

**WTI 2017 Onderzoek en
ontwikkeling landelijk
toetsinstrumentarium**

Product 5.25 Toetsschemas en foutenboom



**WTI 2017 Onderzoek en
ontwikkeling landelijk
toetsinstrumentarium**

Product 5.25 Toetsschemas en foutenboom grasbekledingen

Andre van Hoven

1220086-001

Titel

WTI 2017 Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat Water,
Verkeer en Leefomgeving

Project

1220086-001

Kenmerk

1220086-001-HYE-0001

Pagina's

40

Trefwoorden




Grasbekleding, erosie, afschuiven, overslag, golfploop, golfklap, WTI, Wettelijk toetsinstrumentarium 2017, toetsschema's

Samenvatting

Toetslaag 1 en 2 voor grasbekledingen in het WTI2017 bestaat uit vier sporen, erosie buitentalud (GEBU), erosie kruin en binnentalud (GEKB), afschuiven grasbekleding buitentalud (GABU) en afschuiven grasbekleding binnentalud (GABI). Voor elk van de sporen is een toetsschema opgesteld voor de eenvoudige en gedetailleerde toets. De stappen worden kort beschreven. Op basis van de stappen in de eenvoudige en gedetailleerde toets kan worden gekomen tot het oordeel 'voldoet' of er zal door moeten worden gegaan met de toets op maat, toetslaag 3. Hierbij wordt opgemerkt dat voorafgaand aan toetslaag 3 een afweging plaatsvindt of het uitvoeren van een toets op maat economisch verstandig is. De schema's zijn grotendeels gebaseerd op de Handreiking Toetsen Grasbekledingen op Dijken t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde [2] en het eerder verschenen rapport met toetslaag 1 voor grasbekledingen [1]. De schema's worden opgeleverd aan het WTI cluster Raamwerk.

Referenties

WTI-2017, cluster 5, Toetsregels Dijkbekledingen, product 5.25

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	juni 2015	Andre van Hoven		Huub de Bruijn		Leo Voogt	
2	sept. 2015	Andre van Hoven		Huub de Bruijn		Leo Voogt	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
2 Belastingzones, mechanismen en hydraulische randvoorwaarden	3
2.1 Belastingzones en mechanismen	3
2.2 Hydraulische randvoorwaarden toetslaag 1	4
3 Toetsschema's en beschrijvingen	7
3.1 GEBU Grasbekleding erosie buitentalud	7
3.1.1 Toetslaag 1	7
3.1.2 Toetslaag 2	8
3.2 GABU Grasbekleding afschuiven buitentalud	11
3.2.1 Toetslaag 1	11
3.2.2 Toetslaag 2	12
3.3 GEKB Grasbekleding erosie kruin en binnentalud	13
3.3.1 Toetslaag 1	13
3.3.2 Toetslaag 2	15
3.4 GABI Grasbekleding afschuiven binnentalud	16
3.4.1 Inleiding	16
3.4.2 Toetslaag 1	16
3.4.3 Toetslaag 2	17
4 Referenties	19
Bijlage(n)	
A Beschrijving graszode kwaliteit [2]	A-1
A.1 Zodekwaliteit	A-1
A.2 Visuele inspectie voor de beoordeling van de zodekwaliteit	A-1
A.3 Eenvoudige veldproef voor de beoordeling van de zodekwaliteit	A-2
B Beschrijving kleikwaliteit [2]	B-1
C GABI – formules	C-1
C.1 Kleidijk	C-1
C.2 Zanddijk met kleibekleding	C-2
C.2.1 Opdrukken van de kleibekleding	C-4
C.2.2 Uitspoelen van zand door een kleibekleding	C-9
C.2.3 Afschuiven van de kleibekleding	C-13
C.3 Zanddijk talud boven water	C-16
C.4 Zanddijk talud onder water	C-17

1 Inleiding

Het WTI2017 programma wordt door Rijkswaterstaat WVL en Deltares uitgevoerd en moet leiden tot de oplevering van het Wettelijk Toetsinstrumentarium. Het toetsinstrumentarium bestaat uit verschillende bouwstenen, waarvan de toetsschema's, er één is.

De taken binnen het WTI2017 programma bij Deltares zijn verdeeld over inhoudelijke en generieke clusters. Onderzoek naar faalmechanismen van grasbekledingen zijn uitgevoerd binnen het inhoudelijke cluster 5: Toetsregels Dijkbekledingen. Dit cluster levert onderhavige bouwsteen voor grasbekledingen op aan het generieke cluster A: raamwerk. De wensen c.q. eisen aan de toetsschema's zijn vastgelegd in het memorandum "Definitief voorstel opzet layout toetsschema's" d.d. 5 november 2014 van Huub de Bruijn, Deltares¹. Het cluster A raamwerk is verantwoordelijk voor consistentie van de bouwstenen die vanuit de verschillende inhoudelijke clusters worden geleverd.

De toetsing bestaat uit drie lagen; 1, 2 en 3, ook wel de eenvoudige toetsing, de gedetailleerde toetsing en de toets op maat genoemd. Onderhavig rapport betreft de toetsschema's voor toetslaag 1 en 2. Toetslaag 3 is wel als blokje in de schema's opgenomen, maar niet verder uitgewerkt. Opgemerkt wordt dat voorafgaand aan de toets op maat een economische afweging moet worden gemaakt of het uitvoeren hiervan zinvol is. De toetsschema's komen in het VTV Technisch deel.

Eerder zijn de schema's voor toetslaag 1 opgeleverd aan het cluster Raamwerk en aan RWS WVL [1]. Deze schema's zijn voor de volledigheid ook weer in dit rapport opgenomen.

Voor onderhavig rapport is voor de te hanteren hydraulische randvoorwaarden in toetslaag 1 gebruik gemaakt van het memorandum "Golfrandvoorwaarden voor Toetslaag 1", d.d. 23 juni 2014 van Hans de Waal, Deltares².

Falen van de grasbekleding beslaat vier mechanismen, erosie van binnentalud en buitentalud en afschuiven van binnentalud en buitentalud. Voor elk van de mechanismen worden schema's gegeven.

De toetsschema's zijn voor het overgrote deel overgenomen uit [2], dat eerder werd beoordeeld door ENW Techniek en het review team dijken. De achtergrond bij de verschillende criteria staat in de Handreiking (RWS 2012). In enkele gevallen wordt voor de achtergrond van criteria verwezen naar andere rapporten. In enkele gevallen is op basis van uitgangspunten voor WTI2017 besloten om een verandering aan te brengen. Dit wordt in de tekst aangegeven.

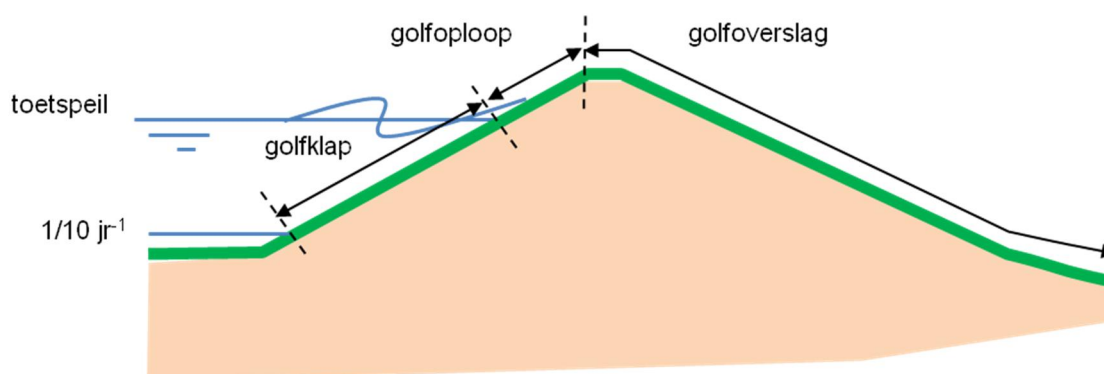
¹ Verder in het rapport genoemd Memo Toetsschema's

² Verder in het rapport genoemd Memo HR

2 Belastingzones, mechanismen en hydraulische randvoorwaarden

2.1 Belastingzones en mechanismen

Bij de beoordeling van de grasbekleding wordt onderscheid gemaakt in verschillende zones in het dijkprofiel (Figuur 2.1).



Figuur 2.1 Schematische weergave dijkprofiel met verschillende belastingzones

De grenzen tussen de verschillende zones op het talud zijn als volgt gedefinieerd:

De grasbekleding buitenwaarts³ van het niveau op het buitentalud met een belastingkans door golfklappen van 1/10 per jaar wordt niet getoetst binnen het WTI2017⁴.

Golfklap	Tussen niveau 1/10 jr ⁻¹ en toetspeil plus toeslagen niveau.
Golfoploop	Tussen toetspeil en de buitenkruinlijn.
Golfoverslag	Kruin en binnentalud, tot en met de knik van talud naar het achterland.

Met het toetspeil wordt bedoeld de waterstand met een kans van voorkomen gelijk aan de normoverstromingskans.

In de verschillende zones wordt op de volgende mechanismen getoetst (Tabel 2.1).

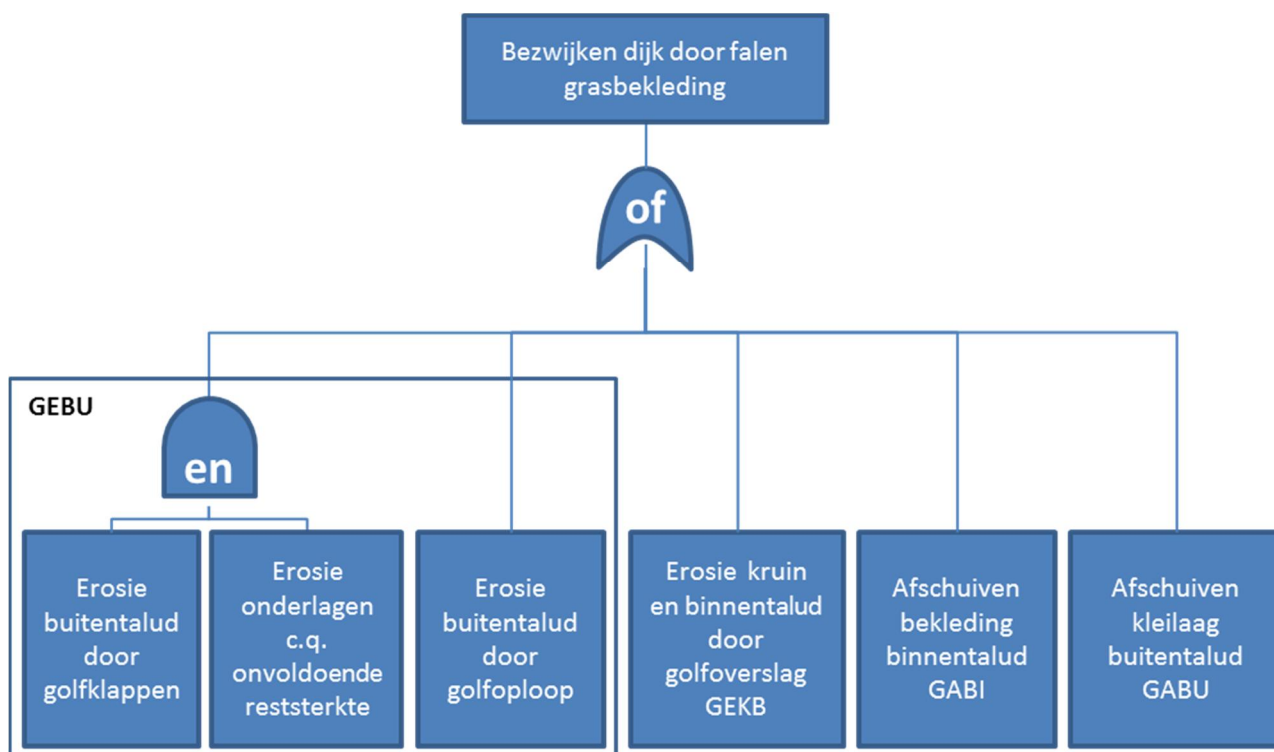
Zone	Mechanisme	Verwijzing
Golfklap	erosie (GEBU)	par. 3.1
	afschuiven (GABU)	par. 3.2
Golfoploop	erosie (GEBU)	par. 3.1
Golfoverslag	erosie (GEKB)	par. 3.3
	afschuiven (GABI)	par. 3.4

Tabel 2.1 Overzicht belastingzones en te toetsen mechanismen

³ buitenwaarts is in de richting van het buitenwater, binnenwaarts is in de richting van het achterland

⁴ De bekleding in deze zone, laag op het talud, wordt met enige regelmaat aangevallen. Eventuele schades hier zullen opvallen in de praktijk van dagelijks beheer en zullen leiden tot passende acties van de dijkbeheerder. Onder veiligheidsbedreigende omstandigheden, bij een hoge waterstand, ligt deze zone onder water en niet meer in de zone waar de bekleding zwaar wordt aangevallen door golfwerking.

De deelmechanismen kunnen elk leiden tot de topgebeurtenis: bezwijken van de dijk. Na het falen van de bekleding leidt verdere erosie van onderlagen (reststerkte) tot de topgebeurtenis. Dit proces is samengevat in een foutenboom (Figuur 2.2).



Figuur 2.2 Foutenboom leidend tot bezwijken dijk door falen grasbekleding

Opgemerkt wordt dat alleen voor het erosiemechanisme op het buitentalud door golfklappen (GEBU) reststerkte in rekening wordt gebracht en niet voor de overige mechanismen (GEBU-Golfoploop, GEKB, GABI en GABU). Alleen voor de reststerkte in de golfklapzone is een gevalideerd model beschikbaar.

2.2 Hydraulische randvoorwaarden toetslaag 1

In de eerste helft van 2014 is er discussie geweest of, en welke, hydraulische randvoorwaarden beschikbaar worden gesteld voor toetslaag 1. Besloten is om de aanbevelingen uit het eerder genoemde memorandum HR over te nemen. Dit betekent dat voor toetslaag 1 via Ringtoets een lijst beschikbaar komt met:

- waterstand h (m tov NAP),
- golfhoogte H_{m0} (m)
- golfperiode $T_{m-1,0}$ (s) en
- golfperiode T_p (s).

Deze parameters worden gegeven voor verschillende overschrijdingskansen (1/terugkeertijd). Om de juiste parameter voor de toetsing te bepalen moet hiervoor de normoverstromingskansen worden genomen. Deze wordt voor alle te toetsen dijktrajecten vastgesteld en beschikbaar gesteld.

De parameters worden onafhankelijk van elkaar bepaald. Het is dus niet zo dat de combinatie van de parameters een bepaalde overschrijdskans heeft, maar elke parameter onafhankelijk van de andere. Hierdoor zullen de HR een conservatief beeld van de belasting geven bij de gegeven overschrijdskans. De hoek van inval van de golven zal in toetslaag 1 niet worden meegenomen: aangenomen wordt dat de golven loodrecht invallen (conservatief).

Voor de toetsing van grasbekledingen is ook het overslagdebiet van belang. Besloten is echter dat het voor een eenvoudige toetsing te ver gaat om deze informatie uit Hydra-Ring te halen, en eventueel aan te vullen met een PC-Overslag berekening. Daarom is besloten om de eenvoudige toetsing uit te voeren met de bovengenoemde basisparameters en een conservatieve vereenvoudiging van de overslagformule:

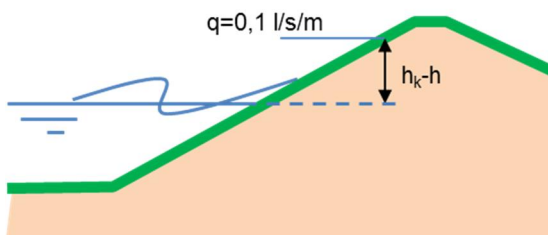
$$q = 0.2 \cdot \sqrt{g \cdot H_{m0}^3} \cdot e^{\frac{-2.6(h_k - h)}{H_{m0}}} \quad (1.1)$$

Waarin:

- q Overslagdebiet (m³/s/m')
- h_k (kruin)hoogte (m tov NAP)
- h waterstand (m tov NAP)
- H_{m0} Significante golfhoogte, gebaseerd op spectrum (m)

Voor de toetsing van grasbekledingen op het buitentalud wordt gebruik gemaakt van het niveau op het buitentalud waar een debiet van 0,1 l/s/m langskomt. Dit niveau wordt berekend met de omschreven vorm van formule (1.1). Let op dat in de formule het debiet in m³/s/m' moet worden ingevoerd.

$$h_k - h = \frac{H_{m0}}{2.6} \cdot \ln \left(\frac{0.2 \cdot \sqrt{g \cdot H_{m0}^3}}{q} \right) \quad (1.2)$$



Figuur 2.3 Voorbeeld niveau op buitentalud waar $q=0,1$ l/s/m langskomt te berekenen met formule (1.2)

Bij een niveau op het buitentalud gaat het niet om een overslagdebiet, maar om een hydraulisch belastingniveau. Deze terminologie komt terug in de toetsschema's in hoofdstuk 3.

In [2] werd in de eenvoudige toets tevens gebruik gemaakt van de belastingduur voor golfklappen. De belastingduur is de tijd dat een te toetsen punt op de grasbekleding wordt belast door golfklappen. Binnen het WT12017 programma is besloten dat de bepaling van een belastingduur te lastig is om binnen toetslaag 1 uit te voeren. Daarom is deze stap uit de eenvoudige toets verwijderd.

3 Toetsschema's en beschrijvingen

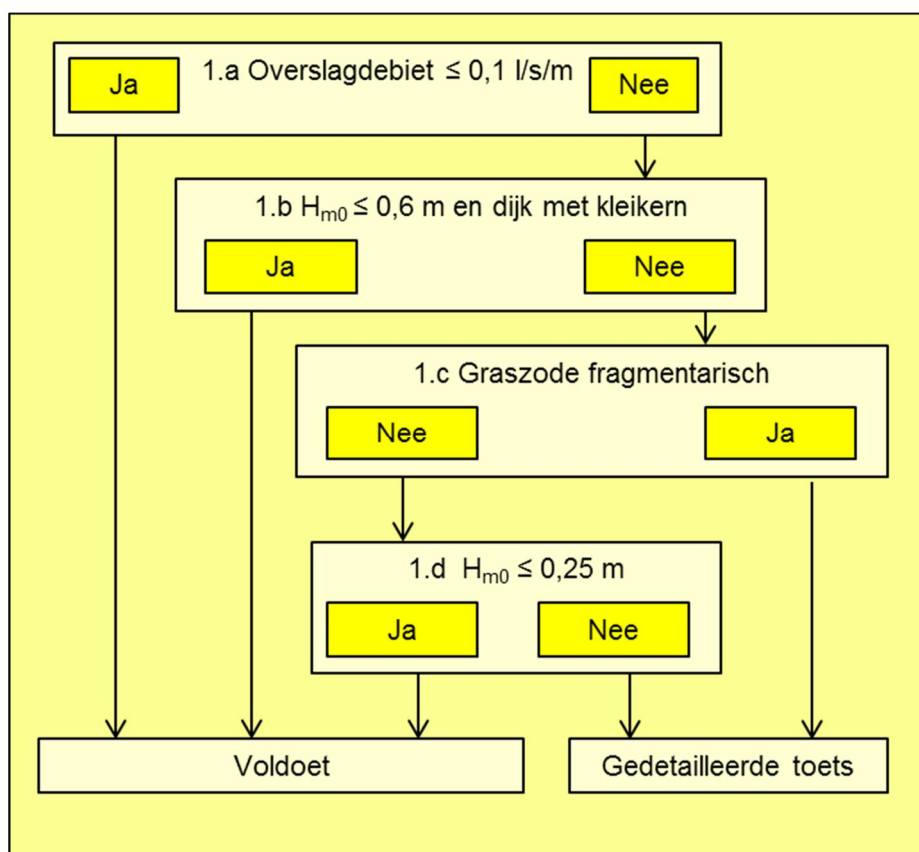
3.1 GEBU Grasbekleding erosie buitentalud

3.1.1 Toetslaag 1

Toetslaag 1 voor het mechanisme erosie grasbekleding buitentalud is de gecombineerde toets voor de golfklapzone en de golfploopzone. Het mechanisme erosie door golfklappen is altijd maatgevend boven het mechanisme erosie door golfploop. Indien de grasbekleding voldoet voor golfklappen, dan voldoet die gelijk ook voor golfploop.

De te toetsen grasbekleding bevindt zich boven het niveau op het buitentalud behorend bij een waterstand met een terugkeertijd van 10 jaar. Deze waterstand wordt gegeven door Ringtoets (zie ook paragraaf 2.2). Het handhaven van een redelijk kwaliteitsniveau van de bekleding op dit lage taluddeel behoort niet tot de toetsing op veiligheid. De bekleding in deze zone laag op het talud wordt met enige regelmaat aangevallen. Eventuele schades hier zullen opvallen in de praktijk van dagelijks beheer en zullen leiden tot passende acties van de dijkbeheerder. Onder veiligheidsbedreigende omstandigheden, bij een hoge waterstand, ligt deze zone onder water en niet meer in de zone waar de bekleding zwaar wordt aangevallen door golfwerking.

Het toetsschema staat in Figuur 3.1. Toetslaag 1 bestaat uit een eenvoudige analyse op basis van algemene kenmerken (stap 1.a tot en met 1.d).



Figuur 3.1 Toetslaag 1 GEBU

Stap 1a hydraulisch belastingniveau $\leq 0,1$ l/m/s

Als de grasbekleding op het buitentalud boven het hydraulisch belastingniveau van 0,1 l/s/m ligt, dan volgt de score 'voldoet'. Op en boven dit niveau wordt de bekleding nauwelijks belast. De bepaling van het hydraulisch belastingniveau gaat volgens de methode beschreven in paragraaf 2.2. Indien de grasbekleding zich beneden dit niveau bevindt dan wordt verder gegaan met stap 1b.

Stap 1b reststerkte kleikern

Indien de dijk een kleidijk is of een kleikern heeft tot 0,5 m boven het toetspeil, en de golfhoogte $H_{m0} \leq 0,6$ m dan zal de dijk voldoende reststerkte hebben. De kwaliteit van de grasbekleding is hierbij niet van belang.

Stap 1c kwaliteit graszode

Deze stap bestaat uit een beoordeling van de kwaliteit van de graszode. Van belang is de aanwezigheid van een dicht gewoven wortelnet. Hiertoe worden de bovengrondse plantendelen van de grasbekleding beoordeeld, bij twijfel aangevuld met lokale beoordeling van globale karakteristieken van een met een spade gestoken zode-plag. Voor de beoordeling van de sterkte van de graszode worden drie kwaliteitscategorieën onderscheiden (gesloten zode, open zode, fragmentarische zode; zie bijlage A).

Indien de graszode fragmentarisch is, dan moet verder worden gegaan met stap 2. Bij een open of gesloten graszode gaat de toets verder met stap 1c.

Stap 1d $H_{m0} < 0,25$ m

Indien de golfhoogte H_{m0} kleiner is dan 0,25 m, dan is de score 'voldoet'. Zo niet, dan wordt de toetsing met Stap 2 voortgezet. De golfhoogte wordt door Ringtoets geleverd.

Er zijn vier wijzigingen ten opzichte van het WTI2011. De toetsing voor het laag gelegen deel van een grasbekleding (belastingkans $> 1/10$ per jaar) is verwijderd. De toets met behulp van bewezen sterkte is verwijderd. De stap met $H_{m0} < 0,5$ m en een belastingduur kleiner dan 20 uur is verwijderd. De laatste stap is verwijderd, omdat de belastingduur geen onderdeel uitmaakt van de beschikbare hydraulische belastingen in de eenvoudige toetsing. De toets met een golfhoogte kleiner dan 0,6 m in combinatie met een kleidijk of kleikern tot boven het toetspeil is toegevoegd.

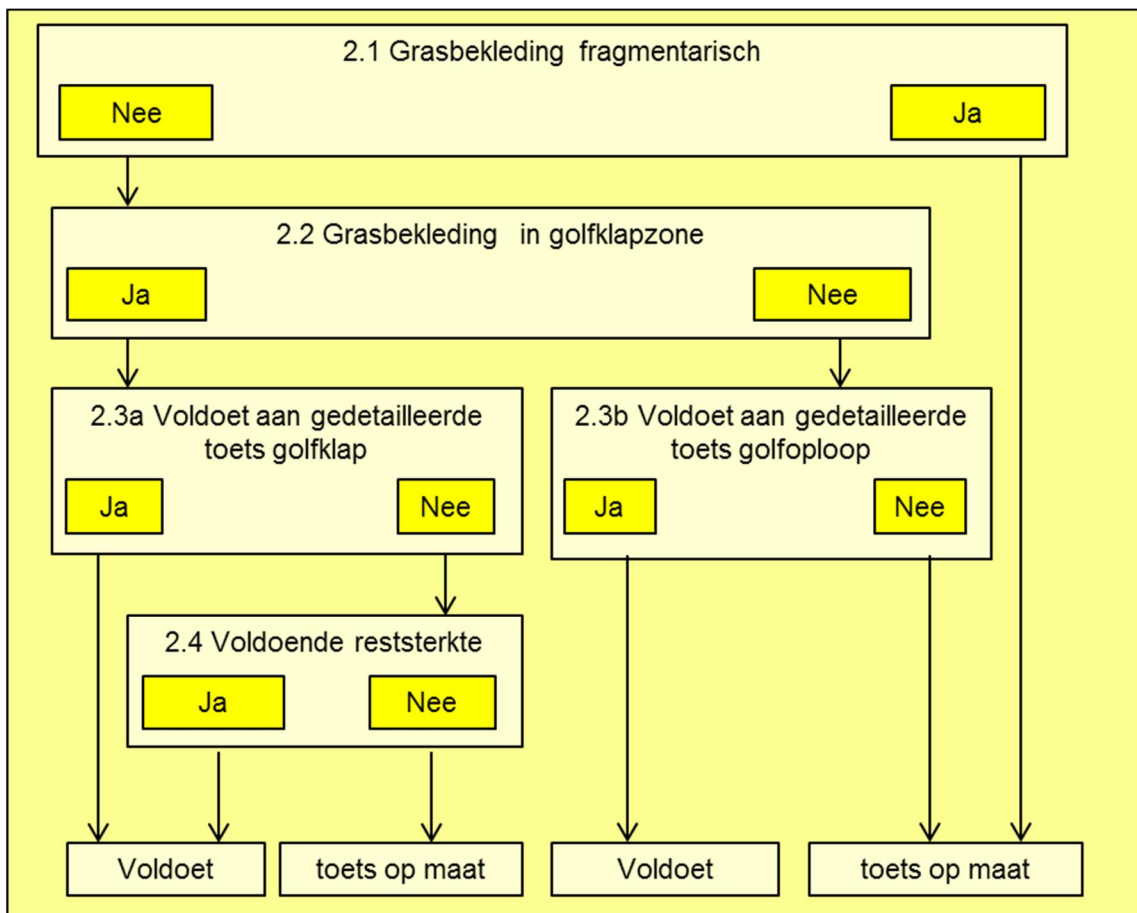
Voor de achtergrond van de criteria wordt verwezen naar [2] en [3].

3.1.2 Toetslaag 2

De toetsing verloopt volgens het schema in Figuur 3.6.

Stap 2.1 bestaat uit de beoordeling of de graskwaliteit 'fragmentarisch' is (Bijlage A). In dat geval kan er niet worden uitgegaan van enige sterkte van de grasbekleding en resteert de sterkte van de onderlagen.

Stap 2.2 bestaat uit de beoordeling in welke zone de grasbekleding zich bevindt, in de golfklapzone, onder de waterstand behorend bij de normoverstromingskans, of in de golfploopzone, boven deze waterstand (Figuur 2.1).



Figuur 3.2 Toetslaag 2 GEBU

In stap 2.3a en 2.3b wordt de grasbekleding in respectievelijk de golfklapzone en de golfoploopzone beoordeeld. Voor deze mechanismen is software beschikbaar die buiten Ringtoets werkt en waarmee een semi-probabilistische beoordeling wordt uitgevoerd.

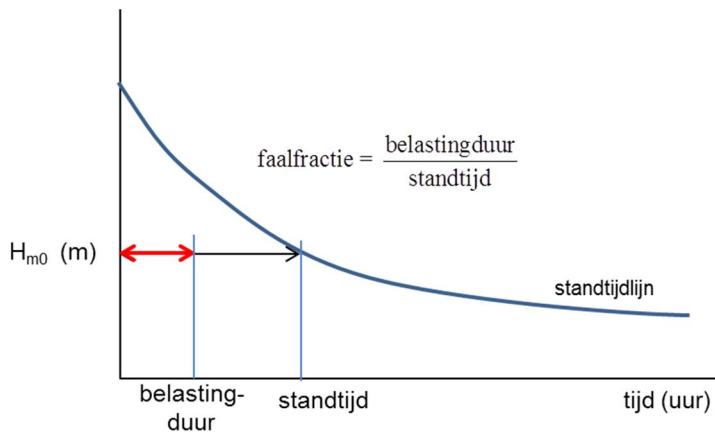
Stap 2.3a en stap 2.4 (reststerkte) zijn verwerkt in één software module. Er wordt in de software bepaald of de grasbekleding de golfklapbelasting kan weerstaan en indien dit niet het geval is of er eventueel voldoende reststerkte aanwezig is in de vorm van een onderliggende kleilaag, om het resterende deel van de storm te weerstaan.

Voor het erosiemodel in de software moet het talud 1:2,5 zijn of flauwer. Indien hieraan niet wordt voldaan, dan zal de software geen berekening uitvoeren en volgt toetslaag 3, de toets op maat.

De software beschouwt voor een aantal discrete punten op het buitentalud in de golfklapzone (standaard om de 10 cm verticaal) hoe de belastingduur zich verhoudt tot de standtijd van de grasbekleding inclusief eventuele reststerkte. Deze verhouding wordt de faalfractie genoemd (Figuur 3.3).

De standtijdlijn representeert de sterkte van de bekleding en geeft de relatie tussen de golfhoogte en de tijd dat de grasbekleding en eventueel een kleilaag deze gegeven golfhoogte kan weerstaan. De standtijdlijn is naast de golfhoogte afhankelijk van de

graskwaliteit, de kwaliteit van de grond in de zode en eventueel de kleilaagdikte onder de zode en het zandgehalte hiervan.



Figuur 3.3 Voorbeeld faalfractie bij beoordeling erosie grasbekleding in de golfklapzone

De belastingduur is de tijd dat het beschouwde punt gedurende een hoogwaterverloop in de zone ligt tussen de waterstand en een halve golfhoogte H_{m0} onder de waterstand. In de software worden de verlopen van waterstand en golfhoogte opgedeeld in tijdstapjes en wordt per tijdstapje gekeken of de beschouwde punten in de door golfklappen aangevallen zone liggen. Het waterstandverloop en het verloop van de golfhoogte maken deel uit van de hydraulische randvoorwaarden in het WTI beschikbaar worden gesteld.

Er wordt gerekend met een faalfractie, omdat tijdens een storm de golfhoogte verandert en er dus geen sprake is van één golfhoogte met één bijbehorende standtijd. De faalfracties bij verschillende golfhoogtes en waterstanden gedurende een storm worden gesommeerd. Bij een som van 1 wordt de kritische waarde van de faalfractie bereikt en faalt de grasbekleding. Indien er een kleilaag aanwezig is met een bepaalde reststerkte, dan wordt hiermee bij de berekening van de faalfractie rekening gehouden. De veiligheidsfactor, een deel van de uitvoer van de software, is gedefinieerd als één gedeeld door de faalfractie.

Voor de beoordeling van erosie van gras in de golfoploopzone (stap 2.3b) wordt gebruik gemaakt van aparte software. Hierbij wordt in toetslaag 2 geen rekening gehouden met reststerkte. De beoordeling vindt plaats voor één, maatgevend, punt op het buitentalud, namelijk het laagst gelegen punt in de golfoploopzone. In het algemeen zal dit het punt zijn op de overgang van de harde bekleding die in de golfklapzone ligt naar de grasbekleding hoger op het talud.

De software bevat het erosiemodel voor gras, de cumulatieve overbelastingmethode:

$$D = \sum_{i=1}^N \max(\alpha_M U_i^2 - \alpha_S U_c^2; 0)$$

Waarin:

- D cumulatieve overbelasting (m^2/s^2)
- N aantal golven (-)
- U_i frontsnelheid van de i^{de} van N oplopende golven (m/s)
- U_c kritische stroomsnelheid, sterkte parameter van de graszode (m/s)
- α_S sterkte reductiefactor in geval van een overgang (-)

α_M belastingverhogingsfactor in geval van een overgang (-)

De erosiebestendigheid van de grasbekleding wordt gekarakteriseerd door de kritische stroomsnelheid U_c . Deze is gekoppeld aan een graskwaliteit en de kwaliteit van de grond in de zode (klei of zand). Overige invoerparameters zijn de factoren α_S en α_M die het effect van de overgang van de harde bekleding naar het gras verdisconteren.

De belasting bestaat uit de fontsnelheid van de oplopende golven voor zover de linker term in de formule groter is dan de rechter term. De software bepaald per tijdstap in gedurende de storm wat de cumulatieve overbelasting is en telt deze op. Indien de overbelasting de kritische waarde van 7000 m²/s² overschrijdt faalt de grasbekleding. De benodigde hydraulische belasting bestaat uit het verloop van waterstand en golfcondities, welke in het WTI beschikbaar worden gesteld.

Voor de achtergrond van het erosiemodel in de golfklapzone wordt verwezen naar [2] en [3]. Voor de beschrijving van het erosiemodel in de golfoploopzone wordt verwezen naar [10] en [11]. Voor de achtergrond van het reststerkemodel wordt verwezen naar [12].

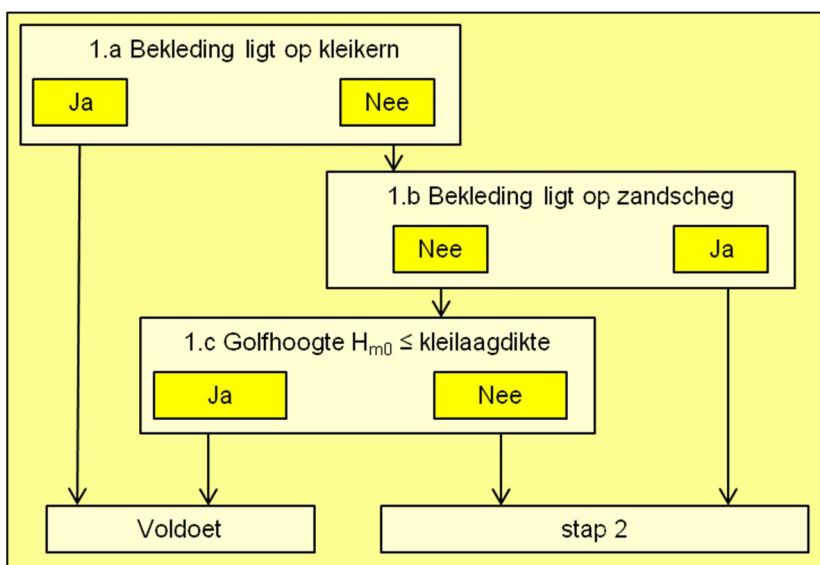
Ten opzichte van het VTV2006 zijn er de volgende wijzigingen:

- De beschrijving van de graskwaliteit is veranderd (Bijlage A).
- Het erosiemodel golfoploop is veranderd. Voorheen werd de toetsing uitgevoerd op basis van de CIRIA krommes, nu wordt het cumulatieve overbelastingmodel gebruikt.
- Het golfklapmodel is veranderd. De grond in de zode wordt op een iets gewijzigde manier beschreven (Bijlage B).
- Het reststerkemodel is aangepast.

3.2 GABU Grasbekleding afschuiven buitentalud

3.2.1 Toetslaag 1

De beoordeling vindt plaats volgens het schema in Figuur 3.4.



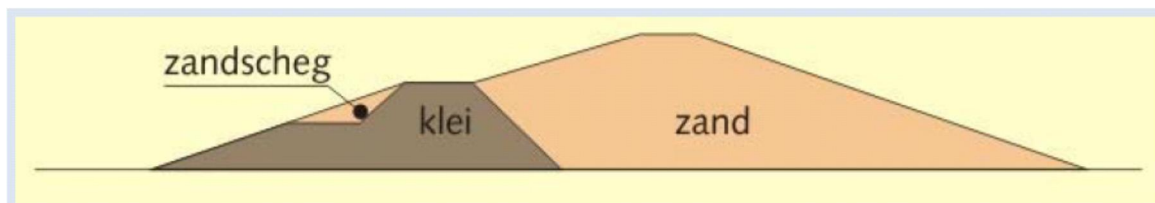
Figuur 3.4 Toetslaag 1 GABU

Stap 1.a

Indien de bekleding direct op een kleikern ligt, dan is de score 'voldoet'.

Stap 1.b

Als zich vlak onder de bekleding een zandscheg bevindt dan volgt stap 2. Een voorbeeld van een dijkprofiel met een zandscheg is weergegeven in Figuur 3.5.



Figuur 3.5 Dijkprofiel met een zandscheg

Stap 1.c Golfhoogte kleiner dan kleilaagdikte

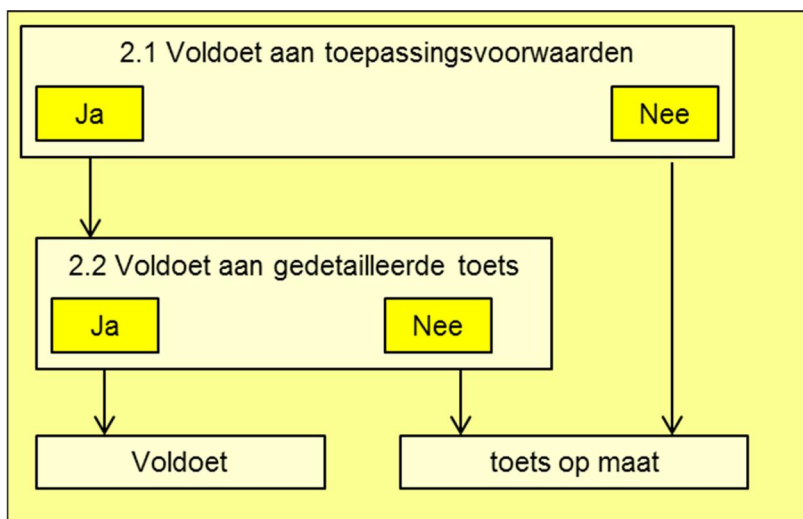
De score is 'voldoet' als de kleilaag (de totale dikte van de deklaag) groter is dan de golfhoogte H_{m0} . De golfhoogte wordt door Ringtoets geleverd. Indien niet wordt voldaan aan stap 1.c dan moet worden doorgegaan met stap 2, de gedetailleerde toetsing.

Ten opzichte van het WTI2011 is de stap met de restrictie aan de taludhelling 1:2,7 verwijderd. Een steiler talud zou direct naar toetslaag 3 moeten, afgesproken is dat dit in de eenvoudige toetsing in WTI2017 niet meer kan. Deze stap wordt daarom verplaatst naar stap 2.

Voor de achtergrond bij de criteria wordt verwezen [4].

3.2.2 Toetslaag 2

De beoordeling vindt plaats volgens het schema in Figuur 3.6.



Figuur 3.6 Toetslaag 2 GEBU

Stap 2.1

Voor het uitvoeren van de gedetailleerde toetsregel (stap 2.2) moet voldaan worden aan de toepassingsvoorwaarden:

- de kleilaag bekleding ligt niet op een zandscheg (Figuur 3.5) en
- de taludhelling is minder steil dan 1:2,5.

Als wordt voldaan aan beide voorwaarden dan wordt de toetsing voortgezet met de gedetailleerde rekenregel (stap 2.2), anders volgt de toets op maat (stap 3).

Stap 2.2

De gedetailleerde rekenregel is gelijk aan die voor een steenbekleding op een kleilaag:

$$\frac{H_s}{(\Delta D)_{\text{kleilaag}} \cdot \cos \alpha} \leq 3$$

Waarin:

H_s	significante golfhoogte (m)
$(\Delta D)_{\text{kleilaag}}$	onderwatergewicht kleilaag (m)
Δ	relatieve dichtheid kleilaag $(\rho_g - \rho_w) / \rho_w$
ρ_w	soortelijke massa water (kg/m^3)
ρ_g	soortelijke massa grond (kg/m^3)
D	dikte kleilaag (m)
α	taludhelling ($^\circ$)

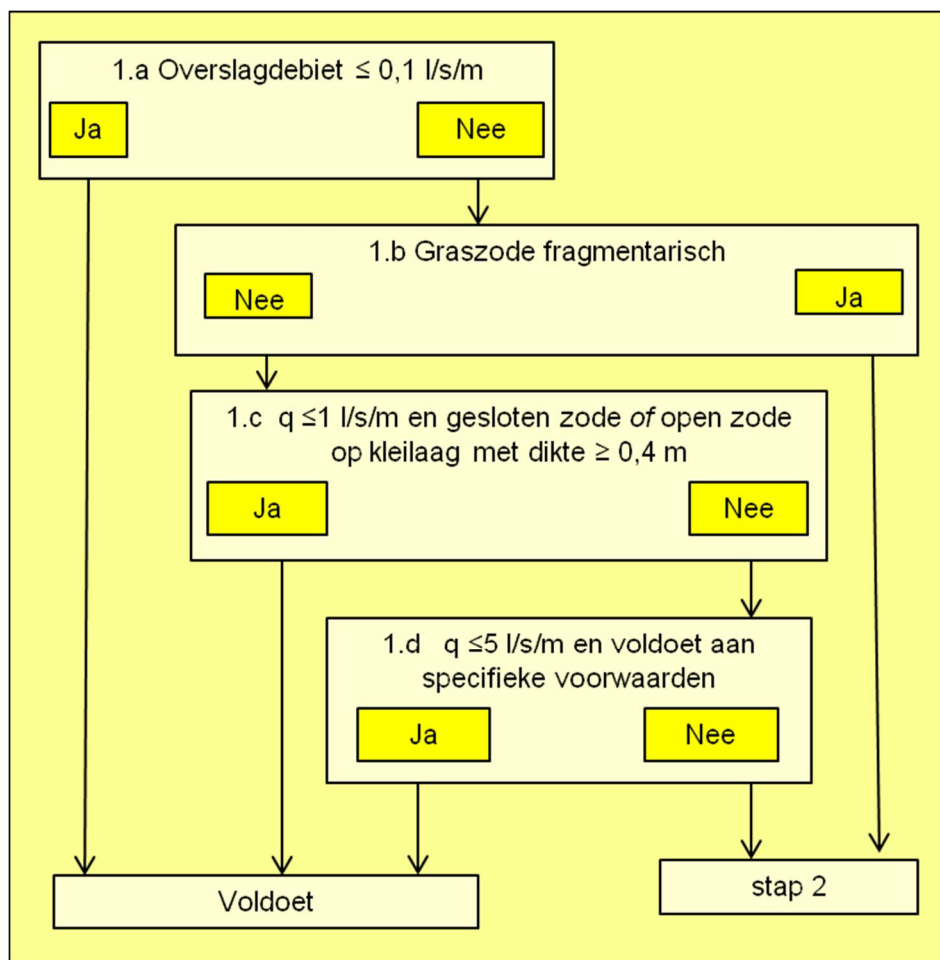
De rekenregel wordt beschreven in [5] en [6].

Ten opzichte van het VTV2006 zijn gewijzigd: de voorwaarde van de taludhelling 1:2,5 in plaats van 1:2,7 en aanpassing van de gedetailleerde rekenregel. Beide wijzigingen staan beschreven in [5] en [6].

3.3 GEKB Grasbekleding erosie kruin en binnentalud

3.3.1 Toetslaag 1

De beoordeling in toetslaag 1 voor GEKB (erosie kruin en binnentalud) verloopt volgens het schema in Figuur 3.7.



Figuur 3.7 Toetslaag 1 GEKB

Stap 1a Overslagdebiet $\leq 0,1$ l/s/m

Bij een overslagdebiet kleiner of gelijk aan $0,1$ l/s/m, wordt aangenomen dat de grasbekleding de belasting zonder ontoelaatbare schade kan weerstaan. De berekening van het overslagdebiet wordt beschreven in paragraaf 2.2. De berekening wordt uitgevoerd met door Ringtoets voor toetslaag 1 geleverde hydraulische randvoorwaarden. Als het overslagdebiet groter is dan $0,1$ l/s/m wordt de toetsing voortgezet met stap 1b.

Stap 1b kwaliteit graszode

Stap 1.2 bestaat uit een beoordeling van de kwaliteit van de graszode op de kruin en het binnentalud van de dijk. Van belang is de aanwezigheid van een dicht gewoven wortelnet. De grasbekleding moet worden ingedeeld in een van de drie categorieën: gesloten zode, open zode of fragmentarische zode. De beoordeling wordt beschreven in bijlage A.

Indien de graszode fragmentarisch is, dan volgt direct stap 2. Indien de graszode open of dicht is wordt de toets voortgezet met stap 1c.

Stap 1c overslagdebiet ≤ 1 l/s/m

Onder de volgende voorwaarden kan de grasbekleding met 'voldoet' worden beoordeeld:

- Bij een gesloten zode en overslagdebiet kleiner of gelijk aan 1 l/s/m
- Bij een open zode op kleilaagdikte van minimaal $0,4$ m en overslagdebiet kleiner of gelijk aan 1 l/s/m.

Indien niet aan deze voorwaarden wordt voldaan wordt de toets voortgezet met stap 1d.

Stap 1.d Sterkte criterium

Onder de volgende voorwaarden kan de grasbekleding met 'voldoet' worden beoordeeld (als alle 5 voorwaarden van toepassing zijn):

- gesloten zode (zie Bijlage A)
- overslagdebiet q is kleiner of gelijk aan 5 l/m/s
- golfhoogte H_{m0} is kleiner dan 3 m;
- kleilaagdikte is groter of gelijk aan 0,4 m of taludhelling flauwer dan 1:4;
- De snede door de zode van objecten (NWO's) is kleiner dan 0,15 m. Met snede door de zode wordt bedoeld de grootste afmeting van het object (NWO) gemeten in het vlak van de bekleding. Er zijn ook geen wegen of fietspaden op de dijk aanwezig.

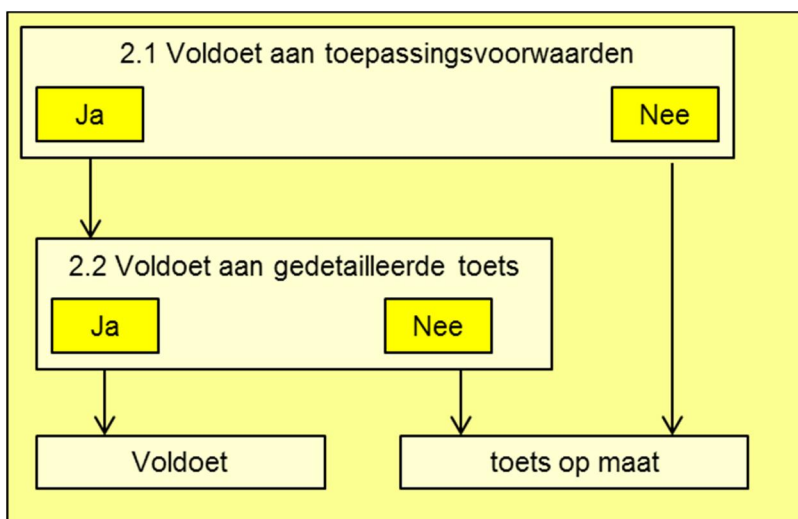
Indien niet aan deze voorwaarden wordt voldaan, dan wordt de beoordeling voortgezet met stap 2, de gedetailleerde toets.

Ten opzichte van WTI2011 is één wijziging aangebracht. Een fragmentarische zode bij een overslagdebiet groter dan 0,1 l/s/m kreeg de score 'voldoet niet', maar gaat nu naar stap 2: de gedetailleerde toetsing.

Voor de achtergrond van de criteria wordt verwezen naar [2].

3.3.2 Toetslaag 2

De beoordeling vindt plaats volgens het schema in Figuur 3.8.



Figuur 3.8 Toetslaag 2 GEKB

De gedetailleerde toetsing bestaat uit een beoordeling of de berekende faalkans voor dit mechanisme kleiner is dan de acceptabele faalkans. De faalkansberekening vindt plaats in Ringtoets, op basis van de kwaliteit van de grasbekleding.

Stap 2.1

Voor het uitvoeren van de gedetailleerde toets moet worden voldaan aan de volgende toepassingsvoorwaarden:

- graskwaliteit is 'open zode' of 'gesloten zode';
- $H_s \leq 3$ m;
- taludhelling flauwer dan 1:4 **of** kleilaagdikte $\geq 0,4$ m;

Er kunnen in toetslaag 2 twee soorten berekeningen worden uitgevoerd. Een berekening voor dijken, zonder noemenswaardige overgangen en objecten in de grasbekleding en een berekening voor dijken met overgangen en objecten.

Zonder noemenswaardige overgangen en objecten betekent:

- De snede door de zode van objecten (NWO's) is kleiner dan 0,15 m.
- Geen wegen of fietspaden.
- Wel meegenomen zijn geometrische overgangen van het talud naar berm of naar achterland.

Indien er wel noemenswaardige objecten en overgangen aanwezig zijn dan wordt een berekening gemaakt waarbij default een invloedsfactor wordt toegepast die uitgaat van de meest ongunstige overgangen en objecten.

Indien de faalkansberekening leidt tot een onaanvaardbaar hoge faalkans door dit mechanisme dan volgt toetslaag 3, de toets op maat.

Eventueel differentiëren naar verschillende type overgangen en objecten tussen deze uiterste grenzen vind plaats in toetslaag 3.

3.4 GABI Grasbekleding afschuiven binnentalud

3.4.1 Inleiding

Het faalmechanisme GABI heeft een sterke relatie met het faalmechanisme micro-instabiliteit. Bij een overslagdebiet dat groter is dan 0,1 l/s/m kunnen de waterspanningen in de dijk extra snel stijgen. De waterspanningstoename als gevolg van golfoverslag moet worden meegenomen bij de beoordeling van de stabiliteit van de bekleding op het binnentalud. Deze controle hoeft maar één keer te gebeuren. Daarom wordt bij een overslagdebiet kleiner of gelijk aan 0,1 l/s/m alleen de controle op micro-instabiliteit te worden uitgevoerd, en hoeft bij een overslagdebiet groter dan 0,1 l/s/m alleen het faalmechanisme GABI te worden gecontroleerd.

3.4.2 Toetslaag 1

Toetslaag 1 voor het mechanisme GABI, afschuiving van het binnentalud, bestaat uit de toets op basis van geometrische kenmerken en eenvoudig te bepalen parameters. De bekleding "voldoet" aan de toets op Afschuiving binnentalud indien aan minimaal één van de volgende voorwaarden wordt voldaan

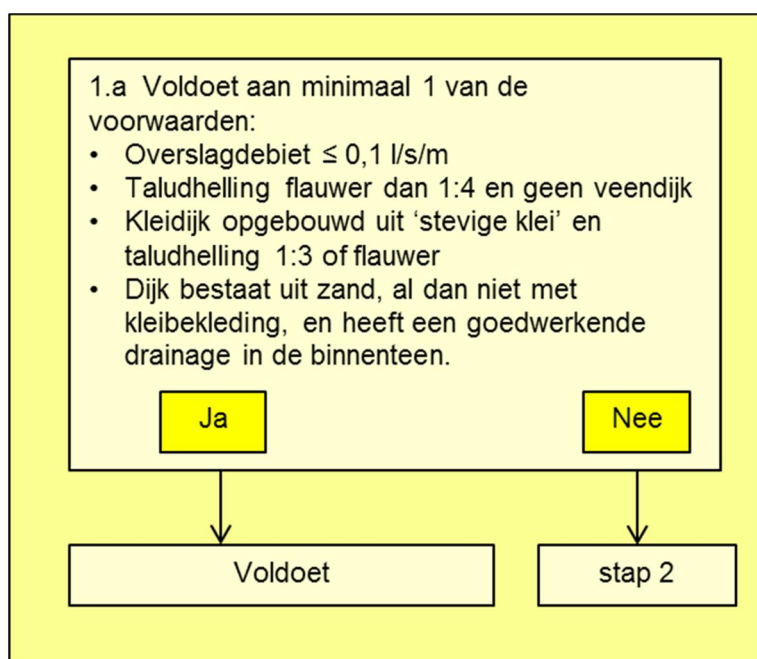
- Het overslagdebiet q is kleiner dan 0,1 l/s/m.
- De taludhelling van het binnentalud is flauwer of gelijk aan 1:4 en bestaat niet uit veen.
- De taludhelling van het binnentalud is flauwer of gelijk aan 1:3 en de dijk bestaat uit stevige klei (beschrijving in Bijlage B)

- De dijk bestaat uit zand, al dan niet voorzien van een kleibekleding, en heeft een goed werkende drainage in de binnenteen.

Het overslagdebiet wordt berekend volgens de methode beschreven in paragraaf 2.2.

Stevige klei (Bijlage B) is ongevoelig voor verweken onder de invloed van golfoverslag, ook al zijn de macroporiën in de kleilaag met bodemstructuur binnen de duur van de golfoverslag volledig verzadigd. De aggregaten van stevige klei houden hun sterkte en zijn daardoor, binnen de grenzen van de overslagduur voor Nederlandse watersystemen, vormvast. Door de nauwsluitende passing van de aggregaten en hun vormvastheid zal de laag stevige klei met bodemstructuur niet afschuiven bij een helling van 1:3 of flauwer.

Het toetschema staat in Figuur 3.9.



Figuur 3.9 Toetslaag 1 GABI

Voor de achtergrond van de criteria wordt verwezen naar RWS 2012.

3.4.3 Toetslaag 2

De beoordeling vindt plaats volgens het schema in Figuur 3.10.



Figuur 3.10 Toetslaag 2 GABI

Stap 2

In stap 2 wordt eerst nauwkeuriger gekeken naar het overslagdebiet. Het overslagdebiet wordt bepaald door HydraRing, aangestuurd vanuit Ringtoets. Uitgaande van de normoverstromingskans voor het te beoordelen traject wordt het overslagdebiet in het illustratiepunt bepaald. Bij een complexe geometrie wordt met de waterstand en golfparameters uit het illustratiepunt eventueel nog een PC-Overslag berekening gemaakt. Dit overslagdebiet zal lager zijn dan berekend in stap 1 en indien het lager is dan 0,1 l/s/m dan kan direct het oordeel 'voldoet' worden gegeven.

Als het overslagdebiet hoger is dan 0,1 l/s/m dan moet de stabiliteit van de bekleding worden gecontroleerd.

De stabiliteit van de grasbekleding op het binnentalud bij golfoverslag wordt gecontroleerd met behulp van de formules in Bijlage C.

De analytische formules zijn grotendeels overgenomen uit [8], waarbij opgemerkt dat er enkele fouten uit [8] zijn verbeterd. De partiële veiligheidsfactoren zijn eveneens overgenomen uit [8].

4 Referenties

- [1] WTI 2017 Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium Product 5.3R Toetslaag 1 grasbekledingen, Deltares rapportnummer 1209437 -001-HYE-0001, december 2014
- [2] RWS 2012, Handreiking Toetsen Grasbekledingen op Dijken t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde, 25-10-2012
- [3] Kruse G.A.M., 2010, Studie voor richtlijnen klei op dijktafuds in het rivierengebied, Deltares 1202512-000-GEO-0002, juli 2010
- [4] TAW 2003, Technisch Rapport Steenzettingen, deel Toetsing, ISBN 90-369-5551-3
- [5] Black box model voor afschuiving bij steenzettingen', WL|Delft Hydraulics rapport H4635, november 2007
- [6] Aanpassing toetsmethodiek Afschuiving bij steenzettingen, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Ruud Bosters, 1 september 2008, Rapportnummer PZDT-R-08300
- [7] Van der Meij, R. and J.B. Sellmeijer, A Genetic Algorithm for Solving Slope Stability Problems: from Bishop to a Free Slip Plane, in 7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE). 2010, Balkema, Rotterdam: Trondheim
- [8] Technische Rapport Waterkerende Grondconstructies, TAW 2001
- [9] Microstabiliteit: overzicht modellering, GeoDelft CO-393440/81, augustus 2000
- [10] Erosie van grasbekleding in golfoploopzone Basis for safety assessment method of WTI2017 Product 5.4R, Deltares kenmerk 1209437-000, Februari 2015
- [11] WTI 2017 Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium Product 5.12 Analyses grass erosion in wave run-up and wave overtopping conditions, Deltares kenmerk 1209437 -005-HYE-0003, Maart 2015
- [12] Residual strength of grass on clay in the wave impact zone, Basis for safety assessment method of WTI-2017, Product 5.10, Deltares kenmerk 1209437-011-HYE-0001, Augustus 2014

A Beschrijving graszode kwaliteit [2]

A.1 Zodekwaliteit

De kwaliteit van de graszode wordt onderverdeeld in drie categorieën, waarbij de nadruk ligt op de **dichtheid van het wortelnetwerk**:

- 1 **Dichte doorworteling**: gesloten dicht doorwortelde zodelaag. Nergens onderbrekingen van een op visuele beoordeling dicht gewoven wortelnet groter dan 0,2 m (lengte in doorsnede van de zode). Het vergt enige moeite om een los gestoken zode-plag (ca. $0,25 \times 0,3 \text{ m}^2$) uiteen te trekken: zo blijft een plag van een dichte zode grotendeels intact bij losmaken van de ondergrond met een spade;
- 2 **Open doorworteling**: open doorwortelde zodelaag waarin er plaatselijk verdichtingen van een visueel overigens wijd gewoven wortelnet zijn. De zode valt uiteen bij loskomen van de ondergrond of valt uiteen bij geringe kracht. Slechts met de nodige voorzichtigheid kan een intacte plag (ca. $0,25 \times 0,3 \text{ m}^2$) van de graszode gestoken worden met een spade (behalve als de grond in natte toestand veelvuldig is betreden; bij het steken van een plag moet hiermee rekening worden gehouden);
- 3 **Fragmentarische doorworteling**: Fragmentarisch doorwortelde zodelaag waarin slechts plaatselijk verdichtingen van een visueel wijd gewoven wortelnet zijn en de wortelmat vaak over meer dan 0,2 m afstand nagenoeg of geheel afwezig is. Het is bijna niet mogelijk een intacte plag (ca. $0,25 \times 0,3 \text{ m}^2$) van het grondoppervlak te nemen (behalve als het oppervlak uit betreden, vochtige kleiige grond bestaat). Onder deze categorie vallen naast slecht beheerde grasbekledingen ook kale grond, ruigtebegroeiing, tuintjes, parken en dergelijke.

De kwaliteit van de grasbekleding op een talud wordt grotendeels bepaald door het beheer ervan. Strategieën van maaien, hooien, beweiding en kunstmestgiften zijn dominante parameters in het beheer. Daarnaast kunnen het daarbij ingezette materieel en bepaalde details van beweiding grote effecten hebben op de kwaliteit van de grasbekleding.

A.2 Visuele inspectie voor de beoordeling van de zodekwaliteit

De veel voorkomende begroeiingstypen voor de drie categorieën zodekwaliteit kunnen worden herkend met visuele inspectie. Zo'n visuele inspectie omvat het schatten van de bedekking van recentelijk gemaaid talud bij het lopen over de grasmat en, vooral als het gras hoger dan ca. 0,1 m staat, regelmatig in meer detail de dichtheid van de begroeiing aan het grondoppervlak na te gaan.

De representatieve plantafstand wordt hier als criterium gehanteerd voor de mate van openheid van de begroeiing. De representatieve plantafstand is het visueel globaal geschatte gemiddelde (voor een stuk van zo'n $0,3 \times 0,3 \text{ m}^2$) van de afstand tussen planten waar deze uit de grond komen. Grasbekleding met een bepaalde plantafstand kan goed herkend worden bij het lopen over de grasbekleding, maar vergt daarbij regelmatig controleren door plaatselijk het grondoppervlak van het talud zelf te bekijken. De kwaliteit van de wortelmat kan bij twijfel gecontroleerd te worden met het steken van een plag voor representatieve strekkingen met dezelfde aanblik. Deze controle kan nodig zijn omdat de bovengrondse plantendelen niet altijd eenduidig de doorworteling representeren. De controle verschaft daarnaast informatie over eventuele afwijkingen in de opbouw van de zode en aard van de grond in de zode die, waar nodig geacht, genoteerd kunnen worden.

De begroeiing die karakteristiek is voor deze drie graszodecategorïeën is als volgt beschreven:

- 1 **gesloten graszode:** Op het oog continue grasmat gedomineerd door grasblad en met, naar globale visuele inspectie, een representatieve plantafstand minder dan ongeveer 0,1 m, welke in niet meer dan 10 % van het oppervlak tot 0,2 m mag bedragen. Er mogen niet meer dan 2 ondiepe (minder dan 0,1 m) beschadigingen per vierkante meter van de grasmat groter dan 0,15 x 0,15 m² zijn en gemiddeld over 25 m² niet meer dan 5 van zulke gaten.
- 2 **open graszode:** Op het oog continue grasmat gedomineerd door grasblad en met, naar visuele inspectie, een representatieve plantafstand minder dan ongeveer 0,1 m, welke in niet meer dan 25 % van het oppervlak tot 0,25 m mag bedragen. Er mogen niet meer dan 2 ondiepe (minder dan 0,1 m) beschadigingen per vierkante meter van de grasmat groter dan 0,15 x 0,15 m² zijn en gemiddeld over 25 m² niet meer dan 5 van zulke gaten.
- 3 **fragmentarische zode:** Taludbegroeiing met meer dan 25 % van het oppervlak plantafstanden groter dan 0,25 m, veelal slechts individuele, losstaande planten, of pollen waartussen eventueel bodembedekkende kleinere planten die geen gesloten grasmat vormen.

Het beheer is ook de dominante factor voor de mate van ruwheid van een dijktaalud met grasbekleding. Een gesloten graszode vormt zich niet als het microreliëf van het grondoppervlak (binnen 0,1 m²) meer dan ongeveer 0,1 m is. Een op het oog voldoende glad talud is daarom een voorwaarde voor een voldoende gesloten graszode, naast de effecten ervan op hydraulische condities. In de later te schrijven schematiseringshandleiding zullen voorbeeldfoto's worden opgenomen om de visuele beoordeling te ondersteunen.

A.3 Eenvoudige veldproef voor de beoordeling van de zodekwaliteit

Bij twijfel over de graszodekwaliteit op basis van de visuele beoordeling (sectie A.2) kan de kwaliteit van de wortelmat en daarmee de graszode op een eenvoudige manier worden gecontroleerd door op een representatieve locatie in een homogeen geachte strekking van het talud een plag uit te steken. Er wordt met een geschikte spade een stuk zode losgesneden van ongeveer 0,25 x 0,3 m, die als plag van 70 - 100 mm dikte wordt opgetild, de kwalificatie van de doorworteling, en daarmee de zodekwaliteit, is als volgt:

- 1 **Dichte doorworteling:** Het vergt enige moeite om een losgestoken zode-plag (ca. 0,25 x 0,3 m²) uiteen te trekken: zo blijft een plag van een dichte zode grotendeels intact bij losmaken van de ondergrond met een spade;
- 2 **Open doorworteling:** Slechts met de nodige voorzichtigheid kan een intacte plag (ca. 0,25 x 0,3 m²) van de graszode gestoken worden met een spade (behalve als het vochtige keiige grond die is verdicht bij betreden of het steken zelf, hiermee moet bij het steken van een plag rekening worden gehouden);
- 3 **Fragmentarische doorworteling:** Het is bijna niet mogelijk een intacte plag (ca. 0,25 x 0,3 m²) van het grondoppervlak te nemen (behalve als het vochtige kleiige grond betreft die is verdicht bij betreden of het steken zelf, hiermee moet bij het steken van een plag rekening worden gehouden).

Het spreekt vanzelf dat de zode na beoordeling teruggeplaatst en aangedrukt wordt!

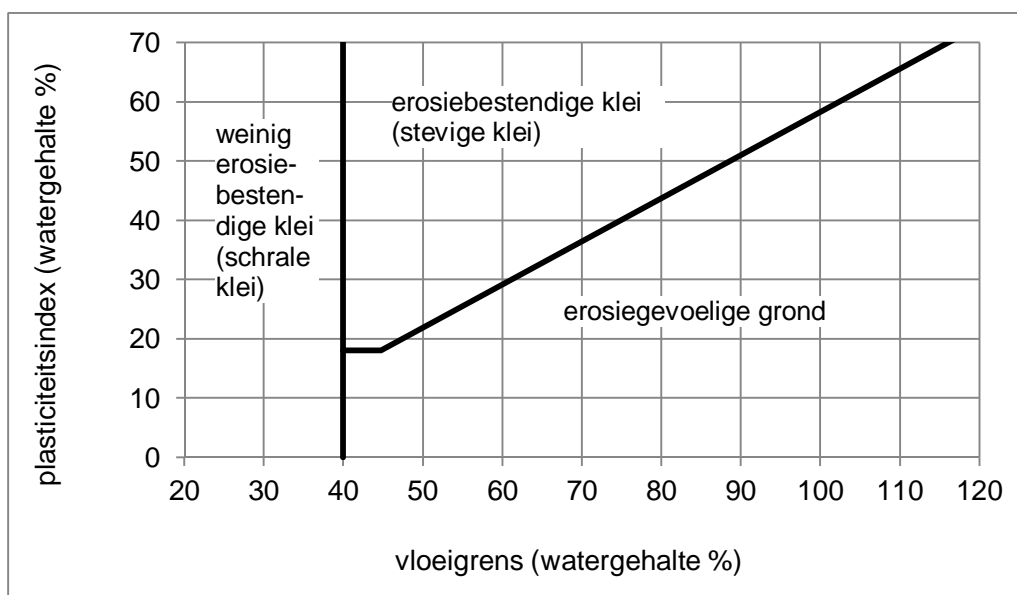
B Beschrijving kleikwaliteit [2]

Classificatie erosiebestendigheid klei

In dit rapport wordt afgeweken van de classificatie zoals opgenomen in het Technisch Rapport Klei voor Dijken, TAW 1995. Er worden drie categorieën klei met betrekking tot erosiebestendigheid onderscheiden (Figuur B.1):

- I. Erosiebestendige klei
- II. Weinig erosiebestendige klei
- III. Erosiegevoelige grond

De derde categorie grond, erosiegevoelige grond, is ongeschikt voor toepassing bij een dijkontwerp op plekken waar wordt gerekend op de erosiebestendigheid van de kleilaag. Dit kan bijvoorbeeld zijn in de golfklapzone op het buitentalud van rivierdijken. Het is niet zo dat bij een veiligheidstoetsing een dijk automatisch wordt afgekeurd als een dergelijke grond in de grasbekleding zit. Het is namelijk goed mogelijk dat de toplaag voldoende sterkte heeft. Een treffend voorbeeld is de met de golfoverslagsimulator beproefde Vechtdijk, die volledig uit zand bestaat, en zeer goed bestand was tegen een golfoverslagbelasting.



Figuur B.1 Atterberg diagram met daarin de indeling in erosiebestendige klei, weinig erosiebestendige klei en ongeschikte grond

De grenswaarde tussen beide categorieën in erosiebestendigheid met betrekking tot de Atterbergse grenzen zijn als volgt:

- een vloeigrens van 40 % en
- een plasticiteitsindex van $0,73 \times (\text{Vloeigrens} - 20)$ met een minimum van 18%

Verder geldt voor een erosiebestendige klei:

- het is afkomstig van een op natuurlijke wijze afgezet materiaal,
- het zandgehalte ($> 63 \mu\text{m}$) is maximaal 40%,

- er is minder dan 5% organisch materiaal volgens de waterstofperoxidebehandeling methode,
- er is minder dan 25% gewichts-verlies bij de HCl-behandeling,
- er zijn geen significante bijmenging van puin, grind en dergelijke en het heeft weinig heldere (rode, bruine en gele, soms blauwe) verkleuringen.

In de categorie 'erosiegevoelige grond' komen grondsoorten voor die door bijvoorbeeld een hoog gehalte aan wortels (zodegrond) of hoge ijzergehalten niet geschikt zijn voor gebruik als bekledingsklei. Zodegrond kan hooguit als dunne deklaag voor het aanslaan van grasbegroeiing worden toegepast op de kleibekledingslaag.

De in Nederland voorkomende klei ligt vaak boven de A-lijn: $0,73 \times (\text{Vloeigrens} - 20)$. In de praktijk komt het soms voor dat erosiebestendige klei in de categorie 'erosiegevoelige grond' komt door afwijkingen bij het volgens de norm bepalen van de Atterbergse grenzen. Enkele aandachtspunten bij de bepaling zijn:

- Verwijderen van eventueel aanwezige wortels. Een hoog organische stof gehalte leidt tot een hoge schatting van de vloeigrens, waardoor de klei onder de A-lijn komt.
- Het schaalpje van Cassagrande (of vloeigrens apparaat) moet worden schoongemaakt met water en gedroogd.
- Bepaling van de Atterbergse grenzen start bij veld-vochtig materiaal, niet zoals in sommige literatuur aanbevolen, oven-droog materiaal.

C GABI – formules

De formules voor de controle van de stabiliteit van de bekleding bij golfoverslag zijn grotendeels ontleend aan [8], enkele fouten uit [8] zijn verbeterd en er zijn figuren toegevoegd ter verduidelijking van de formules.

Voor de beoordeling van de stabiliteit van een kleilaag kan ook gebruik worden gemaakt van de methode Spencer – Van der Meij [7] zoals geprogrammeerd in DGeoStability. Omdat deze software geen deel uitmaakt van het WTI2017 vindt deze analyse plaats in Toetslaag 3.

C.1 Kleidijk

De formule voor de controle op afschuiven van de kleibekleding (zogenaamd Edelman en Joustra criterium):

$$\tan \phi' \geq \frac{\gamma_d \cdot \gamma_{m,\phi} \cdot \gamma_n \cdot \rho_g \cdot g \cdot \sin \alpha - \gamma_{m,\phi} \cdot \gamma_{m,\rho} \cdot \frac{c'}{\gamma_{m,c} \cdot d}}{\rho_g \cdot g \cdot \cos \alpha - \rho_w \cdot g \cos \alpha}$$

Waarin:

$\tan \phi'$	tangens van de effectieve hoek van inwendige wrijving ($^\circ$)
$\gamma_{m,\phi}$	partiële veiligheidsfactor op $\tan \phi'$ (=1,1)
c'	effectieve cohesie (Pa)
$\gamma_{m,c}$	partiële veiligheidsfactor op c' (=1,25)
ρ_g	volumieke massa natte grond (kg/m^3)
ρ_w	volumieke massa water (kg/m^3)
$\gamma_{m,\rho}$	partiële veiligheidsfactor op volumieke massa (=1,0)
α	taludhelling ($^\circ$)
g	zwaartekrachtversnelling (m/s^2)
d	laagdikte (m)
γ_d	modelfactor (=1,1)
γ_n	schadefactor (=1,1)

In termen van een safety factor (sterkte / belasting), inclusief partiële factoren wordt de formule:

$$SF_{EJ} = \frac{R}{S} = \left[\frac{1}{\gamma_d \cdot \gamma_n} \right] \cdot \frac{\tan \phi' \left(\frac{\rho_g}{\gamma_{m,\rho}} \cdot g \cdot \cos \alpha - \frac{\rho_w}{\gamma_{m,\rho}} \cdot g \cos \alpha \right) + \frac{c'}{\gamma_{m,c} \cdot d}}{\frac{\rho_g}{\gamma_{m,\rho}} \cdot g \cdot \sin \alpha}$$

De factor $1/\gamma_d \cdot \gamma_n$ hoort niet bij de sterkte en niet bij de belasting en is daarom los van de breuk geschreven. De safety factor SF_{EJ} wordt getoetst aan 1,0 (groter of gelijk is 'voldoet', kleiner is 'voldoet niet').

En als Z-functie, inclusief partiële factoren:

$$Z = R - S = \left[\frac{\tan \phi'}{\gamma_{m,\phi}} \left(\frac{\rho_g}{\gamma_{m,\rho}} \cdot g \cdot \cos \alpha - \frac{\rho_w}{\gamma_{m,\rho}} \cdot g \cos \alpha \right) + \frac{c'}{\gamma_{m,c} \cdot d} \right] - \gamma_d \cdot \gamma_n \cdot \left[\frac{\rho_g}{\gamma_{m,\rho}} \cdot g \cdot \sin \alpha \right]$$

De Z functie wordt getoetst aan 0 (groter of gelijk aan 0 is 'voldoet', kleiner is 'voldoet niet').

C.2 Zanddijk met kleibekleding

Een kleibekleding kan als gevolg van een hoog freatisch vlak in de dijk:

- opdrukken (par. C.2.1),
- uitspoeling van zand optreden (par. C.2.2)
- of afschuiven (par. C.2.3).

Afwijkend van [8] wordt gedifferentieerd naar enerzijds het mechanisme opdrukken en anderzijds het uitspoelen van zand door een kleibekleding. Hierbij hoort ook het naar beneden bijstellen van de gecombineerde partiële veiligheidsfactor voor opdrukken $\gamma_n \cdot \gamma_d$ van 2,0 [8] naar 1,21.

De factor 2 dekke naast het opdrukken van de bekleding ook andere mechanismen, zoals het uitspoelen van zand door scheuren en of gaten door graverij. Als echter kan worden aangetoond dat de kleilaag geen gaten of scheuren heeft, voordat opdrukken van de kleilaag optreedt, dan kan de factor worden bijgesteld naar 1,21 voor alleen het opdrukken van de laag. Indien gaten in de bekleding niet met voldoende zekerheid kunnen worden uitgesloten, dan moet de (strengere) toets op uitspoelen van zand worden uitgevoerd (par. C.2.2).

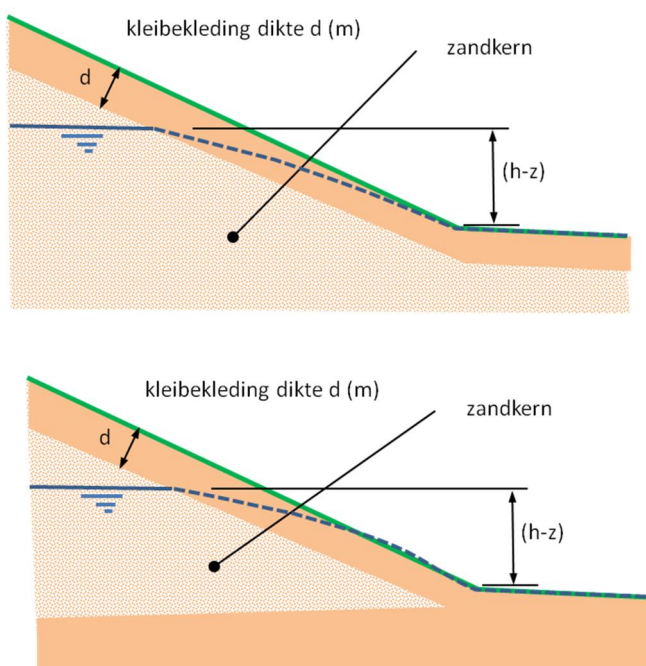
Kleilagen aan het maaiveld zijn altijd onderhevig aan bodemstructuurvormende processen, waardoor ze nagenoeg altijd enige mate van scheuren bevatten. Echter, alleen in gevallen waarbij ook onder natte omstandigheden openstaande scheuren aanwezig zijn kan uitspoelen van zand optreden. Dit kan bijvoorbeeld voorkomen indien bij aanleg de klei veel te nat is verwerkt. In dat geval zullen de scheuren zodanig breed zijn dat ze bij inspecties, zeker bij droogte, opvallen en vervolgens kunnen worden gedicht. Het risico dat zulke scheuren tijdens extreme omstandigheden nog aanwezig zijn is daarom beperkt.

Graverij ter plaatse van de binnenteen van de dijk of onderaan het talud kunnen eveneens leiden tot gaten in de kleibekleding waardoor zand kan uitspoelen. Risicovol zijn gaten die bij inspecties niet opvallen, maar wel kunnen leiden tot uitspoelen van zand. Konijnen en vossenholen tot in de zandkern vallen op. Bij graverij door kleinere beesten kan het echter onopvallend zijn of deze ook door de kleilaag heen zijn gegaan. Graverij door bijvoorbeeld muizen en mollen zijn minder bedreigend door de kleinere diameter van de gangen en doordat ze minder diep gaan. Uit golfoverslagproeven en overloopprouwen op echte dijken, met veel muizen en mollengangen, is gebleken dat bij kleilagen van 60 à 70 cm dikte er geen gangen of nestholtes waren die doordrongen tot de zandkern. Bij een kleilaag van enkele decimeters bleek dit echter wel het geval en leverde dit in combinatie met een slechte graszode al snel uitspoeling op.

Verwacht wordt dat een kleibekledingslaag, inclusief een eventueel aanwezig laagje teelaarde, van 0,8 m of dikker een acceptabel klein risico zal hebben op scheuren of graverij die leiden tot gevaar voor uitspoelen. Bij dunnere kleilagen zal ofwel specifiek moeten worden gelet op de aanwezigheid van dergelijke gangen, zodat deze vanuit inspecties kunnen worden uitgesloten, of moet worden gecontroleerd op uitspoelen van zand (par. C.2.2).

Voor de mechanismen opdrukken (par. C.2.1) en afschuiven (par. C.2.3) is een eenvoudige formule beschikbaar en een meer gedetailleerde formule die ook rekening houdt met de sterkte van de kleilaag zelf.

De aandrijvende kracht achter alle mechanismen is de grondwaterstand in de kern van de dijk, onder de bekleding, ten opzichte van het niveau van de teen van het talud (Figuur C.1). In de figuur zijn twee situaties gegeven, bovenaan een zanddijk met een zandberm en onderaan een zanddijk op een ondoorlatende ondergrond. Een zanddijk met een zandberm zal in veel gevallen weer op een ondoorlatende ondergrond zijn opgebouwd.



Figuur C.1 Schematische weergave zanddijk met kleibekleding, ligging freatisch vlak in de zandkern en definities van kleilaagdikte en parameter $(h-z)$

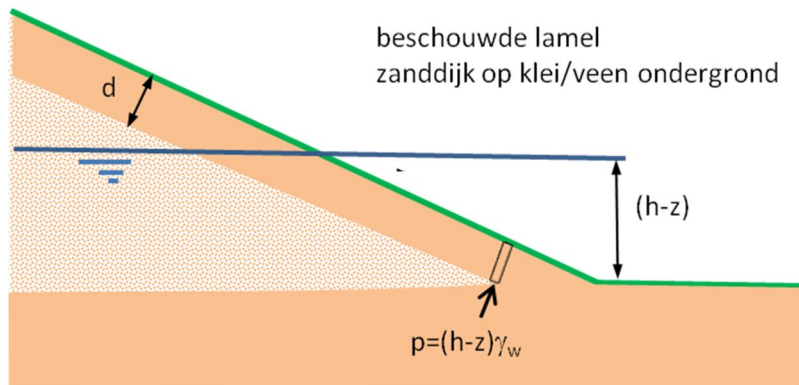
Het freatisch vlak ligt onder dagelijkse omstandigheden in de meeste gevallen onder het teenniveau. Als gevolg van een hoge buitenwaterstand en infiltratie in de golfoploopzone en, in geval van overslag, ook op de kruin en het binnentalud zal het freatisch vlak in de dijk stijgen. De stijging en uiteindelijk de maximale hoogte van het freatisch vlak onder het binnentalud tijdens een hoogwater is afhankelijk van veel factoren:

- De ligging van het freatisch vlak aan het begin van het hoogwater.
- Het waterstandverloop in de tijd en eventueel golven en golfoverslag.
- De opbouw van de dijk en de ondergrond, de doorlatendheid en het bergend vermogen van de diverse grondlagen en bekledingen. Met het bergend vermogen wordt bedoeld, de hoeveelheid water die door de grond wordt opgenomen in de poriën om te komen van het initiële vochtgehalte tot volledige verzadiging.

Met inschattingen of bepalingen van deze parameters en invloedfactoren kan een grondwaterstromingsberekening worden gemaakt naar de maximale h tijdens een hoogwater. De stabiliteit van de bekleding kan vervolgens worden gecontroleerd met de onderstaande formules.

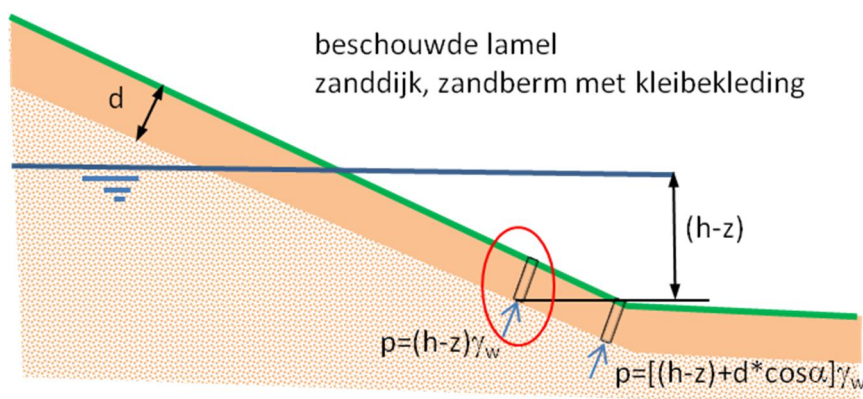
C.2.1 Opdrukken van de kleibekleding

De eenvoudige formule beschouwt het loodrecht evenwicht van een lamel kleibekleding, waarvan de onderkant op het niveau z ligt. Hierbij is uitgegaan van de situatie waarbij de zanddijk op een slecht doorlatende laag ligt. (Figuur C.2).



Figuur C.2 Beschouwde lamel loodrecht evenwicht (opdrukken)

In de praktijk hebben zanddijken vaak ook een zandberm met daarop een kleibekleding (Figuur C.3).



Figuur C.3 Beschouwde lamel loodrecht evenwicht (opdrukken)

In dit laatste geval van een zanddijk met zandberm kan de opdruk stabiliteit ongunstiger worden, omdat de waterdruk onder een dieper gelegen lamel, zoals aangegeven in Figuur C.3, $d \cdot \cos \alpha \cdot \gamma_w$ hoger kan zijn. Deze waterdruk kan hier echter alleen optreden als er helemaal geen polderwaartse afstroming van water door de berm mogelijk is, wat in de praktijk onwaarschijnlijk is. Zowel de plaats van de meest ongunstige lamel en de waterdruk zijn onzeker. In de formule uit [8] wordt uitgegaan van de situatie in Figuur C.3. Verondersteld wordt dat onzekerheden worden afgedekt door de modelfactor.

De wrijving langs de wanden van de lamel worden in de formule verwaarloosd, hetgeen leidt tot:

$$\cos \alpha \geq \frac{\gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \gamma_{m,\rho} \cdot \rho_w (h-z)}{\rho_g \cdot d}$$

Waarin:

- ρ_g volumieke massa natte grond (kg/m^3)
- ρ_w volumieke massa water (kg/m^3)
- $\gamma_{m,\rho}$ partiële veiligheidsfactor op volumieke massa grond (=1,0)
- α taludhelling ($^\circ$)
- d laagdikte (m)
- $(h-z)$ ligging van het freatisch vlak onder het binnentalud ten opzichte van een niveau (m)
- $\gamma_d \cdot \gamma_n$ modelfactor x schadefactor (=1,1x1,1=1,21)

In safety-factor vorm:

$$SF = \frac{R}{S} = \frac{1}{\gamma_n \cdot \gamma_d} \frac{\cos \alpha \cdot d \cdot \frac{\rho_g}{\gamma_{m,\rho}}}{(h-z) \rho_w}$$

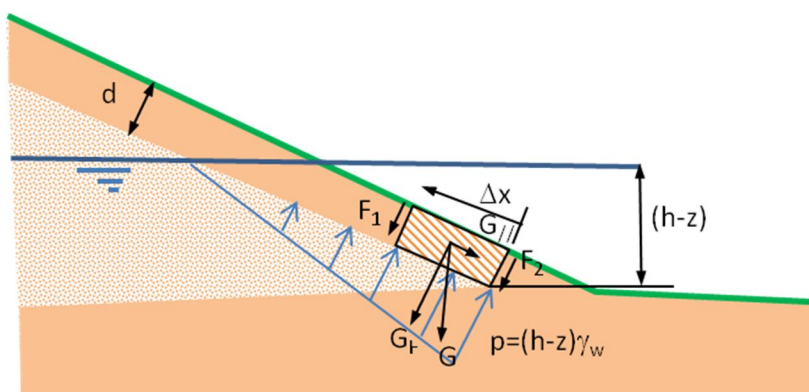
Net als bij de eerder formule in safety-factor vorm wordt getoets aan 1.

De formule als Z-functie:

$$Z = R - S = \left[\cos \alpha \cdot d \cdot \frac{\rho_g}{\gamma_{m,\rho}} \right] - \gamma_n \cdot \gamma_d [(h-z) \rho_w]$$

Net als bij de eerdere Z-functie wordt getoetst aan 0.

Een meer gedetailleerde formule houdt wel rekening met de wrijving langs de randen van de opgedrukte grondmoot (Figuur C.4).



Figuur C.4 Schematische weergave loodrecht evenwicht grondmoot met diverse krachten

De krachten F_1 en F_2 werken langs de randen van de beschouwde grondmoot. Aangenomen wordt dat F_1 gelijk is aan de cohesie c' keer de dikte en dat bij F_2 naast het effect van de cohesie ook de parallelle component van het gewicht keer de wrijvingshoek wordt opgeteld $G/\tan\phi'$.

In formulevorm met partiële veiligheidsfactoren wordt de formule dan als volgt:

$$\frac{2c' \cdot d}{\gamma_{m,c}} + \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \Delta x \cdot d \cdot \cos \alpha + \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \Delta x \cdot d \cdot \sin \alpha \frac{\tan \phi'}{\gamma_{m,\phi}} \geq \gamma_n \cdot \gamma_d \left(\Delta h - \frac{1}{2} \Delta x \cdot \sin \alpha \right) \frac{\rho_w \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \Delta x$$

Waarin:

$\tan\phi'$	tangens van de effectieve hoek van inwendige wrijving ($^{\circ}$)
$\gamma_{m,\phi}$	partiële veiligheidsfactor op $\tan\phi'$ (=1,1)
c'	effectieve cohesie (Pa)
$\gamma_{m,c}$	partiële veiligheidsfactor op c' (=1,25)
ρ_g	volumieke massa natte grond (kg/m^3)
ρ_w	volumieke massa water (kg/m^3)
$\gamma_{m,\rho}$	partiële veiligheidsfactor op volumieke massa (=1,0)
α	taludhelling ($^{\circ}$)
g	zwaartekrachtversnelling (m/s^2)
d	laagdikte (m)
Δh	=(h-z) ligging van het freatisch vlak ten opzichte van een niveau (m)
Δx	kritische lengtemaat langs het talud (m)
$\gamma_d \cdot \gamma_n$	modelfactor x schadefactor (=1,1x1,1=1,21)

In safety-factor vorm:

$$SF = \frac{R}{S} = \frac{1}{\gamma_n \cdot \gamma_d} \cdot \frac{\frac{2c' \cdot d}{\gamma_{m,c}} + \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \Delta x \cdot d \cdot \cos \alpha + \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \Delta x \cdot d \cdot \sin \alpha \frac{\tan \phi'}{\gamma_{m,\phi}}}{\left(\Delta h - \frac{1}{2} \Delta x \cdot \sin \alpha\right) \frac{\rho_w \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \Delta x}$$

In de vorm van een Z-functie:

$$Z = R - S = \frac{2c' \cdot d}{\gamma_{m,c}} + \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \Delta x \cdot d \cdot \cos \alpha + \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \Delta x \cdot d \cdot \sin \alpha \frac{\tan \phi'}{\gamma_{m,\phi}} - \gamma_n \cdot \gamma_d \left(\Delta h - \frac{1}{2} \Delta x \cdot \sin \alpha\right) \frac{\rho_w \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \Delta x$$

In [8] wordt Δx gevarieerd om de kritische waarde te vinden. Dit kan vrij eenvoudig met behulp van een spreadsheet.

Bij een gegeven Δh (=h-z) kan de kritische waarde van Δx , waarbij de SF minimaal is, echter ook analytisch worden gevonden. Δx varieert tussen 0 en de maximale waarde $\Delta h/\sin\alpha$. Het minimum op dit interval kan worden gevonden door de afgeleide $dSF/d\Delta x$ gelijk te stellen aan 0 en hieruit Δx op te lossen. Dit leidt tot:

$$\Delta x = \frac{-2AD \pm \sqrt{4A^2D^2 - 4ABCD}}{2BD} \quad \text{waarin:}$$

$$A = \frac{2c \cdot d}{\gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \gamma_{m,c}}$$

$$B = \frac{\rho_g \cdot g \cdot d}{\gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \gamma_{m,\rho}} \left(\cos \alpha + \sin \alpha \frac{\tan \phi}{\gamma_{m,\phi}} \right)$$

$$C = \Delta h \frac{\rho_w \cdot g}{\gamma_{m,\rho}}$$

$$D = -\frac{1}{2} \cdot \sin \alpha \frac{\rho_w \cdot g}{\gamma_{m,\rho}}$$

Invullen van deze Δx in: $SF = \frac{A + B\Delta x}{C\Delta x + D\Delta x^2}$ geeft vervolgens de minimale SafetyFactor.

Ter controle bij eventueel programmeerwerk wordt het volgende voorbeeld gegeven.

INVOER 1

ϕ'	= 25°
$\gamma_{m,\phi}$	= 1,1 (let op deze gaat over $\tan \phi'$, niet over ϕ' .)
c'	= 2000 Pa
$\gamma_{m,c}$	= 1,25
ρ_g	= 1630 kg/m ³
ρ_w	= 1000 kg/m ³
$\gamma_{m,\rho}$	= 1,0
$\tan \alpha$	= 1/3 (-)
g	= 9,81 m/s ²
d	= 0,8 m
Δh	= (h-z) = 0,9 m
$\gamma_{\alpha'} \gamma_n$	= 1,21

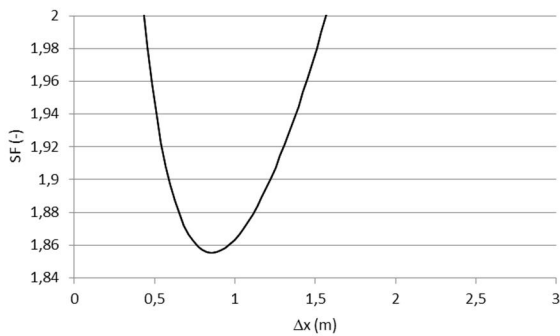
RESULTAAT 1

Met de bovenstaande parameters worden de onderstaande parameters A-D, Δx en SF berekend.

A	2115,7
B	11446,8
C	8829,0
D	-1551,1
Δx	0,8574
SFmin	1,8555

De safety factor is groter dan 1, de stabiliteit van de kleibekleding tegen opdrukken voldoet aan de eisen.

Het lokale minimum van $SF(\Delta x)$ staat in Figuur C.5.



Figuur C.5 Grafiek van SF (-) tegen Δx voor het bovengenoemde voorbeeld.

INVOER 2

ϕ'	= 20°
$\gamma_{m,\phi}$	=1,1 (let op deze gaat over $\tan\phi'$, niet over ϕ' .)
c'	=1000 Pa
$\gamma_{m,c}$	=1,25
ρ_g	=1750 kg/m ³
ρ_w	=1025 kg/m ³
$\gamma_{m,\rho}$	=1,0
$\tan\alpha$	=1/2,8 (-)
g	=9,81 m/s ²
d	=0,7 m
Δh	=(h-z) = 1,25 m
$\gamma_d \cdot \gamma_n$	= 1,21

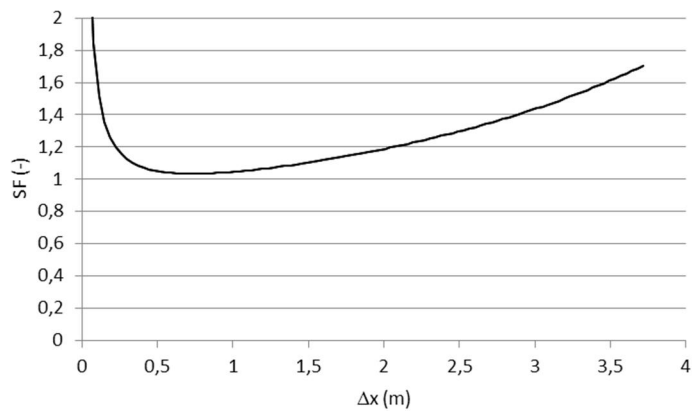
RESULTAAT 2

Met de bovenstaande parameters worden de onderstaande parameters A-D, Δx en SF berekend.

A	925,6
B	10458,3
C	12569,1
D	-1691,0
Δx	0,7274
SFmin	1,0345

De safety factor is groter dan 1, de stabiliteit van de kleibekleding tegen opdrukken voldoet aan de eisen.

Het lokale minimum van $SF(\Delta x)$ staat in Figuur C.6.



Figuur C.6 Grafiek van SF (-) tegen Δx voor het bovengenoemde voorbeeld.

C.2.2 Uitspoelen van zand door een kleibekleding

Er bestaat weinig validatiemateriaal voor het mechanisme. Bij een overloopproef op een steile dijk bij Wissenkerke in 1993 trad water dat infiltreerde in het talud geconcentreerd uit onderaan het talud. Hierbij werd grond/zand meegevoerd en bezweek het binnentalud binnen een uur bij een overstroombediet in de orde van 1 l/s/m. Bij een overslagproef op Tholen gebeurde eenzelfde soort mechanisme bij een talud van 1:2,4 en een overslagbediet van 5 l/s/m. De dikte van de kleibekleding was hier zeer variabel en soms zeer dun (plaatselijk hooguit enkele decimeters). Een geconcentreerde stroming uit een mollengang voerde zand mee en ondermijnde in korte tijd het talud, waarna de golfoverslag verder afrekende met de bekleding. De waarnemingen tonen aan dat sommige dijken gevoelig kunnen zijn voor het uitspoelen van zand door een kleibekleding, zeker indien dit optreedt in combinatie met overloop of overslag.



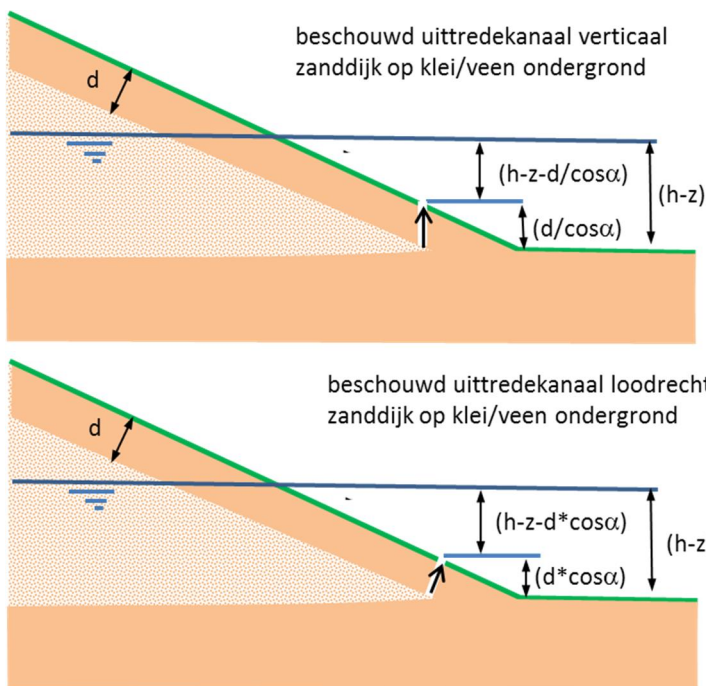
Figuur C.7 Uitspoelen van zand door een molgang onderaan het talud, gevolgd door ondermijning van de kleilaag en falen van de bekleding (Golfverslagproef Tholen [2]).

Het uitspoelen van zand uit de kleilaag kan worden gemodelleerd door het optredende verhang te vergelijken met een kritisch verhang. Het optredend verhang kan worden gescaht door het verschil tussen de grondwaterstand in de zandkern en de ligging van de bovenkant van het uittredekanaal (h), gedeeld door de lengte van het uittredekanaal. Hierbij heeft de oriëntatie van het uittredenkanaal een zekere invloed.

Opgemerkt wordt dat voeding van water vanuit een verzadigd medium (zandkern) anders, langzamer, werkt dan vanuit vrij buitenwater. Dit zou met behulp van grondwaterstromingsberekeningen en eventueel experimenteel onderzoek kunnen worden onderzocht.

Het kritisch verhang is het verhang waarbij zandtransport optreedt. In theorie zal bij een verticaal gericht verhang in een zandpakket gelijk aan $(\rho_g - \rho_w) / \rho_w$ drijfzand ontstaan. Voor normaal gepakt zand met $\rho_g = 2000 \text{ kg/m}^3$ levert dit een kritisch verhang van 1 (-). De korrelspanning is in deze situatie 0 (Pa), het korrelskelet zweeft als het ware in het water. Bij het opbarsten van een horizontaal klei- en of veenpakket kan in de praktijk eerder zandtransport optreden, namelijk bij een verhang van ca. 0,8-1 (-). Een tot nu toe geaccepteerd veilig criterium voor verticaal zandtransport is 0,5 (-) (LOR1).

Als het uittredekanaal een gevolg is van opdrukken of opbarsten van de kleilaag of het gevolg van een scheur door te nat aangebracht materiaal, dan is het waarschijnlijk dat het uittredekanaal een oriëntatie heeft die loodrecht op het talud tot verticaal is. Alleen als het uittredekanaal een gevolg is van graverij, of een slechte inkassing van de kleilaag op de ondergrond dan kan de oriëntatie flauwer worden. Voor sterk van verticaal afwijkende oriëntaties van het uittredekanaal is onbekend in hoeverre het kritisch verhang afneemt. Het verdient de aanbeveling om de kans op voorkomen van deze situaties en de gevolgen voor de veiligheid te onderzoeken. Op dit moment wordt het echter buiten beschouwing gelaten. Bij een kleine afwijking van de verticaal is een correctie met een $\cos\alpha$ denkbaar, zonder dat hiervoor overigens een goede onderbouwing is.



Figuur C.8 Schematische weergave oriëntatie uittredekanal met verval gegeven een grondwaterstand (h-z) in de zandkern

Het verhang over het uittredekanal voor de drie bovenstaande gevallen is gelijk aan:

$$i_{\text{vertikaal}} = \frac{h-z - \frac{d}{\cos \alpha}}{\frac{d}{\cos \alpha}} = \frac{(h-z)}{d} \cos \alpha - 1$$

$$i_{\text{loodrecht}} = \frac{h-z - d \cos \alpha}{d} = \frac{h-z}{d} - \cos \alpha$$

Voor het kritisch verhang kan bijvoorbeeld, zonder verdere onderbouwing of onderzoek, bij benadering worden uitgegaan van:

$$i_{k,\text{vertikaal}} = 0.5$$

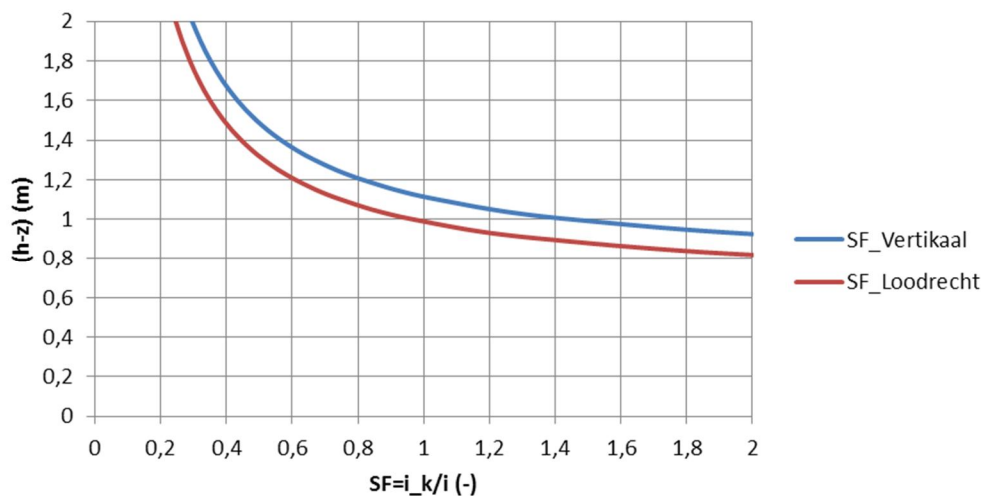
$$i_{k,\text{loodrecht}} = \cos \alpha \cdot 0.5$$

Door het kritische verhang te delen door het optredende verhang kan een veiligheidsfactor (SF; safety factor) worden berekend. Dit leidt tot de volgende formules:

$$SF_{\text{vertikaal}} = \frac{i_{k,\text{vertikaal}}}{i_{\text{vertikaal}}} = \frac{0.5}{\frac{(h-z)}{d} \cos \alpha - 1} = \frac{0.5d}{(h-z) \cos \alpha - d}$$

$$SF_{loodrecht} = \frac{i_{k,loodrecht}}{i_{loodrecht}} = \frac{0.5 \cos \alpha}{\frac{h-z}{d} - \cos \alpha} = \frac{0.5 \cdot d \cdot \cos \alpha}{(h-z) - d \cdot \cos \alpha}$$

Het effect van deze formules is inzichtelijk gemaakt voor een gangbaar talud 1:2,8 van een zanddijk met een kleibekleding van 0,7 m dikte. Voor de twee scenario's is de veiligheidsfactor (SF) uitgezet tegen de belasting (h-z) (Figuur C.9).

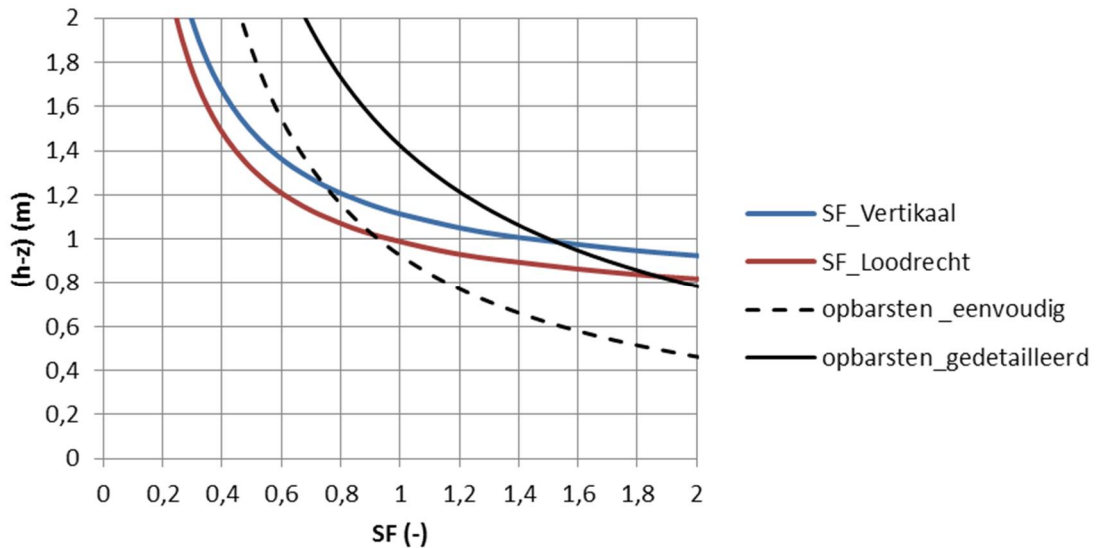


Figuur C.9 SF tegen (h-z) voor twee scenario's: verticaal uittredkanaal, loodrecht uittredkanaal en een horizontaal uittredkanaal

De kritische stijghoogte (h-z) in de zandkern bij verticaal uittreden is gelijk aan 1,1 m en bij loodrecht uittreden 1,0 m. De verschillen tussen 'verticaal' en 'loodrecht' zijn gering. Voor de toetsing moet gebruik worden gemaakt van de formule voor 'loodrecht'.

Boven de kritische waarden van (h-z) zal uitspoelen van zand mogelijk zijn, mits er een scheur of gat aanwezig is in de bekleding, ofwel door bodemstructuurvormende processen en graverij, ofwel als gevolg van opbarsten. Opgemerkt wordt dat dat voor het kritische verhang de veilige waarde van 0,5 (-) is aangehouden.

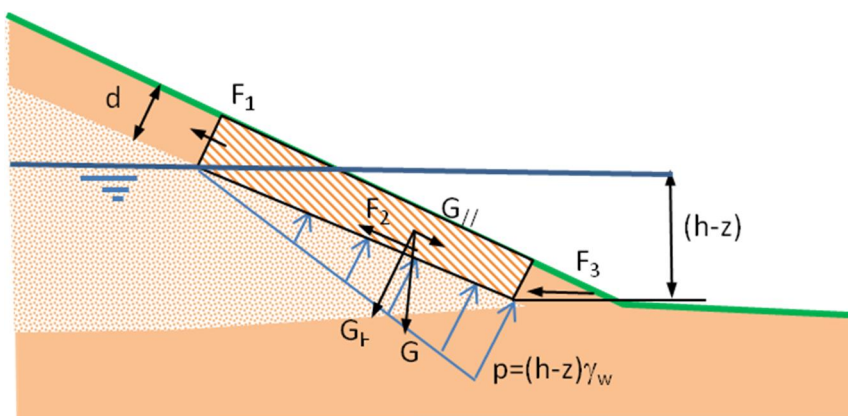
Indien kan worden aangetoond dat de kleibekleding aanvankelijk geen gaten of scheuren in de teen van de dijk heeft (zie inleidende tekst bij par.C.2), dan zal eerst opdrukken van de kleilaag moeten optreden voordat uitspoeling van zand mogelijk is. Hiervoor gelden de formules zoals beschreven in paragraaf C.2.1. Voor de gedetailleerde formule moet ook de sterkte van de grond middels een c en ϕ worden ingevuld. Uitgaande van $c=2$ kPa en $\phi=25^\circ$, redelijk gangbare parameters, kunnen de onderstaande SF-lijnen worden berekend (Figuur C.10), afhankelijk van de belasting (h-z). Bij de formules uit C.2.1 is gebruik gemaakt van de naar beneden bijgestelde veiligheidsfactor van 1,21 in plaats van 2,0 uit [8].



Figuur C.10 SF voor uitspoelen en opbarsten tegen belasting $(h-z)$ in één grafiek (opdrukken $\gamma_d \cdot \gamma_n = 2,0$)

De eenvoudige formule voor opdrukken (lamel zonder wrijving) geeft een kritische $(h-z)$ van 0,9 m, de gedetailleerde formule geeft 1,4 m. Indien de kleilaag geen gaten en scheuren heeft, dan kan dus een extra verval van 0,4 m worden toegelaten over de kleilaag. Indien er bij een verval van 1,4 m werkelijk opbarsten van de laag optreedt, dan is het verhang over de laag ook gelijk groot genoeg om uitspoeling van zand te geven.

C.2.3 Afschuiven van de kleibekleding



Figuur C.11 Schematische weergave krachten op een grondmoot voor beschrijving evenwicht parallel aan het talud

In [9] wordt als eerste stap voor de controle op afschuiven gekeken of krachten F_1 en F_2 voldoende zijn om het gewicht $G_{//}$ te weerstaan (Figuur C.11). Hierin wordt gesteld dat kracht F_1 gelijk is aan de cohesie c' keer de dikte d . F_2 is een resultaat van de wrijving tussen de beschouwde kleibekleding en de zandkern.

$$F_1 = \frac{c' d}{\gamma_{m,c}}$$

$$F_2 = \frac{c'}{\gamma_{m,c}} \cdot \frac{\Delta h}{\sin \alpha} + \left(\cos \alpha \cdot \frac{\Delta h}{\sin \alpha} \cdot d \cdot \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} - \frac{1}{2} \cdot \sin \alpha \cdot \frac{\rho_w \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \cdot \Delta h^2 \right) \frac{\tan \phi'}{\gamma_{m,\phi}}$$

$$G_{//} = \sin \alpha \cdot \frac{\Delta h}{\sin \alpha} \cdot d \cdot \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} = \Delta h \cdot d \cdot \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}}$$

De overweging of F_1 en F_2 voldoende zijn om $G_{//}$ te weerstaan leidt hiermee tot de formule:

$$F_1 + F_2 \geq G_{//}$$

$$\frac{c' d}{\gamma_{m,c}} + \frac{c'}{\gamma_{m,c}} \cdot \frac{\Delta h}{\sin \alpha} + \left(\cos \alpha \cdot \frac{\Delta h}{\sin \alpha} \cdot d \cdot \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} - \frac{1}{2} \cdot \sin \alpha \cdot \frac{\rho_w \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \cdot \Delta h^2 \right) \tan \phi' \geq \Delta h \cdot d \cdot \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}}$$

Kanttekeningen die bij de bovenstaande beredenering uit [9] kunnen worden geplaatst zijn dat er in het algemeen geen trekkracht aan grond wordt toegekend, waardoor F_1 gelijk aan 0 moet zijn. Tevens zou bij de bepaling van F_2 twee berekeningen moeten worden gemaakt, één met de wrijvingseigenschappen van het zand ($c'=0$) en één met de wrijvingseigenschappen van de klei. De laagste is maatgevend.

Volgens [9] is een tweede stap om te kijken of het eventuele tekort aan reactiekracht kan worden gecompenseerd met F_3 , de reactiekracht die de teen kan leveren. In [9] wordt dat als volgt geformuleerd, de resterende kracht is $F_{res}=G_{//}-F_1-F_2$. Deze kracht moet kleiner of gelijk zijn aan F_3 , ofwel $G_{//}-F_1-F_2 \leq F_3$. De kracht F_3 is gelijk aan:

$$F_3 = \frac{c'}{\gamma_{m,c}} \cdot \frac{d}{\sin \alpha} + \frac{1}{2} \cdot \frac{d^2}{\sin \alpha} \cdot \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \cdot \frac{\tan \phi'}{\gamma_{m,\phi}}$$

Hierbij gelden een paar opmerkingen:

- Impliciet wordt bij het uitrekenen van de wrijvingskracht uitgegaan van droge grond op het vlakje waarlangs F_3 werkt, wat in de meeste gevallen optimistisch zal zijn.
- De drukkracht vanuit de afschuivende grondmoot F_{res} wordt niet meegenomen bij de bepaling van reactiekracht door wrijving, wat juist weer pessimistisch zal zijn.
- De krachten F_{res} en F_3 werken niet in dezelfde richting, maar worden toch niet ontbonden wat leidt tot een optimistische uitkomst.
- Het gewicht van het grondmootje bij de teen wordt niet correct berekend ($0.5 \cdot d^2 / \sin \alpha$ in plaats van $0.5 \cdot d^2 / \tan \alpha$). Voor flauwe hoeken is het verschil gering, voor grotere hoeken neemt het verschil toe. De fout leidt tot een optimistische schatting van de reactiekracht.

Er wordt vanuit gegaan dat de optimistische en pessimistische effecten ongeveer tegen elkaar zullen wegvallen en als geheel niet veel invloed zullen hebben op het toetsresultaat.

Toevoeging van de kracht F_3 (conform [9]) en een model schadefactor en het verwijderen van F_1 (grond heeft geen treksterkte) levert de formule voor afschuiven van de bekleding in toetslaag 2. Dit is dezelfde formule als in [8], echter zonder F_1 .

$$\gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \left(\Delta h \cdot d \cdot \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} - \frac{c'}{\gamma_{m,c}} \cdot \frac{\Delta h}{\sin \alpha} - \left(\cos \alpha \cdot \frac{\Delta h}{\sin \alpha} \cdot d \cdot \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} - \frac{1}{2} \cdot \sin \alpha \cdot \frac{\rho_w \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \cdot \Delta h^2 \right) \frac{\tan \phi'}{\gamma_{m,\phi}} \right)$$

$$\leq \frac{c}{\gamma_{m,c}} \cdot \frac{d}{\sin \alpha} + \frac{1}{2} \cdot \frac{d^2}{\sin \alpha} \cdot \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \cdot \frac{\tan \phi}{\gamma_{m,\phi}}$$

Het is zuiverder om de belasting en de sterkte te scheiden voor vermenigvuldiging met de schadefactor en modelfactor. In verdere afwijking van [8] wordt de toets dus:

$$\gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \left(\Delta h \cdot d \cdot \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \right)$$

$$\leq \frac{c}{\gamma_{m,c}} \cdot \frac{d}{\sin \alpha} + \frac{1}{2} \cdot \frac{d^2}{\sin \alpha} \cdot \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \cdot \frac{\tan \phi}{\gamma_{m,\phi}} + \frac{c'}{\gamma_{m,c}} \cdot \frac{\Delta h}{\sin \alpha} + \left(\cos \alpha \cdot \frac{\Delta h}{\sin \alpha} \cdot d \cdot \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} - \frac{1}{2} \cdot \sin \alpha \cdot \frac{\rho_w \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \cdot \Delta h^2 \right) \frac{\tan \phi'}{\gamma_{m,\phi}}$$

In Z-functie vorm wordt dit:

$$Z = R - S = \frac{c'}{\gamma_{m,c}} \cdot \frac{d}{\sin \alpha} + \frac{1}{2} \cdot \frac{d^2}{\sin \alpha} \cdot \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \cdot \frac{\tan \phi'}{\gamma_{m,\phi}}$$

$$+ \frac{c'}{\gamma_{m,c}} \cdot \frac{\Delta h}{\sin \alpha} + \left(\cos \alpha \cdot \frac{\Delta h}{\sin \alpha} \cdot d \cdot \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} - \frac{1}{2} \cdot \sin \alpha \cdot \frac{\rho_w \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \cdot \Delta h^2 \right) \frac{\tan \phi'}{\gamma_{m,\phi}} - \gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \left(\Delta h \cdot d \cdot \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \right)$$

En in SF-vorm:

$$SF = \frac{R}{S} = \frac{1}{\gamma_n \cdot \gamma_d} \cdot$$

$$\frac{\frac{c}{\gamma_{m,c}} \cdot \frac{d}{\sin \alpha} + \frac{1}{2} \cdot \frac{d^2}{\sin \alpha} \cdot \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \cdot \frac{\tan \phi}{\gamma_{m,\phi}} + \frac{c'}{\gamma_{m,c}} \cdot \frac{\Delta h}{\sin \alpha} + \left(\cos \alpha \cdot \frac{\Delta h}{\sin \alpha} \cdot d \cdot \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} - \frac{1}{2} \cdot \sin \alpha \cdot \frac{\rho_w \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \cdot \Delta h^2 \right) \frac{\tan \phi'}{\gamma_{m,\phi}}}{\left(\Delta h \cdot d \cdot \frac{\rho_g \cdot g}{\gamma_{m,\rho}} \right)}$$

Net als bij voorgaande rekenregels wordt de SF getoetst aan 1 en de Z-functie aan 0.

Voor de controle van programmeerwerk wordt een voorbeeld gegeven.

INVOER

ϕ' kleilaag	= 25°
ϕ' zandkern	= 30°
$\gamma_{m,\phi}$	=1,1 (let op deze gaat over $\tan\phi'$, niet over ϕ' .)
c' kleilaag	=2 kPa
$\gamma_{m,c}$	=1,25
ρ_g	=1630 kg/m ³
ρ_w	=1000kg/m ³
$\gamma_{m,\rho}$	=1,0
$\tan\alpha$	=1/3 (-)
g	=9,81 m/s ²
d	=0,8 m
Δh	=(h-z) = 0,9 m
$\gamma_d \cdot \gamma_n$	= 1,1x1,1=1,21

RESULTAAT

De krachten zijn gelijk aan:

F_1	= 1280 N/m' (wordt niet gebruikt bij de toetsing)
F_2 klei	= 18662,73 N/m'
F_2 zand	= 17468,87 N/m'
F_2	= 17468,87 N/m' (minimum van F_2 zand en klei)
$G_{//}$	= 11513,02 N/m'
F_3	= 10907,75 N/m'

Voor de toets leidt dit tot:

$\gamma_d \cdot \gamma_n \cdot G_{//} \leq F_2 + F_3$ dus $1,21 \cdot 11513,02 \leq 17468,87 + 10907,75$ dus $13930,75 \leq 28375,99$ dus de bekleding voldoet ten aanzien van het mechanisme afschuiven.

De safety factor (SF) met deze parameters is gelijk aan 2,036932.

Opgemerkt wordt dat voor gangbare zanddijken met een kleibekleding het opdrukken (par. C.2.1) of het uitspoelen van zand (par. C.2.2) maatgevend zijn ten opzichte van het afschuiven van de bekleding.

C.3 Zanddijk talud boven water

Zanddijken, zonder kleibekleding, worden in [8] getoetst aan uitspoelen van korrels en aan afschuiven. Er wordt uitgegaan van horizontaal uit het talud tredend grondwater.

Uitspoelen wordt gecontroleerd met de formule:

$$\tan \alpha \leq \sqrt{\frac{\rho_g - \rho_w}{\rho_w \cdot \gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \gamma_{m,\rho}}} \quad (3.1)$$

Waarin:

ρ_g	volumieke massa natte grond (kg/m ³)
ρ_w	volumieke massa water (kg/m ³)
$\gamma_{m,\rho}$	partiële veiligheidsfactor op volumieke massa grond (=1,0)
α	taludhelling (°)

$\gamma_d \cdot \gamma_n$ modelfactor x schadefactor (=2)

Bij een volumieke massa van de grond van 2000 kg/m^3 (gangbaar voor verzadigd zand), is de maximaal toegelaten taludhelling iets steiler dan 1:1,5. Omdat taludhellingen steiler dan dit in de praktijk zelden voorkomen zal zelden een dijk worden afgekeurd op dit mechanisme.

Afschuiven van een zandtalud boven water, bij horizontaal uittredend grondwater wordt gecontroleerd met de formule:

$$\tan \phi' \geq \frac{\gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \gamma_{m,\phi} \cdot \rho_g \cdot g \cdot \sin \alpha}{\rho_g \cdot g \cdot \cos \alpha - \frac{\rho_w \cdot g}{\cos \alpha}} \quad (3.2)$$

Waarin:

ϕ' hoek van inwendige wrijving ($^\circ$)
 $\gamma_{m,\phi}$ =1,1 (let op deze gaat over $\tan \phi'$, niet over ϕ')
 ρ_g volumieke massa natte grond (kg/m^3)
 ρ_w volumieke massa water (kg/m^3)
 α taludhelling ($^\circ$)
 g zwaartekrachtsversnelling (m/s^2)
 $\gamma_d \cdot \gamma_n$ modelfactor x schadefactor (=1,1x1,1=1,21)

Bij een volumieke massa van de grond van 2000 kg/m^3 (gangbaar voor verzadigd zand), en $\phi'=35^\circ$ is de maximaal toegelaten taludhelling iets flauwer dan 1:4. Afschuiven is veruit maatgevend boven uitspoelen.

In Z-functie vorm:

$$Z = R - S = \frac{\tan \phi'}{\gamma_{m,\phi}} - \gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \frac{\rho_g \cdot \sin \alpha}{\rho_g \cdot \cos \alpha - \frac{\rho_w}{\cos \alpha}} \quad (3.3)$$

En in SF-vorm:

$$SF = \frac{R}{S} = \frac{1}{\gamma_n \cdot \gamma_d} \cdot \frac{\tan \phi'}{\gamma_{m,\phi}} \cdot \frac{\left(\rho_g \cdot \cos \alpha - \frac{\rho_w}{\cos \alpha} \right)}{\rho_g \cdot \sin \alpha} \quad (3.4)$$

C.4 Zanddijk talud onder water

Ook voor een zandtalud onder water met een uittredend verhang worden in het [8] formules afgegeven. Deze zijn typisch bedoeld voor micro-instabiliteit, een grondwaterstroming door de dijk. Deze wordt waarschijnlijk veel minder beïnvloed door infiltratie door overslag (de taluds bevinden zich al onder water). Deze formules worden voor het toetspoot GABI buiten beschouwing gelaten. Voor de volledigheid worden ze toch gegeven.

De aandrijvende kracht voor het uitspoelen van zandkorrels uit een onderwatertalud en het afschuiven van een zandtalud onder water is het buitenwaarts gerichte verhang i (-). Bij een talud onder water zal het grondwater loodrecht uittreden. De grootte van het verhang moet worden bepaald met een grondwaterstromingsberekening.

De controle op uitspoelen van zandkorrels gebeurt met de formule:

$$\cos \alpha \geq \frac{\gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \gamma_{m,\rho} \cdot i_{\perp} \rho_w}{\rho_g - \rho_w}$$

Waarin:

- ρ_g volumieke massa natte grond (kg/m^3)
- ρ_w volumieke massa water (kg/m^3)
- $\gamma_{m,\rho}$ partiële veiligheidsfactor op volumieke massa grond (=1,0)
- α taludhelling onderwatertalud ($^{\circ}$)
- i_{\perp} buitenwaarts gericht verhang (-)
- $\gamma_d \cdot \gamma_n$ modelfactor x schadefactor (=2 voor loodrecht evenwicht)

Let op, in [8] staat ten onrechte $\gamma_{m,\phi}$ in plaats van $\gamma_{m,\rho}$.

Voor een talud van 1V:3H en $\rho_g=2000 \text{ kg/m}^3$ leidt dit tot een kritisch verhang $i_{\perp} = 0,78 \text{ (m/m)}$, wat onder normale condities groot is en vaak zal leiden tot 'voldoet'.

De controle op afschuiven van een zandtalud ($c'=0 \text{ Pa}$) onder water gaat met de formule:

$$\tan \phi' \geq \frac{\gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \gamma_{m,\phi} (\rho_g - \rho_w) \cdot \sin \alpha}{\rho_g \cdot \cos \alpha - \rho_w (\cos \alpha + i_{\perp})}$$

- ρ_g volumieke massa natte grond (kg/m^3)
- ρ_w volumieke massa water (kg/m^3)
- ϕ' hoek van inwendige wrijving ($^{\circ}$)
- $\gamma_{m,\phi}$ partiële veiligheidsfactor op $\tan \phi'$ (=1,1)
- α taludhelling onderwatertalud ($^{\circ}$)
- i_{\perp} buitenwaarts gericht verhang (-)
- $\gamma_d \cdot \gamma_n$ modelfactor x schadefactor (=1,1x1,1=1,21 voor evenwijdig evenwicht)

Voor een talud van 1V:3H, $\rho_g=2000 \text{ kg/m}^3$ en $\phi'=35^{\circ}$ leidt dit tot een kritisch verhang $i_{\perp} = 0,34758 \text{ (m/m)}$.