

C Rekenregels voor gedetailleerde toets op zettingsvloeiing

C.1 Stap A - Bepaal optredingskans zettingsvloeiing per ondergrondscenario $P(ZV|S_i)$ voor het betreffende vak

Eerst wordt de frequentie van optreden $F(ZV|S_i)$ berekend met:

$$F(ZV|S_i) = \left(\frac{5}{\cot\alpha_R}\right)^5 \left\{ 0.5 \cdot \left(\frac{H_R}{24}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{1}{10}\right)^{-10 \cdot (0.05 + \psi_{5m, kar})} + 0.5 \cdot \left(\frac{H}{24}\right)^5 \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^{-4}}{d_{50, gemiddeld, kar}}\right)^5 \cdot F_{cohesivelayers} \right\} \cdot L_{vak} \cdot \frac{V_{lokaal}}{V_{Zeeland}} \cdot 0.025 \cdot year^{-1} \quad \text{Vgl 29.1}$$

Waarin:

L_{vak} de lengte van het dijkvak [km]

Vervolgens kan de frequentie omgerekend worden in een kans van optreden $P(ZV|S_i)$ met:

$$P(ZV|S_i) = 1 - e^{-F(ZV|S_i)} \quad \text{Vgl 29.2}$$

De parameters zijn hieronder beknopt beschreven, waarbij de parameters zijn onderverdeeld in parameters die betrekking hebben op de geometrie, de grondeigenschappen en –toestand en de beweeglijkheid van de vooroever.

Geometrie:

De schematisatie van het meest ongunstige *rekentalud* in de beoordelingsperiode wordt gekarakteriseerd door een fictieve taludhoogte H_R [m] en een bijbehorende taludhelling α_R [graden] (zie Figuur C.1 en paragraaf 6.2.2 uit (van den Ham, 2015)). De taludhelling α_R volgt uit de schematisatie van het meest ongunstige dwarsprofiel in de beoordelingsperiode; de fictieve taludhoogte H_R wordt als volgt berekend:

$$H_R = H_{geul} + \Delta h_{onder} + 2 \cdot h_{dijk} \cdot \frac{\cot(\alpha_R)}{\cot(\alpha'_{boven})} \quad \text{Vgl 29.3}$$

Met:

$$\alpha'_{boven} = \arctan \left\{ \frac{2h_{dijk}}{B + 2h_{dijk} \cdot \cot(\alpha_{boven})} \right\}$$

Waarin:

H_{geul} geuldiepte [m]

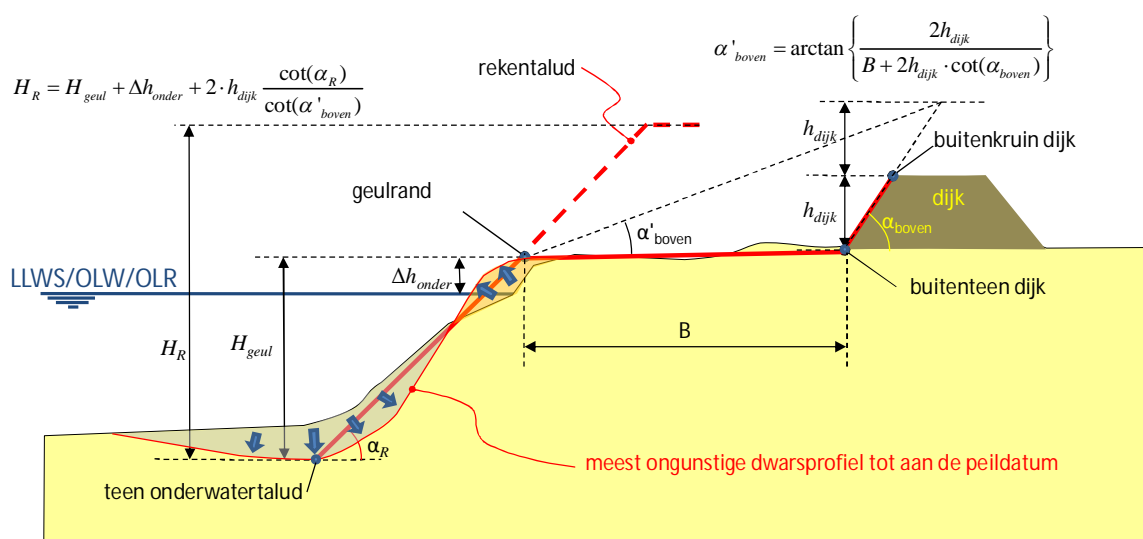
Δh_{onder} hoogte van de geulhelling die bij extreem laagwater boven water ligt: “niveau van geulrand” – “niveau LLWS/OLW/OLR” [m]

h_{dijk}	hoogte van het waterkerend grondlichaam ten opzichte van de buitenteen van de dijk [m]
B	breedte van het voorland, voor een schaaldijk geldt $B = 0$ [m]
$\cot(\alpha)$	cotangens van de taludhelling α [-]
α_R	rekenwaarde voor de taludhelling van het fictieve dwarsprofiel = taludhelling van het geschematiseerde onderwatertalud, ten opzichte van horizontaal [graden]
α_{boven}	helling van het buitentalud van de buitenteen van de dijk naar de buitenkruinlijn, ten opzichte van horizontaal [graden]
α'_{boven}	fictieve taludhelling van de rand van het voorland naar de fictieve buitenkruinlijn van de $2 \cdot h_{dijk}$ -hoge dijk, ten opzichte van horizontaal. Voor een schaaldijk geldt $\alpha'_{boven} = \alpha_{boven}$ [graden]

Verder is in onderstaande figuur:

- LLWS meerjarig gemiddelde van het laagste springlaagwater ten opzichte van NAP, geldig in het kustgebied en de estuaria.
- OLW Overeengekomen Laag Water ten opzichte van NAP, geldig in het benedenrivierengebied (in Waal stroomafwaarts van Tiel).
- OLR Overeengekomen Lage Rivierstand ten opzichte van NAP, geldig in het bovenrivierengebied (in Waal stroomopwaarts van Tiel), hetgeen overeenkomt met de Overeengekomen Lage Afvoer bij Lobith.

Hoe geulrand, teen onderwatertalud, buitenteen dijk en buitenkruinlijn dijk, bepaald moeten worden staat in meer detail beschreven in de schematiseringshandleiding.



Figuur C.1 Schematisatie van meest ongunstige geometrie in de beoordelingsperiode met bepaling van de rekentaludhoogte H_R en de rekentaludhelling α_R

Materiaalparameters:

- $\psi_{5m, kar}$ de karakteristieke waarde van ψ_{5m} [-]. ψ_{5m} is het gemiddelde van de state parameter ψ over in totaal 5 m (verticaal) van de meest zettingsgevoelige (= hoge ψ -waarde) lagen gelegen tussen de geulrand en $0,5 H_R$ onder de geulbodem.
- $d_{50, gemiddeld, kar}$ de karakteristieke waarde van $d_{50, gemiddeld}$ [m]. $d_{50, gemiddeld}$ is de gemiddelde mediane korrelde diameter is over alle zand- en siltlagen tussen geulrand en geulbodem.

$F_{cohesivelayers}$ is een parameter die de invloed van stoorlagen uitdrukt [-].

Hoe de waarde van bovenstaande parameters te bepalen, is beschreven in de schematiseringshandleiding.

Beweeglijkheid:

De beweeglijkheid van de voorlandgeometrie wordt gegeven door een lokaal bepaalde waarde V_{lokaal} en een referentiewaarde $V_{zeeland}$:

V_{lokaal} een maat voor de beweeglijkheid van de vooroever [m/jaar]. 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.

$V_{zeeland}$ de beweeglijkheid van een gemiddelde Zeeuwse vooroever, waarop de optredingskansformule in de Gedetailleerde toets gebaseerd is [m/jaar]. Voor $V_{zeeland}$ kan 1 m/jaar gekozen worden.

C.2 Stap B - Bepaling optredingskans zettingsvloeiing voor alle grondopbouwscenario's P(ZV)

Combineer de optredingskans per ondergrondscenario, zoals bepaald met *Vgl 29.2*, tot de totale optredingskans (zie (Deltares, 2014i)):

$$P(ZV) = \sum_i P(ZV|S_i)P(S_i) \quad \text{Vgl } 29.4$$

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

C.3 Stap C - 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 zijanten afvloeien. Door dit tweedimensionale effect zal de oppervlakte van de verdwenen grond bovenin het dwarsprofiel (oppervlak 1 in Figuur C.2) ongeveer een factor 1,4 groter zijn dan de oppervlakte van de grond die er aan de onderkant (oppervlak 2) bijkomt. Het uitvloeiingsprofiel 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 formule³:

$$L = ax - Db \quad \text{Vgl } 29.5$$

Met:

³ Formule geldt alleen als $c \neq 1$. Als $c = 1$ geldt $X = \frac{1}{2}H + \frac{1}{2}\frac{D^2}{H} \cdot \frac{b}{a}$

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

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

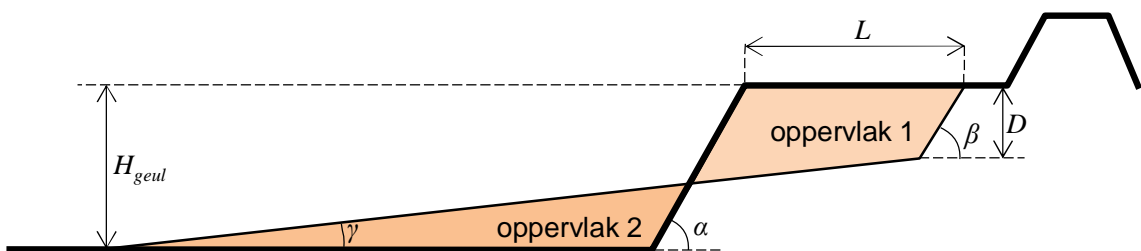
$$b = \cot \gamma - \cot \beta$$

Waarin:

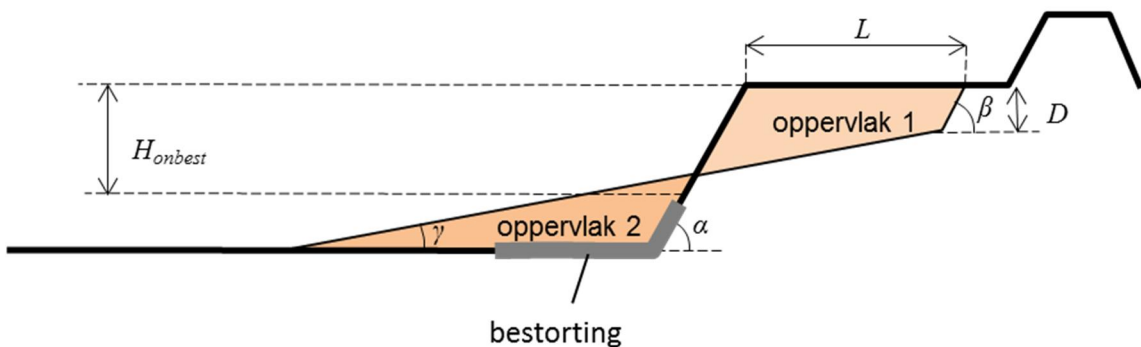
c verhouding tussen oppervlak 1 en oppervlak 2 ($A_1 = cA_2$) [-]

H totale hoogte van het onderwatertalud, moet de werkelijke hoogte tot aan het voorland worden genomen (en dus niet fictieve rekenhoogte H_R) [m]. In geval van een onbestort onder water talud of als sprake is van een bestorting op een gedeelte van het talud, dat niet doorloopt tot in het diepste punt van de geul, geldt: $H = H_{geul}$. Indien er gedeeltelijk bestorting aanwezig is die begint in het diepste punt van de geul, geldt $H = H_{onbest}$

D steile gedeelte van het uitvloeiingsprofiel [m]



Figuur C.2 Geschematiseerd restprofiel ten behoeve van gedetailleerde toets



Figuur C.3 Geschematiseerd restprofiel ten behoeve van gedetailleerde toets, voor situatie met gedeeltelijke bestorting die onderin de geul begint

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 het type verdeling bepaald. De resultaten zijn weergegeven in onderstaande tabel.

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

Tabel C.1 Overzicht geometrische variabelen. Omrekening verwachtingswaarde en standaardafwijking vanuit het gemiddelde en standaardafwijking van de onderliggende lognormale verdeling $\mu(X)=\exp(\mu(Y))$ en $\sigma(X)=\exp(\mu(Y)+\sigma(Y))-\exp(\mu(Y))$.

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

$$Z = L_{\text{toelaatbaar}} - L \quad \text{Vgl 29.6}$$

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

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

- Met de in het kader van WTI-2017 ter beschikking gestelde software wordt de betrouwbaarheidsfunctie met een FORM analyse, aangeropen uit de probabilistische bibliotheek, opgelost. Daarnaast wordt de volumebalans niet met Vgl 29.5 opgelost, maar numeriek. Daarmee kan rekening worden gehouden met beperkte berging, bijvoorbeeld in het geval van een smalle geul.
- In het geval de software niet gebruikt wordt is kan teruggevallen worden op een handmatige FORM berekening, waarin enige vereenvoudigingen worden aangenomen. Deze methode wordt navolgende beschreven.

Uit probabilistische berekeningen blijkt dat $\cot \alpha$, $\cot \beta$, D/H en c een kleine invloed hebben op de overschrijdingskans (d.w.z. de invloedsfactor is klein). Daarom kan de FORM analyse vereenvoudigd worden door deze parameters deterministisch te nemen, dus uit te gaan van de verwachtingswaarden, $\mu(X)$, aangegeven in Tabel C.1

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 Vgl 29.7 genomen. Hierin is L de optredende inscharingslengte die berekend wordt met Vgl 29.5 op basis van de verwachtingswaarde en de standaardafwijking van $\cot \gamma$ en $L_{\text{toelaatbaar}}$. $L_{\text{toelaatbaar}}$ is de aanwezige lengte van het voorland. In dit geval is $\cot \gamma$ de enige stochast, dus kan de betrouwbaarheidsindex β worden bepaald door de volgende vergelijking op te lossen voor $\cot \gamma$, lognormaal verdeeld.

$$Z = L_{\text{toelaatbaar}} - L(\cot \gamma(\beta)) = 0 \quad \text{Vgl 29.7}$$

$$\cot \gamma = \exp(\mu_{\cot \gamma} + \beta \sigma_{\cot \gamma})$$

Oplossen van deze vergelijking kan door middel van iteratie. Hiervoor kan het volgende zoekalgoritme worden gebruikt:

- 1 Start met $\beta_i = 1$ en bepaal L voor $\cot \gamma = \exp(\mu_{\cot \gamma} + \beta_i \cdot \sigma_{\cot \gamma})$
- 2 Bepaal de waarde van de relatieve afstand⁴ $L_{\text{toelaatbaar}}/L$
- 3 Gebruik $\beta_{i+1} = \beta_i + (L_{\text{toelaatbaar}}/L - 1)$ als nieuwe waarde voor β en bepaal L voor $\cot \gamma = \exp(\mu_{\cot \gamma} + \beta_{i+1} \cdot \sigma_{\cot \gamma})$
- 4 Herhaal de stappen 1 tot 3 tot een stabiele waarde van β is gevonden, waarvoor $Z = L_{\text{toelaatbaar}} - L(\cot \gamma(\beta)) = 0$

Om te compenseren voor de niet beschouwde stochastische variabelen $\cot \alpha$, $\cot \beta$, 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 en een FORM-analyse waarbij alleen $\cot \gamma$ als stochast is meegenomen, blijkt dat de β , berekend volgens de bovenstaande procedure, gedeeld moet worden door een factor 1,10.

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

$$P(L > L_{\text{toelaatbaar}} | ZV) = P(Z < 0) = \Phi(-\beta) \quad \text{Vgl 29.8}$$

C.4 Stap D - Bepaal de kans op overschrijding van toelaatbare inscharingslengte door een zettingsvloeiing per dijkvak per jaar $P(L > L_{\text{toelaatbaar}})_{\text{vak}}$

$$P(L > L_{\text{toelaatbaar}})_{\text{vak}} = P(ZV) \cdot P(L > L_{\text{toelaatbaar}} | ZV) \quad \text{Vgl 29.9}$$

⁴ Een robuuster/stabieler algoritme is door $\ln(L_{\text{toelaatbaar}}) / \ln(L)$ als relatieve afstand te gebruiken. Dit kost meer iteratiestappen, maar voorkomt wel dat de iteratie "uit de bocht schiet" bij hoge beta-waarden