

Toetsproces zettingsvloeiing



Toetsproces zettingsvloeiing

dr. G.A. van den Ham

1220078-008

Titel
Toetsproces zettingsvloeiing

Opdrachtgever
RWS-WVL

Project
1220078-008

Kenmerk
1220078-008-GEO-0001-
jvm

Pagina's
17


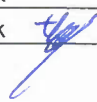

Trefwoorden
Toetsproces, zettingsvloeiing, voorland, WT12017

Samenvatting

Dit rapport bevat het toetsschema voor het faalmechanisme zettingsvloeiing. Tezamen met de faalmechanismebeschrijving en schematiseringshandleiding vormt dit één van de bouwstenen voor het wettelijk toetsinstrumentarium voor de 4^{de} toetsronde. Welke gegevens nodig zijn per toetsstap en hoe deze geschematiseerd moeten worden, wordt beschreven in de schematiseringshandleiding [Van den Ham 2015b]. De toetsing zelf is niet cyclisch, d.w.z. er kan niet teruggegaan worden naar een vorige toetsstap. Een toetsstap zelf kan wel meerdere keren worden doorlopen, omdat de inwinning van gegevens, en de schematisering daarvan, meestal van grof naar fijn zal verlopen. De mogelijkheden hiertoe worden in de schematiseringshandleiding beschreven.

Definities van parameters die bepaald moeten worden voor het doorlopen van de verschillende toetsstappen, alsmede defaultwaarden, indien relevant, worden eveneens in de schematiseringshandleiding gegeven.

Voor een onderbouwing van de globale en gedetailleerde toets wordt verwezen naar [Van den Ham 2015a].

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	maart 2015	dr. G.A. van den Ham		ir. T.P. Stoutjesdijk		dr.ir. M.S. Sule	
2	mei 2015	dr. G.A. van den Ham		ir. T.P. Stoutjesdijk		dr.ir. M.S. Sule	
3	aug. 2015	dr. G.A. van den Ham		ir. T.P. Stoutjesdijk		dr.ir. M.S. Sule	

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Kader	1
2 Doel	3
2.1 Afbakening	3
3 Toetsstappen	5
3.1 Toetsschema	5
3.2 Eenvoudige toets	6
3.3 Gedetailleerde toets	8
3.3.1 Stap 1:	9
3.3.2 Stap 2:	10
3.3.3 Stap 3:	10
3.3.4 Stap 4:	13
3.3.5 Stap 5:	13
3.3.6 Stap 6:	14
3.4 Toets op maat	14
3.5 Toetsing vs zorgplicht	15
4 Referenties	17

1 Inleiding

1.1 Kader

In het programma Wettelijk Toets Instrumentarium 2017 (WTI2017) wordt het wettelijk toetsinstrumentarium voor de 4de toetsronde ontwikkeld. De 4de toetsronde start in 2017. WTI2017 bouwt voort op het WTI2011. Met het nieuwe toetsinstrumentarium kan worden getoetst op basis van een overstromingskansnorm. Daarnaast wordt nieuwe kennis met betrekking tot faalmechanismen en hydraulische belastingen geïmplementeerd.

De veiligheid tegen overstromen wordt bepaald door de sterkte van de waterkering in relatie tot de belasting op de kering. Het is daarom belangrijk dat in alle processen die gericht zijn op het behouden van de veiligheid van de waterkering, de sterkte en belasting op uniforme wijze bepaald worden. Het mag niet voorkomen dat op basis van het toetsinstrumentarium een waterkering niet aan de norm voldoet en dat volgens het ontwerpinstrumentarium geen maatregelen nodig zijn. Daarom is het streven dat voor alle processen hetzelfde basisinstrumentarium voor sterkte en belasting gebruikt wordt.

De kennisimplementatie vindt plaats via een basisinstrumentarium dat de kennisbasis bevat die nodig is voor de borging van de waterveiligheid. Alle processen, van beleidsstudies rondom waterveiligheid (Deltaprogramma) en het toetsen van waterkeringen (WTI) tot het ontwerpen

van maatregelen voor hoogwaterbescherming (HWBP) zijn gebaseerd op eenzelfde kennisbasis. Dezelfde kennisbasis wordt ook gebruikt voor de berichtgeving, de crisisbeheersing/rampenbestrijding en voor dagelijks beheer en onderhoud van waterkeringen. De kennis wordt gebruikt voor beleid en beheer van zowel regionale als primaire keringen.

Dat basisinstrumentarium bestaat uit verschillende bouwstenen. In het WTI2017 zijn die bouwstenen:

- Faalmechanismebeschrijvingen: rapporten.
- Watersysteembeschrijvingen: achtergrondrapporten.
- Faalmechanismemodellen: softwarebouwstenen.
- Toetsproces faalmechanisme: rapporten.
- Handvatten voor geavanceerde analyses: rapporten.
- Schematiseringshandleiding: rapporten.
- Basis Stochastische Ondergrondschematisering van Primaire Waterkeringen (WTI-SOS), incl. gebruikshandleiding.
- Probabilistische rekentechnieken HydraRing: softwarebouwstenen.
- Probabilistische model watersystemen: softwarebouwsteen.
- Schematiseringen watersystemen: softwarebouwstenen.
- Statistiek en Onzekerheden watersystemen.

Voorliggend document beschrijft het toetsproces voor zettingsvloeiing.

Voor het opstellen zijn de uitgangspunten uit [De Bruijn 2014] gehanteerd.

Voor een onderbouwing van de globale en gedetailleerde toets wordt verwezen naar [Van den Ham 2015a].

2 Doel

Doel van dit rapport is het geven van een toetschema voor het faalmechanisme zettingsvloeiing.

2.1 Afbakening

Voor de toetsing zijn gegevens nodig. Welke gegevens nodig zijn per toetsstap en hoe deze geschematiseerd moeten worden wordt beschreven in de schematiseringshandleiding zettingsvloeiing [Van den Ham 2015b]. De toetsing zelf is niet cyclisch, d.w.z. er kan niet teruggegaan worden naar een vorige toetsstap. Een toetsstap zelf kan wel meerdere keren worden doorlopen, omdat de inwinning van gegevens, en de schematisering daarvan, meestal van grof naar fijn zal verlopen. De mogelijkheden hiertoe worden in de schematiseringshandleiding beschreven.

Definities van parameters die bepaald moeten worden voor het doorlopen van de verschillende toetsstappen, alsmede defaultwaarden, indien relevant, worden gegeven in de schematiseringshandleiding.

3 Toetsstappen

3.1 Toetsschema

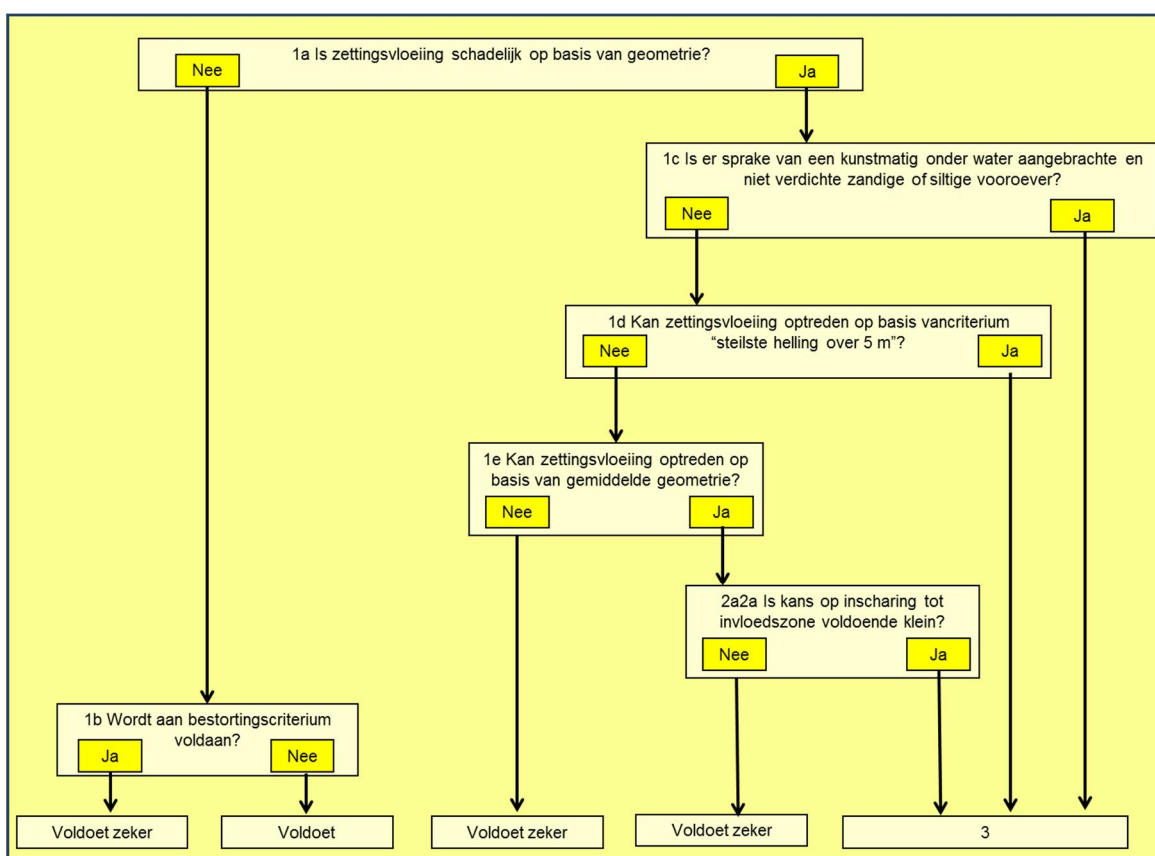
Layout en nummering van stappen binnen de eenvoudige en gedetailleerde toets zijn conform [De Bruijn 2014]. De stappen in de eenvoudige toets worden genummerd als 1a tot 1z. Voor de gedetailleerde toets wordt de volgende nummering aangehouden:

	Vak (2a)	Traject (2b) volgt na 2016
Semi- probabilistisch	2a1	n.v.t.
Volledig probabilistisch	2a2	2b

Tabel 3.1 Definitie en onderscheid gedetailleerde toets

Bijvoorbeeld: de toetsstappen in een volledig probabilistische gedetailleerde toets op vakniveau worden genummerd als 2a2a tot 2a2z.

Het toetsschema voor zettingsvloeiing is weergegeven in Figuur 3.1.



Figuur 3.1 Toetsschema zettingsvloeiing¹

¹ Mogelijk moet een toets op maat uitgevoerd worden voor locaties die in aardbevingsgevoelige gebieden liggen. Dit zouden locaties kunnen zijn waar de ontwerpwaarde van de horizontale grondversnelling gedefinieerd volgens de Eurocode 8 groter is dan 0,22 m/s². Dit zijn in ieder geval locaties die niet binnen seismische zones A en B volgens de seismische zoneringskaart van De Crook (1996) vallen. Daarnaast zijn er in Groningen gebieden waar waarschijnlijk niet aan dit criterium wordt voldaan. Dit is nog onderwerp van onderzoek.

3.2 Eenvoudige toets

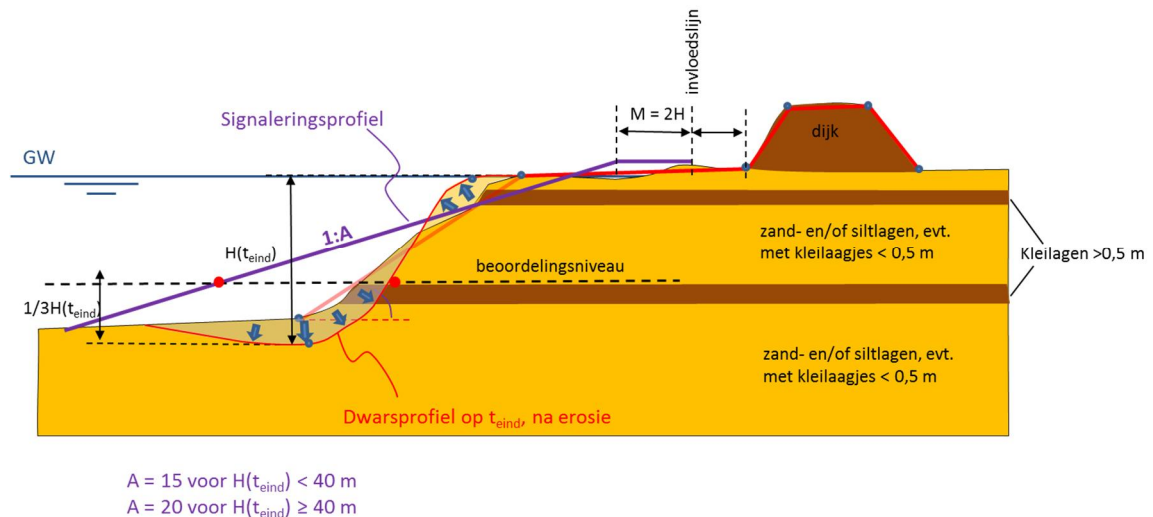
De eenvoudige toets is een semi-probabilistische toets op vakniveau (2a1). Het is een puur geometrische toets. Grondgegevens en beweeglijkheid van de vooroever kunnen dus niet ingevoerd worden (maar worden impliciet conservatief aangenomen, d.w.z. verwekings- en bresvloeiingsgevoelig zand² en grote beweeglijkheid³).

- 1a Is zettingsvloeiing schadelijk op basis van geometrie?
In deze stap wordt getoetst of, indien een zettingsvloeiing plaatsvindt, deze schadelijk kan zijn voor het waterkerend vermogen van de waterkering. Daartoe moet als eerste het zogenaamde signaleringsprofiel geconstrueerd worden. Het signaleringsprofiel bestaat uit een horizontaal stuk vanaf de *invloedslijn* van de dijk⁴, de zogenaamde marge (M), en een lijn onder een hellingshoek. Er kunnen twee situaties zijn: met en zonder vooroeverbrestorting:
 - Vooroever zonder vooroeverbrestorting: $M = 2 \cdot H$. Zie Figuur 3.2. De helling van hellende deel is 1:15 voor $H < 40$ m en 1:20 voor $H \geq 40$ m. Het beoordelingsniveau ligt op $1/3 \cdot H$ boven de geulbodem. Indien het snijpunt van het beoordelingsniveau met het *meest ongunstige profiel in de beoordelingsperiode* buitenwaarts (zeewaarts) ligt ten opzichte van het snijpunt van het beoordelingsniveau met het signaleringsprofiel, wordt niet voldaan aan het schadelijkheids criterium (d.w.z. bij optreden van een zettingsvloeiing is deze niet schadelijk) en wordt doorgegaan naar stap 1b. Indien er geen of onvoldoende informatie beschikbaar is om het meest ongunstige profiel in de beoordelingsperiode te bepalen, moet de marge vergroot worden met een afstand in meters gelijk aan het aantal jaren tot de volgende beoordeling.
 - Vooroever met vooroeverbrestorting: Indien de buitenwaartse beëindiging van de (teen)brestorting van de dijk buitenwaarts ligt ten opzichte van de buitenwaartse beëindiging van de marge, begint het hellende deel van het signaleringsprofiel aan het uiteinde van de bestorting. Zo niet, dan begint het hellende deel van het signaleringsprofiel aan de buitenwaartse beëindiging van de marge (zoals bij een situatie zonder bestorting). Taludhellingen van het signaleringsprofiel zijn hetzelfde als voor de situatie zonder bestorting. Het beoordelingsniveau wordt op dezelfde manier bepaald als in de situatie zonder bestorting.
- 1b Wordt aan bestortingscriterium voldaan? Een fictieve lijn met een helling van 1:2½, beginnend bij de buitenwaartse beëindiging van de (teen)brestorting mag geen snijpunt hebben met het *meest ongunstige profiel in de beoordelingsperiode*.
- 1c Indien sprake is van een kunstmatig opgebouwde en niet-verdichte zandige of siltige vooroever dient een toets op maat te worden uitgevoerd.

² Indien de $d_{50, \text{gemiddeld}}$ (d.w.z. de gemiddelde waarde van d_{50} over alle zand- en siltlagen, zie schematiseringshandleiding) kleiner is dan $200 \mu\text{m}$ en/of de $d_{15, \text{gemiddeld}}$ kleiner is dan $100 \mu\text{m}$ is onzeker of de eenvoudige toets in alle gevallen voldoende betrouwbaar is. In die gevallen zou een toets op maat moeten worden uitgevoerd! Verwacht wordt dat die situaties echter nauwelijks voorkomen. Daarom is dit niet als extra toetsstap opgenomen. Daarmee kan de eenvoudige toets een puur geometrische toets blijven.

³ Indien de beweeglijkheid van de oever, zoals gedefinieerd in de schematiseringshandleiding, groter is dan 1 m/jaar, is onzeker of de eenvoudige toets in alle gevallen voldoende betrouwbaar is. In die gevallen zou een gedetailleerde toets moeten worden uitgevoerd! Verwacht wordt dat die situaties echter nauwelijks voorkomen. Daarom is dit niet als extra toetsstap opgenomen. Daarmee kan de eenvoudige toets een puur geometrische toets blijven.

⁴ De locatie van de invloedslijnen is benodigd voor de bepaling van de beschermingszone van de waterkering, die vastgelegd dient te zijn in de legger. De locatie van de invloedslijnen wordt bepaald met stabiliteitsberekeningen aan de waterkering. De afstand tussen teen van de waterkering en invloedslijn kan dan ook verschillen per locatie



Figuur 3.2 Signaleringsprofiel zettingsvloeiing (profiel sterk vertrokken in verticale richting)

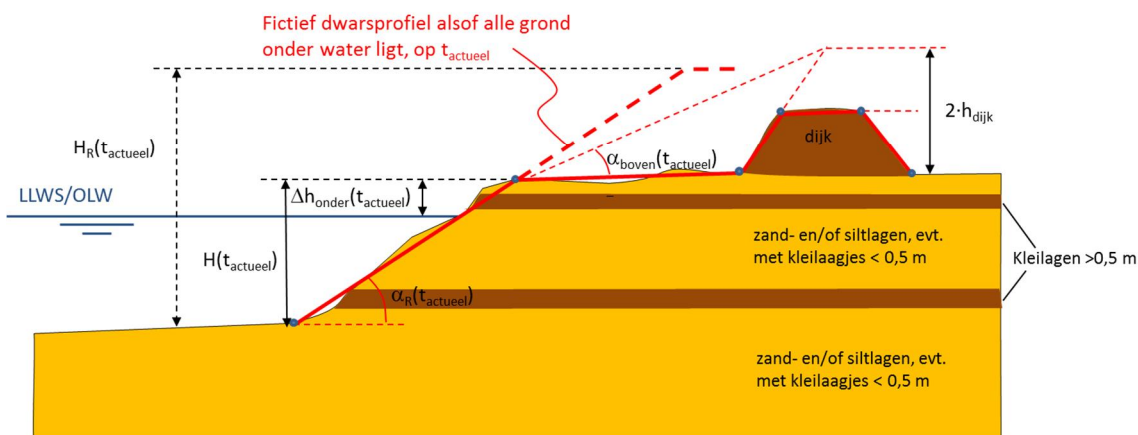
Optredingscriteria:

- 1d: Op basis van helling steilste 5 m
 - De gemiddelde helling is steiler dan of gelijk aan 1:4 over een hoogte van minimaal 5 m. Indien aan het criterium wordt voldaan, moet direct een toets op maat worden uitgevoerd (stap 3).
- 1e: Op basis van gemiddelde geometrie. Een zettingsvloeiing kan optreden als voor het meest ongunstige profiel aan minimaal één van de volgende voorwaarden wordt voldaan: Een zettingsvloeiing kan optreden als voor *het meest ongunstige profiel in de beoordelingsperiode* geldt dat aan minimaal één van de twee volgende voorwaarden wordt voldaan:
 - De gemiddelde helling van het onderwatertalud over de hoogte H_R is steiler dan $7 \cdot (H_R/24)^{1/3}$, waarbij H_R is gedefinieerd in Figuur 3.3. Als $\cot \alpha_R \geq 7 \cdot (H_R/24)^{1/3}$ zal een gedetailleerde toets moeten worden uitgevoerd, stap 2a2.
 - Een bresvloeiing is mogelijk op basis van het eenvoudige geometrische bresvloeiocriterium: Een bresvloeiing kan niet optreden als het onbestorte deel van het onderwatertalud overall flauwer is dan de waarden gegeven in onderstaande tabel. De onbestorte hoogte van het onderwatertalud mag niet groter dan 40 m zijn. Dit geldt alleen als gemiddeld over alle zand- en siltlagen in het onbestorte deel van het onderwatertalud geldt dat $d_{50, \text{gemiddeld}} > 0,200$ mm en $d_{15, \text{gemiddeld}} > 0,100$ mm. Indien een bresvloeiing wel kan optreden op basis van het eenvoudige geometrische bresvloeiocriterium moet een gedetailleerde toets worden gedaan, stap 2a2.

Diepte-interval van onbestort deel van het onderwatertalud [m]	Helling per interval
0 - 5	1:2
5 - 10	1:2.5
10 - 15	1:3
15 - 20	1:3.5
20 - 25	1:4
25 - 30	1:4.7
30 - 35	1:5.4
35 - 40	1:6

Tabel 3.2 Maximaal toelaatbare lokale hellingen ($d_{50, \text{gemiddeld}} > 0,200 \text{ mm}$ en $d_{15, \text{gemiddeld}} > 0,100 \text{ mm}$)

$$H_R(t_{\text{actueel}}) = H(t_{\text{actueel}}) + \Delta h_{\text{onder}}(t_{\text{actueel}}) + 2 \cdot h_{\text{dijk}} \cdot \frac{\cot \alpha_R(t_{\text{actueel}})}{\cot \alpha_{\text{boven}}(t_{\text{actueel}})}$$



Figuur 3.3 Geschematiseerde geometrie (t_{actueel}), met bepaling rekentaludhoogte H_R en rekentaludhelling α_R , ten behoeve van globale en gedetailleerde beoordelingsmethode voor zettingsvloeiing

3.3 Gedetailleerde toets

De gedetailleerde toets is een volledig probabilistische toets op vakniveau (2a2a). De indeling in vakken wordt beschreven in de schematiseringshandleiding [Van den Ham 2015b]. Per vak moeten achtereenvolgens de volgende stappen worden uitgevoerd:

1. Bepaal optredingskans zettingsvloeiing per ondergrondscenario $P(ZV|S_i)$
2. Bepaal optredingskans zettingsvloeiing voor alle grondopbouwscenario's

$$P(ZV) = \sum_i P(ZV|S_i)P(S_i)$$
3. Bepaal overschrijdingskans toelaatbare inscharingslengte gegeven een vloeiing: $P(L > L_{\text{toelaatbaar}}|ZV)$
4. Bepaal overschrijdingskans toelaatbare inscharingslengte voor het dijkvak: $P(L > L_{\text{toelaatbaar}})_{\text{vak}}$
5. Bepaal toelaatbare faalkans per dijkvak $P_{\text{loc, toel}}$
6. Controleer of $P(L > L_{\text{toelaatbaar}})_{\text{vak}}$ kleiner is dan $P_{\text{loc, toel}}$

In de volgende paragrafen worden deze stappen beschreven.

3.3.1 Stap 1:

Bepaal optredingskans zettingsvloeiing per ondergrondscenario $P(ZV|S_i)$

Eerst wordt per ondergrondscenario (zie schematiseringshandleiding) de frequentie berekend met:

$$F(ZV|S_i) = \left(\frac{5}{\cot \alpha_R} \right)^5 \left\{ 0.5 \cdot \left(\frac{H_R}{24} \right)^{2.5} \cdot \left(\frac{1}{10} \right)^{-10 \cdot (0.05 + \psi_{5m})} + 0.5 \cdot \left(\frac{H}{24} \right)^5 \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^{-4}}{d_{50, \text{gemiddeld}}} \right)^5 \right. \\ \left. \cdot F_{\text{cohesivelayers}} \right\} \cdot \frac{V_{\text{lokaal}}}{V_{\text{Zeeland}}} \cdot 0.025 \text{ km}^{-1} \cdot \text{year}^{-1} \quad (2.1)$$

Vervolgens kan de frequentie omgerekend worden in een kans via het Poisson proces:

$$P(ZV|S_i) = 1 - e^{-F(ZV|S_i)} \quad (2.2)$$

Hiermee wordt voorkomen dat kansen groter dan 100% berekend worden.

Hoe de parameters in bovenstaande formule moeten worden bepaald staat in de schematiseringshandleiding beschreven. Hieronder volgt alleen een korte beschrijving, waarbij de parameters zijn onderverdeeld in parameters die betrekking hebben op de geometrie, de grondeigenschappen en –toestand en beweeglijkheid van de vooroever.

Geometrie:

H_R [m] is de hoogte van *het meest ongunstige onder water rekentalud in de beoordelingsperiode* (zie Figuur 3.3),

H_R wordt als volgt bepaald:

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

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 taludhoogte van de dijk 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. Voor een schaarndijk geldt $B = 0$.

- $\cot \alpha_R$ is gelijk aan $\cot \alpha_{\text{onder}}$.
- H [m] is de hoogte van het onder water talud ($H = h_{\text{onder}} + h_{\text{boven}}$)

Materiaalparameters:

- ψ_{5m} [-] is de gemiddelde waarde van de state parameter over de 5 m tussen geulrand en $0,5 H_R$ onder de geulbodem waarin de state parameter het hoogst is (dus meest losgepakt).
- $d_{50, \text{gemiddeld}}$ [m] de gemiddelde mediane korreldiameter is over alle zand- en siltlagen tussen geulrand en geulbodem.
- $F_{\text{cohesivelayers}}$ [-] is een parameter die de invloed van stoorlagen uitdrukt:

(0,5 m < laagdikte < 5 m)	$F_{cohesivelayers}$
Vrijwel geen klei- en/of veenlaagjes	1/3
Beperkt aantal klei- en/of veenlaagjes	1
Groot aantal klei- en/of veenlaagjes	3

Beweeglijkheid:

- V_{lokaal} is een maat voor de beweeglijkheid van de vooroever. Deze kan bepaald worden door de grootste waarde te nemen van:
 - De snelheid van de terugschrijding of vooruitgang van de waterlijn.
 - De terugschrijding of vooruitgang van het gemiddelde talud.
 - De snelheid van de verdieping aan de teen maal $cot\alpha_R$.
 De minimale waarde die ingevuld moet worden voor V_{lokaal} is 0,01 m/jaar.
- $V_{Zeeland}$ is de beweeglijkheid van een gemiddelde Zeeuwse vooroever, waarop de optredingskansformule in de gedetailleerde toetsmethode gebaseerd is. Voor $V_{Zeeland}$ dient 1 m/jaar gekozen te worden.

Voor meer informatie over bepaling van deze parameters wordt verwezen naar de schematiseringshandleiding.

3.3.2 Stap 2:

Bepaling optredingskans zettingsvloeiing voor alle grondopbouwscenario's $P(ZV)$

Combineer de optredingskansen voor de verschillende ondergrondscenario's, zoals bepaald in de vorige paragraaf, tot een totale optredingskans (zie [Schweckendiek 2014]):

$$P(ZV) = \sum_i P(ZV|S_i)P(S_i) \quad (2.3)$$

waarin $P(S_i)$ de kans van aantreffen op scenario S_i is. Hierbij geldt dat $\sum_i P(S_i) = 1$.

3.3.3 Stap 3:

Bepaal overschrijdingskans toelaatbare inscharingslengte gegeven een vloeiing $P(L > L_{toelaatbaar}|ZV)$

Als een zettingsvloeiing plaatsvindt, zal een deel van het vervloeiide materiaal naar de zijkanen afvloeien. Door dit tweedimensionale effect zal de oppervlakte van de verdwenen grond bovenin het dwarsprofiel (Area 1 in Figuur 3.4) 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. Indien deze verhouding wordt meegenomen, luidt de formule:

$$L = ax - Db \quad (2.4)$$

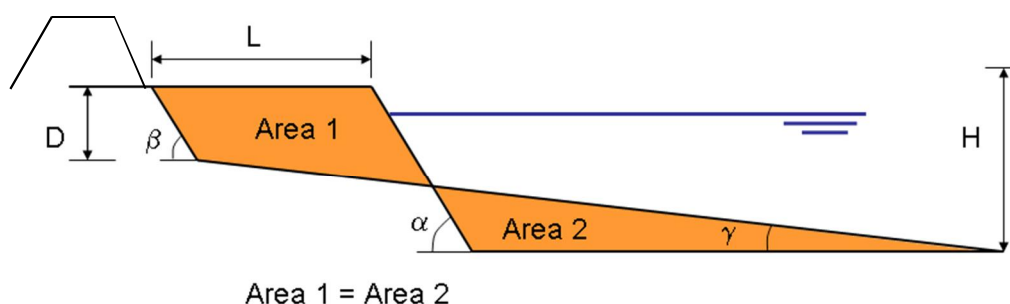
met:

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

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

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

c = verhouding tussen Area1 en Area2 ($A_1=cA_2$). $c=1,4$ kan aangehouden worden⁵
 H = de totale hoogte van het onderwatertalud, moet de werkelijke hoogte tot aan het voorland worden genomen (en dus niet fictieve rekenhoogte H_R)
 D = steile gedeelte schadeprofiel



Figuur 3.4 Inscharingslengte (L) na zettingsvloeiing

De variabelen in bovenstaande formule zijn onzeker. Op basis van statistische analyse van de geometrische kenmerken van circa 140 vloeiingen in de Zuidwestelijke Delta is voor elke variabele de verwachtingswaarde, standaardafwijking en type verdeling bepaald. De resultaten zijn weergegeven in onderstaande tabel.

De standaardafwijking van parameters c en $\cotan(\alpha)$ zijn niet gebaseerd op waarnemingen en dus schattingen.

X	$E(X)$	$\sigma(X)$	Type verdeling	Onderliggende normale verdeling	
				$\mu(X)$	$\sigma(X)$
$\cotan(\gamma)$	16,8	7,1	Lognormaal	2,82	0,38
$\cotan(\beta)$	2,9	1,7	Lognormaal	1,05	0,47
D/H	0,43	0,06	Normaal		
c	1,4	0,1	Normaal		
$\cotan(\alpha)$		$0,05 \cdot \mu(X)$	Normaal		

Tabel 3.3 Overzicht geometrische variabelen. Omrekening verwachtingswaarde en standaardafwijking vanuit het gemiddelde en standaardafwijking van de onderliggende normale verdeling: $E(X) = \exp(\mu(X))$ en $\sigma(X) = \exp(\mu(X) + \sigma(X)) - \exp(\mu(X))$

Voor bepaling van de kans op overschrijding van de toelaatbare inscharingslengte moet de volgende betrouwbareheidsfunctie opgelost worden:

$$Z = L_{\text{toelaatbaar}} - L \quad (2.5)$$

Deze functie kan exact opgelost worden door de kansdichtheidsfuncties alle variabelen in bovenstaande tabel mee te nemen, niveau III, of door de functie te lineariseren in het ontwerppunt, waarbij de kansverdeling van elke variabele wordt benaderd door een standaard normale verdeling, niveau II. Dit laatste vindt plaats in een FORM analyse.

⁵ Formule (2.4) geldt alleen als $C \neq 1$. Als om bepaalde redenen $c = 1$ wordt genomen, geldt $x = \frac{1}{2}H + \frac{1}{2}\frac{D^2}{H} \cdot \frac{b}{a}$

Navolgend worden twee methoden beschreven om de overschrijdingskans van de inscharingslengte te berekenen:

- Met de software D-FlowSlide, waar “onder de motorkap” een FORM analyse is ingebouwd en waarin alle stochastische variabelen worden meegenomen.
- Een handmatige FORM berekening, waarin enige vereenvoudigingen worden aangenomen.

Voor meer details wordt verwezen naar de [CUR190].

3.3.3.1 Methode D-FlowSlide

In de software D-FlowSlide wordt de betrouwbaarheidsfunctie met een FORM analyse, aangeroepen uit de probabilistische bibliotheek, opgelost. Daarnaast wordt de volumebalans niet met vergelijking (2.4) opgelost, maar numeriek. Daarmee kan rekening worden gehouden met beperkte berging, bijvoorbeeld in het geval van een smalle geul.

3.3.3.2 Benaderende methode (analytisch)

Uit probabilistische berekeningen blijkt dat $\cotan\alpha$, $\cotan\beta$, D/H en c een kleine invloed hebben op de overschrijdingskans (de invloedsfactor is klein). Daarom kan de FORM analyse vereenvoudigd worden door deze parameters deterministisch te nemen, dus de verwachtingswaarden, $E(X)$, aangegeven in Tabel 3.3.

Met deze kentallen is het mogelijk de overschrijdingskans van L te bepalen en vervolgens de kans dat L groter is dan $L_{toelaatbaar}$. Als betrouwbaarheidsfunctie wordt dus vergelijking (2.5) genomen. Hierin is L de optredende inscharingslengte die berekend wordt met vergelijking (2.4) op basis van de verwachtingswaarde en de standaardafwijking van $\cotan\gamma$ en $L_{toelaatbaar}$, dat is de aanwezige lengte van het voorland. In dit geval is $\cotan\gamma$ de enige stochast, dus kan de betrouwbaarheidsindex β worden bepaald door vergelijking (2.6) op te lossen voor $\cotan\gamma$, lognormaal verdeeld. Oplossen van deze vergelijking kan door middel van iteratie.

$$Z = L_{toelaatbaar} - L(\cotan \gamma(\beta)) = 0$$

$$\cotan \gamma = \exp(\mu_{\cotan \gamma} + \beta \sigma_{\cotan \gamma}) \quad (2.6)$$

Een zoekalgoritme voor de iteratie wordt gegeven door het volgende stroomschema.

- 1 Start met $\beta_i = 1$ en bepaal L voor $\cotan \gamma = \exp(\mu_{\cotan \gamma} + \beta_i \cdot \sigma_{\cotan \gamma})$
- 2 Bepaal de waarde van de relatieve afstand⁶ $L_{toelaatbaar} / L$
- 3 Gebruik $\beta_{i+1} = \beta_i \cdot L_{toelaatbaar} / L$ als nieuwe waarde voor β en bepaal L voor $\cotan \gamma = \exp(\mu_{\cotan \gamma} + \beta_{i+1} \cdot \sigma_{\cotan \gamma})$
- 4 Herhaal de stappen 1 tot 3 tot de waarde van β is gevonden waarvoor $Z = L_{toelaatbaar} - L(\cotan \gamma(\beta)) = 0$

Om te compenseren voor de niet beschouwde stochastische variabelen $\cotan\alpha$, $\cotan\beta$, D/H en c moet de berekende betrouwbaarheidsindex gecorrigeerd worden. Op basis van een kalibratie, waarbij β is berekend in een FORM-analyse met alle parameters als stochast (x-as) en een FORM-analyse waarbij alleen $\cot\gamma$ als stochast is meegenomen (y-as), blijkt dat de in hierboven gegeven stappen berekende β gedeeld moet worden door een factor 1,10.

⁶ Een robuuster/stabieler algoritme is door $\ln(L_{toelaatbaar}) / \ln(L)$ als relatieve afstand te gebruiken. Dit kost meer iteratiestappen, maar voorkomt wel dat de iteratie “uit de bocht schiet” bij hoge beta-waardes

Uitgaande van een Gauss-verdeling, wordt de overschrijdingskans van de toelaatbare inscharingslengte vervolgens berekend met:

$$P(L > L_{\text{toelaatbaar}} | ZV) = P(Z < 0) = \Phi(-\beta) \quad (2.7)$$

Rekenvoorbeeld:

De toelaatbare inscharingslengte bedraagt 60 meter, de helling van het voorland $\cotan \alpha = 6$ en de diepte van de geul $H = 15\text{m}$. Voor de overige parameters wordt de verwachtingswaarde genomen. De iteratie om β te bepalen ziet er als volgt uit.

- 1 $\beta_i = 1$; $\cotan \gamma = \exp(\mu_{\cotan \gamma} + \beta_i \cdot \sigma_{\cotan \gamma}) = 24,5$; $L = 36,9$
- 2 $L_{\text{toelaatbaar}} / L = 60 / 36,9 = 1,63$
- 3 $\beta_{i+1} = \beta_i \cdot L_{\text{toelaatbaar}} / L = 1,0 \cdot 1,63 = 1,63$
- 4 De iteratiestappen 1 tot 3 worden herhaald. De berekende waarden staan in onderstaande tabel.

Iteratie	β_i	$\cotan(\gamma)$	L	$L_{\text{toelaatbaar}} / L$	β_{i+1}
1	1,0	24,5	36,9	1,63	1,63
2	1,63	31,1	55,8	1,08	1,75
3	1,75	32,6	60,0	1,0	1,75

Itereren van β naar $Z=0$ levert dus $\beta = 1,75$, zodat $\cotan \gamma = \exp(16,8 + 1,75 \cdot 0,38) = 32,6$ en $L(\cotan \gamma = 32,6) = 60\text{m}$. De gecorrigeerde betrouwbaarheidsindex bedraagt nu $\beta = 1,75 / 1,10 = 1,59$, wat neerkomt op een kans $P(L > L_{\text{toelaatbaar}}) = \Phi(-\beta) = 0,056$.

3.3.4 Stap 4:

Bepaal overschrijdingskans toelaatbare inscharingslengte per dijkvak $P(L > L_{\text{toelaatbaar}})_{\text{vak}}$

$$P(L > L_{\text{toelaatbaar}})_{\text{vak}} = P(ZV) \cdot P(L > L_{\text{toelaatbaar}} | ZV) \cdot L_{\text{vak}} \quad (2.8)$$

waarin L_{vak} de lengte van het dijkvak is.

3.3.5 Stap 5:

Bepaal toelaatbare faalkans per dijkvak $P(L > L_{\text{toelaatbaar}})_{\text{vak, toelaatbaar}}$

De berekende kans uit vergelijking (2.8) dient nu te worden getoetst aan een maximaal toelaatbare faalkans.

In zowel de globale als gedetailleerde toets wordt getoetst of de bijdrage van zettingsvloeiing aan de kans op een *direct* faalmechanisme verwaarloosbaar klein is. Gecontroleerd wordt of de kans dat de inscharing voorbij de invloedslijn komt voldoende klein is. Als dit zo is, zal de bijdrage van zettingsvloeiing aan de overstromingskans eveneens verwaarloosbaar zijn. Omdat de toelaatbare overstromingskans voor het traject volgens de norm (P_{traject}) (als het goed is) al in de locatie van de invloedslijn verwerkt zit, is een koppeling van de toelaatbare overschrijdingskans door een inscharing door een zettingsvloeiing aan de norm niet nodig. Wel moet de lengte van het voor zettingsvloeiing beschouwde dijkvak meegenomen worden.

Dit leidt tot de volgende toelaatbare kans:

$$P(L > L_{\text{toelaatbaar}})_{\text{vak, toelaatbaar}} = 0,01 \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{jaar}^{-1} \quad (2.9)$$

3.3.6 Stap 6:

Vergelijk berekende overschrijdingskans toelaatbare inscharingslengte per dijkvak $P(L > L_{\text{toelaatbaar}})_{\text{vak}}$ met toelaatbare faalkans $P(L > L_{\text{toelaatbaar}})_{\text{vak, toelaatbaar}}$

Vergelijk $P(L > L_{\text{toelaatbaar}})_{\text{vak}}$ met $P(L > L_{\text{toelaatbaar}})_{\text{vak, toelaatbaar}}$

Indien $P(L > L_{\text{toelaatbaar}})_{\text{vak}} \leq P(L > L_{\text{toelaatbaar}})_{\text{vak, toelaatbaar}}$ is het oordeel “voldoet zeker”, anders wordt doorgedaan naar toetsniveau 3 (toets op maat).

3.4 Toets op maat

Als mogelijkheden voor een toets op maat worden genoemd:

- Verdere verfijning bepaling kans op inscharingslengte, bijvoorbeeld met geavanceerde rekenmodellen. In D-FlowSlide zijn twee rekenmodellen ingebouwd: SLIQ2D voor bepaling van het optreden van verweking en HMBreach voor bepaling van het optreden van bresvloeiing.
- Probabilistisch per traject, al dan niet met flexibele faalkansverdeling
- Verstoringprofiel meenemen als stochastische variabele in beoordeling directe faalmechanismen: als continu verdeelde variabele of als geometrie-scenario.

Verder is er altijd de mogelijkheid dat binnen een beoordelingsperiode sprake is van voortschrijdend inzicht (kennisontwikkeling) waarmee het toetsoordeel kan worden aangescherpt.

Indien zettingsvloeiing als *direct* faalmechanisme wordt getoetst, moet de toelaatbare faalkans wel gekoppeld worden aan de norm. Dit zou als volgt kunnen gebeuren.

Met formule (2.8) wordt de kans berekend dat er ergens binnen het dijkvak een zettingsvloeiing optreedt waarbij de inscharingslengte de kritische inscharingslengte overschrijdt. Om deze kans te toetsen moet dus een transformatie plaatsvinden van de toelaatbare overstromingskans voor het traject volgens de norm (P_{traject}) naar een toelaatbare faalkans in het dijkvak.

Voor berekening van de toelaatbare faalkans in het dijkvak kunnen de formules uit Appendix G van [LOR2] als uitgangspunt worden genomen (die grotendeel is overgenomen in [OI2014]).

De toelaatbare kans op een instabiliteit op een bepaalde locatie (1/jaar) is:

$$P_{\text{vak, toet}} = \frac{P_{\text{traject}} \cdot \omega}{\left(1 + a \cdot \frac{L_{\text{traject}}}{b}\right) \cdot P_{f|inst}} \quad (2.10)$$

Norm veiligheidsnorm voor traject

ω faalkansruimtefactor voor het faalmechanisme. Voor zettingsvloeiing moet de bijdrage aan de overstromingskans verwaarloosbaar zijn, dus $\omega_{\text{zettingvloeiing}} = 0,01$

L_{traject} Totale lengte van traject

a factor voor het lengte-effect die twee fenomenen verdisconteert:

- Het niet substantieel bijdragen van alle dijkstrekkingen met lengte l aan de faalkans op trajectniveau (omdat de faalkans erg klein is door bijvoorbeeld het afwezig zijn een vloeiingsgevoelige ondergrond).
- Het feit dat dijkstrekkingen een gecorreleerde bijdrage leveren aan de kans op instabiliteit, met name als gerekend wordt met dezelfde sterkteparameters, zoals bepaald uit een proevenverzameling

- Voor zettingsvloeiing is het tweede aspect niet relevant. Voor het eerste aspect kan wellicht de waarde van 0,1 die in de [LOR2] voor macrostabiliteit is geschat worden overgenomen. Dus $a_{\text{zettingstvloeïing}} = 0,1$
- b* representatieve lengte voor de analyse in een doorsnede. Met formule (2.6) wordt de kans berekend er ergens binnen het in de schematisering gekozen dijkvak een zettingstvloeïing optreedt waarbij de inscharingslengte de kritische inscharingslengte overschrijdt. Er vindt dus geen vertaling plaats naar een doorsnede. Dus $b_{\text{zettingstvloeïing}} = \text{lengte van het gekozen dijkvak}$.
- P_{fjinst} Kans op falen gegeven instabiliteit ergens in de strekking. In [LOR2] wordt aangehouden deze factor op 1,0 te zetten als het optreden van de instabiliteit wordt veroorzaakt door hoogwater. Als dat niet zo is, wordt $P_{\text{fjinst}} = 0,1$ aangehouden. Voor zettingstvloeïing kan dus $P_{\text{fjinst, zettingstvloeïing}} = 0,1$ aangehouden worden.

3.5 Toetsing vs zorgplicht

In het kader van een wijziging van de Waterwet, vindt er een wijziging plaats in de manier van toetsen van de veiligheid van primaire waterkeringen. Dit houdt in dat er vanaf 1 januari 2014 onderscheid wordt gemaakt in de 12-jaarlijkse periodieke toetsing en een continuoets in het kader van de zorgplicht. Er wordt nog gediscussieerd over de plek van zettingstvloeïing hierin (landelijke verkenning). Vooralsnog wordt er vanuit gegaan dat zettingstvloeïing in zowel de instandhoudingstoets als 12-jaarlijkse toets beoordeeld zal worden.

In principe kan het toetsproces (en ook de schematiseringshandleiding) worden toegepast in zowel de toetsing als instandhoudingstoets.

4 Referenties

[CUR190]

CUR190 Kansen in de civiele techniek deel 1, Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, 1997

[De Bruijn 2014]

De Bruijn, H., 2014. Definitief voorstel lay-out toetschema's. Deltares memo, kenmerk 1209429-000-GEO-0012-v01, d.d. 5 november 2014

[LOR2]

Leidraad voor het ontwerpen van Rivierdijken deel 2 – benedenrivierengebied, Technische Adviescommissie voor de waterkeringen, 1989

[OI2014]

Achtergrondrapport Ontwerpinstrumentarium 2014, Rijkswaterstaat WVL, versie 1.0, 23 december 2013

[Schweckendiek 2014]

Schweckendiek, T., 2014. Treatment of Schematisation Uncertainties in WTI-2017. Deltares memo, kenmerk 1209431-007-ZWS-0003, d.d. 7 november 2014

[Van den Ham 2015a]

Van den Ham, G.A., 2015. WTI Cluster Indirecte faalmechanismen 2014 – Update detailed assessment on flow slides – final report. Deltares rapport, kenmerk 1209439-002-GEO-0001-v4, d.d. 1 juni 2015

[Van den Ham 2015b]

Van den Ham, G.A., 2015. Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing. Versie A Cluster D. Deltares rapport, kenmerk 1209439-002-GEO-0002-v3-r, d.d. 1 juni 2015

[Van der Krogt 2015]

Van der Krogt, 2015. Safety assessment method for indirect failure mode flow sliding. Master thesis, TUDelft.