



**Handreiking
Toetsen Voorland Zettingsvloeiing
t.b.v. het opstellen van het
beheerdersoordeel (BO) in de
verlengde derde toetsronde**

Datum 25-10-2012

Definitief

Inhoudsopgave

1 Inleiding	1
1.1 Kader en doel van dit rapport	1
1.2 Achtergrond	1
1.3 Het fenomeen zettingsvloeiing	1
1.4 Tot standkoming	2
1.5 Leeswijzer	2
2 Beschrijving mechanismen	5
2.1 Inleiding	5
2.2 Verwekingsvloeiing	5
2.2.1 Definitie van een verwekingsvloeiing	5
2.2.2 Oorzaken van een verwekingsvloeiing	6
2.2.3 Voorwaarden voor een verwekingsvloeiing	9
2.2.4 Fasen van een verwekingsvloeiing	9
2.3 Bresvloeiing	10
2.3.1 Definitie van bresvloeiing	10
2.3.2 Bresproces bij zandwinning	10
2.3.3 Mechanisme van bresvloeiing	12
2.3.4 Voorwaarden voor een bresvloeiing	12
2.3.5 Invloedsfactoren voor een bresvloeiing	13
2.4 Verschillen tussen verwekingsvloeiing en bresvloeiing	13
2.5 Interactie tussen verwekingsvloeiing en bresvloeiing	13
3 Bepaling taludgeometrie	15
4 Grondonderzoek	17
4.1 Inleiding	17
4.2 Archief- en kaartmateriaal, geologische informatie	17
4.3 Veldonderzoek	18
4.3.1 Sonderingen	18
4.3.2 Boringen	19
4.3.3 Elektrische dichtheidsmeting	20
4.3.4 Geofysische metingen	20
4.4 Laboratoriumonderzoek	20
4.4.1 Classificatieproeven	20
4.4.2 Triaxiaalproeven of kritieke dichtheidsproeven	21
4.4.3 Minimum- en maximum dichtheid	21
4.4.4 Doorlatendheid van zand	21
4.5 Overige metingen	22
4.6 Aanbevelingen	22
5 Methoden analyse verwekingsvloeiing en bresvloeiing	23
5.1 Inleiding	23
5.2 Analyse optreden verwekingsvloeiing	23
5.2.1 Inleiding	23
5.2.2 Geometrie ten behoeve van eenvoudige en gedetailleerde toetsing	24
5.2.3 In situ relatieve dichtheid	24

5.2.4	Overzicht methoden analyse optreden verwekingsvloeiing	27
5.2.5	Geometrie en spanningsverdeling	28
5.2.6	Verwekingsgevoeligheidsfunctie	28
5.2.7	Omvang potentieel metastabiele gebied	29
5.2.8	Instabiliteit hele talud ten gevolge van metastabiliteit en verweking	29
5.2.9	Invloed aardbeving	30
5.2.10	Eindresultaat	30
5.2.11	Zeer geavanceerde analyse optreden verwekingsvloeiing	31
5.3	Analyse optreden bresvloeiing	32
5.4	Analyse inscharingslengte	32
6	Handreiking beoordeling Zettingsvloeiing	33
6.1	Inleiding	33
6.2	Beoordeling Zettingsvloeiing	33
6.3	Gedetailleerde toetregels	34
6.4	Bepaling toelaatbare faalkans	41
6.5	Toepasbaarheid van de gedetailleerde toetsregel buiten de Zuidwestelijke Delta	42
6.5.1	Beweeglijkheid van de vooroevers	42
6.5.2	Korrelgrootteverdeling van het uitvloeiend zand	43
6.6	Handreikingen geavanceerde Toetsing	43
6.6.1	Beschrijving fysische processen	43
6.6.2	Onzekerheden	44
6.6.3	Geavanceerde toets: Bewezen sterkte analyse in de faalkans	45
6.6.4	Toelaatbare faalkans	47
7	Literatuur	49
Bijlage A	Case study	1
Bijlage B	Bepaling toelaatbare faalkans: foutenboom	1
Bijlage C	Samenvatting benodigde parameters	2

1 Inleiding

1.1 Kader en doel van dit rapport

Deze handreiking is uitsluitend bedoeld als hulpmiddel voor de waterkeringsbeheerder t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde.

De toetsing van de waterkeringen in de verlengde derde toetsronde vindt plaats op basis van het vigerende toetsinstrumentarium: het VTV2006. Voor het toetsen op zettingsvloeiing is nieuwe kennis beschikbaar, die kan helpen bij het komen tot een veiligheidsoordeel in situaties, waar dit volgens het VTV2006 niet mogelijk was. Dit rapport geeft handvatten om gebruikt te kunnen maken van de nieuwste inzichten m.b.t. het toetsen van voorland zettingsvloeiing. Omdat deze nieuwe kennis nog niet in Technische Rapporten is vastgelegd, kunnen de toetsregels uit deze handreiking alleen gebruikt worden bij het opstellen van het beheerdersoordeel.

1.2 Achtergrond

In dit rapport wordt een beschrijving gegeven van de mechanismen die een rol spelen bij zettingsvloeiingen in vooroevers langs waterkeringen en wordt ingegaan op het benodigde grondonderzoek en de modellen en methoden waarmee zettingsvloeiingen kunnen worden beoordeeld (met betrekking tot het waterkerend vermogen van de waterkering). Tevens worden een gedetailleerde toets en handvatten voor de geavanceerde analyse gegeven.

Kanttekening

Voor de totstandkoming van dit rapport is gebruik gemaakt van bestaande kennis, die geschikt is gemaakt voor de ontwikkeling van de gedetailleerde toetsregels. Er is geen nieuwe kennis met betrekking tot (de beoordeling van) zettingsvloeiingen ontwikkeld. De in deze handreiking beschreven toetsregels zijn gebaseerd op de kennis die is opgedaan met zettingsvloeiing in Zeeland. Dit betekent dat geen rekening is gehouden met de regionale differentiatie van het fenomeen zettingsvloeiing. Voor het uitvoeren van de toetsing is het dan ook van belang dat de beheerder rekening houdt met zijn/haar ervaringen en gebiedskennis. In paragraaf 6.4 wordt ingegaan op toepasbaarheid van de gedetailleerde toetsregel buiten de Zuidwestelijke Delta.

1.3 Het fenomeen zettingsvloeiing

Een onderwater zandtalud kan soms schijnbaar spontaan instabiel worden, waarna het zand uitvloeit om pas bij een zeer flauwe helling te sedimenteren. Gewoonlijk wordt dit met 'zettingvloeiing' betiteld. Twee processen kunnen worden aangewezen als oorzaak van een dergelijke sterke taludverflauwing: verweken en bressen. Overeenkomstig kan gesproken worden over een 'verwekingsvloeiing' of 'een bresvloeiing'. Vaak zal het echter gaan om een combinatie van beide.

Een *verwekingsvloeiing* kan worden omschreven als een verschijnsel waarbij een pakket losgepakt zand onder water plotseling verweekt: er ontstaat een soort drijfzand. *Verweking* impliceert een dramatische vermindering van het onderlinge contact tussen de zandkorrels en van de schuifsterkte van het zandlichaam. Als het zandpakket oorspronkelijk in een helling aanwezig is, dan zal de verweekte massa naar beneden *vloeien* en pas weer onder een zeer flauwe helling tot rust komen. De mate van verweking waarbij de zandkorrels in het geheel geen onderling contact meer hebben (volledige verweking), treedt niet zo vaak op. Maar gedeeltelijke verweking kan het vermogen van het zand om schuifspanning op te nemen al

zodanig doen verminderen dat het talud instabiel wordt en er een grote massa zand naar beneden vloeit.

Een bresvloeiing in een onderwater talud is een gestaag terugschrijdend erosieproces dat zichzelf versterkt of althans zichzelf in stand houdt. Het proces wordt in gang gezet door een lokale afschuiving of verwekingsvloeiing. Die resulteert enerzijds in een zand-watermengsel dat als een dichtheidsstroom langs het talud naar beneden stroomt ("suspensiestroom") en daarbij verdere erosie veroorzaakt, waardoor de suspensiestroom steeds sterker wordt. Anderzijds resulteert de lokale taludinstabiliteit doorgaans in een zo steil taludgedeelte ("bres" of "wallepje") dat het zand aan het oppervlak afregent, waardoor het steile taludgedeelte terugschrijdt en het afregende zand de suspensiestroom versterkt.

1.4 Tot standkoming

Dit rapport is gebaseerd op de twee eindproducten van het SBW-project "Buitendijkse zones en afslagbeheer", subonderdeel "zettingsvloeiing", dat is uitgevoerd tussen 2008 en 2010:

- 1 SBW Buitendijkse zones en afslagbeheer - Management Rapportage ten behoeve van WTI Onderdeel Zettingsvloeiing, Deltares, december 2010
- 2 SBW Buitendijkse zones en afslagbeheer - Achtergrond rapportage onderdeel Zettingsvloeiing. Deltares, juli 2010.

Opdrachtgever Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Rijkswaterstaat

Opgesteld door G.A. van den Ham Deltares
M.B. de Groot Deltares
M. van der Ruyt Deltares

Kwaliteitsborging SBW Reviewteam Dijken
Henk Jan Verhagen (*voorzitter*) TU Delft

ENW Werkgroep Techniek
Peter van der Berg (*voorzitter*) Deltares

1.5 Leeswijzer

De opbouw van dit rapport is:

- In hoofdstuk 2 worden de relevante fenomenen beschreven die een rol spelen bij een zettingsvloeiing.

Zowel de gedetailleerde als geavanceerde toetsing bestaan uit het bepalen van de kans op falen van de dijk ten gevolge van een zettingsvloeiing en de vergelijking van die kans met een toelaatbare faalkans. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen (a) de kwantificering van de kans op het optreden van een zettingsvloeiing en (b) de kwantificering van de kans dat de inscharingslengte een bepaalde kritieke waarde overschrijdt. Deze kwantificeringen bestaan uit de volgende activiteiten:

- In hoofdstuk 3 het vaststellen van de taludgeometrie;
- In hoofdstuk 4 het verzamelen van relevante gegevens middels grond- en laboratoriumonderzoek;
- In hoofdstuk 5 het verwerken van die gegevens in een analyse van de mogelijke vloeiingen;

- In hoofdstuk 6 het berekenen van de faalkans en het vergelijken van die kans met de toelaatbare faalkans.

In Bijlage A wordt de eenvoudige en gedetailleerde toets gedemonstreerd in een case study. De berekening van de toelaatbare faalkans waaraan de berekende faalkans moet worden getoetst wordt gegeven in Bijlage B. In Bijlage C wordt een samenvatting gegeven van de benodigde gegevens voor het uitvoeren van de beoordeling.

2 Beschrijving mechanismen

2.1 Inleiding

Een onderwater zandtalud kan schijnbaar spontaan instabiel worden, waarna het zand uitvloeit om pas bij een zeer flauwe helling te sedimenteren. Gewoonlijk wordt dit met 'zettingsvloeiing' betiteld. Zoals hieronder uiteengezet zal worden, kan het bij een zettingsvloeiing gaan om een 'verwekingsvloeiing', een 'bresvloeiing' of een combinatie van die twee.

Voorbeelden van zettingsvloeiingen die schade kunnen veroorzaken aan waterkeringen zijn:

- Oevervallen in Ooster- en Westerschelde, waarbij dijken in de diepte kunnen verdwijnen. In het verleden is dat veel voorgekomen. Vanaf eind negentiende eeuw is men begonnen de vloeiingsgevoelige oevers vast te leggen, waardoor dijkvallen thans nauwelijks meer voorkomen.
- Bij stormvloedkeringen, uitwateringssluizen, brugpijlers en andere stroomvernauwingen ontstaan ontgrondingskuilen. Vaak moet daar een bodembescherming worden aangelegd om te voorkomen dat de kuil zo diep en dat de kuilhelling zo steil wordt, dat een zettingsvloeiing ontstaat en de constructie of naburige constructies, zoals aangrenzende dijken, in de kuil wegzakken. Bij de Oosterscheldekering was zelfs de ruim 500m brede bodembescherming onvoldoende om het risico voldoende te reduceren en moeten ook in de beheerfase geregeld bestortingen worden aangebracht op taluds van de ontgrondingskuilen.

Ook bij niet-waterkeringen kunnen zettingsvloeiingen tot schade leiden zoals bijvoorbeeld bij het baggeren van havenbekkens, slibdepots en bij zandwinning, waarbij voortdurend instabiliteiten in taluds teweeg worden gebracht en beheerste vloeiingen vaak gewenst zijn. In enkele gevallen worden die instabiliteiten echter onbeheersbaar en treden ongewenste oeverinscharingen op. Gevaar voor verwekingsvloeiingen treden ook op bij onder water aangelegde zandlichamen. Een en ander is onderwerp van een recent verschenen CUR Aanbeveling 113 [CUR 2008].

In de hier aangedragen gedetailleerde toetsregels zal het fenomeen bresvloeiing echter niet apart worden behandeld. Dit omdat er enerzijds onvoldoende gegevens voorhanden zijn om bresvloeiingen probabilistisch te benaderen en er anderzijds in de statistiek vanuit de Zuidwestelijke Delta waarop deze probabilistische toetsregels sterk leunen ook geen onderscheid is gemaakt tussen bres- en verwekingsvloeiingen. Dit betekent dat de gedetailleerde toetsregels ook impliciet bresvloeiingen meenemen en er geen noodzaak tot onderscheid tussen beide mechanismen is.

Ter ondersteuning van het begrip is hieronder wel een overzicht gegeven van zowel het fenomeen bres- als verwekingsvloeiing. In de geavanceerde toets kunnen, indien voldoende informatie beschikbaar is, beide mechanismen wel apart beschouwd worden.

2.2 Verwekingsvloeiing

2.2.1 Definitie van een verwekingsvloeiing

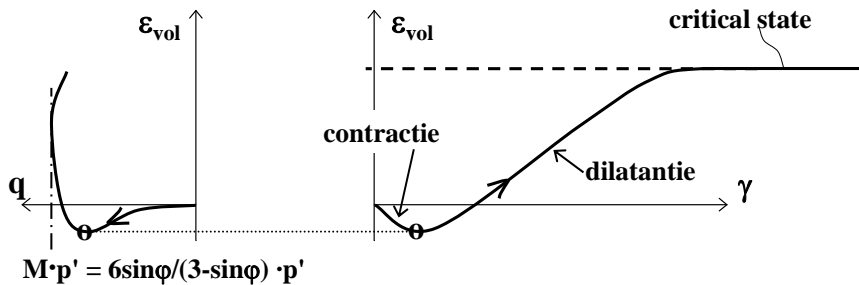
Een *verwekingsvloeiing* kan worden omschreven als een verschijnsel waarbij een pakket losgepakt zand onder water plotseling verweekt: er ontstaat een soort drijfzand. *Verweking* impliceert een dramatische vermindering van het onderlinge contact tussen de zandkorrels en

van de schuifsterkte van het zandlichaam. Als het zandpakket oorspronkelijk in een helling aanwezig is, dan zal de verweekte massa naar beneden *vloeien* en pas weer onder een zeer flauwe helling tot rust komen. De mate van verweking waarbij de zandkorrels in het geheel geen onderling contact meer hebben (volledige verweking), treedt niet zo vaak op. Maar gedeeltelijke verweking kan het vermogen van het zand om schuifspanning op te nemen al zodanig verminderen dat het talud instabiel wordt en er een grote massa zand naar beneden vloeit.

2.2.2 Oorzaken van een verwekingsvloeiing

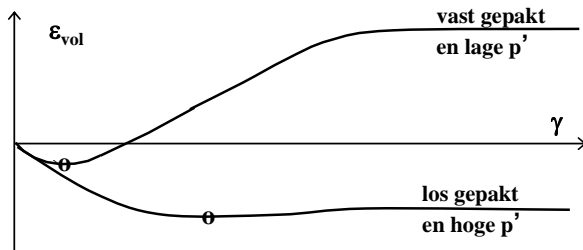
Het ontstaan van *verweking* wordt verklaard uit het materiaalgedrag van met water verzadigd zand wanneer dit ongedraineerd belast wordt. Om de oorzaak van verweking te begrijpen is kennis nodig van de relatie tussen de spanningsverandering en de vervorming van het korrel skelet. Deze relatie kan bestudeerd worden door droog zand te beproeven of door (on)gedraineerde proeven te doen op met water verzadigd zand.

Als droog zand bij constante gemiddelde normaalspanning wordt afgeschoven, ontstaat doorgaans eerst volumeverkleining (contractie) en vervolgens volumevergroting (dilatantie). Zie Figuur 2.1, waarin ϵ_{vol} de volumevergroting is, γ de schuifvervorming, ϕ de hoek van interne wrijving, q de deviatorspanning en p' de gemiddelde korrelspanning. Het punt van de maximale volumeverkleining ('phase transformation') is aangegeven met **0**. Als de afschuiving lang genoeg wordt doorgezet wordt de 'critical state' of 'steady state' bereikt. Daarbij blijft de schuifrek toenemen, terwijl alle andere parameters (volume, deviatorspanning, normaalspanning) constant blijven.

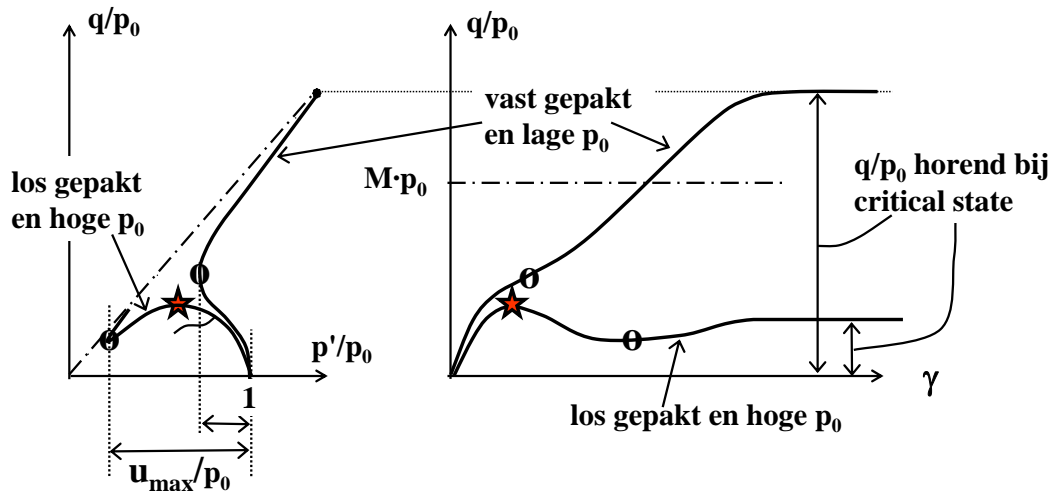


Figuur 2.1 Vervorming droog zand bij afschuiving

Bij vastgepakt zand en/of lage p' (gemiddelde effectieve spanning) domineert dilatantie; bij losgepakt zand en/of hoge p' domineert de contractie (Figuur 2.2).

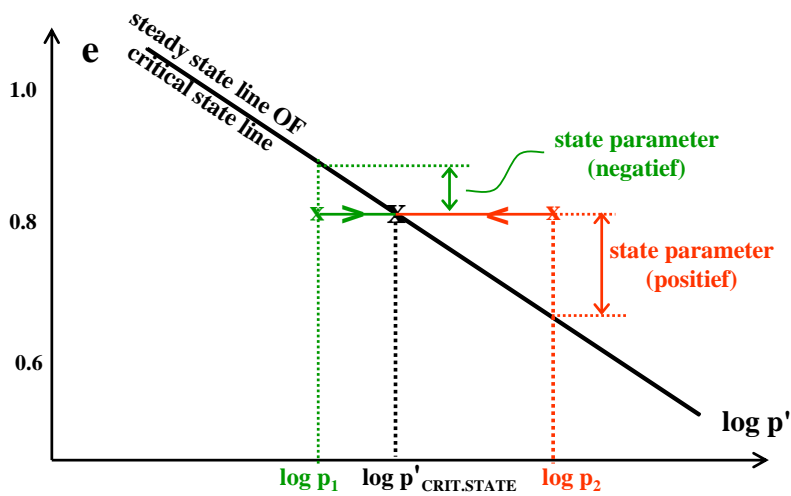


Figuur 2.2 Invloed dichtheid en gemiddelde spanning op vervorming van droog zand



Figuur 2.3 Spanningspad (links) en spanning-rek relatie (rechts) bij ongedraineerd afschuiven van verzadigd zand

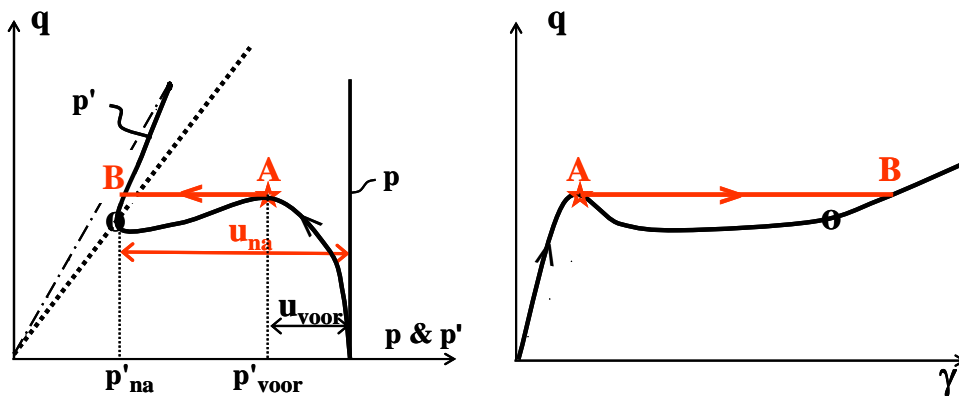
Na veel schuifvervorming wordt weer de critical state bereikt. Bij losgepakt zand en hoge initiële gemiddelde spanning p_0 (consolidatiespanning) is de bijbehorende relatieve deviatorspanning q/p_0 klein, dus ook de effectieve sterkte, vergeleken bij de sterkte bij volledig gedraineerde (of droge) afschuiving, $q/p_0 = M$ (Figuur 2.3). Dat komt door de wateroverspanning die dan nog in het monster heerst, waardoor de waarde van p' (critical state) $< p_0$. Die waarde van p' (critical state) is overigens géén functie van p_0 en is alleen een functie van de dichtheid, bijvoorbeeld zoals uitgedrukt in het poriegetal e . Die functie wordt de 'critical state lijn' of 'steady state lijn genoemd'. Het is een rechte lijn op half-logaritmisch papier. Zie Figuur 2.4.



Figuur 2.4 Gemiddelde korrelspanning p' als functie van poriëngetal e bij critical state

De afstand tot deze lijn, de zogenaamde 'state parameter' is een maat voor de verwekingsgevoeligheid. Die gevoeligheid is groter naarmate die parameter groter is.

Het is echter een vrij grove maat, omdat de initiële skeletstructuur en de initiële spanningsverhoudingen, die beide een grote invloed hebben op de verwekingsgevoeligheid, verloren gaan door de sterke schuifvervorming en omdat verweking juist optreedt bij geringe schuifvervorming.

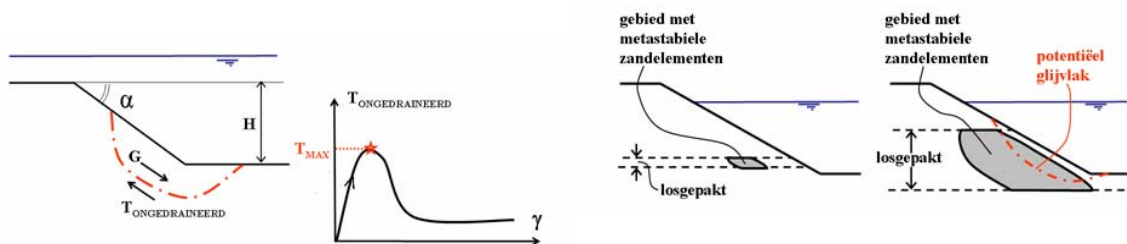


Figuur 2.5 Metastabiliteit bij spanningsgestuurde triaxiaalproef op losgepakt zand met hoge p'

Relevanter voor verweking is de vraag of dichtheid groter of kleiner is dan de 'natte kritieke dichtheid' ofwel de vraag of de kromme in Figuur 2.3 een tussenmaximum vertoont. Zie de ster die in die figuur getekend is voor los gepakt zand en hoge beginspanning. Als de spanningstoestand van een zandelement zich bij die ster bevindt, is het element 'metastabiel' bij ongedraineerd belasten. Dit is geïllustreerd in Figuur 2.5. Zelfs een heel kleine verhoging van de schuifspanning kan alleen maar worden opgevangen als het zandelement onmiddellijk heel sterk vervormt (overspringen van punt A naar punt B), waarbij de wateroverspanning heel sterk toeneemt.

Net als de dichtheid horend bij de critical state (Figuur 2.5) is de natte kritieke dichtheid een functie van de gemiddelde korrelspanning p' . In het verleden werd de 'natte kritieke dichtheid' gedefinieerd als die gevonden in een triaxiaalproef bij een beginspanning $p'_0 = p = 50$ kPa. Maar hier wordt de natte kritieke dichtheid gedefinieerd als de dichtheid waarbij het zandelement aan het metastabiliteitscriterium voldoet. Daarmee is hij afhankelijk van de beginspanning. Anders dan de critical state dichtheid is de natte kritieke dichtheid tevens afhankelijk is van de wijze van belasten. Die is in een talud anders is dan in een triaxiaalproef en ook anders dan in een Direct Simple Shear proef. De natte kritieke dichtheid van een zandelement in een talud is lager (grotere n of e) dan in een triaxiaalproef bij dezelfde p'_0 , omdat de vervormingsvrijheid in het talud veel beperkter is.

Niettemin kunnen er, bij bepaalde combinaties van zandeigenschappen, taludhelling en taludhoogte, zoveel metastabiele zandelementen in een talud zijn, dat het hele zandlichaam **metastabiel** is. Zie Figuur 2.6. De minste of geringste belastingwijziging is dan voldoende om het zand in een groot deel van het talud ineens tot verweking te brengen. Door het combineren van het materiaalgedrag van het zand met de grond- en waterspanningen in het talud is een criterium gedefinieerd voor het berekenen van de metastabiele toestand.



Figuur 2.6 Metastabiliteit bij een talud in zand

2.2.3 Voorwaarden voor een verwekingsvloeiing

Voorwaarden voor *metastabiliteit* van een onderwater zandtalud zijn:

- 1 Het zand moet verwekinggevoelig zijn, dus voldoende los gepakt, over een bepaalde minimum laagdikte, die waarschijnlijk varieert van 2 tot 5m.
- 2 De taludgeometrie moet ongunstig zijn: helling voldoende steil en hoogte voldoende groot.

Daarbij dient men zich te realiseren dat beide voorwaarden afhankelijk zijn van elkaar. Om een verwekingsvloeiing te krijgen moet de helling steiler zijn naarmate de verwekingsgevoeligheid minder is ofwel moet de verwekingsgevoeligheid groter zijn naarmate de helling flauwer is.

- 3 Voorwaarde voor het *optreden* van verweking, en daarmee een verwekingsvloeiing, is bovendien dat er sprake moet zijn van een inleidend mechanisme ("trigger"). Dat kan een flinke trilling zijn, bijvoorbeeld door een kleine aardbeving of door heien, de locale afschuiving van een kleilaagje, erosie waardoor een verstelling van het talud plaatsvindt of een plotselinge waterspiegeldaling.

2.2.4 Fasen van een verwekingsvloeiing

Bij een verwekingsvloeiing kunnen de volgende fasen onderscheiden worden:

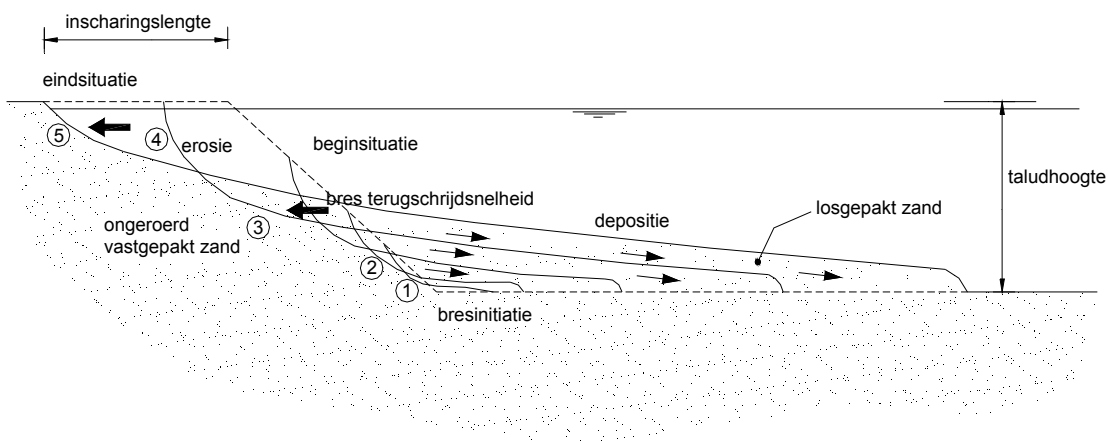
- 1 Geleidelijke verandering van de spanningen als gevolg van erosie, aanzanding of anderszins zodanig dat het talud metastabiel wordt.

- 2 Sterke toename van de wateroverspanning in een groot deel van het talud ingeleid door een plotselinge kleine wijziging van de belasting (trilling, plotselinge waterspiegeldaling, afbrokkelen kleilaagje, et cetera). Daarbij treden kleine schuifvormingen op met herverdeling van de spanningen tussen zandelementen met verschillende verwekinggevoeligheid. Tijdsduur: orde fractie van seconde.
- 3 Afstroming van overspannen water met verdere herverdeling van spanningen, verweking van bovenliggend zand, verdichting diepe lagen en wegvloeien van verweekte zandelementen. Tijdsduur: orde minuten.
- 4 Eventueel: ontstaan metastabiliteit in ander deel van het talud met verdere ontwikkeling vloeijing (zie ook paragraaf 2.2 bresvloeijing).

2.3 Bresvloeijing

2.3.1 Definitie van bresvloeijing

Een bresvloeijing in een onderwater talud is een gestaag terugschrijdend erosieproces dat, net als een verwekingsvloeijing, kan resulteren in een oever- of taludaantasting met een grote inscharingslengte (zie Figuur 2.7).



Figuur 2.7 Oeverinscharing door bresvloeijing. Het proces verloopt in chronologische volgorde van 1 tot 5.

Een bresvloeijing kan beschouwd worden als een onbeheerste vorm van het 'bresproces' dat bekend is als mechanisme om zand te winnen met een winzuiger. Dit proces zal daarom eerst beschreven worden.

2.3.2 Bresproces bij zandwinning

Om te begrijpen hoe het talud, dat middels winzuigen gebaggerd wordt, zich ontwikkelt, is inzicht in het zandzuigproces van belang. Om het proces op gang te brengen wordt de zuigbuis aan de voet van het talud eerst een zekere diepte (circa 2 tot 5 m) in het zand ingestoken. Door het al zuigend insteken van de zuigbuis wordt een actieve bres (een zeer steil deel van het talud; ook wel 'wal' genaamd) gevormd, die vervolgens langs het talud omhoogloopt en zand aanlevert (bressen). Het zand stroomt als een zand-water mengselstroom langs de helling naar de zuigbuis toe en die daarbij steeds meer zand opneemt. Hierbij wordt een bepaald hellingverloop ontwikkeld.

De snelheid waarmee de bres omhoog loopt, wordt de walsnelheid genoemd. Deze walsnelheid is een functie van de doorlatendheid van het zand, die weer afhangt van de samenstelling en pakking, en niet van de zuigparameters. De walsnelheid, bij matig vast en vastgepakt zand, is ongeveer gelijk aan 25x de doorlatendheid van het oorspronkelijke zandpakket (dus orde enkele mm/s ofwel enkele meters per uur).

Voorwaarde voor het kunnen bestaan van een zeer steile bres (zelfs verticaal) en een walsnelheid van bovengenoemde ordegrootte, is dat het zand in het talud voldoende vast gepakt is. Daardoor gedraagt het zand zich bij een kleine schuifvervorming dilatant (volumetoename) en ontstaat een negatieve wateroverspanning. Zandkorrels kunnen pas loskomen en vervolgens gaan stromen als de korrelspanning tot praktisch nul gereduceerd is en dat kan pas als voldoende water is het talud is ingestroomd om de volumetoename (ϵ_{vol} in Figuur 2.1), horend bij de critical state (bij een korrelspanning van praktisch 0), te bereiken.

Hoe het proces bij losgepakt zand plaats vindt is niet zo goed bekend. Bij zeer losgepakt zand is de vereiste volumetoename waarschijnlijk nul of zelfs negatief. Dan kan een steil taludgedeelte (actieve bres) niet bestaan, zelfs niet voor korte tijd, tenzij het zand (zeer licht) gecementeerd is. Als het zand iets minder losgepakt is, kan er waarschijnlijk wel een actieve bres bestaan. Mogelijk is de walsnelheid dan veel groter dan 25x de doorlatendheid.

Naast het omhoog lopen van de bres of wal is het zand dat aan de teen van de bres terecht komt en in de vorm van een zand-water mengselstroom (turbulente suspensiestroom of "turbidity current") over het talud gaat afstromen een belangrijk element in het proces, dat pas tot ontwikkeling komt bij grotere taludhoogte. Het mengsel erodeert het gedeelte van het zandtalud waarover het stroomt, mits dat gedeelte steil genoeg is, ofschoon veel minder steil dan de bres, en mits het zanddebiet van het mengsel groot genoeg is. Anders treedt juist sedimentatie vanuit het mengsel op. (Meestal treden erosie en sedimentatie tegelijk op, maar is één van beide processen sterker, waardoor netto erosie of sedimentatie optreedt). Indien de steilte en hoogte van de taludhelling voldoende zijn om verdergaande erosie te veroorzaken, neemt het zanddebiet bij de stroming naar beneden toe en wordt de erosieve kracht steeds groter totdat het mengsel in de zuigmond verdwijnt. Het deel van het mengsel dat niet wordt opgezogen blijft doorstromen totdat het op een flauwer taludgedeelte, dan wel de bodem belandt en daar vertraagt en tot bezinking komt. Overigens is de overgang van bres naar mengselstroom niet altijd scherp te onderscheiden.

Een verstoring van het zandoppervlak, zoals een locale versteiling, loopt langs het talud omhoog zolang het zand kan wegstromen en niet opnieuw bezinkt: dit wordt "nabressen" genoemd. Dit verklaart waarom een verstoring soms pas na enige tijd aan de oevers waarneembaar is en niet direct gerelateerd is aan de baggeractiviteit op dat moment. Na het staken van de zuigactiviteit blijven actieve bressen zand naleveren (orde enkele uren).

Het bressen wordt op gang gehouden door het wegzuigen van het toestromende zand. Door de keuze van de plaats en diepte van insteken en het beheersen van de verticale en horizontale insteeksnelheid c.q. de positie van de winzuiger ten opzichte van het talud, kan dit bresproces in homogeen, vastgepakt zand, goed beheerst worden. Gebeurt dit echter op een onbeheerste manier (te diep insteken of onvoorzien omstandigheden (bijvoorbeeld niet gedetecteerde grondlaag met afwijkende eigenschappen), dan kan dit leiden tot een bresvloeiing. De fysische achtergrond hiervan is voor het eerst beschreven in [van Rhee & Bezuijn 1998].

2.3.3 Mechanisme van bresvloeiing

Kenmerkend voor bresvloeiing is het zichzelf versterkende proces van groei van de hoogte van de bres en groei van de stroomsnelheid en het debiet van het zand-water mengselstroom. Naarmate de bres hoger en steiler wordt neemt het debiet van het vrijkomende zand aan de teen van de bres toe, waardoor de bres zich onder een flauwere helling zal voortplanten, dus zich dieper zal invreten in het talud. Tegelijk is er ook een toename van het debiet en het zandtransport langs het talud onder de bres met als gevolg een voortgaande erosie van dat taludgedeelte.

De actieve bres kan doorgaan in talud opwaartse en zijdelingse richting (terugschrijdende erosie) zolang het geërodeerde materiaal kan wegstromen naar een dieper gelegen deel of opgezogen wordt. Is er geen dieper gelegen bodem en wordt het materiaal niet opgezogen, dan zal het over een beperkte afstand in suspensie doorstromen en vervolgens sedimenteren. Die sedimentatie leidt tot een flauwe helling, waardoor het bresproces uiteindelijk zal uitsterven met als netto resultaat een groot zandtransport van boven naar beneden, een taludverflauwing en een inscharing.

Ook zonder baggeractiviteiten kan een bresvloeiing ontstaan op een aangelegd of natuurlijk onderwatertalud, zoals in het voorland, als een actieve bres, dat wil zeggen een taludgedeelte dat voldoende steil en hoog is, door een andere oorzaak ontstaat. Voorbeelden zijn een mechanische verstoring, erosie door waterstroming, een lokale afschuiving, het bezwijken van een kleilaag of een kleine verwekingsvloeiing in een losgepakte zandlaag.

2.3.4 Voorwaarden voor een bresvloeiing

Voorwaarden voor het ontstaan van een bresvloeiing zijn:

- 1 Het onderwater talud bestaat uit erosiegevoelig materiaal zoals silt of zand; het is fijn genoeg (hoe fijner des te erosiegevoeliger; bij een D_{50} groter dan 1 mm is een bresvloeiing nauwelijks mogelijk).
- 2 Een doorgaand talud zonder bermen of beschermde zones
- 3 Het "afgebreste" materiaal moet in de vorm van een suspensiestroom vanaf de teen van de initiële bres in voldoende mate kunnen wegstromen of worden opgezogen.
- 4 Het onderwater talud moet voldoende hoog en steil zijn (in Nederland doorgaans hoger dan 10 m en gemiddeld steiler dan 1:4 à 1:6)
- 5 Een grote verstoring ofwel initiële bres ergens in het talud.

Ad 5 Het ontstaan van een initiële bres aan de teen van een dijk of vooroever kan in principe veroorzaakt worden door de volgende fysische processen:

- Een lokale, plotselinge afschuiving bij of afbrokkeling van een ondermijnde kleilens nadat erosie is opgetreden.
- Verwekingsvloeiing in losgepakte lagen.
- Het vallen of storten van grond op het onderwater talud; die grond kan met een deel van het omringende water als turbulent mengsel langs het talud gaat stromen en erosie veroorzaken.

De locatie van de initiële bres - onderaan het talud, bovenaan of daartussenin - heeft wel invloed op de ontwikkeling van een eventuele bresvloeiing. Hoe meer onderaan het talud hoe groter de inscharing (mits geen stoorlagen, redelijke homogeniteit van zandeigenschappen, etc.).

2.3.5 Invloedsfactoren voor een bresvloeiing

- Taludhelling: als het talud voldoende flauw is zal er, afhankelijk van de zandsoort, bij een taludverstoring geen zichzelf versterkend zand-water mengselstroming ontstaan.
- Taludhoogte: hetzelfde geldt als de taludhoogte beperkt is, waardoor de stroming onvoldoende kan versnellen.
- Korrelverdeling van het zand. Naarmate het zand grover is de gevoeligheid kleiner bij gelijkblijvende taludhelling en taludhoogte.
- De afwisseling van grondlagen. Naarmate er meer stoorlagen in het zand zijn en naarmate de pakkingsdichtheid meer varieert is er grotere kans op het ontstaan van een initiële grote bres.
- Snelheid waarmee de taludgeometrie verandert. Als er niet gebaggerd wordt of grond gestort wordt, is de kans op het ontstaan van een initiële grote bres kleiner naarmate de erosie of aanzanding langzamer gaat.
- De eventuele aanwezigheid van een steil taludgedeelte bij de oever boven water. Daar kan de grond bij bagger- of erosieprocessen ook in de vorm van afkalvende schollen vrijkomen. Daarbij neemt het risico op inbrossing toe, omdat een grote afkalvende schol het zanddebiet plotseling doet toenemen waardoor een extra hoge actieve bres kan ontstaan.

2.4 Verschillen tussen verwekingsvloeiing en bresvloeiing

Het bresvloeiingsproces is een vorm van oppervlakte-erosie, waardoor het talud wordt uitgesleten en niet als geheel bezwijkt zoals het geval is bij een afschuiving of verwekingsvloeiing.

Een bresvloeiing speelt zich af binnen een tijdsbestek van enkele uren tot ongeveer een etmaal. De terugschrijdsnelheid ("walsnelheid") is van de orde van enkele mm/s, een inscharing van bijv. 30 m duurt dus enkele uren. Een verwekingsvloeiing duurt vermoedelijk niet langer dan orde een kwartier, al is het ook denkbaar dat een verwekingsvloeiing bestaat uit een serie deel-verwekingsvloeiingen die achter elkaar optreden en daardoor meerdere uren vergen.

In tegenstelling tot een verwekingsvloeiing komt bresvloeiing ook voor in vastgepakt zand.

2.5 Interactie tussen verwekingsvloeiing en bresvloeiing

De mechanismen verwekingsvloeiing en bresvloeiing treden in veel situaties interactief op:

- Een verwekingsvloeiing in het deel van een talud met losgepakte zandlagen kan in een paar minuten een steile bres doen ontstaan aan de bovenkant van de vloeiing en/of een mengselstroom met groot zanddebiet aan de onderkant.
- Door bressen kan de taludvorm zodanig veranderen (veelal versteilen) dat (een deel van) het talud metastabiel wordt en verweekt.

Ook zonder metastabiliteit is het denkbaar dat tijdens een vrij rustig lopend bresproces plotseling een vrij omvangrijke vloeiing in losgepakt zand optreedt die een steile bres en/of groot zanddebiet doet ontstaan. Dat zou het geval kunnen zijn als het onderste deel van het talud uit (middel) vastgepakt zand bestaat en daarboven een laag losgepakt zand ligt. Als een bres onderin het talud begint en langzaam naar boven loopt door het (middel) vastgepakte zand kan het losgepakte zand gaan vloeien op het moment dat de bres die laag bereikt. Immers, de bovengenoemde bresvoortplantingssnelheid van 25 maal de doorlatendheid geldt eigenlijk alleen voor redelijk vastgepakt zand. Die snelheid is namelijk evenredig aan het volume water dat het zand in moet stromen en daarmee omgekeerd evenredig met de volumetoename van het zand tijdens het dilateren. Bij zand dat zo losgepakt is dat het zelfs bij de lage spanning aan het oppervlak niet dilateert zou de snelheid theoretisch oneindig

moeten zijn. Feitelijk kan een bres dan niet meer bestaan. In ieder geval is, ook bij iets minder extreem losgepakt zand, te verwachten dat de walsnelheid in die zandlaag plotseling vele malen groter wordt dan die in het onderliggende (middel) vastgepakte zand, waardoor van 'vloeien' gesproken kan worden.

Zoals reeds uitgelegd in de eerste paragraaf van dit hoofdstuk zal in de gedetailleerde toetsregel geen onderscheid tussen deze twee mechanismen worden gemaakt. In de geavanceerde toets kan dit onderscheid wel gemaakt worden.

3 Bepaling taludgeometrie

De taludgeometrie beïnvloedt in hoge mate de kans op een vloeijing en ook op de eventuele vervolgschade. Zettingsvloeiingen hebben, wat de taludgeometrie betreft, de kleinste optredingskans bij:

- Een flauwe helling
- Geringe taludhoogte
- Een holle taludvorm (taludhelling onderin flauwer dan bovenin).

De bepaling van de taludhelling hangt sterk af van de praktijksituatie waarvoor men het zettingsvloeiingsrisico wil beschouwen.

Bij dijken langs een getijgeul of rivier kan de bestaande geometrie gemeten worden uit peilingen (bijvoorbeeld single-/multibeam echolodingen). De toekomstige geometrie kan men voorspellen op basis van extrapolatie, tenzij belangrijke veranderingen worden aangebracht in het stroompatroon. In dat geval kan de geometrie voorspeld worden middels een voorspelling van de toekomstige stroming, alsmede van de resulterende aanzanding en erosie met hydraulische en morfologische modellen. Uiteraard kan men de geometrie vastleggen met behulp van een taludbescherming, soms ook een bodembescherming.

Bij de dimensionering van stormvloedkeringen, uitwateringssluizen, brugpijlers en andere stroomvernauwingen is een voorspelling nodig van kuildiepte en hellingen. Die hangen sterk af van het stromingspatroon (wervelstraten, turbulentie), dat op zijn beurt bepaald wordt door ondermeer het ontwerp van de constructie (o.a. mate van stroomvernauwing) en de lengte van de bodembescherming. Bij bestaande constructies kan men de helling van de kuilen beïnvloeden door bestortingen aan te brengen.

Bij het toetsen op veiligheid moet de binnen de toets periode te verwachten meest ongunstige geometrie moet worden getoetst.

4 Grondonderzoek

4.1 Inleiding

De modellen waarmee voorspeld kan worden of een zettingsvloeiing kan optreden worden in het volgende hoofdstuk beschreven. Om berekeningen met deze modellen te kunnen uitvoeren is het noodzakelijk, dat de opbouw van de ondergrond wordt geschematiseerd. In de eenvoudige toetsing is niet echt een model schematisatie nodig maar wel een beeld en interpretatie van de ondergrond of hier los gepakte zandlagen voorkomen. De ligging van de verschillende bodemlagen en de relevante parameters dienen door middel van onderzoek te worden vastgesteld.

Een overzicht van de grondkarakteristieken, die bekend moeten zijn om het risico op het optreden van zettingsvloeiingen te kunnen beoordelen, is gegeven in Tabel 4.1. De verwekingsgevoeligheid van een zandlaag is een functie van de relatieve dichtheid, de in situ spanningssituatie en de aard van het zand. De technieken voor het bepalen van de relatieve dichtheid en de verwekingsgevoeligheid van het zand als functie van de relatieve dichtheid verschillen. Om deze reden wordt de relatieve dichtheid apart vermeld. In de eenvoudigere analyses wordt alleen de relatieve dichtheid bepaald en wordt de relatie tussen dichtheid en verwekingsgevoeligheid bekend verondersteld.

	Bodemopbouw	Schuifsterkte klei/veen	Verwekingsgevoeligheid zand		Korrelverdeling zand
			Relatieve dichtheid zand	Verwekingsgevoelig- heid zand als functie van relatieve dichtheid en spanning	
Verwekings- vloeiing	relevant tot 0,5 maal de taludhoogte onder de teen van het talud	niet relevant	zeer relevant	zeer relevant	niet relevant voor kans op vloeiing; wel voor gevolgschade
Bresvloeiing	relevant tot teen talud	enigszins relevant (stoorlagen)	weinig relevant	weinig relevant	zeer relevant: fijn zand is gevoeliger

Tabel 4.1 Grondkarakteristieken relevant voor verwekingsvloeiing/zettingsvloeiing

In de volgende paragrafen worden de belangrijkste soorten grondonderzoek en andere metingen kort beschreven. In de laatste paragraaf van dit hoofdstuk volgt een indicatie van de mogelijke hoeveelheid onderzoek als functie van het niveau van diepgang. Meer gedetailleerde informatie is te vinden in [CUR 2003].

4.2 Archief- en kaartmateriaal, geologische informatie

Voordat wordt begonnen met de uitvoering van veldonderzoek verdient het aanbeveling zoveel mogelijk informatie over de bodem te verzamelen; niet alleen gegevens over de huidige situatie van het terrein, maar ook die over eventuele ingrepen in het verleden zijn bruikbaar. Zo bestaat er het DINO-systeem van TNO waarin diepe en ondiepe boringen, grondwatergegevens, sonderingen, geo-elektrische metingen resultaten van geologische, geomechanische monsteranalyses, boorgatmetingen en seismische gegevens in heel Nederland gearchiveerd zijn en (indien openbaar) oproepbaar zijn via het DINOLoket.

Ervaring die in gelijksoortige projecten met een vergelijkbare bodemopbouw is opgedaan kan eveneens van nut zijn. Dergelijke informatie kan uitermate nuttig zijn voor het opstellen van het grondonderzoekprogramma.

Regionale geologische, bodemkundige, geohydrologische en historische gegevens zijn in Nederland relatief gemakkelijk en goedkoop verkrijgbaar en bevatten vaak informatie die ook voor de toetsing zeer waardevol kan zijn.

4.3 Veldonderzoek

De verschillende bodemlagen kunnen worden onderscheiden op grond van sonderingen of boringen met boorbeschrijving en eventuele classificatieproeven op monsters uit boringen. Ook ander in situ onderzoek kan soms zinvol zijn. Boringen zonder bemonstering, zoals spoelboringen, waarbij de grond uit verschillende lagen gemengd wordt voordat hij boven komt, zijn minder geschikt. Vaak verdient het de aanbeveling voorafgaande aan het boren eerst te sonderen, om de exacte diepte van de gewenste grondmonsters te kunnen vaststellen.

Doordat de eigenschappen van de grond in ruimtelijk opzicht spreidingen vertonen, kan theoretisch op ieder onderzocht punt een afwijkende bodemgesteldheid worden aangetroffen. Op basis van het grondonderzoek wordt een schematisatie van de bodemopbouw gemaakt, waarbij men zich bewust moet zijn dat lokale afwijkingen mogelijk blijven. Daarbij gaat het in de eerste plaats om de laagopbouw, zoals aan te duiden met de diepteligging van relevante laagscheidingen, en de eigenschappen van de diverse lagen.

In de tweede plaats gaat het om de horizontale uitgestrektheid van kritieke lagen, zoals lagen losgepakt zand of lagen slappe klei. Meestal volstaat het om een inschatting van de horizontale uitgestrektheid te maken op basis van geologisch inzicht. Omgekeerd kan op basis van geologisch inzicht een inschatting worden gemaakt van de te verwachten variabiliteit van de ondergrond en daarmee van de gewenste dichtheid van het grondonderzoek. In kritieke gevallen dient de horizontale uitgestrektheid echter vastgesteld te worden door uitvoering van zeer veel sonderingen, bijvoorbeeld op een onderlinge afstand van 50 m. Nog intensiever onderzoek heeft meestal weinig zin, omdat een eventuele zettingsvloeiing bepaald wordt door de eigenschappen gemiddeld over een tamelijk groot oppervlak.

4.3.1 Sonderingen

Voor de bepaling van de bodemopbouw is met name de standaard (elektrische) druksondering (Cone Penetration Test, CPT) met meting van de kleef of mantelwrijving een belangrijk meetinstrument. Met het wrijvingsgetal kan onderscheid worden gemaakt tussen zand, klei en veen. Tevens kan op basis van de conusweerstand een inschatting gemaakt worden van de relatieve dichtheid van zand.

Extra informatie kan worden verkregen door gebruik van de piëzoconus. Daarmee wordt door continue meting van de waterspanningen eveneens een zeer nauwkeurig beeld verkregen van de bodemopbouw. Deze opbouw kan vooral bij dunne (stoor)lagen zoals silthoudende lagen en dunne kleilagen die aanwezig zijn in een zandige formatie, beter worden vastgesteld dan door middel van kleefmantelsonderingen alleen.

Als er grindhoudende lagen zijn, zoals in Limburg, of andere harde lagen zijn bijzondere maatregelen nodig om met een sondering op diepte te komen. Soms is het voldoende om de techniek van 'spoelonderingen' toe te passen. In andere situaties kan het nodig zijn om eerst

een boring uit te voeren, door de harde laag heen, om vervolgens een sondering uit te voeren in de onderliggende, zachtere lagen. Een weinig gangbaar alternatief is het uitvoeren van een boring met SPT's (Standard Penetration Tests) op verschillende diepten.

De sondeerwaarde is volgens talrijke onderzoekers duidelijk gecorreleerd aan de sterkteparameters van de grond. Voorwaarde voor het afleiden van die parameters uit de sondeerwaarde is dat de meting voldoende nauwkeurig geschiedt.

Met behulp van correlaties kan op basis van de conusweerstand ook een redelijke schatting worden gemaakt van de relatieve dichtheid van zand. In paragraaf 5.1.3 wordt hierop verder ingegaan.

Berekeningen met SLIQ2D hebben laten zien, dat voor wat betreft het mechanisme verwekingsvloeiing de grootste bijdrage aan de kans op metastabiliteit van het gehele talud wordt geleverd door de onderste helft van het talud samen met het zand tot een diepte onder de teen van 0,5 maal de (reken)taludhoogte H_R (fig. 5.1). Om deze reden wordt aanbevolen voor het bepalen van de verwekingsgevoeligheid sonderingen tot een diepte van 0,5 maal de (reken)taludhoogte onder de teen van het talud uit te voeren.

Naarmate de grond meer variatie vertoont en/of de opbouw eerder aanleiding geeft tot zettingsvloeiingen, bijvoorbeeld vanwege de losse pakking van het zand of de aanwezigheid van stoorlagen, is meer grondonderzoek en analyses nodig.

Over het algemeen wordt als minimum sondeerdichtheid aanbevolen 4 sonderingen per strekkende kilometer oever. Bij een sterk variërende ondergrond kan een dichtheid van 1 sondering per 50 m à 100 m nodig zijn. Zie verder Tabel 4.2.

4.3.2 Boringen

Boringen zijn ten opzichte van sonderingen duur. Hoofddoel van de boringen is het nemen van monsters, die nodig zijn voor het laboratoriumonderzoek. Daarnaast is de boorbeschrijving door de boormeester zeer nuttig voor identificatie van de verschillende grondlagen, dit in aanvulling op de informatie uit sonderingen. Niet alle boortechnieken zijn geschikt. Vooral indien grond sterk gelaagd is (hetgeen uit sonderingen is af te leiden) is het nuttig om op elke diepte monsters te steken die zo min mogelijk geroerd zijn om daaruit het karakter van de gelaagdheid te bepalen en om elk laagje in het laboratorium te kunnen classificeren. Nog beter zijn Begemannboringen en seismische boringen, waarmee één lang continu monster wordt verkregen.

Zandmonsters mogen enigszins geroerd zijn. Alleen in uitzonderlijke gevallen (zand opgesloten tussen kleilagen) is het mogelijk een tamelijk ongeroerd monster van zand te verkrijgen. Dus de in situ dichtheid is normaal niet middels monsternamen te bepalen.

De boring moet gaan tot een diepte gelijk aan die van de teen van het talud. Indien uit sonderingen blijkt dat onder de aangrenzende rivier- of zeebodem losgepakte lagen aanwezig zijn, kan het zinvol zijn de boringen ook tot 1,5 maal de taludhoogte door te zetten.

Het aantal boringen hangt direct samen met de aanwezige variabiliteit (o.a. de gelaagdheid) van de ondergrond. Gedacht kan worden aan minimaal 4 boringen per strekkende kilometer oever (zie Tabel 4.2).

Het aantal te nemen monsters hangt samen met het doel van de monsters en de aanwezige variabiliteit (o.a. de gelaagdheid) van de ondergrond. Over het algemeen is het voor een

zandige ondergrond gewenst na iedere laagscheiding en verder voor ieder diepte interval van 1 à 2 m een monster te nemen.

4.3.3 Elektrische dichtheidsmeting

Voor het bepalen van de relatieve dichtheid van het zand kan de elektrische dichtheidsmeting worden ingezet. Daarmee wordt de verhouding bepaald tussen de geleidbaarheid van de grond als geheel (korrels + poriewater) en de geleidbaarheid van het poriewater alleen. Die bepaling vereist twee metingen, ieder met een eigen sonde: één voor de geleidbaarheid van het water (watersonde) en één voor de geleidbaarheid van de grond (grondsonde). Verder is een ijking op grondmonsters in het laboratorium nodig om de relatie tussen het poriëngehalte van het zand en de verhouding tussen die geleidbaarheden te vinden. Ten slotte moeten ook de minimum en maximum dichtheden bepaald worden om de relatieve dichtheid te vinden als functie van het poriëngehalte.

Elektrische dichtheidsmetingen geven geen betrouwbare resultaten in zand met veel kleilaagjes of schelpresten. Hetzelfde geldt voor zand met sterk wisselend zoutgehalte. De diepte van de elektrische dichtheidmeting moet zodanig gekozen worden dat de losgepakte zandlagen er in voorkomen. Uit kostenoverwegingen worden elektrische dichtheidmetingen alleen uitgevoerd, wanneer een meer gedetailleerd inzicht wenselijk is in de aanwezigheid van losgepakt zand.

Als een elektrische dichtheidmeting wordt uitgevoerd, is het nodig ook een boring op een locatie binnen ongeveer 2 m afstand te maken, zodat er monsters voor de ijking van de dichtheidsmeting kunnen worden verzameld.

4.3.4 Geofysische metingen

Geofysische metingen kunnen dienen om over het gehele terrein van het project een globaal beeld van de bodemgesteldheid te verkrijgen [CUR 1996]. Bij verkenning van grote oppervlakten zijn deze methoden goed bruikbaar als voorverkenning van de bodem. Significante verschillen in geleidbaarheid (elektrisch of elektromagnetisch) c.q. overgangen in de bodemopbouw (reflectie/refractie van seismische golven) kunnen met redelijke nauwkeurigheid worden opgespoord, zodat kan worden aangegeven op welke plaatsen relatief omvangrijk grondonderzoek gewenst is. Echter in estuaria is het gebruik van Elektromagnetische methoden zeer beperkt door de storende werking van zout water. Ook Kabels en leidingen hebben zeer versturende werking op de bruikbaarheid van deze technieken.

4.4 Laboratoriumonderzoek

4.4.1 Classificatieproeven

Het is aan te bevelen om op alle monsters classificatieproeven uit te voeren ter verdere onderbouwing of aanvulling van het karakter van de verschillende grondlagen, zoals beschreven door de boormeester en zoals afgeleid uit een nabije sondering. Een van de classificatieproeven betreft de korrelverdeling (mede ter bepaling van het gehalte siltig materiaal en kleideeltjes).

De korrelvorm en de uniformiteit beïnvloeden ook de parameters waaruit de verwekingsgevoeligheid van het zand wordt afgeleid. Maar van een duidelijke invloed op die gevoeligheid als functie van de relatieve dichtheid is, voor zover bekend, weinig gebleken. Niettemin is het vastleggen van korrelvorm en korrelverdeling ook voor verweking van belang om de homogeniteit van de grondslag te kunnen beoordelen.

4.4.2 Triaxiaalproeven of kritieke dichtheidsproeven

Triaxiaalproeven zijn onmisbaar voor de vaststelling van de verwekingsgevoeligheid van zand als functie van relatieve dichtheid en gemiddelde spanning. Als ze volgens een bepaalde procedure worden uitgevoerd worden ze 'kritieke dichtheidsproeven' genoemd.

Van elk zandmonster moeten proeven gedaan worden bij meerdere relatieve dichtheden en bij meerdere gemiddelde spanningen.

Er kunnen droge, gedraineerde en ongedraineerde (ook wel 'natte') proeven worden uitgevoerd. De uitkomsten van de gedraineerde proeven zijn praktisch gelijk aan die van de droge. De ongedraineerde proeven simuleren het verwekingsgedrag het best. De droge of gedraineerde geven beter inzicht in het gedrag van het korrel skelet. Dat soort proeven levert ook de parameters van het in paragraaf 5.1.4 genoemde programma SLIQ2D.

Naast relatieve dichtheid en gemiddelde korrelspanning blijkt ook het spanningspad waarlangs het monster op spanning wordt gebracht voordat de eigenlijke afschuiving begint en de verhouding tussen verticale en horizontale spanningen tijdens de afschuiving (K_0 toestand), een grote invloed te hebben op de verwekingsgevoeligheid. In het kader van een studie op geavanceerd niveau kan het aanbeveling verdienen extra proeven te doen om deze invloed te kunnen afschatten

4.4.3 Minimum- en maximum dichtheid

Van het zand waarop bovenbeschreven triaxiaalproeven worden uitgevoerd moeten ook de minimum- en maximum dichtheid bepaald worden om te weten bij welke relatieve dichtheid elk van de proeven gedaan is.

De relatieve dichtheid, R_e , is gelijk aan de verhouding tussen het verschil tussen het maximum poriëngetal (e_{\max}) en het aanwezige poriëngetal (e) en het verschil tussen het maximum en minimum poriëngetal (e_{\min}):

$$R_e = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (4.1)$$

4.4.4 Doorlatendheid van zand

De doorlatendheid is van belang voor de duur van de wateroverspanning ten tijde van het optreden van een verwekingsvloeiing.

De doorlatendheid wordt in sterke mate bepaald door de kleinere korrels. De doorlatendheid kan met een beperkte nauwkeurigheid (factor 10) uit de korrelverdeling worden afgeleid [TAW 1999; Lubking 1992]. De nauwkeurigheid van die bepaling kan worden vergroot als ook het poriëngehalte of de relatieve dichtheid bekend is (factor 3 à 10). Bepalingen in het laboratorium met behulp van doorlatendheidsmetingen zijn over het algemeen niet nauwkeuriger. Het probleem is namelijk dat het verkrijgen van ongestoorde zandmonsters praktisch onmogelijk is, waardoor de gelaagdheid van het monster, die een aanzienlijke invloed heeft op de uitkomst, verloren gaat. Dat bezwaar geldt niet bij het uitvoeren van pompproeven in het veld. Daaruit kan men de gemiddelde doorlatendheid van een heel pakket afleiden; niet de doorlatendheid van individuele laagjes.

Uit een piëzoconus-sondering kunnen ook indicaties van de doorlatendheid worden verkregen.

In alle gevallen dient rekening gehouden te worden met een beperkte nauwkeurigheid.

4.5 Overige metingen

Ook de volgende metingen kunnen nuttig of nodig zijn voor de bepaling van de kans op een vloeijing:

- Stijghoogtemetingen. Stijghoogtegradiënten kunnen de korrelspanningen beïnvloeden; lokale doorbreking van een kleilaag door baggeren of erosie kan leiden tot uitstromend grondwater en micro-instabiliteit als de stijghoogte in de onderliggende watervoerende laag hoger is dan de buitenwaterstand; beide kunnen invloed hebben op verweking en bressen. Deze informatie zal in het maatwerk van de geavanceerde toetsing kunnen worden verwerkt
- Erosie en zandtransport. Waar zandtransport leidt tot erosie of aanzanding, verandert de vorm van het talud. Dit laatste kan van invloed zijn op de taludstabiliteit en kan als invoer in de geavanceerde toetsing dienen. Ontgrondingskuilen zijn daarvan een markant voorbeeld.

4.6 Aanbevelingen

In Tabel 4.2 is een indicatie gegeven van de mogelijke omvang van het grondonderzoek en andere metingen als functie van het niveau van diepgang of fase van toetsing op zettingsvloeijing. Verder hangt de mate van detaillering van het grondonderzoek samen met de grondgesteldheid (aanwezigheid stoorlagen, eventuele losse pakking) en de gewenste/benodigde analysemethoden. De intensiteit van grondonderzoek wordt groter naarmate het ontwerp verfijnder wordt of de bodemopbouw meer risico's met zich meebrengt.

Fase toetsing	Benodigd grondonderzoek	
Eenvoudig *)	- archief- en kaartmateriaal - sonderingen tot $0,5 \cdot H_R$ **) onder bodem: minimaal 4 per km talud	
Gedetailleerd	- als bij 'Eenvoudig' - eventueel extra sonderingen, afhankelijk van ruimtelijke variatie van losgepakt zand - eventueel boringen ter bepaling van soort zand, stoorlaagjes, etc.	
Geavanceerd	Faalmechanisme	
	Verwekingsvloeijing	Bresvloeijing
	- elektrische dichtheidsmetingen (met ijking) - boringen voor monsters van losgepakt zand - serie triaxiaalproeven plus maatwerk afhankelijk van de situatie	- archief- en kaartmateriaal - boringen tot bodem: één per 0,3 à 1,0 km talud (minimaal 3) - classificatieproeven zand (met name korrelverdeling) VERFIJNING: - extra boringen, afhankelijk van ruimtelijke variatie korrelgrootte zand - extra boringen, afhankelijk van ruimtelijke variatie korrelgrootte zand - classificatie op verkregen monsters - sonderingen tot bodem om gelaagdheid beter in kaart te brengen als er stoorlagen zijn
	*) Alleen indien in de eenvoudige toetsing aan het optredingscriterium wordt getoetst. Zie hoofdstuk 6. **) Definitie H_R gegeven in paragraaf 5.1.2 met Figuur 5.1	

Tabel 4.2 Globale indruk van benodigd grondonderzoek bij verschillende fasen van toetsing

5 Methoden analyse verwekingsvloeiing en bresvloeiing

5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de thans beschikbare methoden en modellen waarmee de processen verwekingsvloeiing (paragraaf 5.2) en bresvloeiing (paragraaf 5.3) geanalyseerd kunnen worden. Omdat er in de ervaringsstatistiek vanuit de Zuidwestelijke Delta, waarop zowel de eenvoudige als gedetailleerde toetsregels sterk leunen, geen onderscheid is gemaakt tussen deze beide mechanismen zullen in de in hoofdstuk 6 gepresenteerde gedetailleerde toetsregel deze twee mechanismen niet apart behandeld worden. In de geavanceerde toets (toets op maat) kan dit onderscheid wel gemaakt worden. De in dit hoofdstuk beschreven methoden hebben dus alleen betrekking op de geavanceerde toetsing. De in paragraaf 5.2.2 en 5.2.3 beschreven methoden ter bepaling van, respectievelijk, geometrie en relatieve dichtheid zijn echter wel van toepassing voor de gedetailleerde toetsing.

In paragraaf 5.4 wordt ingegaan op de mogelijkheden om met behulp van de in 5.2 en 5.3 beschreven methoden de inscharingslengte te bepalen, indien een verwekingsvloeiing of en/of bresvloeiing daadwerkelijk optreedt.

De ervaringsstatistiek voor de gedetailleerde toets komt in hoofdstuk 6 aan de orde.

5.2 Analyse optreden verwekingsvloeiing

5.2.1 Inleiding

Deze paragraaf geeft een overzicht van de methoden die in de geavanceerde toetsing gebruikt kunnen worden indien het mechanisme verwekingsvloeiing apart beschouwd wordt. Zoals eerder opgemerkt wordt bij de eenvoudige en gedetailleerde toets zettingsvloeiing niet opgesplitst in verwekings- en bresvloeiing.

De drie voorwaarden waaraan voor het optreden van een verwekingsvloeiing moet worden voldaan zijn aangegeven in paragraaf 2.2.3 (aanwezigheid van verwekingsgevoelig zand, een voldoende steil en hoog talud, optreden van een inleidend mechanisme). Deze vormen het uitgangspunt voor de analyse methoden. Doorgaans wordt er van uitgegaan dat in de toetsperiode altijd wel een keer aan de derde voorwaarde (optreden van een inleiding) wordt voldaan.

In paragraaf 5.2.2 wordt eerst ingegaan op de bepaling van de geometrie, waarbij het talud dat bestaat uit een bovenwater- en onderwatergedeelte kan worden omgerekend in een compleet (fictief) onderwatertalud (voorwaarde 2). Paragraaf 5.2.3 gaat in op een aantal methoden ter bepaling van de relatieve dichtheid, die nodig is om vast te stellen of er verwekingsgevoelige lagen aanwezig zijn (voorwaarde 1).

In paragraaf 5.2.4 wordt een drietal in de praktijk toegepaste rekenmodellen gebaseerde methoden besproken waarmee het optreden van verwekingsvloeiing geanalyseerd kan worden, op basis van voorwaarden 1 en 2.

In paragrafen 5.2.5 t/m 5.2.9 wordt vervolgens een aantal aspecten besproken die in elk van de drie analysemethoden op een andere wijze meegenomen worden. Deze aspecten zijn:

- het meenemen van de invloed van geometrie en spanningsverdeling (5.2.5)

- de beschrijving van de verwekingsgevoeligheid als functie van relatieve dichtheid en gemiddelde spanning (5.2.6)
- de bepaling van de omvang van het “metastabiele” gebied (5.2.7)
- de bepaling van de stabiliteit van het gehele talud ten gevolge van metastabiliteit en verweking in een gedeelte van het onderwatertalud (5.2.8)
- de manier waarop het effect van een aardbeving kan worden meegenomen (5.2.9)

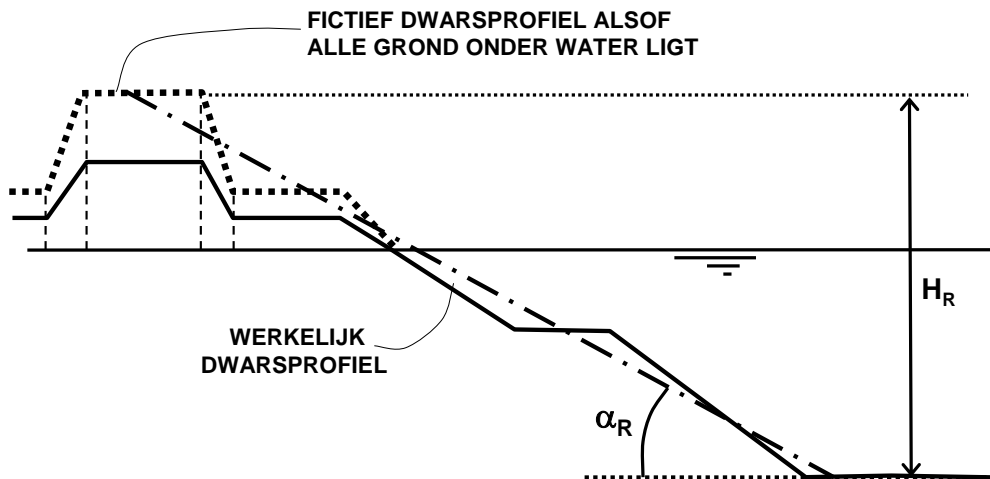
Waar mogelijk wordt aangegeven of bepaalde aspecten in de ene methode meer of minder conservatief wordt meegenomen dan in een andere methode.

In paragraaf 5.2.11 wordt voor een aantal van deze aspecten beschreven hoe deze op nog gedetailleerder niveau zouden kunnen worden meegenomen in een analyse.

5.2.2 Geometrie ten behoeve van eenvoudige en gedetailleerde toetsing

Voor de geometrische criteria zoals die in de eenvoudige toetsing worden gehanteerd (zie hoofdstuk 6) is het van belang te weten in hoeverre het grondmassief onder water ligt en in hoeverre boven water. Verweking kan alleen optreden in het onderwater gedeelte, maar het bovenwater gedeelte bepaalt wel mede de korrelspanningen in het onderwater gedeelte.

Het bovenwater gewicht van zand groter is dan dat onder water. Om dat in rekening te brengen wordt voor de analyse van verwekingsvloeiingen een fictief onderwater dwarsprofiel profiel beschouwd waarin de verticale korrelspanningen gelijk zijn aan die van een profiel dat daadwerkelijk geheel onder water ligt. Dat profiel wordt verder vereenvoudigd tot een profiel met één constante taludhelling. Die helling wordt hier met de **rekentaludhelling** α_R aangeduid. De bijbehorende (fictieve) taludhoogte met **rekentaludhoogte** H_R . Zie Figuur 5.1.,



Figuur 5.1 Fictief onderwater dwarsprofiel; definitie van rekentaludhoogte H_R en rekentaludhelling α_R

5.2.3 In situ relatieve dichtheid

De verwekingsgevoeligheid hangt in de eerste plaats af van de pakking van het zand. Dat is van belang tot een diepte van ongeveer $0,5 \cdot H_R$ onder de teen van het talud. Er zijn eenvoudige regels waarmee in bepaalde omstandigheden kan worden uitgesloten dat grond verwekingsgevoelig is. Zo zijn cohesieve lagen en grof materiaal zoals mijnsteen of grind niet verwekingsgevoelig.

Op basis van de conusweerstand q_c in zand en de diepte kan een schatting van de relatieve dichtheid worden gemaakt. In de literatuur zijn verschillende verbanden gelegd tussen de conusweerstand van een sondering (q_c) en de relatieve dichtheid van zand. Relatieve dichtheid en effectieve verticale spanning blijken verreweg de belangrijkste factoren die de conusweerstand bepalen. De meeste relaties kunnen worden geschreven in de volgende vorm:

$$R_e = A \cdot \ln \left[\frac{q_c}{B(\sigma'_{v0})^C} \right] \quad (5.1)$$

waarin σ'_{v0} de effectieve verticale spanning is. A, B en C zijn empirisch bepaalde constanten en verschillend per relatie:

	A	B	C
[Schmertmann 1975]	34,36	0,047	0,71
[Lunne & Christoffersen 1983]	34,36	0,061	0,71
[Baldi et al. 1982]	40	0,14	0,6
[Villet & Mitchell 1981]	41,67	0,08	0,78

Tabel 5.1 Waarden voor A, B en C

[Villet & Mitchell 1981] geeft de meest optimistische resultaten, [Schmertmann 1975] de meest conservatieve. [Baldi et al. 1982] en [Lunne & Christoffersen 1983] verschillen niet veel van elkaar en liggen tussen de andere twee relaties in. Aanbevolen wordt de relatie van Baldi voor de bepaling van de verwachtingswaarde van R_e te gebruiken, indien niet uit andere gegevens kan worden afgeleid welk van deze relaties het beste is op de betreffende locatie.

Deze relaties zijn gebaseerd op metingen in normaal geconsolideerde zanden. Extra horizontale grondspanning doet de conusweerstand toenemen zonder dat de relatieve dichtheid toeneemt. Bij overgeconsolideerd zand kan het zijn dat men uitgaat van een veel hogere relatieve dichtheid dan in het terrein aanwezig is. De graad van overconsolidatie of de horizontale spanning is in situ echter zeer lastig te bepalen. Indien hierover wel informatie beschikbaar is, door schatting of metingen, kan deze in de hieronder gepresenteerde correlaties tussen conusweerstand en relatieve dichtheid meegenomen worden.

Volgens Schmertmann (1976) kan de graad van overconsolidatie, OCR, in de correlatie mee worden genomen door de gemeten conusweerstand $q_{c,OC}$ in een overgeconsolideerd pakket om te rekenen tot een equivalente, normaal-geconsolideerde conusweerstand $q_{c,NC}$ met de volgende formule :

$$\frac{q_{c,OC}}{q_{c,NC}} = 1 + 0,75 \cdot \left(\frac{K_{0,OC}}{K_{0,NC}} - 1 \right) = 1 + 0,75 \cdot (OCR^\beta - 1) \quad (5.2)$$

Hierin zijn:

- OCR = overconsolidatiegraad
- β = constante
- K_0 = gronddrukcoëfficiënt ($\sigma'_{ho}/\sigma'_{v0}$)

Voor de constante β worden waarden van 0,40 tot 0,52 genoemd, afhankelijk van de relatieve dichtheid. Lunne en Christoffersen (1983) stellen dat de invloed klein is vergeleken met de onnauwkeurigheid in de schatting van de OCR en stellen een gemiddelde waarde van 0,45

voor. De berekende waarde van $q_{c;NC}$ kan vervolgens in de correlatie worden gebruikt om R_e te bepalen. Een hogere OCR-waarde bij dezelfde relatieve dichtheid geeft een hogere conusweerstand.

Kulhawy en Mayne (1990) hebben een empirische relatie opgesteld met 3 deelfactoren voor de verwerking van de samendrukbaarheid, graad van overconsolidatie en aging. Aging betreft de verandering in fysische eigenschappen van een geologische afzetting in de tijd. Met betrekking tot zand heeft aging vooral te maken met cementatie (verkitting), verwering en herschikking van het korrelskelet. De relatie van Kulhawy en Mayne is voornamelijk gebaseerd op proeven met jong, schoon, fijn tot matig fijn, uniform zand met voornamelijk kwarts:

$$R_e^2 = \frac{q_{c1}}{305 \cdot Q_C \cdot Q_{OCR} \cdot Q_A} \quad (5.3)$$

Waarin:

$$q_{c1} = \text{dimensieloze conusweerstand} = \frac{q_c/p_a}{(\sigma_{v0}'/p_a)^{0,5}}$$

Q_C = samendrukkingsfactor

Q_{OCR} = overconsolidatiefactor = $OCR^{0,18}$

Q_A = agingfactor, afhankelijk van de ouderdom van de afzetting t in jaar

p_a = atmosferische druk [kPa]

q_c = conusweerstand [kPa]

σ_{v0}' = initiële verticale effectieve spanning

Kulhawy en Mayne (1990) stellen voor de volgende waarden te gebruiken voor de verschillende factoren:

Q_C = 0,91 voor hoge samendrukbaarheid (veel fijne fractie, mica of andere samendrukbare mineralen)
 = 1,00 voor gemiddelde samendrukbaarheid (kwarts- en feldspathoudend zand en enkele procenten fijne fractie)
 = 1,09 voor lage samendrukbaarheid (kwartzand, rond korrels, weinig of geen fijne fractie (<75 μm))

$$Q_{OCR} = OCR^{0,18}$$

$$Q_A = 1,2 + 0,05 \cdot \log\left(\frac{t}{100\text{jaar}}\right)$$

Andere variabelen die in hierboven gepresenteerde correlaties niet meegenomen worden, maar waarschijnlijk ook minder invloed hebben op de relatie tussen q_c en R_e , zijn:

- korrelvorm en vergruisbaarheid: speelt voor de Nederlandse zanden (kwartzanden) geen rol.
- korrelverdeling: bij een fijne fractie (<75 μm) van meer dan 5% à 10% leiden de correlaties door afnemende doorlatendheid waarschijnlijk tot een systematische onderschatting van R_e (Jamiolkowski et al. 1988). Bij matig grof tot grof zand leveren de correlaties juist een te lage waarde voor R_e . Bij grove benadering kan de gevonden waarde van R_e worden vermenigvuldigd worden met een correctiefactor van ca. 1,15.
- samendrukbaarheid: wordt voornamelijk bepaald door de mineralogische samenstelling, de korrelverdeling en de korrelvorm (Robertson en Campanella 1983). Wordt wel rekening mee gehouden in bovenstaande correlatie van Kulhawy en Mayne (1990).

Verder in het rapport zal in meer detail ingegaan worden op de modelonzekerheid van de correlatie functies en hoe dit ten behoeve van probabilistische analyses verdisconteerd kan worden in de onzekerheid van R_e .

De verschillen tussen de correlaties onderling en de verschillen tussen de uitkomsten van de correlaties en die van elektrische dichtheidsmetingen geven aan dat de nauwkeurigheid van de bepaling van de relatieve dichtheid op basis van conusweerstand relatief gering is. Hierop wordt verder ingegaan.

Uitvoering van enige elektrische dichtheidsmetingen (zie paragraaf 4.3.3) kan om al deze redenen een grote meerwaarde hebben voor de bepaling van de in situ dichtheid.

De verwekingsgevoeligheid is een functie van meer variabelen dan de relatieve dichtheid (zie de volgende paragraaf). Voor zand zoals doorgaans in Nederland wordt gevonden, kan de waarde van R_e als belangrijkste maat gebruikt worden.

Globaal kan men stellen voor zand bij een verticale effectieve spanning die zich bevindt tussen 20 kPa en 200 kPa ($20 \text{ kPa} < \sigma'_{vo} < 200 \text{ kPa}$):

$R_e < 0,33$	zeer verwekingsgevoelig
$0,33 < R_e < 0,67$	verwekingsgevoelig
$R_e > 0,67$	niet verwekingsgevoelig.

Of een verweking kan optreden in een heel talud, hangt af van de omvang van eventueel verwekingsgevoelige pakketten zand. Als slechts een dunne zandlaag los gepakt is en de rest van het zand vastgepakt, dan zal het talud niet metastabiel kunnen worden. Daarom is de dikte van de zandlaag met een (gemiddeld over die laag) geringe relatieve dichtheid van belang. Bij de standaard gedetailleerde analyse voor het optreden van een zettingsvloeiing wordt de kans van optreden gelijk genomen aan de waarde afgeleid uit de ervaringsstatistiek voor Zeeland, genuanceerd wordt m.b.v. kennis van de fysische mechanismen. Daarbij wordt voor de waarde van R_e de waarde gekozen die gemiddeld geldt voor de meest losgepakte laag van 5m dikte.

5.2.4 Overzicht methoden analyse optreden verwekingsvloeiing

Indien het optreden van een verwekingsvloeiing geanalyseerd wordt gebruikmakend van rekenmodellen, worden geometrie en verwekingsgevoeligheid van het zand (voorwaarden 1 en 2 in paragraaf 2.2.3), geïntegreerd beschouwd. Er wordt verder verondersteld dat de vloeiing moet worden ingeleid (voorwaarde 3 in paragraaf 2.2.3) en dat in de praktijk altijd wel een inleiding zal optreden binnen het beschouwde tijdsbestek van vijf jaar.

Navolgend zal aandacht besteed worden aan drie methoden:

- SLIQ2D methode
- Modified state parameter methode(n)
- Methode volgens Olson & Stark

5.2.4.1 SLIQ2D methode

Door Deltares (voorheen GeoDelft) is een computerprogramma SLIQ2D ontwikkeld. Met dit programma kan worden beoordeeld in hoeverre taluds van losgepakt zand onder water metastabiel zijn (relevantie besproken in paragraaf 2.2). In het Handboek zettingsvloeiing [Stoutjesdijk & de Groot 1994] is beschreven hoe met dit programma dient te worden omgegaan. In [Stoutjesdijk et al. 1998] wordt de achtergrond nader onderbouwd. In [Delft

Cluster 2009] worden enige aspecten nader uitgewerkt. Het gebruik van het model (met name het bepalen van de invoerparameters) vraagt veel expertise.

5.2.4.2 *Modified state parameter methode(n)*

De internationaal toegepaste methoden zijn veelal gebaseerd op de state parameter van [Been en Jefferies 1985]. Deze parameter is gerelateerd aan de critical state (zie paragraaf 2.2), waardoor logischerwijs de benaming 'critical state concept' gebruikt wordt voor deze methoden. In critical state concepten, bijvoorbeeld [Chu et al. 2003]) wordt meestal alleen het gedrag (de sterkte) van de grond meegenomen. Het toetsen van een mechanisme kan vervolgens plaatsvinden door bijvoorbeeld de Bishop methode of een eindige elementenpakket toe te passen. De laatste heeft de voorkeur, omdat in de Bishop methode de koppeling tussen spanningen en rekken volledig ontbreekt. De Bishop methode kan alleen toegepast worden, wanneer het doorlopen spanningspad zorgvuldig is geanalyseerd. Een geometrie-criterium is niet langer noodzakelijk, omdat de mate van instabiliteit direct uit de analyse zou moeten volgen.

5.2.4.3 *Methode volgens Olson & Stark*

[Olson en Stark 2003] hebben een eenvoudige, geïntegreerde berekeningsmethode opgesteld op basis van analyse van bekende vloeelingen. De methode is gebaseerd op glijvlak analyses. Daarbij bepalen ze eerst of de verwekingsgevoelige lagen voldoende dik zijn om verweking in het talud te doen ontstaan en vervolgens wat de stabiliteitsfactor is, rekening houdend met de reductie van de effectieve schuifsterkte van de verweekte lagen.

5.2.5 Geometrie en spanningsverdeling

De invoer van de geometrie is van belang voor de bepaling van de spanningen in alle punten van het talud voorafgaand aan eventuele verweking. Het is van belang om daarbij de invloed van alle spanningscomponenten mee te nemen. Op dezelfde diepte onder het grondoppervlak zijn die dicht bij de teen van het talud heel anders dan dicht bij de bovenrand.

Een en ander is verwerkt in SLIQ2D op basis van eindige elementen berekeningen gemaakt voor een geschematiseerd talud. De dwarsdoorsnede wordt benaderd met ten hoogste twee rechte lijnen met verschillende hellingen; in [Stoutjesdijk & de Groot 1994] is beschreven hoe andere taluds kunnen worden omgezet in deze specifieke taludvormen. In een variant van de SLIQ2D-methode worden voor elk talud nieuwe eindige elementen berekeningen gemaakt (bijvoorbeeld PLAXIS met het 'hardening soil model'), waarbij de specifieke taludvorm (in SLIQ2D) wordt ingevoerd om de spanningstoestand zo goed mogelijk te benaderen.

Bij methoden die gebruik maken van de modified state parameter wordt veelal ook gebruik gemaakt van een eindige elementenpakket. [Olson en Stark 2003] baseren zich geheel op de methode Bishop, waar de effecten van de spanningsverdeling in het talud als gevolg van de geologische geschiedenis worden verwaarloosd.

5.2.6 Verwekingsgevoeligheidsfunctie

De verwekingsgevoeligheid als functie van relatieve dichtheid en gemiddelde spanning (voorafgaand aan eventuele verweking) verschilt van zandsoort tot zandsoort. Met een serie triaxiaalproeven op de locale zandsoort(en) kan de beste functie worden afgeleid.

Uit ongedraineerde triaxiaalproeven wordt de natte kritieke dichtheid als functie van de gemiddelde consolidatiespanning bepaald en parameters over de ligging van het metastabiliteitspunt (ster in Figuur 2.3), het punt van de maximale wateroverspanning (O in Figuur 2.3) en de critical state (eindpunt krommes in Figuur 2.3).

Uit droge of gedraineerde proeven worden parameters bepaald over de ligging van het punt van maximale contractie (O in Figuur 2.1), de ϕ -waarde (punt met maximale q in Figuur 2.1) de critical state (eindpunt krommes in Figuur 2.1). Verder worden ook parameters voor de stijfheid in ontlasting gebruikt.

SLIQ2D maakt gebruik van droge of gedraineerde proeven. Bij de modified state parameter methode wordt meestal gebruik gemaakt van ongedraineerde proeven. [Olson en Stark 2003] presenteren grafieken waarmee de schuifsterkten die horen bij het metastabiliteitspunt en het punt van maximale wateroverspanning worden gegeven als functie van sondeerwaarde en verticale korrelspanning.

5.2.7 Omvang potentieel metastabiele gebied

Onder 'potentieel metastabiele gebied' wordt hier verstaan het gebied dat bij ongedraineerde belasting metastabiel is op basis van de spanningen die aanwezig zijn voorafgaand aan eventuele verweking. SLIQ2D berekent de omvang van dat gebied op basis van bovenbeschreven invoer van geometrie, relatieve dichtheid en verwekingsgevoeligheid parameters. Bij de formulering van het metastabiliteitscriterium (bepaling 'natte kritieke dichtheid'; als deze groter is dan de actuele relatieve dichtheid heeft de kromme in Figuur 2.3 een tussenmaximum) is rekening gehouden met de gunstige invloed van de beperkte vervormingsvrijheid van zandelementen in een talud. Er is een variant waarbij met gebruik van PLAXIS rekening wordt gehouden met eventueel afwijkende spanningsverdelingen in het talud voorafgaand aan eventuele verweking.

Modified state parameter methoden maken meestal ook gebruik van een eindige elementen methode om de initiële spanningstoestand in ieder punt te bepalen. Maar het metastabiliteitscriterium wordt tot nu toe steeds gelijk genomen aan dat bij triaxiale belasting, hetgeen vooral bij flauwe taluds tot zeer conservatieve resultaten leidt.

[Olson en Stark 2003] maken gebruik van een glijvlak analyse met Spencer om het kritieke glijvlak te vinden en de schuifspanningsbelasting te bepalen, waarbij de schuifspanningsbelasting langs dat vlak verdeeld wordt recht evenredig met de diepte onder talud. Zij nemen aan dat metastabiliteit optreedt in die zandlagen waarbij de berekende schuifspanningsbelasting groter is dan de schuifspanning die hoort bij het metastabiliteitspunt. Dat betekent dat ze geen rekening houden met de andere componenten van de deviator spanning, hetgeen mogelijk te optimistisch is.

5.2.8 Instabiliteit hele talud ten gevolge van metastabiliteit en verweking

Of het hele zandlichaam onder talud instabiel wordt bij ongedraineerde belasting (zie Figuur 2.6) hangt af van de omvang van het potentieel metastabiele gebied. Vaak is het voldoende om vast te stellen of de breedte van het gebied (indien globaal ellipsvormig) groter of kleiner is dan ongeveer 0,3 maal de rekenhoogte van het talud (H_R in Figuur 5.1). Een iets meer verfijnde methode berekent de stabiliteit van het talud met de glijcirkelmethode volgens Bishop, waarbij in het metastabiele gebied met een gereduceerde sterkte ten gevolge van de wateroverspanningen die bij verweking optreden wordt gerekend. Op dezelfde manier kan ook een eindige elementen berekening gemaakt worden.

Volgens een conservatieve benadering wordt die verminderde sterkte gelijk genomen aan die thuishorend bij het punt van maximale wateroverspanning. Dat wordt door [Olson en Stark 2003] gedaan en wordt ook voor de SLIQ2D-benadering aanbevolen. De grootte van de maximale wateroverspanning kan geschat worden op basis van ongedraineerde triaxiaalproeven uitgevoerd bij spanningen die ongeveer overeen komen met de spanningen

in het gedeelte van het talud waar metastabiliteit optreedt. In sommige publicaties waarin de 'Modified state parameter methode' wordt gebruikt wordt daarvoor de schuifspanning gevonden bij het metastabiliteitspunt gebruikt. Dat zou alleen gerechtvaardigd zijn als er een zodanige herverdeling van spanningen optreedt dat de spanning in de potentieel metastabiele delen van het zandlichaam praktisch niet veranderen terwijl de andere delen zodanig vervormen dat ze hun maximale sterkte bereiken. Dat is vermoedelijk veel te optimistisch.

5.2.9 Invloed aardbeving

In Nederland moet rekening gehouden worden met het optreden van een lichte tot middelzware aardbeving tenminste eenmaal in de 30 tot 100 jaar. Op de schaal van Richter hebben lichte bevingen een magnitude 4 tot 5 en middelzware bevingen een magnitude 5 tot 6. Het deel van Nederland waar rekening gehouden moet worden met het optreden van een middelzware aardbeving betreft allereerst het gebied rond de Peelrandbreuk, d.w.z. heel Limburg, Oost-Noord-Brabant en Gelderland. Zie verder [Crook 1996] en de website van het KNMI.

Anders dan trillingen door heiwerkzaamheden of de activiteiten van een zuiger, treedt de belasting door een aardbeving tegelijkertijd over het hele grondlichaam op. Hierdoor zal de trilling als gevolg van een middelzware aardbeving significant zwaarder zijn dan de hei- of zuigerwerkzaamheden. De invloed ervan kan expliciet in rekening te worden gebracht bij een gedetailleerde analyse en of geavanceerde toetsing door de kans van de aardbeving te beschouwen als de kans van initiatie.

Een aardbeving kan een verwekingsvloeiing in drie opzichten bevorderen:

- veroorzaken van een wateroverspanning in alle zand- en siltpakketten als gevolg van de cyclische schuifspanningsbelasting
- een horizontale versnelling die de stabiliteit doet verminderen
- als inleidend mechanisme.

De eerste twee bijdragen dienen expliciet te worden gekwantificeerd. De eerste bijdrage kan worden gekwantificeerd door een representatief aantal cycli vast te stellen, een representatieve horizontale versnelling te bepalen, daaruit de relatieve schuifspanning op elke diepte te berekenen en vervolgens de wateroverspanning als functie van de relatieve dichtheid te bepalen op grond van in de literatuur gegeven relaties. Zie bijvoorbeeld [Youd et al. 2001] of [Ishihara 1993] of [Been et al. 1986]. Deze wateroverspanning zorgt voor een wijziging in de korrelspanningsverdeling voorafgaand aan eventuele verweking en is daarom relevant voor de bepaling van de omvang van het metastabiele gebied. De wateroverspanning in de niet-metastabiele delen moet meegenomen worden bij de vraag of het hele talud metastabiel kan worden.

De tweede bijdrage kan worden gekwantificeerd door de horizontale piekversnelling als belasting aan te brengen bij de beoordeling van de instabiliteit van het hele talud ten gevolge van verweking.

5.2.10 Eindresultaat

Het eindresultaat is het antwoord op de vraag of een verwekingsvloeiing op kan treden zodra er een inleidend mechanisme werkzaam is. Die vraag wordt bevestigend beantwoord zodra blijkt dat het verweken van (een deel van) het talud kan leiden tot een taludinstabiliteit.

5.2.11 Zeer geavanceerde analyse optreden verwekingsvloeiing

Een aantal aspecten van de in de vorige paragrafen beschreven methode kunnen nader uitgewerkt worden in het kader van een zeer geavanceerde analyse. Hieronder enige mogelijkheden:

- Met eindige elementen methoden kan de spanningsverdeling in het talud voorafgaand aan eventuele metastabiliteit beter bepaald worden, mits de geologische geschiedenis op een goede manier kan worden nagebootst.
- Uit de vergelijking van triaxiaalproeven met verschillende spanningspaden is gebleken dat de verwekingsgevoeligheid niet alleen een functie is van relatieve dichtheid en gemiddelde consolidatiespanning, maar ook van het spanningspad en van de wijze waarop een monster wordt opgebouwd. Dat is ook bekend uit proeven ter bepaling van de gevoeligheid voor cyclische verweking, waarvan er zeer veel in de literatuur gepresenteerd zijn. Er zijn aanwijzingen dat de verwekingsgevoeligheid bepaald uit de, internationaal meest gangbare, ongedraineerde triaxiaalproeven met isotrope consolidatie, veel groter is dan bij de niet-isotrope consolidatie die in de meeste taluds te verwachten is. Gebruik van de gangbare proeven zou dan tot behoorlijk conservatieve resultaten leiden. De invloed kan worden bestudeerd door extra proeven te doen met niet-isotrope consolidatie.
- Afhankelijk van de geologische voorgeschiedenis van het talud, wordt aanbevolen extra aandacht te besteden aan de invloed van overconsolidatie. De extra horizontale spanning leidt tot hogere sondeerwaarden bij gelijke relatieve dichtheid. Het is nog niet duidelijk of die extra horizontale spanning tot lagere verwekingsgevoeligheid leidt. Dat kan worden gekwantificeerd met een aangepaste correlatiefunctie (zie vorige paragraaf) of met extra triaxiaalproeven, waarin verschillende spanningspaden worden toegepast. Probleem blijft dat de in situ graad van overconsolidatie moeilijk te meten is.
- Bij de afleiding van de verwekingsgevoeligheid uit parameters gevonden in droge of gedraineerde proeven, speelt de ontlastingsstijfheid een zeer grote rol. Die wordt doorgaans uit triaxiaalproeven bepaald, terwijl de ontlasting in een talud op een andere manier plaatsvindt. De invloed van de afwijking kan bestudeerd worden door ook gebruik te maken van K_0 -CRS proeven.
- Voor de bepaling van de vraag of het hele talud metastabiel is onder ongedraineerde belasting kan gebruik gemaakt worden van een eindige elementenmodel in plaats van een stabiliteitsbeschouwing volgens Bishop. Dan is het nodig behalve de gereduceerde sterkte ook de stijfheid van de potentieel metastabiele elementen in te voeren. Hoe groot die moet zijn is niet geheel duidelijk.
- Wanneer de losgepakte zandlaag slechts een beperkte dikte heeft kan het zijn dat de ongedraineerde respons van het zandlichaam op een plotselinge kleine belastingwijziging zeer beperkt is, waardoor de metastabiliteit van het hele talud niet tot een significante vervorming van het talud leidt. Het is mogelijk om op basis van de doorlatendheid van het zand en de aangrenzende lagen een voorspelling te doen van de tijdsduur die gemoeid is met de bij metastabiliteit horende wateroverspanning. Deze tijdsduur kan vervolgens worden gekoppeld aan een analytische berekening van de vervorming van het verweekte zand en de daaruit volgende vervorming van het hele talud. Het verweekte zand wordt daarbij als een viskeuze vloeistof beschouwd, waarvan de viscositeit kan worden geschat uit oude proeven en veldmetingen. Ook de traagheid kan meegenomen worden.
- Een soortgelijke analyse kan worden toegepast om te bestuderen in hoeverre het overspannen water in de metastabiele delen van het zandlichaam andere zandlagen tot (gedeeltelijke) verweking brengen.

5.3 Analyse optreden bresvloeiing

Voor de bepaling of een bresvloeiing kan optreden heeft WL|Delft Hydraulics in samenwerking met GeoDelft (thans tezamen Deltares) het rekenmodel HMBREACH ontwikkeld. Met dit model kan de optredende taludontwikkeling gegeven de laagopbouw van de grond en het erosie- en sedimentatiegedrag van zand in suspensiestromingen, bijvoorbeeld bij zandzuigen zoals beschreven in paragraaf 2.3, berekend worden. Het model is beschreven in [Mastbergen & van den Berg 2003] en [Delft Cluster 2003]. Met dit rekenmodel is voor een aantal praktijkprojecten de taludontwikkeling nagerekend en het is geverifieerd onder laboratoriumomstandigheden (breshoogte tot 2.5 m) [van Rhee & Bezuijen 1998].

Er zijn twee versies van het model. De standaardversie berekent de taludvorm die, uitgaande van gelijkmatige zandwinning aan de teen zorgt voor een constante, langzame achteruitgang van het talud, waarbij dus erosie optreedt over de volle hoogte van het talud. Als zonder zandwinning het talud die vorm heeft of flauwer is of minder hoog, zal doorgaans geen bresvloeiing optreden, ook niet als lokaal een relatief kleine verstoring, zoals een kleine lokale afschuiving, optreedt. Maar hoe groot de verstoring moet zijn om wel een bresvloeiing in te leiden is met die versie van het programma niet te kwantificeren. Bij de andere versie van het programma kan bij een willekeurige taludvorm worden gekwantificeerd hoe groot een verstoring op een bepaald niveau moet zijn om een bresvloeiing te doen ontstaan.

5.4 Analyse inscharingslengte

De in voorgaande paragrafen beschreven methoden voor de analyse van het optreden van verwekingsvloeiing en bresvloeiing kunnen in zekere zin ook gebruikt worden voor het berekenen van de inscharingslengte, zij het met een zeer beperkte nauwkeurigheid. Zoals aangegeven in paragraaf 2.5 zal er bij zettingsvloeiing vaak sprake zijn van een combinatie van bresvloeiing en verwekingsvloeiing. Bijvoorbeeld als losgepakte en vastgepakte lagen zich afwisselen of als er stoorlaagjes aanwezig zijn. Daarvan zal vrijwel altijd sprake zijn. Aangezien er momenteel alleen rekenmodellen voor de mechanismen apart bestaan, is kwantificering van de inscharingslengte zeer lastig. Indien een pure verwekingsvloeiing voor de hand zou liggen, zou met de methode beschreven in paragraaf 5.2.8 een inscharingslengte berekend kunnen worden, indien een glijcirkelberekening of een eindige elementen berekening wordt gemaakt, waarbij in het metastabiele gebied met een gereduceerde sterkte ten gevolge van de wateroverspanningen die bij verweking optreden en met de genoemde effecten van een aardbeving wordt gerekend. Indien sprake is van een pure bresvloeiing zou met het programma HMBreach de evenwichtshelling berekend kunnen worden en vergeleken met de actuele gemiddelde taludhelling. Indien de evenwichtshelling flauwer is dan de actuele gemiddelde taludhelling, zou een inschatting van de inscharingslengte gemaakt kunnen worden.

Omdat de kans op een pure bres- of verwekingsvloeiing om genoemde redenen zeer klein is, kan voor de voorspelling van de inscharingslengte het beste gebruik gemaakt worden van een combinatie van de rekenmodellen voor verwekingsvloeiing en bresvloeiing en aanvullende ervaringsgegevens. Op dit laatste wordt in hoofdstuk 6 verder ingegaan.

6 Handreiking beoordeling Zettingsvloeiing

6.1 Inleiding

De primaire waterkeringen moeten, overeenkomstig de Waterwet, worden getoetst op veiligheid. De wijze waarop getoetst moet worden staat weergegeven in het vigerende Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen (VTV2006).

Indien in de derde toetsronde niet mogelijk is gebleken om een eindscore te geven voor het toetsspoor Zettingsvloeiing, kan de beheerder overwegen om een Beheerdersoordeel op te stellen (mede) op basis van de beoordelingsmethoden in deze handreiking.

In de voorafgaande hoofdstukken zijn de activiteit beschreven die van belang zijn voor het kunnen uitvoeren van de toetsing: het vaststellen van de taludgeometrie (hst. 3), het verzamelen van relevante gegevens middels grond- en laboratoriumonderzoek (hst. 4) en het verwerken van die gegevens in een analyse van de mogelijke vloeiingen (hst. 5). In dit hoofdstuk worden nieuwe gedetailleerde toetsregels¹ beschreven en een handreiking voor een geavanceerde analyse gegeven. De eenvoudige toetsregels, conform VTV2006, zijn niet opgenomen in deze handreiking.

In Bijlage C is een samenvatting opgenomen van de benodigde parameters voor het uitvoeren van de beoordeling op Zettingsvloeiing..

Bij het opstellen van de Beheerdersoordeel is het van belang dat de beheerder aangeeft of de toetsresultaten op basis van de toetsregels in deze handreiking overeenkomen met zijn/haar ervaring en kennis van de waterkeringen.

6.2 Beoordeling Zettingsvloeiing

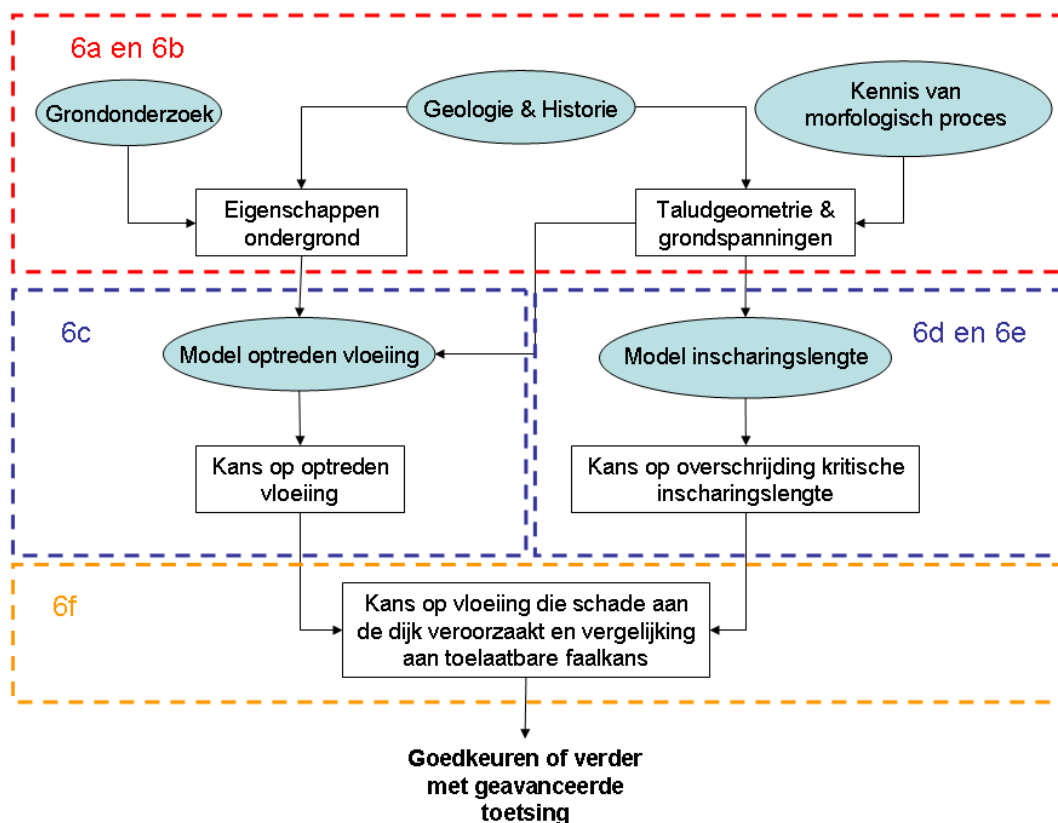
Zowel de gedetailleerde als geavanceerde beoordeling van Zettingsvloeiing bestaan uit het bepalen van de kans op falen van de dijk ten gevolge van een zettingsvloeiing en de vergelijking van die kans met een toelaatbare faalkans. Hierbij wordt de kans dat een zettingsvloeiing leidt tot het bezwijken van de waterkering bepaald op basis van ervaringsstatistiek genuanceerd met de kennis van de fysische mechanismen verweken en bressen. De faalkans wordt berekend door vermenigvuldiging van de twee onafhankelijke kansen; de kans dat een zettingsvloeiing optreedt ($P[ZV]$) en de kans dat de resulterende inscharing leidt tot schade aan het dijklichaam ($P[\text{overschrijding maximaal toelaatbaar schadeprofiel}]$). De berekende faalkans wordt vergeleken met de toelaatbare faalkans. Op de bepaling van de toelaatbare faalkans wordt in paragraaf 6.4 ingegaan.

Benadrukt wordt dat in de gedetailleerde toets met “faalkans” de kans op schade aan de dijk wordt bedoeld en niet de kans op overstromen. In de geavanceerde toets kan de “faalkans” wel de kans op overstromen betekenen. Hierop zal in paragraaf 6.6.4 nog op worden ingegaan.

¹ Deze toetsregels zijn bedoeld als een handreiking t.b.v. het opstellen van een beheerdersoordeel in het kader van de verlengde derde toetsronde. De (inhoudelijke) kwaliteit van deze regels is gewaarborgd door een positief advies van ENW. De regels zijn echter (nog) niet opgenomen in de vigerende voorschriften of technische rapporten.

6.3 Gedetailleerde toetregels

De gedetailleerde toets bestaat op zichzelf uit slechts één stap: de kans op een zettingsvloeiing die leidt tot schade aan de dijk wordt vergeleken met de toelaatbare faalkans. Om tot deze faalkans in de gedetailleerde toets te komen zijn in totaal 6 stappen (6a t/m 6f) nodig. Deze stappen worden in Figuur 6.1 schematisch weergegeven. In stappen 6a en 6b wordt de voor de gedetailleerde toets benodigde informatie beschreven. Hoe tot de toelaatbare faalkans gekomen kan worden, wordt in paragraaf 6.4 beschreven.



Figuur 6.1 Stappen om te komen tot de kans op een zettingsvloeiing die leidt tot schade aan de dijk, ten behoeve van de gedetailleerde toets

Stap 6a: bepaal het representatieve dwarsprofiel en de ondergrondopbouw

In de voorgaande toetsstappen 2 (schadelijkheids criterium), 4 (optredings criterium) en 5 (aanwezigheids criterium) is reeds gekeken naar respectievelijk de voorlandlengte, de onderwateroever geometrie en de aanwezigheid van verwekingsgevoelige lagen. In deze eerste stappen zijn al representatieve dwarsprofielen per dijkvak bepaald op basis van gelijke kenmerken van:

- De lengte van het voorland
- De gemiddelde geuldiepte
- De gemiddelde hellingsgradiënt van het (onderwater)talud
- De dikte en diepteligging van de verwekingsgevoelige lagen of laag.

De lengte van een dijktraject wordt gelijk genomen aan de lengte waarover bovengenoemde aspecten redelijk constant zijn.

Stap 6b: bepaal de gemiddelde relatieve dichtheden van de zandlagen in de ondergrond

Er bestaan verschillende manieren om de relatieve dichtheid van een zandlaag te bepalen. Enerzijds bestaat de mogelijkheid om de relatieve dichtheid in situ te meten door middel van elektrische dichtheidsmetingen en anderzijds door middel van correlaties met sondeerweerstand. Er zijn verschillende correlaties om op basis van de conusweerstand de relatieve dichtheid te bepalen. De meest gebruikelijke zijn de correlaties van Schmertmann, Baldi en Villet&Mitchell, waarbij de correlatie van Schmertmann in de regel de hoogste, Baldi de gemiddelde en Villet&Mitchell de laagste relatieve dichtheden genereert.

In de gedetailleerde toetsing wordt geadviseerd de correlatie van Baldi te gebruiken tenzij aantoonbaar kan worden gemaakt dat een andere correlatie meer van toepassing is (bijvoorbeeld na validatie met in situ metingen). De correlatie van Baldi wordt gegeven in de volgende formule:

$$R_e = \frac{1}{2,5} * \ln \left(\frac{q_c}{0,14(\sigma_v')^{0,6}} \right) \quad (6.1)$$

met:

$R_e = (e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min})$ = relatieve dichtheid, gebaseerd op poriegetal e (-)
 q_c = gemiddelde conusweerstand per meter in de sondering (MPa)
 σ_v' = verticale korrelspanning (kPa).

Let wel, de bovengenoemde correlatie is geldig voor elektrische sonderingen, conform oude NEN standaard (of nieuwe EURO-code) met kwaliteitsklasse I of II, en niet voor mechanische sonderingen. Ten behoeve van de toetsing zijn in de regel sonderingen op de kruin en in het achterland voorhanden. Het verdient aanbeveling, zeker bij aanwezigheid van een voorland om extra sonderingen op het voorland uit te voeren.

Stap 6c: bepaal de kans op optreden van een zettingsvloeiing P(ZV)

Er kan beschikbare kennis van een zandwinning bestaan in de vorm van lokale ervaringsstatistiek. Daarnaast is er algemeen beschikbare kennis over het optreden van afschuivingen en zettingsvloeiingen. Deze betreft:

- ervaring opgedaan in Zeeland met oever-, dijk- en plaatvallen;
- de shadepraktijk zoals deze met zandwinningen is bepaald.

Van de Zeeuwse praktijk van 'zettingsvloeiingen' langs de vooroevers en langs de zandplaten is een overzicht gemaakt [Wilderom 1979]. Hierin zijn de resultaten van meer dan 1100 'zettingsvloeiingen' en 'afschuivingen' verwerkt. Enkele 'zettingsvloeiingen' zijn zeer omvangrijk geweest, waarbij enkele miljoenen m³ zand zijn verplaatst. De resultaten zijn samengevat in [Silvis & de Groot 1995].

Deze 'zettingsvloeiingen' zijn oeverinscheringen waarvan de meeste waarschijnlijk voor een groot deel bestaan uit verwekingsvloeiingen, omdat ze vooral zijn opgetreden in gebieden met dikke lagen van losgepakt zand. Uit beschrijvingen kan men echter ook afleiden, dat een aantal van die vloeiingen plaatsvond in een tijdsbestek van vele uren of zelfs ruim een etmaal. Daaruit kan men wellicht concluderen, dat bresvloeiingen ook een belangrijke rol hebben gespeeld.

Een verwekingsvloeiing in een losgepakte laag of een afschuiving in een lokaal door stroming uitgeschuurde laag kunnen als initiatie voor een terugschrijdend bresproces hebben geleid, dat eindigde in een grote oeverinscharing.

De gemiddelde kans kan men als volgt afleiden. Langs de Zeeuwse oevers hebben in 100 jaar circa 1000 grote zettingsvloeiingen plaatsgevonden. De lengte van de oevers met losgepakt zand in voldoende dikke lagen wordt geschat op 100 km. Zodoende ging het om 0,1 zettingsvloeiing per jaar per km oever met verwekingsgevoelig zand. Deze ervaring is opgedaan bij taluds waarvan de karakteristieken zijn weergegeven in Tabel 6.1 (uit [Silvis & de Groot 1995]).

	Gemiddelde	Range waarbinnen 90% valt
Geuldiepte	27 m	11 – 45 m
Gemiddelde helling voor inscharing α	1 : 4	1 : 9 – 1 : 1,5
Steilste helling over 5 m hoogte	1 : 2,4	1 : 5 – 1 : 1

Tabel 6.1 Geometrische karakteristieken van de dwarsprofielen langs Zeeuwse oevers waar grote zettingsvloeiingen zijn opgetreden

Deze statistiek is pas bruikbaar in andere situaties als de geometriewijziging die in Zeeland werd veroorzaakt door erosie en aanzanding, vertaald wordt naar de geometriewijziging die daar veroorzaakt wordt door erosie, aanzanding of anderszins. Stel dat de taludwijziging die in een dergelijke andere situatie optreedt 10 maal zo snel gaat als die welke langs een (onbeschermd) Zeeuwse oever optreedt als gevolg van erosie en/of aanzanding. Dan zou voor een gelijke taludhelling en taludhoogte volgen, dat de kansdichtheid van een zettingsvloeiing met losgepakt zand 1 per kilometer taludlengte per jaar bedraagt.

Het is verder van belang op te merken dat bij de Zeeuwse vooroevers veelal sprake is van relatief fijn zand (D_{50} ligt tussen 150 en 250 μm). Een afwijkende zandgradatie geeft eveneens aanleiding tot nuancering van de statistiek.

Op basis van de gegevens werd in Zeeland de stelregel afgeleid, dat over een hoogte van 5 meter een taludhelling van 1:3 overschreden zou moeten worden wil een zettingsvloeiing op kunnen treden. Het is niet aan te raden die regel elders toe te passen. Immers bij grotere taludhoogten blijkt dat circa 15 % van de opgetreden vloeiingen bij taludhellingen flauwer dan 1:4 zijn geïnitieerd (Tabel 6.1).

In [CUR 2008] zijn de resultaten weergegeven van een inventarisatie van vele zandwinputten in Nederland. Daaruit volgt een andere ervaringsstatistiek. Die lijkt echter niet bruikbaar voor de toetsing van waterkeringen gezien de dominerende invloed van het baggerproces op die statistiek.

Op basis van aanvullende berekeningen met SLIQ2D blijkt dat de kans op een verwekingsvloeiing ongeveer met een factor 10 toeneemt als $\cot\alpha_R$ met een factor 1,5 afneemt (taludhelling neemt bijvoorbeeld toe van 1:6 naar 1:4) of H_R met een factor 3 toeneemt (bijvoorbeeld van 10m naar 30m) of als R_e met 10% afneemt (bijvoorbeeld van $R_e=0,40$ naar $R_e=0,30$). Daaruit zou men kunnen afleiden dat de kansdichtheid de volgende is:

$$P(ZV) = \left(\frac{H_R}{25m}\right)^2 \cdot \left(\frac{3,5}{\cot \alpha_R}\right)^6 \cdot \left(\frac{1}{10}\right)^{10 \cdot (R_e - 0,4)} \cdot 0,1 / km / jaar \quad (6.2)$$

met:

H_R = (fictieve) rekenhoogte talud (m)

$\cot \alpha_R$ = cotangens van de (fictieve) rekenhellingshoek (-)

R_e = laagste waarde van de relatieve dichtheid, gemiddeld over 3m hoogte tussen de maatgevende waterstand en 0,3 H_R onder de teen (-).

Voor de bepaling van de rekentaludhoogte en –helling wordt verwezen naar paragraaf 5.2.2. Indien de onderkant van de diepste verwekingsgevoelige laag zich boven de teen van de geul bevindt, kan de voor bepaling van H_R de onderkant van de diepste verwekingsgevoelige laag aangehouden worden. Conservatief kan voor de rekentaludhelling ook de gemiddelde geulhelling genomen worden.

Zowel de onzekerheid van de relatieve dichtheid, indien deze bepaald wordt volgens stap 6b, als de onzekerheid door variaties in de fictieve taludhoogte en de fictieve taludgradiënt binnen één dijktraject, kunnen worden opgevangen door toepassing van een modelfactor van 1,5².

De kans die met bovenstaande formule wordt berekend, is uitgedrukt in kans per kilometer per jaar. Om tot de representatieve kans per jaar te komen moet de berekende kans (naast de voorgestelde modelfactor) nog met de lengte van het dijktraject worden vermenigvuldigd. De lengte van het dijktraject wordt bepaald door overeenkomende geologische en geometrische karakteristieken. Aaneengesloten dijkstrekkings met een even dik verwekingsgevoelig zandpakket, een even groot voorland en gelijk onderwatertalud moeten als één dijktraject worden genomen. Het opknippen van een dergelijk dijkvak met overeenkomende karakteristieken om zodoende de faalkans te verlagen is niet toegestaan.

De representatieve kans op het voorkomen van een zettingsvloeiing per dijktraject wordt hiermee:

$$P(ZV)_{rep} = P(ZV) \cdot m \cdot L_{trajectlengte} \quad (6.3)$$

met:

$P(ZV)_{rep}$ = representatieve kans op zettingsvloeiing per dijktraject (per jaar)

$P(ZV)$ = kans op voorkomen van een zettingsvloeiing (per jaar per kilometer)

m = modelfactor is 1,5 (-)

$L_{trajectlengte}$ = lengte van het dijktraject waarover voorlandlengte, geuldiepte, gradiënt van de onderwatergeul en dikte van verwekingsgevoelige lagen uniform worden geacht (km).

Stap 6d: bepaal de maximaal toelaatbare en de optredende inschарingslengte

Een zettingsvloeiing is pas schadelijk voor het waterkerend vermogen van de dijk als het schadeprofiel de dijk raakt (interactie met andere faalmechanismen wordt in deze redenatie

2. Dit is een voorlopige modelfactor waarvoor de onderbouwing nog verder uitgewerkt moet worden. Dit zou tot aanpassing van de modelfactor kunnen leiden of tot een andere manier van toepassen van de modelfactor.

niet meegenomen). De maximaal toelaatbare inscharingslengte (zie Figuur 6.2) is dus de lengte van het voorland. Dat is een conservatief criterium. Immers, enige aantasting van de dijk hoeft nog niet tot een overstroming te leiden. Voor deze maximale inscharingslengte mag de totale lengte van het voorland in rekening worden gebracht, ofwel het "uittredpunt" van het maximaal toelaatbare schadeprofiel is de buitenteen van de dijk.

Naast de maximaal toelaatbare inscharingslengte, $L_{\text{toelaatbaar}}$, moet de optredende inscharingslengte L bepaald worden.

Als een zettingsvloeiing plaatsvindt, zal een deel van het vervloeiende materiaal naar de zijkanten afvloeien. Door dit tweedimensionale effect zal de oppervlakte van de verdwenen grond bovenin het dwarsprofiel (Area 1 in Figuur 6.2) ongeveer een factor 1,4 groter zijn dan de oppervlakte van de grond die er aan de onderkant (Area 2) bijkomt. Het uitvloeingsprofiel heeft ook niet één gelijkmatige taludgradiënt maar bestaat uit ruwweg twee delen; een zeer flauw ondergedeelte en een steiler bovengedeelte. Door [Silvis en De Groot 1995] is voor een tweedimensionale situatie een formule afgeleid voor deze massa/oppervlakte balans tussen vervloeid en gesedimenteerd materiaal. Daarbij is het genoemde verschil tussen Area 1 en Area 2 nog niet meegenomen. Indien deze verhouding wel wordt meegenomen, luidt de formule:

$$L = ax - Db \tag{6.4}$$

met:

$$x = \frac{-cH + \sqrt{(cH)^2 + (1-c) \left(\frac{D^2 b}{a} + H^2 c \right)}}{(1-c)} \quad \text{mits } c \neq 1$$

$$a = \cot \gamma - \cot \alpha ,$$

$$b = \cot \gamma - \cot \beta$$

$$c = \text{verhouding tussen Area1 en Area2 (A1=cA2)}$$

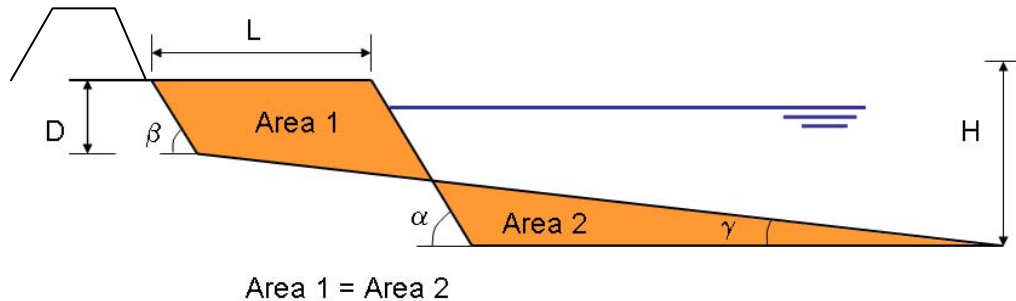
$$H = \text{geuldiepte (niet fictieve)}$$

$$D = \text{steile gedeelte schadeprofiel}$$

Als $c = 1$ geldt:

$$x = \frac{1}{2} H + \frac{1}{2} \frac{D^2}{H} \cdot \frac{b}{a}$$

Onderstaande figuur geeft een weergave in dwarsprofiel.



Figuur 6.2 Inscharingslengte na zettingsvloeiing [Silvis en De Groot 1995]

Voor H , de totale taludhoogte, moet de werkelijke hoogte tot aan het voorland worden genomen en niet meer worden gerekend met de fictieve rekenhoogte van het talud. Dit geldt eveneens voor de taludhelling. Bij afwijkende geometrie of gedeeltelijke vloeiingen zijn vergelijkbare formules af te leiden uitgaande van een oppervlaktebalans ($\text{Area}1 = c \cdot \text{Area}2$). In veel gevallen is $c = 1,4$ voldoende conservatief.

In vergelijking (6.4) staan drie onbekenden, te weten de helling van het bovenste steilere deel (β), het flauwe onderste deel (γ) van het schadeprofiel en de hoogte van het steilere bovenste gedeelte (D).

De bandbreedte van de hellingsgradiënt van het bovenste steile deel van het schadeprofiel is echter beperkt. De onderste hellingsgradiënt is verreweg de belangrijkste onzekere parameter en is in de gedetailleerde toetsing als enige stochastische variabele in de bepaling van het optredende schadeprofiel gesteld. Daarom wordt voor de toetsing alle onzekerheid in die parameter gestopt en voor het bovenste steile deel de gemiddelde hellingsgradiënt aangehouden (1:2,6). Verder geldt $D = 0,43H$. Deze waarden voor het bovenste steile deel van de inscharing en de parameter D zijn gebaseerd op waarnemingen van circa 1100 taludinstabiliteiten in de Zuidwestelijke Delta en vele waarnemingen in zandwinputten (voornamelijk Gelderland en Overijssel, CUR 130).

Door Wilderom [1979] zijn meer dan 1100 taludinstabiliteiten in Zeeland geanalyseerd. Van de 145 zettingsvloeiingen waarvan voldoende gegevens bekend waren, zijn de statistische gegevens berekend. Zie Silvis en de Groot [1995]. De volgende tabel geeft een overzicht van de karakteristieken van de geanalyseerde schadeprofielen.

	Gemiddelde	Onder- en bovengrens
Inscharingslengte L	80 m	10 - 250 m
Helling gemiddeld over het gehele talud δ	1:7,5	1:4,0 - 1:17,9
Helling bovenste steile deel β	1:2,6	1:1,3 - 1:8,0
Helling onderste deel γ (uitvloeit)	1:15,9	1:10 - 1:30
Relatieve hoogte bovenste deel D/H	0,43	0,35 - 0,50

Tabel 6.1 Geometrische eigenschappen van het dwarsprofiel na optreden van een zettingsvloeiing

Na het bepalen van de maximaal toelaatbare inscharingslengte (L = de breedte van het voorland) kan met behulp van formules 0.4 (met $\cot \beta = 2,6$ en $D=0,43H$) de te verwachten inscharingslengte L berekend worden als functie van de stochast γ . De daaruit volgende kansverdeling van L wordt afgeleid in de volgende stap.

Stap 6e: bepaal $P(L > L_{\text{toelaatbaar}})$

Op basis van de hiervoor beschreven statistiek kan de kansverdeling van $\cot \alpha_\gamma$ worden beschreven door een normale verdeling met $E_{\cot \alpha_\gamma} = 15,9 (= \mu_z)$ en $\sigma_{\cot \alpha_\gamma} = 4,6$.

Met deze kentallen is het mogelijk de overschrijdingskans van L te bepalen en vervolgens de kans dat L groter is dan $L_{\text{toelaatbaar}}$. Als betrouwbaarheidsfunctie wordt dus genomen:

$$Z = L_{\text{toelaatbaar}} - L$$

Hierin is L de optredende inscharingslengte die berekend wordt met vergelijking (6.4) op basis van de verwachtingswaarde en de standaardafwijking van $\cot \alpha_\gamma$ en $L_{\text{toelaatbaar}}$, dat is de aanwezige lengte van het voorland.

De betrouwbaarheidsindex β wordt als volgt berekend:

$$\beta = \frac{L_{\text{toelaatbaar}} - \mu(L)}{\sigma(Z)}$$

waarin $\mu(L)$ de verwachtingswaarde van L is volgend uit $\cot \alpha_\gamma = 15,9$. De standaardafwijking van Z wordt als volgt berekend:

$$\sigma(Z) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma(x_i)^2 \left(\frac{\partial Z}{\partial x_i} \right)^2}$$

waarin x_i de stochastische variabelen zijn. In dit geval is $\cot \alpha_\gamma$ de enige stochast, dus kan bovenstaande vergelijking vereenvoudigd worden tot:

$$\sigma(Z) = \sqrt{\sigma(\cot \alpha_\gamma)^2 \left(\frac{\partial Z}{\partial \cot \alpha_\gamma} \right)^2}$$

Hierin representeert $\frac{\partial Z}{\partial x_i}$ de gevoeligheid van Z voor een verandering van stochast $\cot \alpha_\gamma$,

ofwel dit is de ratio tussen de verandering van $\cot \alpha_\gamma$ en de (ten gevolge daarvan) verandering van Z. Bij benadering geldt:

$$\frac{\partial Z}{\partial x_i} = \frac{\Delta Z}{\Delta \cot \alpha_\gamma} = \frac{Z(E_{\cot \alpha_\gamma} + \sigma_{\cot \alpha_\gamma}) - Z(E_{\cot \alpha_\gamma})}{\sigma_{\cot \alpha_\gamma}} = \frac{L(\cot \alpha_\gamma = 20,5) - L(\cot \alpha_\gamma = 15,9)}{4,6}$$

Uitgaande van een Gauss-verdeling, wordt de kans dat een schadeprofiel de waterkering raakt en schade berokkend $P(\text{schadeprofiel})$ als volgt bepaald uit de berekende β :

$$P(L > L_{\text{toelaatbaar}}) = P(Z < 0) = \Phi(-\beta) \quad (6.5)$$

Met bovenstaande berekeningen is de kans dat inscharingslengte groter is dan de maximaal toelaatbare inscharingslengte bepaald.

Bovenstaande berekeningen zijn relatief eenvoudig in Excel uit te voeren. Zie ook de case study in Bijlage A.

Stap 6f: bepaal $P(\text{Schade aan waterkering door ZV})$

In stap 6c is de afzonderlijke kans van voorkomen van een zettingsvloeiing (oorzaak) bepaald en in stap 6e de afzonderlijke kans op schade (gevolg) gegeven een zettingsvloeiing. De totale kans op schade ofwel de totale kans op aantasting van het waterkerend vermogen (kans op falen) van het dijklichaam door een zettingsvloeiing wordt bepaald door vermenigvuldiging van de beide afzonderlijke kansen (oorzaak maal gevolg):

$$P(\text{Falen door ZV}) = P(ZV)_{rep} \cdot P(L > L_{toelaatbaar}) \quad (6.6)$$

De berekende faalkans uit vergelijking (6.6) dient nu te worden getoetst aan de maximale normkans. Deze normkans voor het afzonderlijke faalmechanisme zettingsvloeiing moet worden afgeleid van de norm voor de betreffende dijkkring. Hoe dit moet worden gedaan is uitgelegd in de volgende paragraaf.

In Bijlage A wordt de gedetailleerde toets uitgevoerd in een case study.

6.4 Bepaling toelaatbare faalkans

In de voorgaande paragrafen is aangegeven hoe de faalkans voor het mechanisme zettingsvloeiing per dijktraject kan worden bepaald. Als deze faalkansen zijn bepaald moeten ze worden getoetst aan de toelaatbare faalkans. Voor een bepaald deel van een waterkering (dijkvak) kan de toelaatbare kans op overstroming als gevolg van falen na een vloeiing in de langslopende getijgeul afgeleid worden uit de normen die bij wet zijn vastgesteld voor de verschillende dijkkringen. De afleiding staat beschreven in Appendix G van de Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken deel 2. Deze methodiek ter bepaling van de toelaatbare faalkans wordt gevisualiseerd door de foutenboom in bijlage B. Ter bepaling van de toelaatbare faalkans voor het mechanisme zettingsvloeiing worden feitelijk de volgende stappen doorlopen:

- Bepaal de overschrijdingskans (norm) van de betreffende dijkkring en neem deze als de totale faalkansruimte voor elke deel van de waterkering van de betreffende dijkkring.
- Van de totale faalkansruimte is 90% gereserveerd voor de mechanismen overloop/overslag. Slechts 10% rest voor de overige mechanismen (waaronder zettingsvloeiing). Bepaal de 10% van de totale faalkansruimte.
- Voor het falen van het dijklichaam is 40% van de bij stap 2 bepaalde faalkansruimte gereserveerd, welke wederom is verdeeld over de verschillende geotechnische faalmechanismen (waarvan instabiliteit van het voorland er 1 is). Voor het voorland is 10% van de bij de tweede stap bepaalde faalkansruimte gereserveerd.
- De totale faalkansruimte voor het voorland is dus 1% van de norm voor de dijkkring. Omdat voor de voorlandmechanismen de hoogste faalkans maatgevend is gesteld is hiermee de toelaatbare faalkans voor het mechanisme zettingsvloeiing bepaald; 1% van de totale normkans voor de dijkkring.

Ter illustratie een voorbeeld:

De gedachtegang is als volgt: de waterkering moet bestand zijn tegen een waterstand die een kans heeft van bijvoorbeeld 1:4000 jaar = $2,5 \cdot 10^{-4}$ / jaar. De kans dat het overslagdebiet het toelaatbare debiet overschrijdt mag niet groter zijn dan die kans. Maar de kans dat bij die waterstand of een lagere de waterkering faalt door een ander mechanisme dan overloop/overslag mag niet groter zijn dan 10% van 1:4000 jaar, dus niet groter dan $2,5 \cdot 10^{-5}$ / jaar. Zie paragraaf 5.1 van Technisch Rapport Ontwerpbelastingen voor het rivierengebied van ENW. Dat deel van de faalkansruimte moet dan weer verdeeld worden over al die overige mechanismen, waaronder macro-instabiliteit binnenwaarts, micro-instabiliteit

binnenwaarts, piping, falen bekleding en ook zettingsvloeiing. Zodoende blijft er voor de toelaatbare kans op overstroming als gevolg van falen van dat deel van de waterkering na een vloeïing in de langslopende getijgeul niet meer over dan $2,5 \cdot 10^{-6}$ / jaar.

Toch is dit geen keiharde norm. Vooral als andere faalmechanismen een relatief kleine bijdrage leveren, kan de beheerder van de waterkering aan een eventuele vloeïing een grotere faalkansruimte toekennen.

6.5 Toepasbaarheid van de gedetailleerde toetsregel buiten de Zuidwestelijke Delta

Hoewel de meeste ervaring waarop de toetsregels zijn gebaseerd voortkomt uit de Zeeuwse praktijk zijn er ook in het kader van het CUR onderzoek ervaringen uit de zandwinputten verwerkt. Deze ervaringen komen uit de regio's Utrecht, Gelderland, Overijssel en Limburg. Hiermee is al enige ervaring in het rivieren gebied opgenomen. De statistiek is echter nog nooit goed vergeleken bij gebrek aan gedetailleerde gegevens en een iets andere context met betrekking tot de initiatie (baggeren versus erosie en getijdebelastingen).

Met betrekking tot de verschillen van de zanden weten we dat de getijdezanden uit Zeeland in de regel uniformer zijn en een kleinere D_{50} hebben dan de rivierzanden. Een fijnere korrelverdeling impliceert een flauwer uitvloeiingsprofiel en dus een zekere mate van conservatisme bij de aangedragen regels voor het (boven)rivierengebied

Navolgend worden enkele (voorlopige) voorstellen gedaan waarmee de gedetailleerde toetsing in de toekomst zou kunnen worden aangepast voor situaties die afwijken van de vooroevers langs de Zeeuwse getijdegeulen.

Zowel de formule voor de kans van optreden (6.2) of (6.4) als die voor de kansverdeling van de uitvloeihelling γ zijn gebaseerd op gegevens over vloeïingen in Zeeland. De gevoeligheid van de kans van optreden voor taludhoogte, (reken)hellingshoek en relatieve dichtheid is wel gebaseerd op SLIQ2D berekeningen. Zoals aangegeven mag strikt genomen de gedetailleerde toets alleen worden toegepast op situaties die vergelijkbaar zijn met Zeeuwse situatie. Factoren die in gebieden buiten Zeeland kunnen afwijken ten opzichte van Zeeland, die waarschijnlijk een belangrijke invloed kunnen hebben op de kans op bezwijken van de waterkering ten gevolge van een zettingsvloeiing, maar die niet meegenomen zijn in hoofdstuk 3 zijn:

- de "beweeglijkheid" van de vooroevers ten gevolge van erosie
- de korrelgrootteverdeling van het zand

In navolgende twee paragrafen wordt kwalitatief aangegeven waar en op welke wijze bovengenoemde factoren meegenomen zouden kunnen worden in de gedetailleerde toetsing. De kwantificering ervan wordt uitgewerkt in SBW Faalmechanismen in losgepakt zand dat in 2011 start.

Andere variabelen die de kans op een zettingsvloeiing kunnen beïnvloeden, maar die in de gedetailleerde toetsing niet worden meegenomen, zijn versterkte erosie tijdens hoogwater en de snelheid van de daling van de waterstand na een hoogwater. Beide factoren kunnen een trigger voor een zettingsvloeiing zijn.

6.5.1 Beweeglijkheid van de vooroevers

Alternatief voor stap 6c: bepaal de kans op een zettingsvloeiing $P(ZV)$:

Vergelijking (6.2) is afgeleid uit de statistiek van zettingsvloeiingen in Zeeland in de tijd dat vooroevers daar nog niet of nauwelijks verdedigd waren. De formule is toepasbaar in gebieden waar de situatie vergelijkbaar is: beweeglijke vooroevers, zoals ze in estuaria

voorkomen. Als de oever vastgelegd is, bijvoorbeeld door een erosiebestendige (voor)oeverbescherming, dan is de kans op een zettingsvloeiing praktisch verwaarloosbaar. Bij toepassing van de formule bij een oever die niet is vastgelegd, maar waarbij de beweeglijkheid veel kleiner is, is de kans kleiner; daar waar de beweeglijkheid groter is, is ook de kans groter. Eén en ander kan weergegeven worden met de factor e , met $e = 1$ als de beweeglijkheid gelijk is aan die van de onbeschermde Zeeuwse oevers en $e = 0$ als de oever in het geheel niet beweeglijk is.

Vergelijking (0.3) zou als volgt aangepast kunnen worden:

$$P(ZV)_{rep} = P(ZV) \cdot m \cdot e \cdot L_{trajectlengte}$$

Met:

e = factor voor de beweeglijkheid van de oever, doorgaans 0 à 1 (-)

6.5.2 Korrelgrootteverdeling van het uitvloeiend zand

Alternatief voor Stap 6e: bepaal $P(L > L_{toelaatbaar})$

Zoals beschreven in paragraaf 6.3 kan de kansverdeling van $\cotan\gamma$ worden beschreven door een normale verdeling met $E_{\cotan\gamma} = 15,9 (= \mu_z)$ en $\sigma_{\cotan\gamma} = 4,6$. Deze kansverdeling is gebaseerd op vloeiingen in Zeeland in uniform zand met gemiddeld $D_{50} \approx 200\mu\text{m}$ en $D_{10} \approx 100$ à $130\mu\text{m}$. De uitvloeihelling γ ontstaat waarschijnlijk op dezelfde manier als de onderwater taludhellingen van kunstmatig in water opgebouwde zandlichamen, namelijk door sedimentatie uit een turbulente suspensiestroom, zoals beschreven in hoofdstuk 8 van [CUR 152, 1991]. Volgens formule (21) van die publicatie is de taludhelling $\tan\gamma$ recht evenredig met de "korreldiameter". Binnen de korrelverdeling van een zand gaat het daarbij vooral om de kleinere korrels. De waarde van D_{10} is een goede maat. Overeenkomstig kan dan aangenomen worden:

$$E_{\cotan\gamma} = 15,9 \cdot \frac{130\mu\text{m}}{D_{10}} \quad \text{en} \quad \sigma_{\cotan\gamma} = 4,6 \cdot \frac{130\mu\text{m}}{D_{10}}$$

6.6 Handreikingen geavanceerde Toetsing

In deze paragraaf worden handvatten voor een geavanceerde geotechnische toets aangedragen. Het betreft hier enerzijds de toepassing van modellen waarmee de fysische processen beschreven worden anderzijds een aanzet voor kwantificering van de bewezen sterkte van de waterkering, waarbij de geschiedenis van de waterkering en de omgevingsontwikkeling (erosie) worden meegenomen.

6.6.1 Beschrijving fysische processen

De eenvoudige toetsing en de beschreven gedetailleerde toetsing zijn voornamelijk gebaseerd op empirische gegevens over zettingsvloeiingen uit het verleden. In de geavanceerde toetsing worden de kans op optreden en de kans op een bepaalde inscharinglengte veelal bepaald op basis van rekenmodellen waarin de fysische processen beschreven worden. Die vereisen veel grondparameters en dus uitgebreid grondonderzoek. Ook hiervoor kan gebruik gemaakt worden van het schema in Figuur 6.1. Dit schema kan dienen als basis voor een foutenboom door de activiteiten en modellen precies te omschrijven en door de resultaten uit te drukken in parameters. Dat leidt meestal tot een sterke uitbreiding van de figuur omdat veel activiteiten moeten worden opgesplitst in deelactiviteiten met parameters als tussenresultaten. Het 'model optreden vloeiing' zal veelal gesplitst worden in een model voor verwekingsvloeiing en een voor bresvloeiing.

Indien voor verwekingsvloeiing de SLIQ2D aanpak gevolgd wordt, moet het model weer gesplitst worden in een model voor bepaling van de omvang van het potentieel verweekte gebied (het metastabiele gebied) en een model voor de (in)stabiliteit van het gehele talud gegeven verweking van het potentieel verweekte gebied. De verschillende modellen voor verwekingsvloeiing en bresvloeiing zijn beschreven in de vorige hoofdstukken. Afhankelijk van de mate waarin die parameters voor de modellen onzeker zijn en afhankelijk van de mate waarin ze het eindresultaat beïnvloeden, zullen ze als stochastische of deterministische variabelen behandeld moeten worden. De modelonzekerheden zullen verwerkt moeten worden door aparte stochastische parameters te introduceren of door stochastische parameters een extra variatie mee te geven. Met behulp van bijvoorbeeld de Monte Carlo-methode of de eenvoudigere, maar minder nauwkeurige FOSM-methode, kan vervolgens de faalkans bepaald worden. In de volgende paragraaf wordt ingegaan op de belangrijkste onzekerheden.

6.6.2 Onzekerheden

Een overzicht van de belangrijkste onzekerheden is hieronder gegeven. Hun relatie met de eventuele gevolgen volgt uit het schema.

- 1 Eigenschappen van de ondergrond:
 - 1.1 Opbouw van de ondergrond, met name de eventuele aanwezigheid van 'stoorlaagjes' in het zand.
 - 1.2 Relatieve dichtheid van het zand, inclusief de variatie daarvan; ook tot een flinke diepte onder de bodem van rivier, geul, meer of zee. Zie paragraaf 4.3 en zie opmerking volgend op dit overzicht
 - 1.3 Verwekingsgevoeligheid als functie van relatieve dichtheid en spanningsverdeling. Zie paragraaf 5.2
 - 1.4 Korrelverdelingen en doorlatendheden van de verschillende zandlagen of zandpakketten
- 2 Taludgeometrie en grondspanningen
 - 2.1 Taludgeometrie als het resultaat van erosie onder invloed van stroming en golven (getijgeul; ontgrondingskuil). Soms ook in het geval van baggeren, als niet voor iedereen duidelijk is hoe precies gebaggerd wordt. Zie hoofdstuk 3
 - 2.2 Spanningsverdeling in het zand voorafgaand aan een eventuele vloeiing (vooral K_0), mede als gevolg van geologische geschiedenis. Zie opmerkingen in paragraaf 5.2.11
- 3 Model optreden vloeiing. Voor verwekingsvloeiing, zie paragraaf 5.2. Voor bresvloeiing wordt verwezen naar [DelftCluster 2003].
- 4 Model inscharingslengte (taludverflauwing)
 - 4.1 Model voor de deformatie van het talud tijdens het vloeien door verweking
 - 4.2 Model voor de stroming van zandwater mengsels en hun interactie (erosie/sedimentatie) met de ondergrond
 - 4.3 Model voor de interactie tussen beide soorten vloeiing en voor de resulterende taludverflauwing.
- 5 Model voor bepaling van de toelaatbare inscharingslengte.

Voor wat betreft de bepaling van de parameters (in sommige gevallen dus uitkomsten van modellen) en de onzekerheden daarvan moet gebruik gemaakt worden van de methoden en modellen beschreven in met name hoofdstuk 5, en in mindere mate hoofdstukken 3 en 4. Zoals uit die hoofdstukken blijkt, zal voor een aantal parameters de bepaling complex zijn, bijvoorbeeld omdat er nog geen goede modellen voor bestaan en de kennis nog beperkt is. Dit geldt bijvoorbeeld voor de voorspelling van de deformatie van het talud tijdens het vloeien na verweking (4.1). Dit betekent dat de onzekerheid van deze parameters groot zal zijn. Die onzekerheid kan verkleind alleen worden door kennisontwikkeling door nieuw onderzoek. In

de aanbevelingen van dit rapport zal een overzicht gegeven worden van de belangrijkste kennishiaten, die de grootste bijdrage aan de onzekerheid van de voorspelling van inscharingen door zettingsvloeiingen leveren, die in SBW2011-2016 opgepakt zouden kunnen worden.

Wat betreft de bepaling van de onzekerheid van de relatieve dichtheid (R_e) van het zand (punt 1.2 hierboven), die in een doorgaans een grote bijdrage aan de totale faalkans zal hebben, kan wel enige toelichting gegeven worden.

De onzekerheid van de waarde van R_e komt uit twee bronnen:

1. onzekerheid in de methode waarmee de relatieve dichtheid is bepaald, door correlaties met de conusweerstand en/of op basis van elektrische dichtheidsmetingen (modelonzekerheid): $\sigma(I_{D,correl})$
2. onzekerheid in R_e ten gevolge van ruimtelijke spreiding: $\sigma(I_{D,spatial})$

De totale standaardafwijking van R_e ten gevolge van beide bronnen van onzekerheid is dan:

$$\sigma(I_D) = \sqrt{\sigma^2(I_{D,correl}) + \sigma^2(I_{D,spatial})}.$$

In paragraaf 5.2.3 zijn verschillende correlaties tussen de conusweerstand en de relatieve dichtheid beschreven. De onderlinge verschillen tussen de correlaties worden voornamelijk toegeschreven aan de verschillende eigenschappen van de gebruikte zandsorten, met name de samendrukbaarheid. Wanneer niets bekend is over de eigenschappen van de ondergrond, kan er geen voorkeur voor één bepaalde correlatie worden uitgesproken. In dat geval is de mogelijke spreiding gelijk aan de gezamenlijke standaardafwijking van alle correlaties bij elkaar. Die bedraagt circa 10%, waarbij de correlatie van Baldi als verwachtingswaarde kan worden gehanteerd. Op basis van aanvullende informatie aangaande de samendrukbaarheid, laterale spanningen of OCR-waarde, kan gekozen worden voor één of enkele van de correlaties, waarmee de bandbreedte wordt beperkt. Op die manier is de standaardafwijking aanzienlijk kleiner, in de orde van 5%. Hetzelfde kan in vrij veel gevallen bereikt worden door de relatieve dichtheid op een aantal plaatsen ook met een andere methode (bijvoorbeeld met EDM) te bepalen

Als de relatieve dichtheid op basis van elektrische dichtheidmetingen alleen wordt bepaald ligt de spreiding van R_e rond de 15%.

De nauwkeurigheid van de bepaling van de relatieve dichtheid kan verbeterd worden door EDM samen met de CPT-correlaties goed doordacht te combineren.

Wat betreft de ruimtelijke variatie van parameters zoals de sondeerweerstand q_c is middeling over een bepaalde hoogte en veelal ook in de breedte gerechtvaardigd omdat een vloeiing bepaald wordt door de gemiddelde eigenschappen in een potentieel afschuifvlak. De optredingskans wordt veelal bepaald per (hecto)meter horizontale lengte evenwijdig aan het talud. Bij de bepaling van de kans voor een bepaald lengtedeel van het talud van bijvoorbeeld 100 m lengte, moet nagegaan worden welke sonderingen en boringen in welke mate representatief zijn voor dat deel van het talud. Veelal zal men de waarden van uit sonderingen afgeleide parameters lineair interpoleren tussen twee naburige sonderingen. Maar ook moet de kans beschouwd worden dat de grondopbouw tussen die twee sonderingen sterk afwijkt van beide. Kennis van de geologie is daarvoor onmisbaar.

6.6.3 Geavanceerde toets: Bewezen sterkte analyse in de faalkans

De kans op een vloeiing bij een bestaand talud waarvan de geometrie al jaren onveranderd is en waarbij bovenbelasting en (grond)waterstanden in de toekomst, naar verwachting, niet meer zullen variëren dan ze in het verleden hebben gedaan, is zeer klein. Een vloeiing kan daar alleen optreden als het talud bijna metastabiel is. Het kan dan optreden op het moment dat er een belasting optreedt die toch iets zwaarder is dan in het verleden is opgetreden.

Daarbij moet men denken aan een aardbeving of een onverwacht sterke en snelle waterstandsverlaging.

Indien in dergelijke gevallen de faalkans die men vindt op basis van ervaringsstatistiek zoals omschreven voor de gedetailleerde toets nog te groot is zal tot een geavanceerde toets moeten worden overgegaan waarbij een bewezen sterkte component kan worden meegenomen.

De bewezen sterkte kan men in rekening brengen uitgaande van de voorspelde kans op basis van rekenmodellen (bijvoorbeeld SLIQ2D in combinatie met een model voor instabiliteit van het gehele talud). Dat gaat in grote lijnen als volgt.

- Beschouw het grondgedrag als de sterkte en de geometrie, met het eventuele gewicht van bovenbelasting, de effecten van grondwaterstroming en het effect van aardbevingen, als de belasting. Dan geldt dat praktisch alle onzekerheid (grondeigenschappen, spanningen, rekenmodel) in de sterkte zit.
- Kies $\tan\alpha_R$, dat is de tangens van de rekentaludhelling, als parameter om belasting en sterkte in uit te drukken. Men kan ook kiezen voor een andere parameter zoals de rekentaludhoogte H_R of de waarde van $(I_D - I_{D1})$, waarbij $I_D = R_e$ de relatieve dichtheid is en I_{D1} de relatieve dichtheid waarbij juist een bepaalde contractie optreedt, waardoor I_{D1} als maat voor de verwekingsgevoeligheid kan gelden. Maar in het hier volgende wordt steeds uitgegaan van het gebruik van $\tan\alpha_R$.

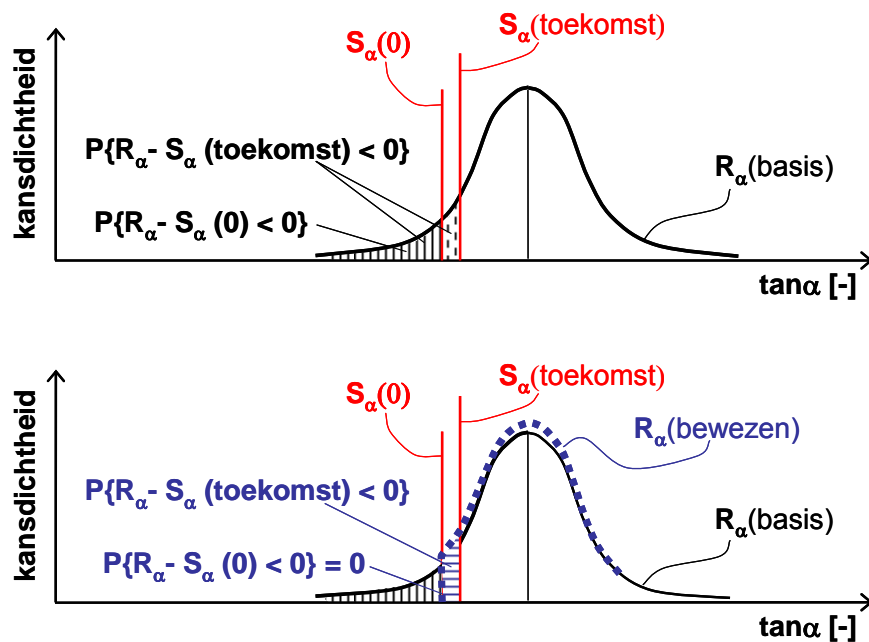
Definieer de kritieke waarde van $\tan\alpha_R$, dus de waarde waarbij in deze grond een vloeijing zal optreden, als sterkte R_α en de werkelijke waarde van $\tan\alpha_R$ als belasting S_α . De “kans op vloeijing” is dan gelijk aan de kans dat $(R_\alpha - S_\alpha) < 0$. Zie ook Figuur 6.3.

- Bereken de kansverdeling van R_α (basis) met het rekenmodel op basis van de kansverdelingen van alle invoerparameters. Verwerk daarbij alle onzekerheden betreffende het grondgedrag in de kansverdeling van R_α (basis). Daartoe moet men kwantificeren welke verandering in bijvoorbeeld relatieve dichtheid hetzelfde effect heeft als een verandering in $\tan\alpha_R$. Dat kan het beste gebeuren door het maken van een flink aantal berekeningen met het rekenmodel voor de specifieke situatie.
- Bepaal de huidige of maximaal in het verleden opgetreden belasting $S_\alpha(0)$ en de maximale in de toekomst te verwachten belasting S_α (toekomst). Om die grootheden te bepalen moeten de effecten van aardbevingsversnelling, bovenbelasting en (grond)waterstanden vertaald worden in equivalente versteilingen van het talud.

Vergelijk de kansverdeling van R_α (basis) met $S_\alpha(0)$ en met S_α (toekomst). Zie het bovenste deel van Figuur 6.3.

De kans op vloeijing die daaruit volgt voor het verleden, $P\{R_\alpha - S_\alpha(0) < 0\}$, is echter incorrect, omdat het talud bewezen heeft stabiel te zijn. Wijzig daarom R_α (basis) in R_α (bewezen) zoals geschetst met een stippellijn in het onderste deel van Figuur 6.3.

- Bereken opnieuw $P\{R_\alpha$ (bewezen) - S_α (toekomst) $< 0\}$. Bij kleine waarde van $[S_\alpha$ (toekomst) - $S(0)]$ zal die significant kleiner zijn dan $P\{R_\alpha$ (basis) - S_α (toekomst) $< 0\}$. Vergelijk het horizontaal gearceerde vlakje in het onderste deel met het verticaal gearceerde (getrokken + onderbroken) in het bovenste deel.



Figuur 6.3 Vertaling van kansdichtheid met medenemen van bewezen sterkte

6.6.4 Toelaatbare faalkans

Bij een gedetailleerde toetsing zal men de toelaatbare kans, waarvan de bepaling in paragraaf 6.4 is besproken, vergelijken met de kans gevonden op de manier aangegeven in paragraaf 6.3. Dat kan echter zeer conservatief zijn, want de kans op “schade aan de waterkering” wordt bepaald, niet de “kans op overstroming als gevolg van een zettingsvloeiing”. Bij een geavanceerde toetsing kan men de volgende elementen meenemen om de marge tussen beide kansen in rekening te brengen:

- In tegenstelling tot veel andere faalmechanismen (binnenwaartse afschuiving, piping) is de kans op het optreden van een zettingsvloeiing in de meeste gevallen niet gecorreleerd aan het optreden van een hoogwater. Voor een overstroming is het in ieder geval nodig dat er zo snel na de zettingsvloeiing een hoogwater optreedt dat men geen tijd heeft om de beschadigde dijk te repareren.
- Als de inscharing verder komt dan de teen, maar niet zover dat de kruin wordt aangetast, is de waterkering op dat moment waarschijnlijk nog in staat zelfs het maatgevend hoogwater te keren. Het belangrijkste risico is dat tijdens een lange tijd van hoge waterstanden, sterke stroom en/of golven het buitentalud zodanig wordt aangetast dat geen reparatie mogelijk is voordat een extreem hoogwater komt.

Beide elementen kan men, zoals nu ook in een geavanceerde analyse mogelijk, meenemen door de kansen op het ontstaan van meerdere kruinhoogteverlagingen te bepalen en die te vergelijken met de kans dat een waterstand optreedt hoger dan gekeerd kan worden bij de betreffende kruinhoogte, in de periode tussen het optreden van de zettingsvloeiing en het voltooien van de (nood)reparatie van de dijk.

De kans op het snel opeenvolgen van twee hoogwaters is in het getijdgebied hoger dan in het bovenrivierengebied. Een aanpak als hierboven beschreven zal dus leiden tot gunstigere resultaten in het bovenrivierengebied.

Indien een toetsing op basis van de overstromingskans zou plaatsvinden is het in de meeste gevallen voldoende één of twee van de volgende inscharingslengten te beschouwen en daarvoor de toelaatbare (overstromings)kans te bepalen:

- inscharingslengte gelijk aan de afstand tussen oever en buitenteen van de dijk;
- inscharingslengte gelijk aan de afstand tussen oever en binnenteen van de dijk;
- inscharingslengte gelijk aan de afstand tussen oever en overgang van binnenberm naar binnentalud (alleen als er een brede binnenberm is).

De eerste inscharingslengte is maatgevend bij een hoge frequentie van een waterstand die het niveau van het terrein aan de binnenzijde van de dijk overschrijdt. Immers, de kans op inscharingslengte die orde 10m groter is, waardoor ook de kruin wordt aangetast door macro-instabiliteit van het buitentalud en de restkruinhoogte gelijk wordt aan het genoemde teenniveau, is dan nauwelijks kleiner, terwijl de kans groot is dat de dijk niet voldoende gerepareerd kan worden om die waterstand te weerstaan. De toelaatbare kans op die inscharingslengte is dan gelijk aan de toelaatbare kans op een overstroming als gevolg van een zettingsvloeiing ofwel de toelaatbare kans op falen van de waterkering als gevolg van een zettingsvloeiing, $P(\text{falen|vloeiing})$.

De tweede inscharingslengte is maatgevend bij waterstanden die zelden hoger zijn dan het niveau van het terrein aan de binnenzijde van de dijk. Dan is de restkruinhoogte gelijk aan het niveau van het terrein aan de binnenteen en is de toelaatbare kans gelijk aan $P(\text{falen|vloeiing})/P(\text{waterstand} > \text{restkruinhoogte})$, waarin $P(\text{waterstand} > \text{restkruinhoogte}) =$ de kans dat de waterstand hoger wordt dan de restkruinhoogte na de vloeiing voordat een (nood)reparatie heeft kunnen plaatsvinden. $P(\text{waterstand} > \text{restkruinhoogte})$ is bijvoorbeeld gelijk aan 2/52 als de tijd nodig voor een (nood)reparatie 2 weken bedraagt en als de overschrijdingsfrequentie van een waterstand gelijk aan de restkruinhoogte 1/jaar = 1/52 weken bedraagt.

De derde inscharingslengte kan maatgevend zijn bij een brede binnenberm en waterstanden die zelden hoger zijn dan het niveau van de binnenberm. Dan is de restkruinhoogte gelijk aan het niveau van de binnenberm en is de toelaatbare kans weer gelijk aan $P(\text{falen|vloeiing})/P(\text{waterstand} > \text{restkruinhoogte})$.

Bij een hoge frequentie van een waterstand die het niveau van het terrein aan de binnenzijde van de dijk overschrijdt, kan zelfs de eerste inscharingslengte soms nog een te gunstige toelaatbare inscharingslengte opleveren. Dat is het geval als een dergelijk inscharing de kans op falen door piping aanzienlijk doet toenemen.

Bij een geavanceerde toetsing kan men meer inscharingslengtes beschouwen dan de drie bovengenoemde en alle mogelijke inscharingslengtes opnemen een analyse van de kans op overstroming na een zettingsvloeiing. Eventueel kan men de analyse ook combineren met de analyse van de kans op overstroming ten gevolge van andere oorzaken dan zettingsvloeiing.

7 Literatuur

[Baldi 1982]

Baldi, G. e.a., Design parameters for sands from CPT. Proceedings 2nd. European Symposium on Penetration Testing Amsterdam, 1982

[Been & Jefferies 1985]

Been, K. and M.G. Jefferies, A state parameter for sands. *Géotechnique* 35, Nr. 2, pp 99-112, 1985

[Been e.a. 1986]

Been, K., J.H.A. Crooks, D.E. Becker. and M.G. Jefferies, The cone penetration test in sands: part I, state parameter interpretation. *Géotechnique* 36, Nr. 2, pp 239-249, 1986

[van den Berg e.a. 2002]

J.H. van den Berg, A. van Gelder & D.R. Mastbergen (2002). The importance of breaching as a mechanism of subaqueous slope failure in fine sand. *Sedimentology* 49, pp 81-95.

[Chu e.a. 2003]

Chu, J, S. Leroueil and W.K. Leong, Unstable behaviour of sand and its implication for slope stability. *Can. Geotechnical Journal* 40, pp 873 –885, 2003

[Crook 1996]

Crook, Th. de, 1996, A seismic zoning map conforming to Eurocode 8, and practical earthquake parameter relations for the Netherlands. *Geologie en Mijnbouw* 75, pp 11-18

[CUR 152, 1992]

CUR-rapport 15 (1992). Kunstmatig onder water gestorte zandlichamen / Artificial sand fills in water. CUR, Gouda.

[CUR 162, 1992]

CUR-rapport 162, Construeren met grond – Grondconstructies op en in sterk samendrukbare en weinig draagkrachtige ondergrond, CUR, Gouda, 1992.

[CUR 182, 1996]

CUR-rapport 182. Geofysische technieken voor grondonderzoek. CUR, Gouda, 1996.

[CUR 2003].

CUR-publicatie 2003-7, Bepaling geotechnische parameters. CUR, Gouda, 2003.

[CUR 2005].

CUR (2005)
Aanbeveling 105: Risicoverdeling Geotechniek

[CUR 2008].

CUR (2008)
Aanbeveling 113: Oeverstabiliteit bij zandwinputten

[Delft Cluster 2003]

Delft Cluster, Numerieke modellering taludvorming bij zandwinning. Delft Cluster rapport DC1-321-10, GeoDelft / WL|Delft Hydraulics, 2003

[ENW 2007]

Expertise Netwerk Waterkeren (2007)
Technisch rapport Ontwerpbelastingen voor het rivierengebied
Ministerie Verkeer en Waterstaat, ISBN-978-90-369-1409-3

[de Groot & Stoutjesdijk 1997]

M.B. de Groot & T.P. Stoutjesdijk (1997)
Undrained stress path of loose sand predicted from dry tests
Can. Geotechn. J. 34, pp 131-138

[de Groot e.a. 2006]

De Groot, M.B., Bolton, M.D., Foray, P., Meijers, P., Palmer, A.C., Sandven, R., Sawicki, A., Teh, T.C. (2006). "Physics of liquefaction phenomena around marine structures." *J. Waterway Port Coastal & Ocean Engineering*, 132-4, pp 227-243

[de Groot e.a. 2007]

M.B. de Groot, T.P. Stoutjesdijk, P. Meijers & T. Schweckendiek (2007).
Verwekingsvloeiing in zand. *Geotechniek*, oktober 2007, pp 54 - 59

[de Groot e.a. 2009]

M.B. de Groot, M.B. van der Ruyt, D. Mastbergen & G.A. van den Ham (2009).
Bresvloeiing in zand. *Geotechniek*, juli 2009, pp 32 - 37

[Ishihara 1993]

Ishihara, K., Liquefaction and flow failure during earthquakes, 33rd Rankine Lecture. *Géotechnique* 43, nr 3, pp 351 – 415, 1993

[Jefferies & Been 2006]

Jefferies M.G. and Been, K. (2006)
Soil liquefaction . A critical state approach.
Taylor & Francis, Abingdon, OX 14 4RN, UK. ISBN 0-419-16170-8, 480 pp

[Koning 1970]

Koning, J. de, Neue Erkenntnisse beim Gewinnen und Transport von Sand im Spülproject Venserpolder. V.D.I. Tagung "Bauen im Ausland", Hamburg, 1-9, 1970

[Lindenberg & Koning]

Lindenberg, J and Koning, H.L.,(1981). Critical density of sand. *Geotechnique*, 31, No 2, 231-245

[Mastbergen & van den Berg 2003]

Mastbergen, D.R. & Van den Berg, J.H. (2003). Breaching in fine sands and the generation of sustained turbidity currents in submarine canyons. *Sedimentology*, Nr 50, pp 635-637.

- [NEN 1986]
NEN 6740: 1986, Technische grondslagen voor bouwconstructies. TGB 1986, Nederlands Normalisatie-instituut, Delft, 1986
- [Olson en Stark 2003]
Olson, S.M. and Stark, T.D. 2003.
Yield Strength Ratio and Liquefaction Analysis of Slopes and Embankments
J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng., 129-8, pp 727-737
- [Overijssel 1997]
Provincie Overijssel, Beperking van risico's op stabiliteitsverlies van taluds bij diepe zandwinningen in Overijssel. Provincie Overijssel, Zwolle, 1997
- [Overijssel 2001]
Provincie Overijssel, Beleidsnotitie taludinstabiliteit en veiligheid diepe zandwinningen in Overijssel. Provincie Overijssel, Zwolle, 2001
- [van Rhee & Bezuijen 1998]
C. van Rhee & A. Bezuijen (1998). The breaching of sand investigated in large-scale model tests. Proc. Int. Conf. Coastal Engineering (ASCE), Volume 3, pp 2509-2519.
- [Schmertmann 1975]
Schmertmann, J.H., An updated correlation between relative density D_r and Fugro type electric cone q . Contract report DACW39-76-M6646 WES, Vicksburg 1975
- [Silvis & de Groot 1995]
F. Silvis & M.B. de Groot (1995)
Flow slides in the Netherlands: experience and engineering practice
Can. Geotechn. J. 32, pp 1086 - 1092
- [Stoutjesdijk & de Groot 1994]
T.P. Stoutjesdijk & M.B. de Groot (1994). Handboek zettingsvloeiing. GeoDelft, CO-353260/10, 104 blz
- [Stoutjesdijk e a 1998]
T.P. Stoutjesdijk, M.B. de Groot & J. Lindenberg (1998).
Flow slide prediction method: influence of slope geometry.
Can. Geotechn. J. 35, pp 34 -54.
- [TAW 1999]
TAW (1999)
Technisch rapport Zandmeevoerende Wellen, appendix II
DWW
- [TAW 2001]
TAW (2001)
Technisch rapport Waterkerende Grondconstructies
DWW

[Villet & Mitchell 1981]

Villet, W.C. and J.K. Mitchell, Cone resistance, relative density and friction angle. Symp. on Cone Penetration testing and Experience Geotechn. eng. Div. ASCE, October 1981

[VTV 2006]

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007)

Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen. Katern 9 Voorland.

ISBN 978-90-369-5762-5

[Wilderom 1979]

Wilderom, Resultaten van het vooronderzoek langs de Zeeuwse stromen. Rijkswaterstaat, Nota 75.2, januari 1979

[WL 2001]

WL|Delft Hydraulics, Taludstabiliteit en veiligheid bij diepe zandwinningen in Overijssel.

WL|Delft Hydraulics in opdracht van Provincie Overijssel, Z3014, 2001

[Youd e.a. 2001]

Youd, T.L. *et al*, Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 127, nr 10, pp 817 – 833, October 2001

Bijlage A Case study

A.1 Inleiding

In dit voorbeeld wordt het toetschema zoals gepresenteerd in paragraaf 6.1 gedemonstreerd aan de hand van een (fictief) dijkvak, die wat betreft geometrie en grondopbouw typisch is voor de Zuidwestelijke Delta. Zowel de globale als gedetailleerde toets worden daarbij doorlopen. Benadrukt wordt dat deze case fictief is en een illustratie ter informatie betreft.

Aanwezige informatie

- Sonderingen en boringen
- Geotechnisch profiel en beschrijving
- Dwarsprofiel en geulmeting
- De vooroever is nergens bestort

Gebiedsomschrijving

De dijk heeft een hoogte van circa NAP + 5 m en een kruinbreedte van 3 m. Het voorland begint aan de denkbeeldige teen van de dijk op een hoogte van NAP en is 60m breed. De teen van de geul ligt op NAP-15,0 m en heeft een helling van 1:6. Het dijkvak is 800m lang.

Geologie

Op basis van sonderingen en boringen (zie o.a. Figuur A.2) kan de volgende grondopbouw afgeleid worden

Van NAP + 3,5 m tot NAP + 1 m: veen

NAP +1 m tot NAP – 5 m: siltige klei

NAP – 5 m tot NAP – 18 m matig tot losgepakt zand (Calais)

NAP – 18 m tot NAP – 30 m vastgepakt zand

A.2 Toetsing

Eenvoudige toetsing

Stap 1: Schadelijkheids criterium

In de eerste stap wordt getoetst of, indien een zettingsvloeiing plaatsvindt, deze schadelijk kan zijn voor het waterkerend vermogen van de waterkering, conform Bijlage 9-4 van het VTV2006.

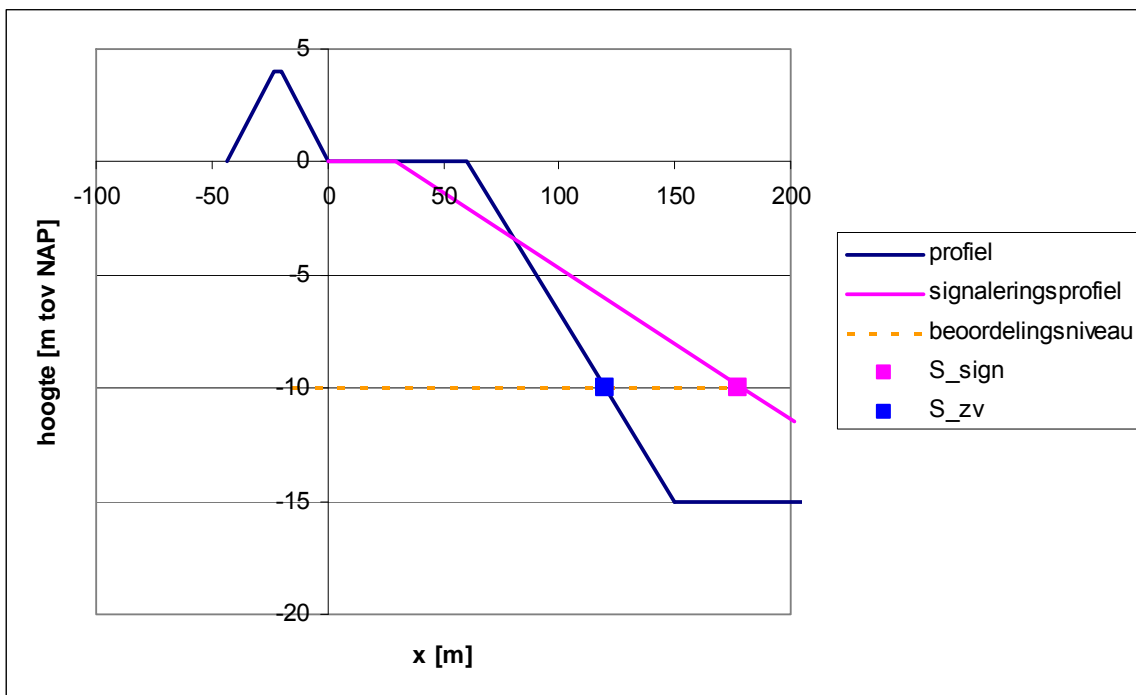
Daartoe moet als eerste het zogenaamde signaleringsprofiel geconstrueerd worden. Het signaleringsprofiel bestaat uit een horizontaal stuk vanaf de buitenteen van de dijk, de zogenaamde marge (M), en een lijn onder een hellingshoek. De zandformatie die in deze stap als verwekingsgevoelig moet worden beschouwd bevindt zich tussen NAP - 5 m en circa NAP - 18 m (zie sondering Figuur A2). De bodem van de geul bevindt zich op een diepte van NAP -15 m. De marge wordt nu bepaald door de relatie $M = 2 \cdot H_{ww} + 1,5 \cdot (H - H_{ww}) = 2 \cdot 13 + 1,5 \cdot (15 - 13) = 29,0$ m.

De geuldiepte is kleiner dan 40 meter dus het hellend deel van het signaleringsprofiel is 1:15.

De totale taludhelling (geulrand-geulbodem) is gemiddeld 1:6.

Het beoordelingsniveau is in principe de onderkant van de verwekingsgevoelige zandlaag, maar ligt minimaal op een hoogte van $1/3H$ en maximaal $1/2H$ boven de geulbodem. In dit geval ligt het beoordelingsniveau op NAP-10 m, hoewel de onderkant van de verwekingsgevoelige lagen zich op NAP-18 m bevindt

In onderstaande figuur (figuur A.1) is te zien dat het verwekingvloeiingspunt (S_{zv}) landinwaarts ligt van het signaleringspunt (S_{sign}). Er wordt dus niet voldaan aan het schadelijkheids criterium en de toetsing moet worden voortgezet met stap 2.



Figuur Fout! Geen tekst met de opgegeven stijl in het document..1 signaleringspunt en verwekingvloeiingspunt

Stap 2: Kunstmatig onder water aangebrachte en niet verdichte zandige vooroever?

Er is sprake van een natuurlijke vooroever. De toetsing wordt dus voortgezet in stap 4.

Stap 4: Optredingscriterium

De totale taludhelling (geulrand-geulbodem) is gemiddeld 1:6. Volgens het eerste optredingscriterium (van in totaal twee) kan een zettingsvloeiing optreden indien de taludhelling gemiddeld steiler is dan 1:7 (het andere criterium is dat het talud steiler of gelijk aan 1:4 is over een hoogte van minimaal 5 m). Het optreden van een zettingsvloeiing is derhalve mogelijk op basis van de geometrie van het onderwatertalud. De toetsing moet worden voortgezet met stap 5.

Stap 5: aanwezigheid van verwekingsgevoelige lagen

Uit de sonderingen blijkt dat van NAP - 5 m tot en met NAP - 18 m matig tot los gepakte zandlagen aanwezig te zijn waarvan delen met een dikte van groter dan 3 meter los- tot zeer losgepakt zijn (zie Figuur A2). Het voorland kan dus als verwekingsgevoelig beschouwd worden. De toetsing moet worden voortgezet met stap 6: de gedetailleerde toetsing.

Gedetailleerde toetsing

Stap 6a: bepaling representatief dwarsprofiel en benodigde rekenwaarden

De lengte van het voorland is $L = 60,0$ m

De geuldiepte is $H = 15,0$ m.

De fictieve geuldiepte H_R is berekend conform VTV2006 Bijlage 9-1:

$$H_R = h_{\text{onder}} + h_{\text{boven}} \cdot \frac{\cot \alpha_{\text{onder}}}{\cot \alpha'_{\text{boven}}}$$

waarin:

$$\alpha'_{\text{boven}} = \arctan \frac{h_{\text{boven}}}{h_{\text{boven}} \cdot \cot \alpha_{\text{boven}} + B},$$

$h_{\text{boven}} = 2 \cdot h_{\text{dijk}}$ (fictieve hoogte van het boventalud uitgaande van een waterverzadigd dijklichaam, met h_{dijk} is hoogte van dijk)

$h_{\text{onder}} = d + 2 \cdot \Delta h_{\text{onder}}$ (fictieve hoogte van de geulhelling, met d is waterdiepte en Δh_{onder} is hoogte van de geulhelling dat bij extreem laagwater boven water ligt).

B is breedte van het voorland.

Invullen van $h_{\text{dijk}} = 4$ m, $d = 13$ m, $\Delta h_{\text{onder}} = 2$ m, $\cot \alpha_{\text{onder}} = 6$, $\cot \alpha_{\text{boven}} = 3$ en $B = 60$ m, levert $H_R = 19,6$ m.

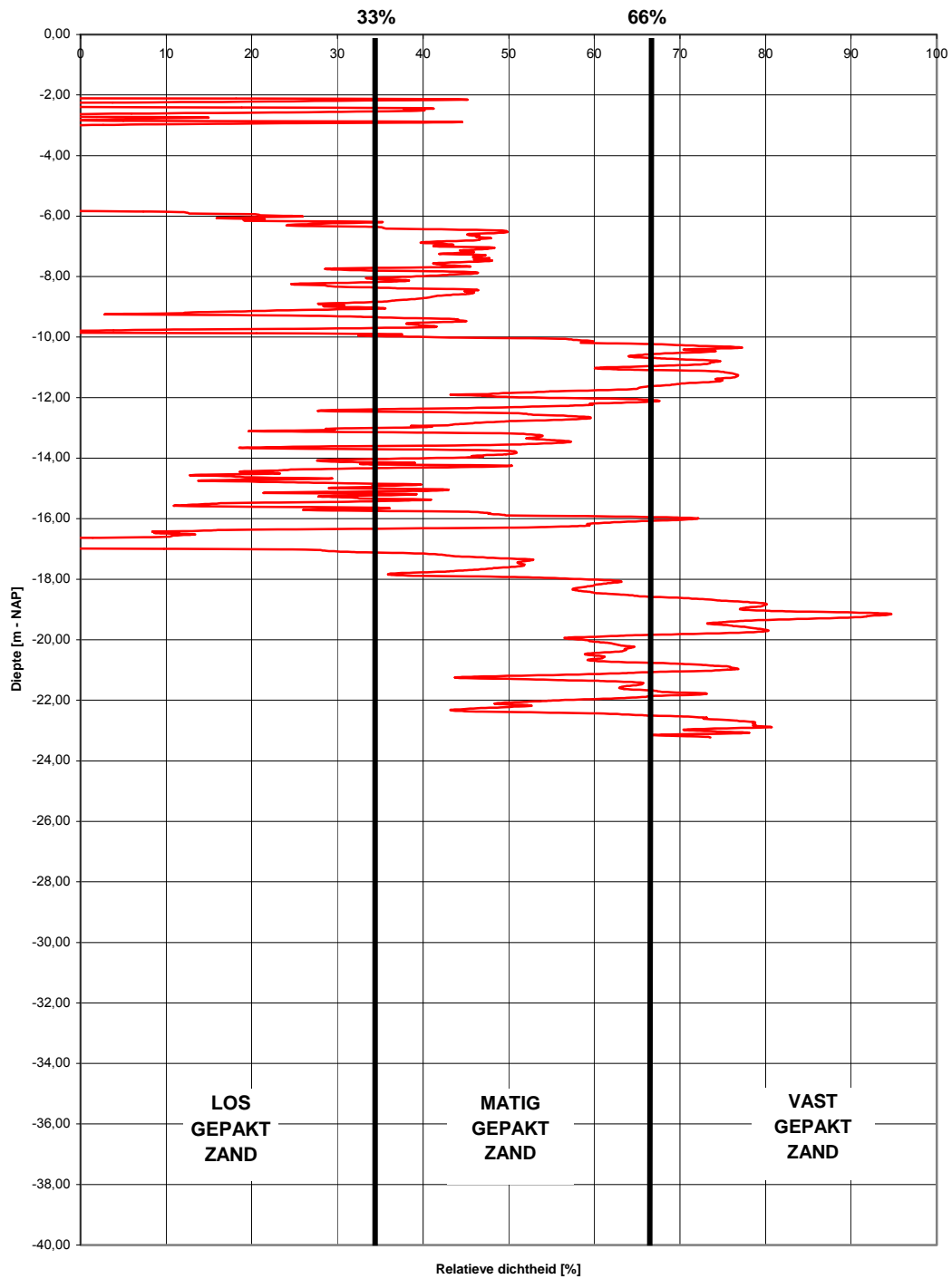
Voor rekentaludhelling kan de gemiddelde helling van de geul worden genomen: $\cot \alpha_R = 6$.

Stap 6b: bepaling van de relatieve dichtheden binnen de zandlaag

De relatieve dichtheid wordt bepaald met de correlatie volgens Baldi op een representatieve sondering. Uit de vertalingen van conusweerstand naar relatieve dichtheid blijkt de zandlaag onder te verdelen in circa 4 sublagen. Van NAP - 5 m tot en met NAP - 10 m is de gemiddelde relatieve dichtheid circa 0,4. Van NAP - 10 m tot en met NAP - 12 m is de relatieve dichtheid circa 0,66 en van NAP - 12 m tot en met NAP - 18 m circa 0,4. Onder het niveau van NAP - 18m heeft het zand een relatieve dichtheid groter dan 0,66. Figuur A.2 geeft de weergave van deze correlatie tussen conusweerstand en relatieve dichtheid.

Als maatgevende relatieve dichtheid wordt de laagste relatieve dichtheid genomen gemiddeld over een dikte van minimaal 3 meter. In dit geval is de maatgevende relatieve dichtheid 0,4.

Relatieve Dichtheid Representatieve Sondering



Figuur Fout! Geen tekst met de opgegeven stijl in het document..2

Relatieve dichtheden op basis van

conusweerstand volgens de Baldi correlatie

Stap 6c: bepaal P(ZV).

De kans op voorkomen, per jaar per kilometer, van zettingsvloeiing wordt als volgt berekend:

$$P(ZV) = \left(\frac{H_R}{25m}\right)^2 \cdot \left(\frac{3,5}{\cot \alpha_R}\right)^6 \cdot \left(\frac{1}{10}\right)^{10 \cdot (R_e - 0,4)} \cdot 0,1$$

Met $H_R = 19,6$ m, $\cot \alpha_R = 6$ en $R_e = 0,4$ volgt dat $P(ZV)$ gelijk is aan $(19,6/25)^2 \cdot (3,5/3)^6 \cdot (1/10)^{10 \cdot (0,4 - 0,4)} \cdot 0,1 = 2,4 \cdot 10^{-3}$ per jaar per kilometer.

De representatieve kans per dijktraject kan nu worden bepaald door een modelfactor (1,5) en de lengte van het dijkvak (0,8 km) te verdisconteren:

$$P(ZV)_{rep} = 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 0,8 = 2,9 \cdot 10^{-3}$$

Stap 6d: bepaal de maximaal toelaatbare inscharingslengte en uitvloeiingsprofiel

De maximale inscharingslengte is in dit geval de lengte van het voorland (in dwarsprofiel). Deze is 60,0 m. Er geldt vanuit de volumebalans (paragraaf 6.3) dat:

$$L = ax - Db$$

met:

$$x = \frac{-cH + \sqrt{(cH)^2 + (1-c) \left(\frac{D^2b}{a} + H^2c\right)}}{(1-c)}$$

$$a = \cot \gamma - \cot \alpha,$$

$$b = \cot \gamma - \cot \beta$$

$$c = \text{verhouding tussen Area1 en Area2 (A1=cA2)}$$

$$H = \text{geuldiepte (niet fictieve)}$$

$$D = \text{steile gedeelte schadeprofiel}$$

Met $H = 15$ m, $\cot \alpha = 6$, $\cot \beta = 2,6$, $D = 0,43H$ en $c = 1,4$ kan de verwachtingswaarde van de inscharingslengte worden bepaald: $\mu(L) = 10,6$ m.

Met $L_{toelaatbaar} = 60,0$ m volgt dat de verwachtingswaarde van $Z = L_{toelaatbaar} - \mu(L) = 60,0 - 10,6 = 49,4$ m

Stap 6e: bepaal P(schadeprofiel_{max})

Door het invullen van de formules in paragraaf 6.3 kan de betrouwbaarheidsindex β worden bepaald:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z}{\partial x_i} &= \frac{\Delta Z}{\Delta \cot \text{any}} = \frac{Z(E_{\cot \text{any}} + \sigma_{\cot \text{any}}) - Z(E_{\cot \text{any}})}{\sigma_{\cot \text{any}}} = \frac{L(\cot \text{any} = 20,5) - L(\cot \text{any} = 15,9)}{4,6} \\ &= \frac{23,8 - 10,6}{4,6} = 2,9 \end{aligned}$$

$$\sigma(Z) = \sqrt{\sigma(\cot \text{any})^2 \left(\frac{\partial Z}{\partial \cot \text{any}}\right)^2} = \sqrt{(4,6)^2 \cdot (2,9)^2} = 13,2$$

$$\beta = \frac{L_{toelaatbaar} - \mu(L)}{\sigma(Z)} = \frac{60,0 - 10,6}{13,2} = 3,7$$

$$P(\text{schadeprofiel}_{\max}) = P(L > L_{\text{toelaatbaar}}) = P(Z < 0) = \Phi(-\beta) = 8,9 \cdot 10^{-5}$$

Hieruit volgt dat de overschrijdingskans van het maximaal toelaatbare schadeprofiel met een inscharingslengte groter dan de breedte van het bestaande voorland $8,9 \cdot 10^{-5}$ is.

Stap 6f: bepaal $P(\text{schade aan waterkering door ZV})$

De kans op schade aan waterkering als gevolg van een zettingsvloeiing is:

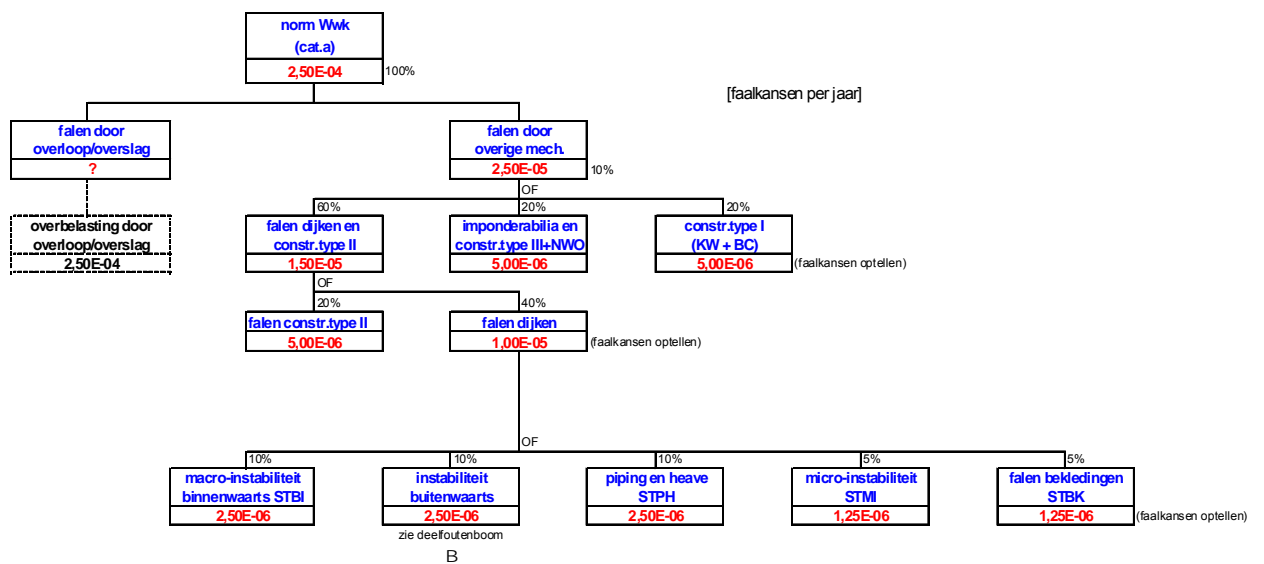
$$P(\text{falen|ZV}) = P(\text{ZV})_{\text{rep}} * P(\text{schadeprofiel}_{\max}) = 2,9 \cdot 10^{-3} * 8,9 \cdot 10^{-5} = 2,6 \cdot 10^{-7} \text{ per jaar.}$$

Deze faalkans moet vergeleken worden met de toelaatbare faalkans, die afgeleid wordt uit de norm van de dijkkring waarvan het dijkvak uitmaakt. In dit voorbeeld is dit de toelaatbare faalkans $2,5 \cdot 10^{-6}$. In de foutenboom in Bijlage B is aangegeven hoe aan deze toelaatbare faalkans gekomen is (zie ook toelichting in paragraaf 6.3).

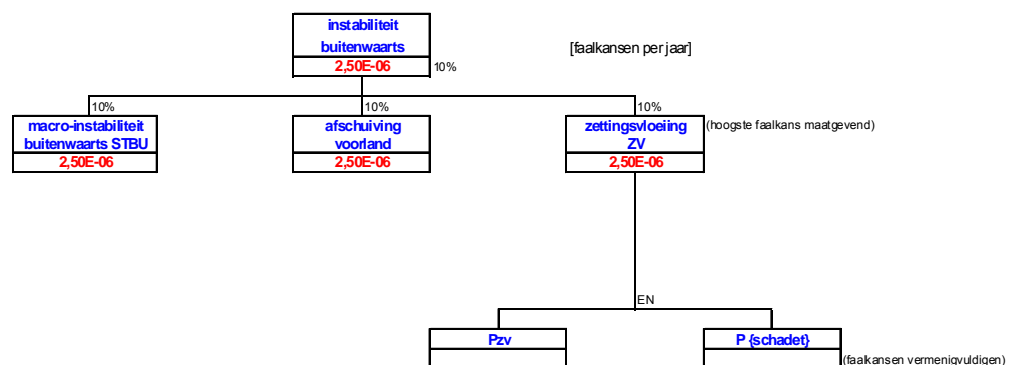
De kans op schade aan de waterkering is kleiner dan de toelaatbare faalkans. Volgens Figuur 6.1 is het oordeel van de gedetailleerde toets daarmee "goed".

Bijlage B Bepaling toelaatbare faalkans: foutenboom

foutenboom A dijkkring



deelfoutenboom B dijkkring
stabiliteit buitenwaarts



Bijlage C Samenvatting benodigde parameters

C.1 Eenvoudige toets

Stap	Parameters	Bepaling
9 m vuistregel	Helling en hoogte van onder water talud	Bathymetrie
	Talud boven water t/m kruin dijk	FliMap
Schadelijkheids criterium	Helling en hoogte van onder water talud	FliMap
	Aanwezigheid en lengte bestorting	Waarnemingen, archief
	Aanwezigheid en dikte van losgepakte lagen (als niet ingevuld wordt alles als verwekingsgevoelig beschouwd)	Sonderingen
Kunstmatig onder water aangebrachte en niet verdichte oever?		Historische gegevens en sonderingen
Bestortings criterium	Helling onder water talud	Bathymetrie
Optredings criterium	Helling en hoogte van onder water talud	Bathymetrie
Aanwezigheid verwekingsgevoelige lagen	Aanwezigheid en dikte van losgepakte lagen (als niet ingevuld wordt alles als verwekingsgevoelig beschouwd)	Sonderingen

C.2 Gedetailleerde toets

6a Bepaal representatieve dwarsprofiel en grondopbouw	Helling en hoogte van onder water talud	Bathymetrie
	Talud boven water t/m kruin dijk	FliMap
	Aanwezigheid en dikte van losgepakte lagen	Sonderingen
6b Bepaal relatieve dichtheid van zandlagen		6a
6c Bepaal optredingskans		6a
6d&e Bepaal overschrijdingskans op inscharingslengte		6a
6f bepaal kans op schade aan waterkering		6a t/m e
Bepaling toelaatbare faalkans		n.t.b.

In bovenstaande tabel wordt een aantal malen FliMap genoemd, maar dit kan ook een ander vergelijkbaar laseraltimetriesysteem zijn.

C.3 Indicatie van omvang grondonderzoek

In Tabel 4.2 is een indicatie gegeven van de mogelijke omvang van het grondonderzoek en andere metingen als functie van het niveau van diepgang of fase van toetsing op zettingsvloeiing. Verder hangt de mate van detaillering van het grondonderzoek samen met de grondgesteldheid (aanwezigheid stoorlagen, eventuele losse pakking) en de gewenste/benodigde analysemethoden. De intensiteit van grondonderzoek wordt groter naarmate het ontwerp verfijnder wordt of de bodemopbouw meer risico's met zich meebrengt.

Fase toetsing	Benodigd grondonderzoek	
Eenvoudig *)	<ul style="list-style-type: none"> - archief- en kaartmateriaal - sonderingen tot $0,5 \cdot H_R$ **) onder bodem: minimaal 4 per km talud 	
Gedetailleerd	<ul style="list-style-type: none"> - als bij 'Eenvoudig' - eventueel extra sonderingen, afhankelijk van ruimtelijke variatie van losgepakt zand - eventueel boringen ter bepaling van soort zand, stoorlaagjes, etc. 	
Geavanceerd	Faalmechanisme	
	Verwekingsvloeiing	Bresvloeiing
	<ul style="list-style-type: none"> - elektrische dichtheidsmetingen (met ijking) - boringen voor monsters van losgepakt zand - serie triaxiaalproeven plus maatwerk afhankelijk van de situatie 	<ul style="list-style-type: none"> - archief- en kaartmateriaal - boringen tot bodem: één per 0,3 à 1,0 km talud (minimaal 3) - classificatieproeven zand (met name korrelverdeling) VERFIJNING: - extra boringen, afhankelijk van ruimtelijke variatie korrelgrootte zand - extra boringen, afhankelijk van ruimtelijke variatie korrelgrootte zand - classificatie op verkregen monsters - sonderingen tot bodem om gelaagdheid beter in kaart te brengen als er stoorlagen zijn
	<p>*) Alleen indien in de eenvoudige toetsing aan het optredingscriterium wordt getoetst. Zie hoofdstuk 6.</p> <p>**) Definitie H_R gegeven in paragraaf 5.1.2 met Figuur 5.1</p>	

Tabel 4.2 Globale indruk van benodigd grondonderzoek bij verschillende fasen van toetsing