstand tijdens droogte, waarbij metingen en/of geohydrologische berekeningen benodigd zijn. Daarbij geldt dat dit aspect afhankelijk is van enkele kenmerken van de kade zelf (kwelsituatie, aanwezigheid teensloot, etc.), maar ook normafhankelijk is. Bij een 1/1000 per jaar – droogte gebeurtenis zal de grondwaterstand dieper dalen dan tijdens een 1/30 per jaar – gebeurtenis. Een daling tot 1,5 m beneden polderpeil vormt een veilige aanname.

Een gedetailleerde rekenmethode is getest (zie [Deltares, 2014c]) maar nog onvoldoende gekalibreerd voor een generieke / landelijke aanscherping van droogtegevoeligheid. Dit komt grotendeels voort uit onvoldoende inzicht in de snelheid waarmee een kade uitdroogt tijdens een periode van droogte.

Kruindaling droogtegevoelige kaden

Tijdens droogte kan door krimp van veen en organische klei sprake zijn kruindaling van droogtegevoelige waterkeringen.

Uit onderzoek [STOWA, 2015] blijkt dat kruindaling door droogte altijd minder dan 15 cm bedraagt. Voorwaarde is dat sprake is van een situatie met reguliere grasbegroeiing. Indien op de waterkering bomen aanwezig zijn, kan een grotere kruindaling optreden. Kruindaling ten gevolge van bomen dient te worden beschouwd bij de toets van de bomen, als niet waterkerend object.

Als veilige aanname voor de kruindaling mag de maximale waarde van 15 cm worden toegepast bij de beoordeling van de hoogte van droogtegevoelige waterkeringen. De situatie droogte kan uitsluitend maatgevend zijn voor de beoordeling van de hoogte indien het verschil tussen het toetspeil en de waterstand tijdens droogte (zie paragraaf B 1.1) kleiner is dan 15 cm. Naar verwachting is dit voor weinig kaden het geval. Voor situaties waar de situatie droogte bij een kruindaling van 15 cm wel maatgevend is voor de kruinhoogte, is een nadere nuancering van de kruindaling mogelijk. Deze nuancering is gebaseerd op enkele kenmerken van een (droogtegevoelige) kering die invloed hebben op de mate van verdroging en resulterende kruindaling. Dit betreft de volgende kenmerken:

- de initiële grondwaterstand;
- de mate waarin nalevering van vocht vanuit het grondwater optreedt;
- de grondwaterstands daling tijdens droogte.

De aanwezigheid van een deklaag van klei is geen onderscheidend kenmerk. Een deklaag vermindert de verdroging, maar het hogere gewicht van klei veroorzaakt (in de berekeningen) meer samendrukking van het veen. Het netto effect is gering, en valt binnen de gekozen afronding. Daarbij zij opgemerkt dat bij aanwezigheid van een deklaag van klei met een dikte van 0,5 m de kade sowieso niet als droogtegevoelig wordt geclassificeerd.

Tabel C.7 presenteert waarden voor de kruindaling, deze waarden vormen een bovengrens. Deze waarden zijn afgerond op 2,5 centimeter, verschillen tussen de varianten vallen daardoor vaak weg. Een differentiatie naar de veiligheidsklasse van de kaden is niet gemaakt.

Ervaringen tijdens eerdere droge perioden kunnen een belangrijke informatiebron zijn om de noodzaak van een dergelijke marge vast te stellen, alsmede de grootte daarvan.

Tabel C.7 Kruindaling tijdens droogte

Daling grondwaterstand tijdens droogte	Nalevering	Niveau gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG)		
		60 cm - mv	90 cm - mv	120 cm - mv
Verwaarloosbaar (= nihil)	Ja	5 cm	10 cm	10 cm
	Nee	7,5 cm	10 cm	12,5 cm
Gemiddeld (30 cm)	Ja	10 cm	10 cm	12,5 cm
	Nee	10 cm	12,5 cm	12,5 cm
Aanzienlijk (100 cm)	Ja	12,5 cm	15 cm	15 cm
	Nee	12,5 cm	15 cm	15 cm

Nadere toelichting bij de kenmerken in de tabel.

Daling grondwaterstand en niveau gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG)

De daling van de grondwaterstand in de kade tijdens droogte betreft de verwachte daling van de grondwaterstand beneden het niveau van de GLG.

Nalevering

Door capillaire werking wordt het bodemvocht in de onverzadigde zone vanuit het grondwater aangevuld. Of sprake is van nalevering, en de mate waarin, is afhankelijk van de grondsoort waaruit de kern van de waterkering is opgebouwd, en eventuele gelaagdheid van het dijklichaam. In het algemeen zal vooral sprake zijn van nalevering indien de grondwaterstand zich bevindt in een klei of veenlaag, vanuit zandlagen vindt nauwelijks of geen nalevering plaats. Ook de aanwezigheid van horizontale zandlagen (cunet, eerdere ophogingen van de kade, etc.) in de onverzadigde zone verstoort nalevering.

Zodoende wordt aanbevolen standaard uit te gaan van de kruindaling zonder nalevering. Desgewenst kan de kruindaling worden geoptimaliseerd door eventueel optredende nalevering wel in rekening te brengen. Deze aanname dient te worden onderbouwd. Nadere informatie over capillaire werking en nalevering zijn beschreven in [CV, 1988].

2.4. Keringen langs regionale rivieren

Hoge windsnelheid

Voor de bepaling van de golfrandvoorwaarden is een maatgevende hoge windsnelheid benodigd. Een veilige benadering voor de afleiding van een maatgevende hoge windsnelheid is de keuze voor een hoge windsnelheid met een overschrijdingsfrequentie gelijk aan de veiligheidsnorm van de kering. Deze benadering veronderstelt het samenvallen van een 1/100 jaar afvoergolf met een 1/100 storm. Voor keringen langs regionale rivieren is dit conservatief, aangezien het optreden van een hoogwatergolf niet is gecorreleerd aan het optreden van hoge windsnelheden. Als optimalisatie is voor de toetsing van keringen langs regionale rivieren een maatgevend hoge windsnelheid afgeleid. De maatgevend hoge windsnelheid is onafhankelijk van de veiligheidsnorm van de kering. De windsnelheid bedraagt:

- 12 m/s: uit de hoek van N (360°) tot ZO (135°);
- 15 m/s: uit de hoek van ZW (225°) tot W (270°);

In de tussenliggende windrichtingen verloopt de windsnelheid gelijkmatig:

- van 12 tot 15 m/s: hoek ZO (135°) tot ZW (225°);
- van 15 tot 12 m/s: hoek van W (270°) tot N (360°).

Indien geen rekening wordt gehouden met de verdeling van de wind over de verschillende windrichtingen dient een maximale windsnelheid van 16 m/s te worden gehanteerd.

Een belangrijke voorwaarde bij de (maatgevende) snelheden is dat ze alleen gebruikt mogen worden ingeval de afvoer dominant is boven de wind, wat er ruwweg gezegd op neerkomt dat een hoge waterstand meer bepalend is voor de benodigde kruinhoogte dan de windsnelheid. Praktisch gezien kan voor regionale rivieren als vuistregel worden aangehouden dat de decimeringswaarde van de waterstand ten gevolge van de afvoer minstens 0,5 m bedraagt (dus: een afvoer met een factor 10 kleinere overschrijdingsfrequentie moet een waterstandsverhoging van minstens 0,5 m opleveren). Indien niet aan deze voorwaarde wordt voldaan, dient toch de windsnelheid met een overschrijdingsfrequentie gelijk de norm van de waterkering te worden gebruikt. Voor deze situaties kan als optimalisatie ook een probabilistische benadering voor afleiding van de maatgevende combinatie van beide belastingen worden uitgevoerd.

2.5. Keringen om waterbergingsgebieden

Waterbergingsgebieden betreffen vooraf aangewezen gebieden die tijdens hoge waterstanden op een regionaal watersysteem (kunnen) worden gebruikt om tijdelijk water te bergen, om de waterstanden op het watersysteem te verlagen. Uit een inventarisatie van waterkeringen om waterbergingsgebieden blijkt dat (per 2012) ca. 200 km van dergelijke keringen voorkomt, rond ca. 60 waterbergingsgebieden verspreid over het land.

Keringen om waterbergingsgebieden betreffen vaak kleine keringen, in uiteenlopende situaties. Van belang bij een eventuele normering en de toets op veiligheid is een goede balans tussen het nut van de kering en de benodigde inspanning van een eventuele normering en toetsing daarvan. Dit vergt maatwerk, afgestemd op de lokale situatie.

Algemeen gesteld stelt de toezichthouder in overleg met de beheerder vast in hoeverre sprake is van een regionale kering, en of aanwijzing (en normering) nodig is. Bij aanwijzing (en normering) kan deze Leidraad worden toegepast voor de beoordeling of de veiligheid aan de norm voldoet. Daarbij wordt opgemerkt dat voor keringen rond waterbergingsgebieden afwijkende belastingen kunnen optreden of dat aanvullende eisen kunnen worden gesteld ten opzichte van een 'gewone' regionale waterkering

Deze Leidraad beschrijft geen specifieke aanpak voor dit type keringen. In deze paragraaf worden wel enkele specifieke aandachtspunten en aanwijzingen ten aanzien van het toetsen van waterkeringen rond waterbergingsgebieden beschreven, inclusief de te beschouwen hydraulische belastingsituaties. Tevens worden enkele opmerkingen ten aanzien van de normering gemaakt, vanwege de relatie met de optredende belasting. Een uitgebreide beschouwing van keringen rond waterbergingsgebieden is beschreven in de studie Waterkeringen om waterbergingsgebieden [STOWA, 2015].

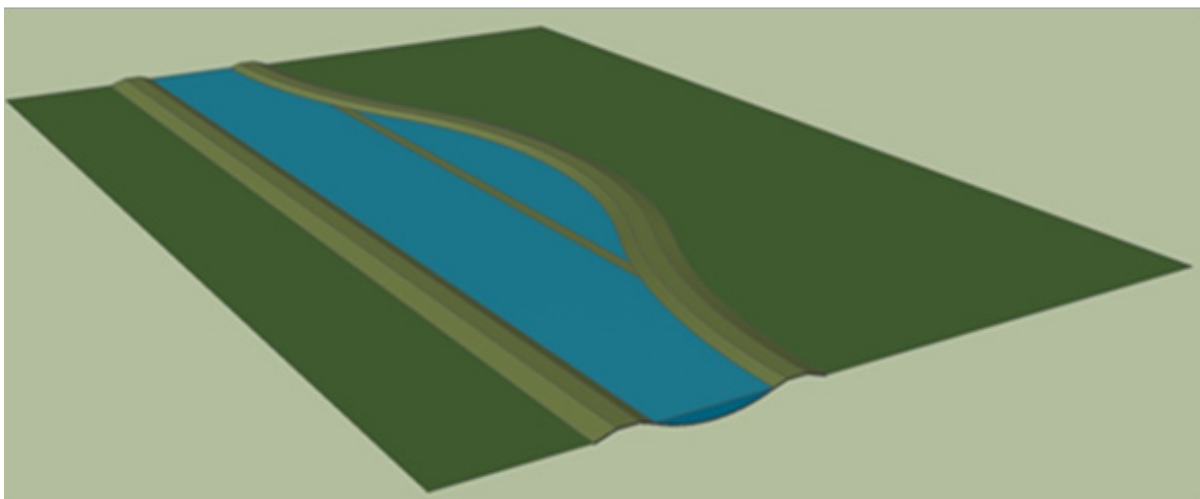
Indien een kering rond een waterbergingsgebied moet worden getoetst, dient de beheerder in overleg met de toezichthouder vast te stellen met welke bijzondere aandachtspunten en / of afwijkingen rekening moet worden gehouden.

In deze paragraaf worden uit oogpunt van de eisen aan de waterkering drie verschillende typen waterbergingsgebieden gedefinieerd:

- I. zomerpolder;
- II. volledige polder;
- III. polderdeel.

Ad. I Zomerpolder

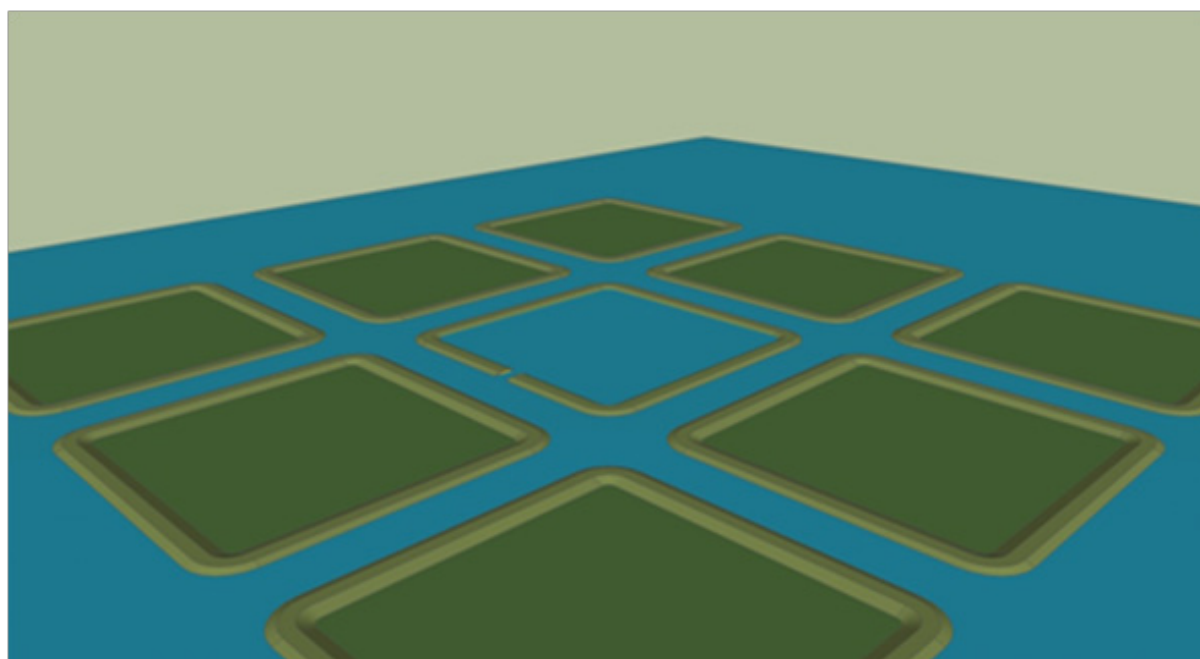
Dit betreft waterbergingsgebieden die direct naast de boezem of regionale rivier liggen, gescheiden door een kering. Voorbeelden zijn uiterwaarden, zomerpolders en boezemlanden. Deze gebieden zullen bij hoog water de boezem of rivier onderlopen en daarna direct deel uitmaken van het regionale watersysteem. Figuur C.3 geeft een schets van een zomerpolder (ingezet als waterberging).



Figuur C.3 Zomerpolder als waterberging

Ad.II: Volledige polder of overstromingsgebied

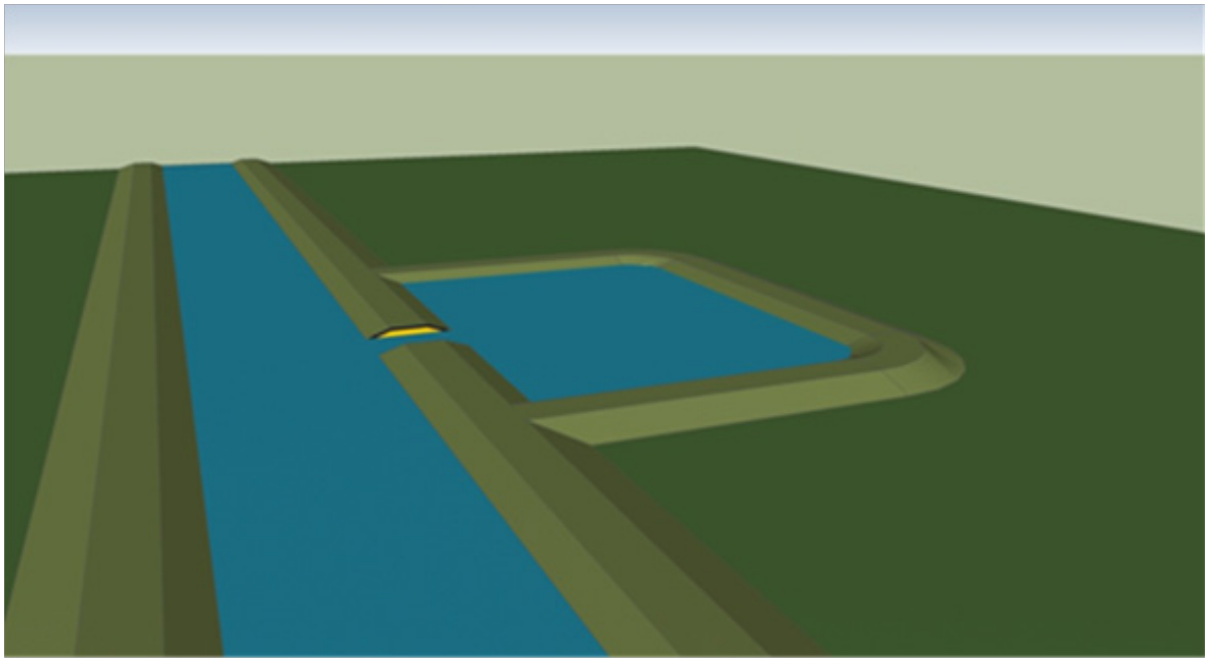
Dit betreft waterbergingsgebieden die een gehele polder (boezem) of overstromingsgebied (regionale rivieren) omvatten (zie figuur C.4). De waterkeringen rond een dergelijk waterbergingsgebied beschermen het gebied tot het moment van de inzet van de waterberging. Na het inzetten van de waterberging zal aan weerszijden van de kering water staan, afhankelijk in hoeverre (lage delen van) de polder gevuld zijn.



Figuur C.4 Waterberging in volledige polder (middelste vlak)

Ad.III: Gedeelte van een polder of overstromingsgebied

Dit betreft waterbergingsgebieden die slechts een deel van het (beschermde) achterland vormen. Het waterbergingsgebied wordt daarbij begrensd door een waterkering (en/of natuurlijke hoogten). Figuur C.5 geeft een schets van een waterbergingsgebied als gedeelte van een polder of overstromingsgebied (in dit voorbeeld volledig begrensd door een waterkering).



Figuur C.5 Waterberging in gedeelte van een polder over overstromingsgebied

Inzet waterbergingsgebied

Een waterbergingsgebied kan op verschillende manieren worden ingezet:

- doordat een deel van de kering min of meer 'automatisch' overloopt indien de waterstand in het regionale watersysteem de kruinhoogte overschrijdt;
- door het openen van een inlaatkunstwerk in de waterkering;
- door het weggraven van een deel van de waterkering.

De wijze van inzet heeft invloed op de hydraulische belastingen op de kering rond het waterbergingsgebied, en de mate waarin de waterstand in het waterbergingsgebied regelbaar is. Bij een volledig open verbinding is de waterstand in het waterbergingsgebied gelijk aan de waterstand in het regionale watersysteem (exclusief wat demping en/of naijling), en is deze niet regelbaar. Bij gebruik van een afsluitbaar inlaatwerk is het mogelijk in het waterbergingsgebied een andere waterstand te hanteren dan de waterstand op het regionale watersysteem. Dit kan zowel een lagere waterstand zijn, als een hogere (indien de verbinding gesloten wordt bij het dalen van de waterstand in het regionaal watersysteem).

Bij een volledig open verbinding tussen het regionale watersysteem en de waterberging wordt de waterkering tussen de waterberging en het beschermde achterland onderdeel van het stelsel regionale keringen.

Bij een regelbare (en afsluitbare) verbinding tussen het regionale watersysteem en het waterbergingsgebied zijn de gevolgen van een eventuele doorbraak van de kering om het waterbergingsgebied kleiner. De omvang van de overstroming van het achterland wordt beperkt door het aanwezige volume water in het waterbergingsgebied.

Toetsen

Rond een waterbergingsgebied zijn verschillende typen waterkeringen te identificeren:

- A. de kering op de gemeenschappelijke grens tussen het watersysteem en het waterbergingsgebied; die:
 - i. bij inzet van het waterbergingsgebied een kerende werking verliezen, of:
 - ii. bij inzet van het waterbergingsgebied een (beperkte) kerende werking houden, indien sprake is van een verschil in waterstand tussen het regionale watersysteem en het waterbergingsgebied;

- B. de kering tussen het waterbergingsgebied en het beschermde achterland, die:
- i. bij inzet van het waterbergingsgebied een kerende werking krijgen, en vanwege een open verbinding onderdeel gaan uitmaken van het stelsel regionale keringen;
 - ii. bij inzet van het waterbergingsgebied een kerende werking krijgen, maar dankzij een regelbare afsluiting van het regionale watersysteem een beperkt belang hebben.

Vanwege dit verschil kennen deze typen keringen verschillende belastingen, en worden aan deze keringen verschillende eisen gesteld. Dit kunnen zowel eisen uit oogpunt van de veiligheid van het beschermde gebied betreffen, als (aanvullende) eisen vanuit het onderhoud van de kering zelf. Voorbeelden zijn:

- de kruin moet bestand zijn tegen overstromend water, om grote herstelkosten na een hoogwater te voorkomen;
- de kering moet voldoen bij een 'omgekeerde' belasting na afloop van het hoogwater, wanneer de waterstand in het regionale watersysteem al lager is dan de waterstand in de waterberging.

Voor type A.i is een toets van de veiligheid uit oogpunt van de functie voor het waterbergingsgebied niet nodig. Indien het waterbergingsgebied wel beschermd moet worden tot een bepaalde veiligheidsnorm, dient de veiligheid uiteraard wel getoetst te worden (aan de bijbehorende norm).

Voor type B.i dient een volledige toets op veiligheid te worden uitgevoerd. Daarvoor kan deze leidraad worden gebruikt.

Voor de typen A.ii en B.ii kan de veiligheid eveneens worden getoetst. Deze leidraad is daarvoor bruikbaar, maar waarschijnlijk behoeven niet alle beoordelingssporen te worden doorlopen omdat ze niet of minder relevant. Ook kunnen aanpassingen vereist zijn. Bijvoorbeeld de toets op hoogte als de kering bij een bepaalde waterstand juist moet overstromen. Het staat het waterschap vrij om voor deze typen keringen deze Leidraad slechts gedeeltelijk toe te passen. Zulks in overleg met het bevoegd gezag.

Door onderscheid te maken tussen enerzijds waterkeringen tussen het watersysteem en de waterberging en anderzijds waterkeringen tussen de waterberging en het achterland kan helder onderscheid worden gemaakt in de wijze waarop de waterkeringen getoetst kunnen worden. De wijze waarop de waterberging wordt ingezet vormt daarbij een nuttige differentiatie.

Bij een toetsing gelden enkele specifieke aandachtspunten, ten aanzien van de relevante belastingen en de sterkte van de kering. Onderstaand volgt een opsomming van enkele aandachtspunten.

Belastingen

Bij een eventuele toetsing wordt aanbevolen te bekijken of bijzondere belastingsituaties moeten worden beschouwd, zoals:

1. het overlopen van water over de kruin (voor de kering tussen waterbergingsgebied en watersysteem);
2. de 'omgekeerde' belasting (indien de waterstand in het bergingsgebied hoger is dan de waterstand in het regionale watersysteem;
3. een snelle daling van de waterstand in het waterbergingsgebied.

Ad. 3 Een relevante belasting voor de regionale kering kan zijn het snel leegstromen van het waterbergingsgebied. Normaliter zal de waterstand in het waterbergingsgebied niet sneller dalen dan de waterstand in het watersysteem. Alleen indien bij een omgekeerde belasting de kering tussen het waterbergingsgebied en het watersysteem faalt, kan een snelle daling van de waterstand in het waterbergingsgebied optreden. Dit kan een bedreiging vormen voor de buitenwaartse stabiliteit van de regionale kering.

Opgemerkt wordt dat beschadiging van de kering tussen het watersysteem en waterbergingsgebied tijdens of na afloop van de inzet van het waterbergingsgebied overwegend geen (direct) gevaar vormt voor de veiligheid van het beschermde gebied. Beschadigingen door het overlopen of de 'omgekeerde' belasting van de kering is vooral relevant voor het beheer en onderhoud van de betreffende kering zelf.

Daarbij gelden enkele uitzonderingen. Beschadiging, het afschuiven en/of het gedeeltelijk verdwijnen van de kering tussen het waterbergingsgebied en het watersysteem kan leiden tot een toename van de hydraulische belasting op de kering die het achterland beschermd. Bijvoorbeeld doordat:

- een weggeslagen of beschadigde kering minder effectief golven reduceert (alleen relevant indien golfreductie van belang is voor de veiligheid van het beschermde gebied)
 - een snelle daling van de waterstand in het waterbergingsgebied een bedreiging vormt voor de buitenwaartse stabiliteit van de regionale kering.
- Deze uitzonderingen kunnen relevant zijn voor de veiligheid van het beschermde gebied, omdat na een eerste hoogwater een tweede hoogwater kan komen.

Tot slot wordt opgemerkt dat de hydraulische belasting in het waterbergingsgebied kan afwijken van de belastingen op het regionale watersysteem. De waterstand kan hoger zijn door mogelijke scheefstand binnen het waterbergingsgebied. Ook kan de golfbelasting lokaal groter zijn, door golfgroei in de geïnundeerde zomerpolder. Maar bij een breed watersysteem is de golfhoogte lokaal mogelijk juist kleiner, indien de zomerkade als golfbreker fungeert.

Aanvullende eisen / functies

Afhankelijk van de gewenste wijze waarop de polder als waterberging wordt ingezet, kunnen aanvullende eisen worden gesteld, zoals bijvoorbeeld:

- om een (te) snelle inundatie te voorkomen de eis dat de kering niet mag doorbreken door gebrek aan stabiliteit, tot een waterstand waarbij de waterberging wordt ingezet;
- het willen vasthouden van het water in het waterbergingsgebied (bij een regelbaar inlaatkunstwerk), zodat de waterstand in het regionaal watersysteem sneller kan dalen. In de waterberging is de waterstand dan hoger dan in het regionale watersysteem. Indien het vasthouden van water een beoogde functie van het waterbergingsgebied is, dient deze belasting te worden beschouwd bij een eventuele beoordeling van de kering.

Voor de veiligheid van de kering zijn deze eisen en de bijbehorende belastingen niet relevant, zodoende vormen ze geen onderdeel van de beoordeling van de veiligheid.

Verdroging van de waterkering

Indien onder normale omstandigheden geen water tegen de kering staat kan verdroging leiden tot uitdroging van de toplaag en scheurvorming. Dit stelt m.n. voorwaarden aan de aanleg van dergelijke keringen, qua verdichting van het dijkmateriaal.

2.6. Compartimenteringskering

De compartimenteringskeringen kunnen in de volgende categorieën worden verdeeld.

- "Droge" compartimenteringskeringen
Keringen die niet langs een watergang of oppervlaktewater zijn gelegen. Onder normale omstandigheden keren deze keringen geen water. Het betreft veelal oude zeedijken (in het kustgebied). De compartimenterende functie is vaak ontstaan doordat voor een zeedijk of rivierdijk een nieuwe kering is gebouwd. Soms ook zijn compartimenteringskeringen gebouwd om een bepaald gebied (bijvoorbeeld een stad) te beschermen of een gebied te verdelen zodat niet het gehele gebied overstroomt bij een overstroming.
- "Natte" compartimenteringskeringen
Keringen die langs een watergang of oppervlaktewater zijn gelegen en dagelijks of tenminste frequent water

keren. Natte compartimenteringskeringen betreffen over het algemeen twee keringen met daartussen water, zoals kanaaldijken, boezemkaden of regionale rivierdijken, waarvan één kering tevens is aangewezen als compartimenteringskering. Door deze dubbelfunctie kan een bijzondere situatie ontstaan waarbij de natte compartimenteringskering aan twee zijden water keert of aan één zijde zowel het “reguliere” water als het water door overstroming van het voorliggende gebied. Daarnaast kan het zijn dat bij inundatie van een compartiment één van beide keringen bezwijkt, maar dat de tweede kering nog intact blijft, waardoor de functie als compartimenteringskering nog voldoet. Met de eerste kering wordt de kering aan de zijde van de inundatie bedoeld, de tweede kering is de kering die grenst aan het tegenovergelegen te beschermen compartiment. Hierdoor ontstaat er een grote verscheidenheid aan mogelijke belastingcombinaties. De belastingcombinaties van deze “natte” compartimenteringskeringen verschillen enigszins ten opzichte van de “enkele” keringen.

- Grondlichamen

Naast de bovenstaande waterkeringen is het denkbaar dat de grondlichamen van auto- of spoorwegen worden aangewezen als compartimenteringskering. Het waterkerend vermogen van dergelijke constructies zal normaal gesproken vaak beduidend minder zijn, omdat ze niet zijn ontworpen voor een waterkerende functie. Daarnaast kunnen zich in aardebanen coupures, onderdoorgangen, enz. bevinden.

Compartimenteringskeringen worden vrijwel nooit als compartimenteringskering hydraulisch belast, zodat ervaring met het werkelijk waterkerend vermogen ontbreekt. Dit gebrek aan inzicht vergt speciale aandacht bij de schematisering in het kader van de beoordeling ten aanzien van de verschillende beoordelingssporen.

2.6.1. Belastingcombinaties natte compartimenteringskeringen

De belastingcombinaties van de “natte” compartimenteringskeringen verschillen enigszins ten opzichte van de “droge” keringen, omdat twee keringen en twee te keren wateren aanwezig zijn. Daarnaast kan één van de twee keringen of beide keringen als compartimenteringskering zijn aangewezen. Verder is het mogelijk dat een compartimenteringskering, afhankelijk van de doorbraaklocatie, water van beide zijde moet kunnen keren (in verschillende situaties).

Bij natte compartimenteringskeringen kunnen zich de onderstaande drie scenario's voordoen met betrekking tot de aanwijzing:

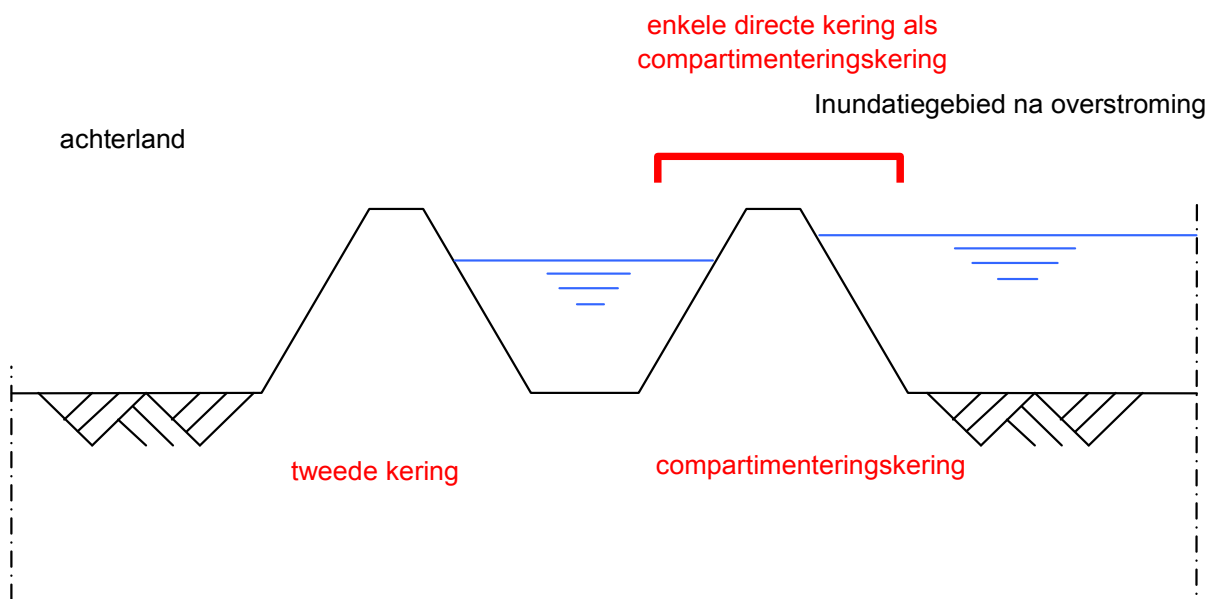
1. Een enkele directe kering aangewezen als compartimenteringskering.
2. Een enkele indirecte kering aangewezen als compartimenteringskering.
3. Een dubbele kering aangewezen als compartimenteringskering.

De belastingcombinaties van deze “natte” compartimenteringskeringen worden hieronder nader toegelicht.

In het algemeen geldt dat de aangewezen kering moet voldoen aan de toetsing als waterkering voor het aanwezige water (boezem, rivier, kanaal) tussen de keringen. Voldoet deze niet als waterkering voor het tussenliggende water, dan voldoet de kering ook niet als compartimenteringskering.

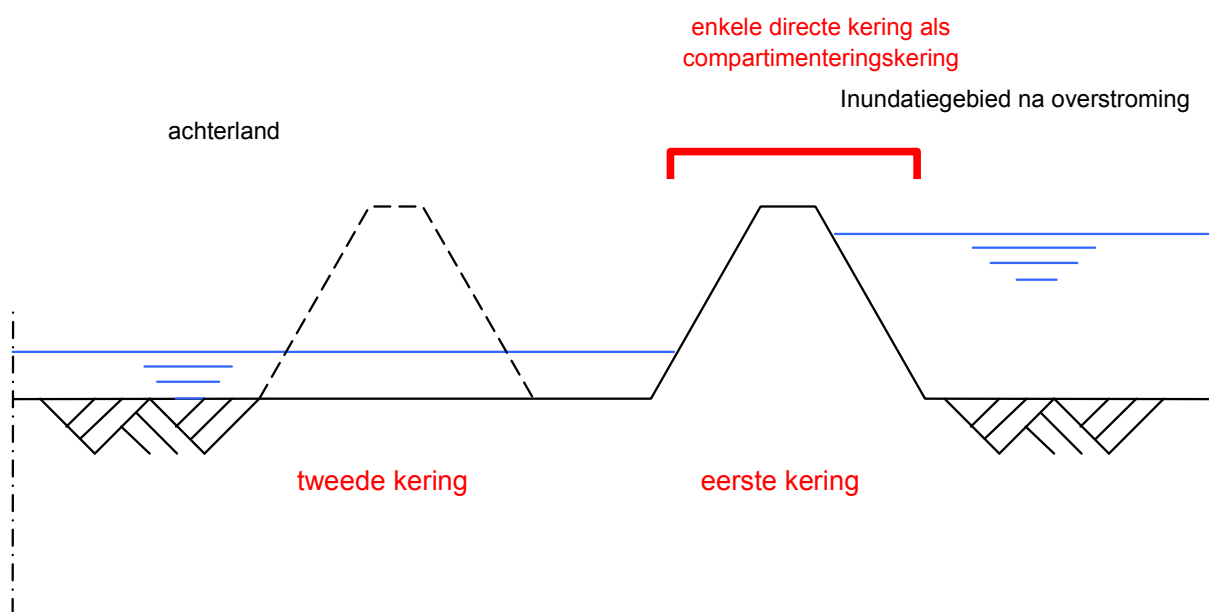
Een enkele directe kering aangewezen als compartimenteringskering

Een enkele directe kering moet het water tijdens de normsituatie keren uit de tegenovergestelde richting ten opzichte van de normale situatie (zie Figuur C.6).



Figuur C.6 Definitie van een enkele directe kering als compartimenteringskering

De tweede kering in dit scenario hoeft niet als compartimenteringskering te worden getoetst, maar heeft wel invloed op de hydraulische randvoorwaarden bij toetsing van de enkele directe kering als compartimenteringskering. Bij de beoordeling van de eerste kering dient de tweede kering veiligheidshalve als afwezig te worden beschouwd, omdat niet kan worden uitgesloten dat deze kering faalt door de gewijzigde (geohydrologische) situatie tijdens de overstroming. De tweede kering is immers niet aangewezen als compartimenteringskering, zodat ook geen rekening gehouden kan worden met deze tweede kering bij de voor de compartimenteringskering te beschouwen veiligheidsniveau. Het waterpeil in de binnenwaartse zijde van de eerste kering is dan lager. Zie ook Figuur C.7.



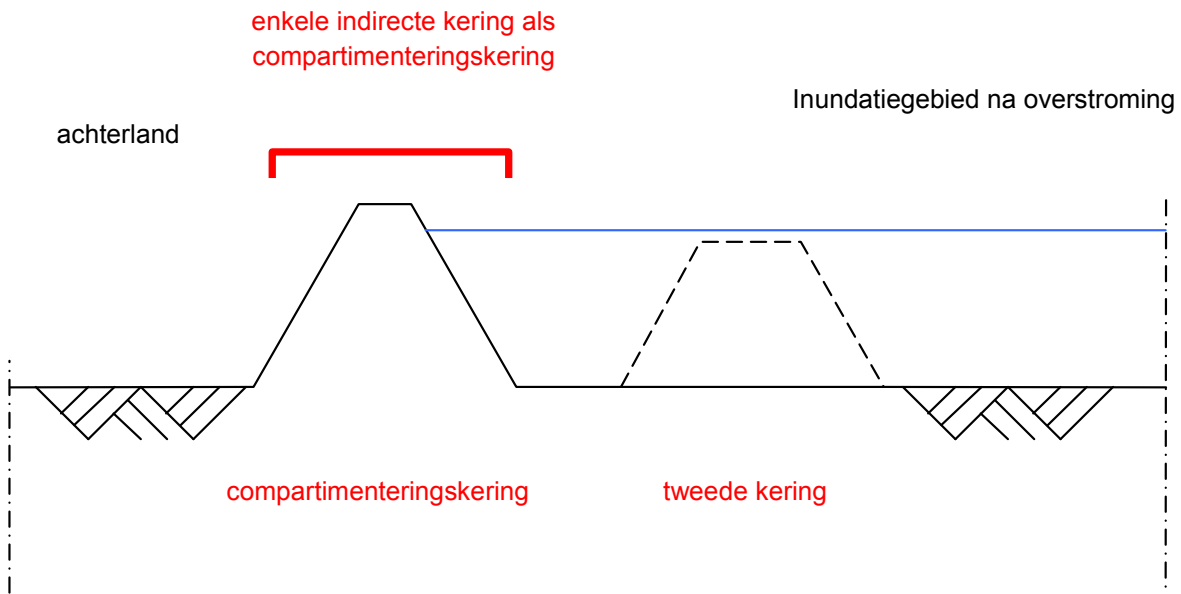
Figuur C.7 Beoordeling van een enkele directe kering als compartimenteringskering waarbij de tweede kering als niet aanwezig wordt beschouwd

De beoordeling van deze enkele directe kering is verder conform module D met dien verstande dat de te

hanteren waterstand aan de binnenzijde gelijk is aan het bodemniveau van de boezem, rivier of kanaal. Alleen indien aangetoond kan worden dat na falen van de tweede kering het water hoger zal staan, mag worden uitgegaan van dit hogere peil.

Een enkele indirecte kering aangewezen als compartimenteringskering

Een enkele indirecte kering keert het water uit dezelfde richting als de normale situatie (zie Figuur C.8).



Figuur C.8 Definitie van een enkele indirecte kering als compartimenteringskering

De tweede kering, die niet is aangewezen als compartimenteringskering, moet als afwezig worden beschouwd. Deze tweede kering hoeft ook niet te worden getoetst. De beoordeling van deze enkele indirecte kering is verder conform module D. Let hierbij op dat de stijghoogte mogelijk ongunstiger kan zijn door hydraulische kortsluiting ter plaatse van het geïnundeerde gebied. Indien de hydraulische belasting voor de compartimenterende functie geringer is dan de belasting als “natte” kering, dan kan de veiligheid direct als voldoende worden beoordeeld.

2.6.2. Hydraulische randvoorwaarden

In deze paragraaf wordt nader ingegaan op specifieke aspecten voor het bepalen van de maatgevende waterstanden in de inundatiegebieden en de resulterende hydraulische randvoorwaarden voor een compartimenteringskering.

Maatgevend hoogwaterstand / inundatieniveau

Het optredende inundatieniveau volgt uit overstromingsberekeningen die normaliter worden uitgevoerd in het kader van de normering van de betreffende compartimenteringskering. De maatgevende waterstand hangt direct af van een gekozen overschrijdings- of normfrequentie. Bij de afleiding van de hydraulische randvoorwaarden dient tevens rekening te worden gehouden met de windopzet. Soms maakt deze verhoging van de waterstand door opwaaiing (windopzet) onderdeel uit van de overstromingsberekening. In de overige situaties dient de waterkeringbeheerder deze lokale toeslag te bepalen.

In kustgebieden is het inundatieniveau mogelijk afhankelijk van eb en vloed. Bij de schematisering van de waterspanningen kan zodoende rekening worden gehouden met een (al dan niet gedempte) fluctuatie van de waterstand.

Windgolven

Ten aanzien van de windsnelheid is het van belang of de overstroming van het inundatiegebied wordt veroorzaakt door een hoogwatersituatie op het buitenwater die gecorreleerd is aan het optreden van een storm. Indien de normering niet is gebaseerd op een overstroming door een hoogwatersituatie die gecorreleerd is aan het optreden van een storm, dan dient te worden uitgegaan van een windsnelheid behorende bij normfrequentie van compartimenteringskering.

Indien de normering wel is gebaseerd op een overstroming door een hoogwatersituatie die gecorreleerd is aan het optreden van een storm, dan dient voor de maatgevend hoge windsnelheid te worden uitgegaan van:

- een windsnelheid overeenkomend met de normfrequentie van de voorliggende hoofdwaterkering, indien in het compartiment binnen een korte tijd (< 18 uur) de maatgevende waterstand ontstaat;
- een maatgevende windsnelheid overeenkomend met de normfrequentie van de compartimenteringskering, indien in het compartiment niet binnen een korte tijd (dus na 18 uur) de maatgevende waterstand ontstaat.

De eerste situatie betreft met name compartimenteringskeringen in het bovenrivierengebied, de tweede situatie betreft met name keringen in het kust-, benedenrivieren- en grote merengebied.

Windopzet

Bij inundatie van een gebied kan wind zorgen voor windopzet. Een ongunstige richting van de wind zorgt voor een hogere waterstand voor de compartimenteringskering. Bij het beoordelen van de compartimenteringskering dient zo nodig rekening gehouden te worden met een maatgevende windopzet.

Ten aanzien van de te hanteren windsnelheid gelden de aanbevelingen zoals bovenstaand beschreven bij het onderdeel windgolven.

2.6.3. Belastingssituatie droogte

Een compartimenteringskering functioneert alleen wanneer sprake is van een overstroming. In het betreffende compartiment is dan sprake van een hoogwater situatie. Deze situatie treedt uitsluitend op na het bezwijken van een primaire waterkering. Het lijkt uitgesloten dat een primaire kering bezwijkt ten gevolge van een periode met langdurige droogte, omdat algemeen wordt aangenomen dat dit type waterkering niet is opgebouwd uit veen.

Theoretisch is het niet ondenkbaar dat een overstroming optreedt kort na of juist voorafgaand aan een periode van langdurige droogte. In dat geval kan sprake zijn van een overstromd compartiment (= hoogwatersituatie) in combinatie met een verdroogd dijklichaam en achterland door droogte. De kans op deze combinatie is echter zeer klein, en mag gezien worden als een boven – normatieve situatie. Zodoende vormt de belastingssituatie droogte geen bedreiging voor compartimenteringskeringen.

2.6.4. Beoordeling behoud veiligheid – handhaven huidig profiel

Bij de uitwerking van enkele case-studies die gedaan zijn voor de Richtlijn Normering

Compartimenteringskeringen is geconstateerd dat sommige regionale compartimenteringskeringen:

- wel een nuttige functie vervullen bij een doorbraak van een primaire waterkering door (tijdelijke) compartimentering van een dijkkring;
- maar dat een verbetering van deze keringen op voorhand als economisch onrendabel (en/of maatschappelijk onacceptabel) kan worden ingeschat.

Daarbij wordt aantasting van het huidige profiel van deze keringen als onwenselijk beschouwd, zodat deze keringen beschermd moeten worden. Aantasting van het huidige profiel is bijvoorbeeld onwenselijk indien het verwijderen van de kering nadelige effecten heeft op:

- het slachtoffer risico in het achterliggend gebied bij falen van de primaire kering, en/of;
- het schaderisico in het achterliggend gebied, en/of;
- de evacuatie fracties in een door overstroming getroffen gebied, omdat vluchtroutes in deze situaties niet meer (goed/langdurig) begaanbaar zijn; en/of;
- de mogelijkheid om te anticiperen op nieuwe inzichten en nieuwe functies van deze waterkering.

Deze keringen worden genormeerd tot 'handhaven huidig profiel'. Deze norm is geen getalsmatige norm, maar een behoudsnorm.

Behoud huidige veiligheid

In de Wet op de Waterkering (1996) is voor de primaire keringen van de categorie C de term 'behoud huidige veiligheid' geïntroduceerd. Behoud huidige veiligheid is uit oogpunt van het beheer van de waterkering echter een moeilijk handhaafbare norm, omdat:

1. geen nadelige wijzigingen in het watersysteem mogen optreden (de belasting behorende bij de norm mag niet toenemen);
2. de waterkering (incl. beschermingszone) mag niet worden aangetast (de sterkte mag niet afnemen).

Aan deze voorwaarden kan de waterkeringbeheerder moeilijk voldoen, omdat dit watersysteem het buitenwater betreft en autonome ontwikkelingen als kruin- of maaiveld daling een afname van de veiligheid kunnen vormen. In de Richtlijn Normeren Compartimenteringskeringen is daarom deze term aangescherpt tot 'behoud huidig profiel'.

Theoretisch is getalsmatige normering mogelijk door (kwantitatief) vast te stellen welke hydraulische belasting de kering in de huidige toestand kan weerstaan. Dit zogenaamde 'inverse toetsen' is praktisch gezien echter zeer complex, bijvoorbeeld omdat voor verschillende faalmechanismen andere belastingen van toepassing zijn.

Bij lokale overdimensionering van de kering dient bovendien niet noodzakelijkerwijs de gehele waterkering te worden beschermd, bijvoorbeeld doordat mogelijk:

- niet alle faalmechanismen even kritiek zijn
- een vergraving direct bij de binnenteen hoeft bijvoorbeeld niet tot een afname van de sterkte te leiden indien de kruinhoogte ruimschoots onvoldoende is;
- niet alle dijkvakken even kritiek zijn
- een geringe aantasting van de waterkering op een dijkvak met een robuuster dwarsprofiel dan de nabijgelegen dijkvakken geeft geen afname van de veiligheid voor het beschermde gebied achter de kering.

Dit bemoeilijkt de waterbouwkundige motivatie van de bescherming van de waterkering aan derden, bijvoorbeeld in het kader van de verlening van vergunningen of ontheffingen.

Daarnaast impliceert deze werkwijze dat een toekomstige toename van het toetspeil tot afkeuren en hiermee tot een verbeteropgave leidt, terwijl op voorhand al ingeschat is dat (grootschalige) verbetering vanuit maatschappelijk en economisch perspectief niet wenselijk is.

Bij de uitwerking van de norm is daarom niet de huidige veiligheid of huidige sterkte van de kering als uitgangspunt genomen, maar het huidige profiel en de inpassing in de bestaande omgeving. Daarbij dient te worden beschouwd welke (autonome) ontwikkelingen te verwachten zijn en in hoeverre dit invloed heeft op het vast te stellen minimaal en benodigde profiel

Overlaat of 'overloop waterkering'

Een bijzonder type compartimenteringskering is de overloopwaterkering. Dit type compartimenteringskering houdt bij een overstrooming het water alleen tijdelijk tegen. De hoogte van de overloopwaterkering is gemaximeerd om de waterdiepte in het overstroomde compartiment te beperken. Een overloopwaterkering mag soms wel doorgraven worden en vraagt dus om een eigen aanpak. De overloopwaterkering is hier daarom niet uitgewerkt.

Uitwerking

Aan de uitwerking van het behoud van het huidige profiel kan op verschillende wijzen invulling gegeven worden. De toegestane mate van "aantasting" van de buitencontour is een keuze die gemaakt wordt tijdens dit proces. Het resultaat is een leggerprofiel voor de keringen, waaraan de buitencontour getoetst wordt. Toetsing is niet meer dan het vergelijken van de buitencontour met het leggerprofiel. Toetsing vindt plaats aan de hand van een handhavingss dossier of met behulp van profielen die ontleend zijn aan nieuwe beelden of technieken.

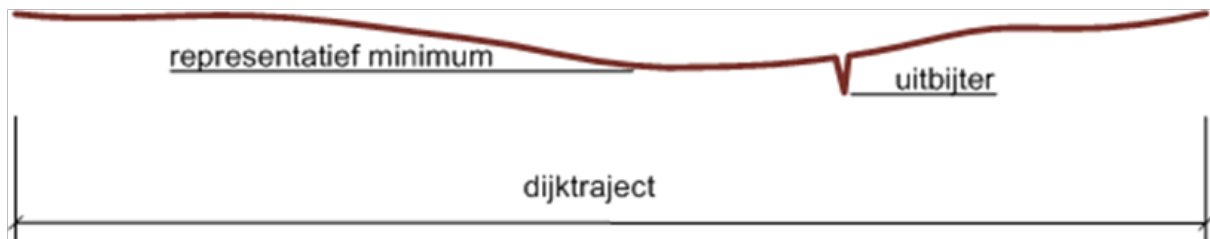
In onderstaande uitwerkingsvarianten is weergegeven op welke wijzen het waterschap tot een leggerprofiel kan komen, en welke effecten die stappen hebben op het gebruik van de kering. De uitwerkingsstappen zijn:

1. Afleiden basisprofielen
2. Bepalen van profiel van vrije ruimte
3. Vaststellen normprofiel/leggerprofiel

Onderstaand volgt een nadere toelichting bij deze stappen.

Stap 1 Afleiden basisprofielen

Onder een basisprofiel verstaan we het dwarsprofiel van de kering ter plaatse van het representatief minimum in een dijktraject. Het representatief minimum is het laagste, steilste en/of smalste dijkprofiel behoudens duidelijke uitbijters (figuur C.9).



Figuur C.9 Bepaling van het representatief minimum binnen een dijktraject, op basis van hoogte

Deze schematisatie geldt voor deze benadering, en is niet per definitie een goede schematisering voor andere doeleinden.

Bij het afleiden van de basisprofielen kan ervoor gekozen worden om een generalisatie toe te passen door het dijktraject langer te maken. Bij een langer dijktraject ligt het voor de hand dat het basisprofiel gemiddeld lager wordt dan bij kortere dijktrajecten. Daardoor ontstaat meer ruimte voor vergunningverlening in de dijk. Tegelijkertijd wordt hiermee meer toegegeven op het huidige veiligheidsniveau. In de praktijk zal het vrijwel altijd gaan om een combinatie van langere en kortere dijktrajecten. Het is aan de beheerder om deze trajecten slim te kiezen zodat zowel veiligheid als ruimte voor ontwikkelingen optimaal worden gediend. We onderscheiden hiervoor drie methoden:

A. Korte dijktrajecten als conservatieve benadering, nadruk op veiligheid

Bij de conservatieve benadering is er nauwelijks sprake van dijktrajecten: de huidige contour van de kering wordt aangehouden. De basisprofielen worden om de 10-50 meter ingemeten vanuit de buitencontour op basis van hoogtemetingen zoals het Actueel Hoogtebestand Nederland 2. Vervolgens wordt op deze profielen een (visuele) controle uitgevoerd om te controleren of er elementen in zitten die buiten de basisprofielen gehouden moeten worden. Dit zijn bijvoorbeeld op- en afritten, bebouwing, bruggen, constructies, begraafplaats, terpen, gronddepots, etc.. Deze methode is goed te automatiseren en vereist weinig inhoudelijke deskundigheid. Met name in situaties waarin het onwenselijk is dat activiteiten het beschouwde dijktraject plaatsvinden, is deze variant goed werkbaar. Bij een vergunningaanvraag zal echter nog steeds gekeken moeten worden naar het profiel ter hoogte van de aanvraag in verhouding tot de profielen in de omgeving.

B. Dijktrajecten gedifferentieerd naar geometrische kenmerken kering, zoeken naar balans

De dijktrajecten worden bepaald op basis van de karakteristieken van de dijk zoals: de geometrie, bodemopbouw (voor zover bekend) en oriëntatie. Dit leidt tot een traject met een lengte van bijvoorbeeld 1 tot 5 km. Per dijktraject wordt de buitencontour bekeken en een basisprofiel bepaald voor dat traject. Het verschil met de conservatieve aanpak is, dat op plaatsen waar de kering relatief robuust is, meer toegestaan kan worden voor vergunningen. Deze methode zorgt voor balans tussen aansluiting bij het huidige veiligheidsniveau en houdt tegelijk enige ruimte voor vergunningen.

C. Dijktrajecten gedifferentieerd naar gevolgen bij een overstroming, nadruk op het bieden van ruimte

De dijktrajecten worden ingedeeld op basis van de te verwachten verschillen in overstromingspatronen bij doorbraak van de compartimenterende kering. Elk deel van de kering waarvan het overstromingspatroon anders is dan het naastgelegen deel, wordt een apart dijktraject. De overstromingspatronen kunnen

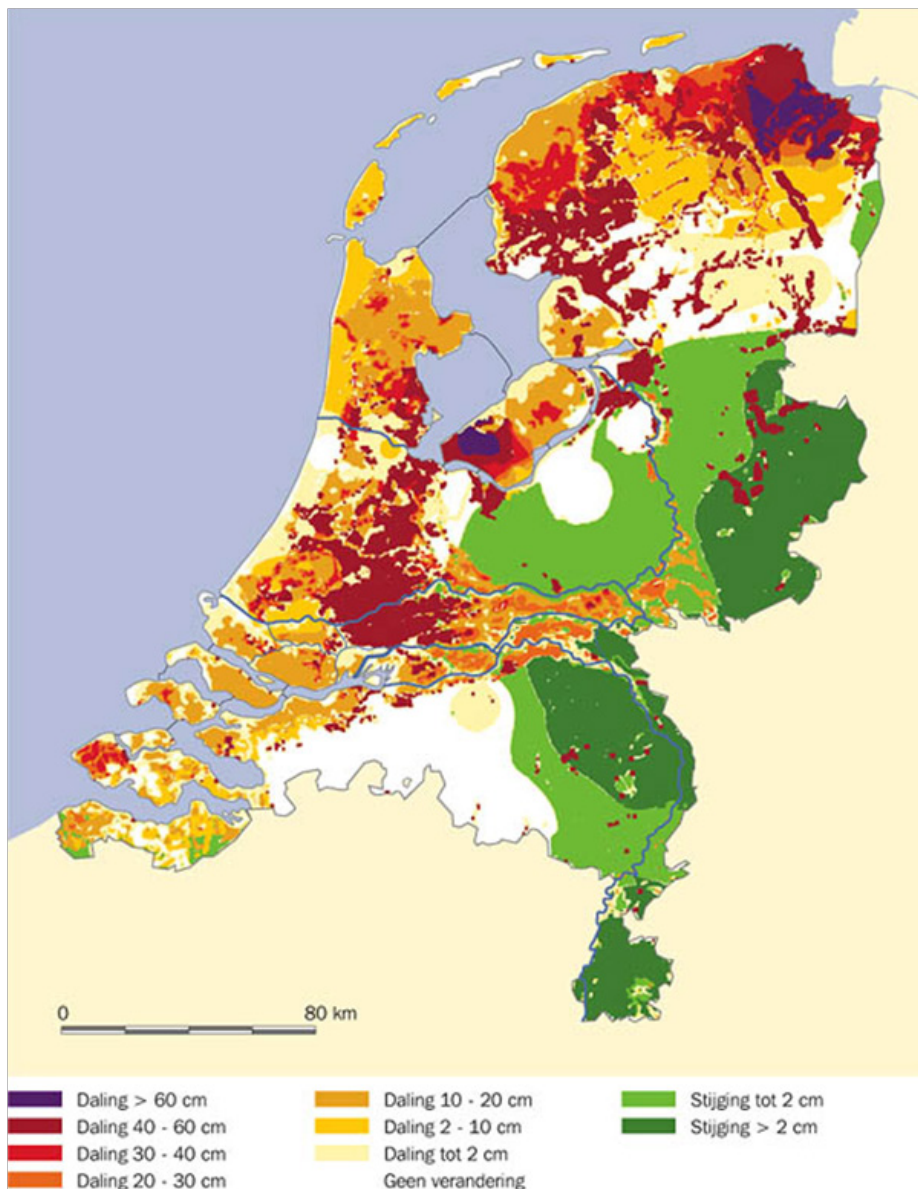
worden afgeleid van de beschikbare overstromingsberekeningen en met behulp van lokale kennis van landschapselementen en hun effect op het overstromingsverloop. De verschillen in overige geometrische kenmerken van de kering spelen een ondergeschikte rol.

Deze methode is te verkiezen bij een complex systeem van compartimenteringskeringen.

Deze aanpak vormt een goede inhoudelijke onderbouwing van de indeling in trajecten en afleiding van het basisprofiel. Indien dit leidt tot lange dijktrajecten is deze aanpak mogelijk streng, en leidt deze tot een basisprofiel met beperkte afmetingen. Hierdoor kan het uiteindelijke beschermingsniveau af gaan wijken van het bestaande veiligheidsniveau. Deze aanpak is geschikt wanneer veel ontwikkelingen nabij de waterkering worden verwacht en het waterschap ook ruimte voor deze ontwikkelingen wil geven.



Figuur C.10 Dijkring met complex systeem van compartimenterende keringen



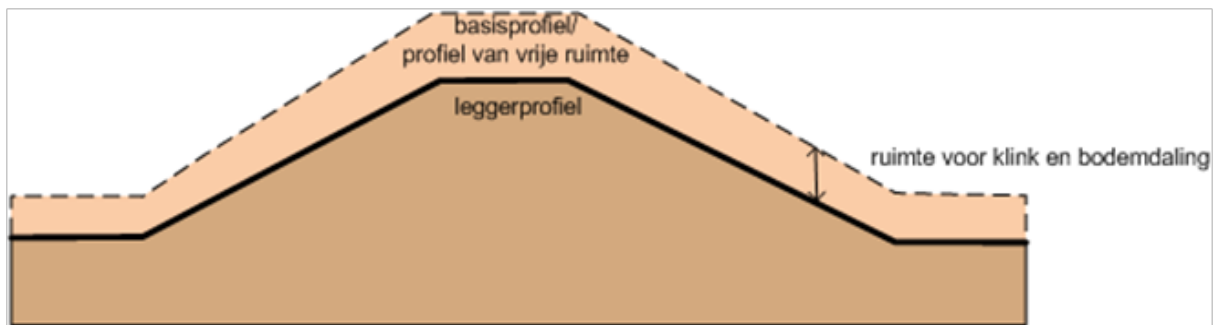
Figuur C.11 Verwachte bodemdaling in Nederland tussen 1995 en 2050 (Bron: RWS)

Stap 2 Bepalen van profiel van vrije ruimte voor klink en bodemdaling

Wanneer het basisprofiel rechtstreeks in de legger zou worden opgenomen, dient de kering na enkele millimeters klink of bodemdaling te worden afgekeurd. Dat is juist niet de bedoeling van de norm 'handhaven huidig profiel'. Daarom wordt een profiel van vrije ruimte gereserveerd voor autonome processen als klink en bodemdaling. De hoeveelheid ruimte die gereserveerd dient te worden is afhankelijk van de tijdshorizon die wordt aangehouden. Om niet elke toetsing het normprofiel te hoeven bijstellen, kan uitgegaan worden van een tijdshorizon van bijvoorbeeld 30-50 jaar, afhankelijk van de plaatselijke bodemsamenstelling. Op basis van ervaringscijfers kan de keringbeheerder het benodigde profiel van vrije ruimte bepalen. Daarnaast kan het zo zijn dat de keringbeheerder ruimte wil reserveren voor ontwikkelingen in de normeringssystematiek of voor eventuele lokale versterking van de dijk, boven de huidige buitencontour. Hoewel integraal voldoen aan een getalsnorm economisch onhaalbaar is, kan het zo zijn dat lokaal versterken van de kering ter plaatse van een uitbijter ten behoeve van een vluchtroute of vluchtplaats wenselijk en economisch te verdedigen is.

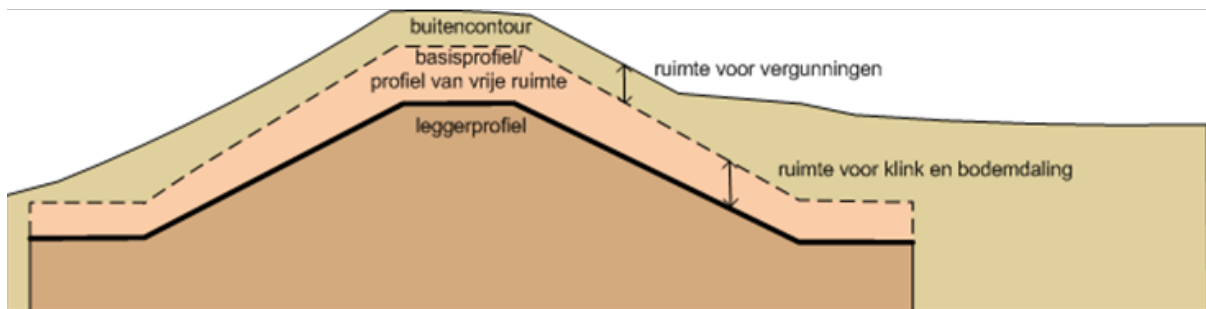
Stap 3 Profielen in de legger

Het basisprofiel vormt de buitenkant van het profiel van vrije ruimte. De reservering voor autonome processen zoals klink en bodemdaling bepaalt het uiteindelijke leggerprofiel (zie figuur C.12).



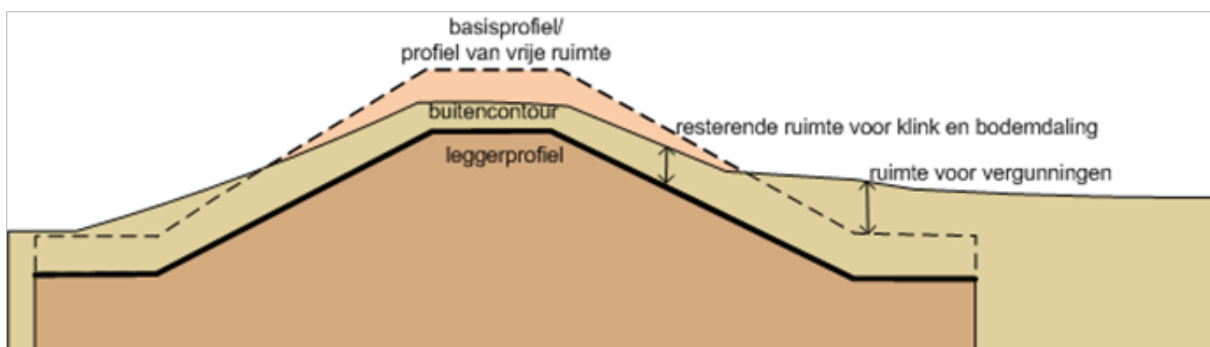
Figuur C.12 Leggerprofiel met profiel van vrije ruimte

De ruimte tussen het profiel van vrije ruimte en de buitencontour van de kering ter plaatse van een vergunningaanvraag is beschikbaar voor vergunningverlening (figuur C.13). Bij compartimenteringskeringen waarvan bekend is dat ze alleen vertragend werken en vrijwel zeker zullen overstromen (zgn. overloopwaterkeringen, zie kader) kan de beheerder ervoor kiezen minder beperkingen op te leggen. De mogelijkheden voor vergunningen worden dan alleen beperkt door de eisen om de kering niet te verlagen en niet te doorgraven.



Figuur C.13 Ruimte voor vergunningverlening tussen profiel van vrije ruimte en de buitencontour

Na verloop van jaren kan het zo zijn dat de buitencontour door bodemdaling en klink binnen het profiel van vrije ruimte komt te liggen (figuur C.14). Dit is ook het geval ter plaatse van een uitbijter in het dijktraject (Figuur C.9), omdat daar het basisprofiel al direct boven de buitencontour ligt. Er is dan weinig tot geen ruimte voor vergunningverlening op deze locatie.



Figuur C.14 Situatie wanneer buitencontour binnen het profiel van vrije ruimte valt

Vervolgstap: nader onderzoek voor meer inzicht in de kering

Bij het aanwijzen met als norm 'handhaven huidig profiel' is een vergelijking gemaakt van

1. de huidige situatie; met
2. de situatie dat de compartimenteringskering zo hoog en sterk is dat deze niet faalt; en
3. de situatie dat de compartimenteringskering afwezig is.

Wanneer verhogen/versterken onhaalbaar is en weghalen niet acceptabel, is gekozen voor handhaven huidig profiel. Het is echter de vraag of 'niet weghalen' van de dijk gelijkgesteld mag worden aan 'het huidig profiel moet behouden blijven'. Bij het bepalen van de norm is uitgegaan van deze aanname. Het zou kunnen zijn dat een kleine versterking of een kleine verlaging een betere bescherming biedt dan de huidige situatie. Een verfijningsronde kan meer inzicht bieden.

Op basis van kennis van het overstromingsverloop aan beide kanten van de kering en de samenstelling van de kering kan voor relevante trajecten iets verder gekeken worden naar de hoogte en de duur van de belasting tegen de kering. Ook kan op basis van de grondsamenstelling een inschatting worden gemaakt van de belangrijkste faalmechanismen. Hierop kan het basisprofiel worden aangepast. Trajecten kunnen relevant zijn omdat zich veel economische waarde op dit dijktraject bevindt, of omdat het traject een vluchtroute of vluchtplaats bevat of omdat het verschil in basisprofielen tussen verschillende trajecten erg groot is.

Economische waarde

Bij een dijktraject waar veel economische activiteit op de dijk plaatsvindt, zoals een dorpskern of een bedrijventoneel, kan behoud van het huidig profiel deze functies in de weg zitten als het profiel 'op slot zit'. Tegelijkertijd levert bezwijken van dat deel van de kering ook veel economische schade op. Dan is het zinvol te kijken hoeveel ruimte gegeven kan worden zonder de standzekerheid te laten afnemen. Welk effect het overstromen van de kering heeft, dient tevens bekeken te worden. Afhankelijk van de bodemopbouw van de kering en welke faalmechanismen mogelijk relevant zijn voor deze kering kan het actuele veiligheidsniveau worden ingeschat en kan gekeken worden welke ruimte lokaal beschikbaar gemaakt kan worden voor vergunningverlening.

Vluchtroute

Het handhaven van een vluchtroute is op zichzelf geen taak van het waterschap. De Nederlandse veiligheidsregio's zijn verantwoordelijk voor evacuatie bij overstromingen. Daarbij kan een compartimenteringskering zeer goed van pas komen als vluchtroute of vluchtplaats. In overleg met de veiligheidsregio kan de keringbeheerder kijken naar de begaanbaarheid van de compartimenteringskering met de behoudsnorm bij een doorbraak van de primaire kering(en). Daarbij moet uitgegaan worden van verkeersbelasting op de compartimenteringskering. Eventueel kan voor (een deel van) een kering die dient als vluchtroute alsnog een tijd tot bezwijken als richtlijn worden aangehouden.

2.7. Hoge gronden

In sommige situaties zullen regionale keringen aansluiten op natuurlijke hoge delen in het landschap die niet overstroomd bij maatgevend hoogwater op het regionale watersysteem. Dit zal met name optreden in de hogere delen van het land. Hoge grond vormt geen onderdeel van het stelsel regionale keringen om een beschermd gebied, en hoeft niet te worden beoordeeld bij de toets op veiligheid. Het is daarbij wel van belang dat hoge grond niet wordt afgegraven of doorgraven. De controle hierop is de verantwoordelijkheid van de provincie.

Lokaal hooggelegen delen in het landschap zoals in stedelijk gebied, haventerreinen of spoor- of snelweglichamen, worden niet als hoge grond beschouwd. Dergelijke delen maken wel onderdeel uit van het stelsel dat een beschermd gebied omsluit. Zodoende worden lokaal hooggelegen delen aangemerkt als waterkering, en dienen deze als zodanig getoetst te worden. Hierbij is dan sprake van een zgn. verholten waterkering. Vaak zal kunnen worden volstaan met een eenvoudige beoordeling.

De aansluiting van een regionale kering op hoge grond kan worden getoetst aan de hand van enkele aanwijzingen die zijn beschreven in het VTV2006.

2.8. Niet genormeerde keringen

In enkele specifieke gevallen zijn regionale keringen wel aangewezen, maar niet van een norm voorzien. Een beoordeling van veiligheid van deze keringen conform deze Leidraad is niet goed mogelijk. Enerzijds ontbreekt hiertoe een maatgevende waterstand behorende bij de norm. Anderzijds lijkt de vereiste inspanning voor zo'n beoordeling geen recht doen aan het ogenschijnlijk geringe belang van deze keringen.

In het buitenland is veel vaker sprake van niet genormeerde keringen, zoals in Engeland en Frankrijk. In beide landen worden methodieken toegepast voor een kwalitatieve beoordeling van de toestand van de kering, vaak op basis van visueel waarneembare kenmerken. Voor nadere informatie over kwalitatieve methoden voor de beoordeling van waterkeringen wordt verwezen naar het International Levee Handbook [CIRIA, 2013].

REFERENTIES

[Deltares, 2011]	Analyse Macrostablieit Dijken met de Eindige Elementen Methode, rapport 1202121-012-GEO-0005, december 2011, i.o.v. RWS Waterdienst,
[Deltares, 2012]	Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen, Deltares, rapport 1202123-003-GEO-0002, maart 2012.
[Deltares, 2014a]	Memo Ongedraineerde schuifsterkte bij toetsspoor macrostablieit in WTI 2017 - informatie voor besluitvormingsproces. Deltares memo met kenmerk 1209434-006-GEO-000711, juli 2014.
[Deltares, 2014b] ongedraineerde	Rapport Modelonzekerheidsfactoren Spencer-Van der Meij model en schuifsterkte Programma WTI 2017, rapport 1207808-001-GEO-0005, Versie 02, Deltares, 17 december 2014.
Deltares, 2014c	droogtegevoeligheid/verdroging
[ENW, 2007]	Addendum bij het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies.
[Geo, 2013]	Van Duinen, T.A., en Van Hemert, H. (2013). Stablieitsanalyses met ongedraineerde schuifsterkte voor regionale waterkeringen. Geotechniek, december 2013.
[Min. I&M, 2014]	Werkwijzer Piping bij Dijken, Min. I&M, RWS Water, Verkeer en Leefomgeving, november 2014
[STOWA, 2007a]	LTV2007, Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen, ORK2007-02.
[STOWA, 2009]	Handreiking Ontwerpen & Verbeteren Boezemkaden, ORK 2009-06.
[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, 2002]	Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij Dijken. TAW richtlijn, mei 2002.
[TAW, 2004]	Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken, TAW richtlijn, september 2004.

