

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat Zeeland
Projectbureau Zeeweringen



Black box model voor afschuiving bij steenzettingen

Onderzoeksprogramma
Kennisleemtes Steenbekledingen

Analyse Deltagootonderzoek

november 2007
H4635

Ministerie van Verkeer en Waterstaat



Rijkswaterstaat



wL | delft hydraulics

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat Zeeland, Projectbureau
Zeekeringen

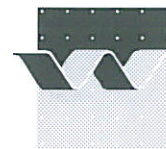
Kennisleemtes Steenbekledingen

Black box model voor afschuiving bij steenzettingen

ir M. Klein Breteler

Rapport

november 2007



OPDRACHTGEVER:	Rijkswaterstaat Zeeland, Projectbureau Zeeweringen							
TITEL:	Black box model voor afschuiving bij steenzettingen							
SAMENVATTING:	<p>Ingevolge de Wet op de Waterkering dienen steenzettingen op waterkeringen vijfjaarlijks getoetst te worden. In de praktijk kan aan veel steenzettingen geen definitief toetsoordeel toegekend worden wegens een gebrek aan wetenschappelijke kennis.</p> <p>In 2003 is daarom door de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen opgestart, zie bijlage A. Doel van dit programma is het reduceren van deze kennisleemtes teneinde te komen tot scherpere toetsregels en daarmee sneller en vaker tot definitieve toetsresultaten. In het kader van dit onderzoeksprogramma heeft voorliggende rapport betrekking op het deelonderzoek B.1.1 "toetsregel afschuiving".</p> <p>Het onderhavige onderzoek richt zich op het opstellen van een black-box model dat de relatie geeft tussen de hydraulische omstandigheden (waterstand, grondwaterstand, golfhoogte en periode) en de eigenschappen van de steenbekleding (taludhelling, toplaagdikte, filterlaag, kleilaagdikte en wellicht de klei-eigenschappen) enerzijds en het al dan niet optreden van het bezwijkmechanisme anderzijds. Dit black-box model moet uiteindelijk bruikbaar worden voor het toetsen van steenzettingen op het mechanisme afschuiving (grondmechanische instabiliteit) voor dijken met een taludhelling van 1:3 à 1:4. Het onderzoek beperkt zich tot steenzettingen op een kleilaag, met eventueel een filterlaag en/of geotextiel ertussen. Onder de kleilaag bevindt zich het zand van de dijk kern.</p>							
REFERENTIES:	Contract ZLDO 35060309 Projectleider PBZ: Y. Provoost Projectbegeleider DWW: M.C.J. Bosters							
VER	AUTEUR		DATUM	OPMERK.	REVIEW		GOEDKEURING	
0	M. Klein Breteler		5-10-'06		B. Hofland		M.R.A. van Gent	
1	M. Klein Breteler		26-11-'07		B. Hofland		M.R.A. van Gent	
PROJECTNUMMER:	H4635							
TREFWOORDEN:	steenzettingen, afschuiving, toetsing							
AANTAL BLADZIJDEN:	22							
VERTROUWELIJK:	<input type="checkbox"/> JA			<input checked="" type="checkbox"/> NEE				
STATUS:	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG			<input type="checkbox"/> CONCEPT		<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF		

Inhoud

1	Inleiding	1
2	Mechanisme	3
3	Invloedsparameters	10
4	Samenvatting van de Deltagootproeven.....	12
5	Toetscriterium voor het mechanisme afschuiving.....	15
6	Conclusies	17
	Referenties	18
A	Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen.....	19

Lijst van symbolen

b	= dikte van de filterlaag (m)
b_{klei}	= dikte van de kleilaag (m)
c_g	= constante, die het aandeel van de golfbelasting weergeeft (-)
D	= dikte van de toplaag (m)
G	= gewichtsc component haaks op het talud van de bekleding (toplaag, filter en kleilaag) per m^2 , uitgedrukt in meters waterkolom (zie figuur 3.1) (m)
GWS	= de gemiddelde waterstand t.o.v. NAP zonder storm of hoogwater (\approx NAP) (m)
h	= waterstand in de goot (m)
H_s	= significante golfhoogte (m)
n	= porositeit van het filter (-)
s_{op}	= $H_s/(1,56T_p^2)$ = golfsteilheid (-)
T_p	= golfperiode bij de top van het spectrum (s)
TP	= toetspeil ten opzichte van NAP (m)
α	= taludhelling ($^\circ$).
Δ	= $(-1 + \rho_s/\rho)$ = relatieve soortelijke massa van de toplaag (-)
Δ_f	= $(-1 + \rho_f/\rho)$ = relatieve soortelijke massa van de filterkorrels (-)
Δ_{klei}	= $(-1 + \rho_{\text{klei}}/\rho)$ = relatieve soortelijke massa van de klei (-)
ρ	= soortelijke massa van water (kg/m^3)
ρ_s	= soortelijke massa van de toplaag (kg/m^3)
ρ_f	= soortelijke massa van de filterkorrels (kg/m^3)
ρ_{klei}	= soortelijke massa van de klei (kg/m^3)
ξ_{op}	= brekerparameter (-)
$\phi_{\text{min}2\%}$	= minimale stijghoogte op het talud tijdens het optreden van het golf front met 2% overschrijdingsfrequentie (m)
ϕ_{sz}	= statisch stijghoogteverschil (m)

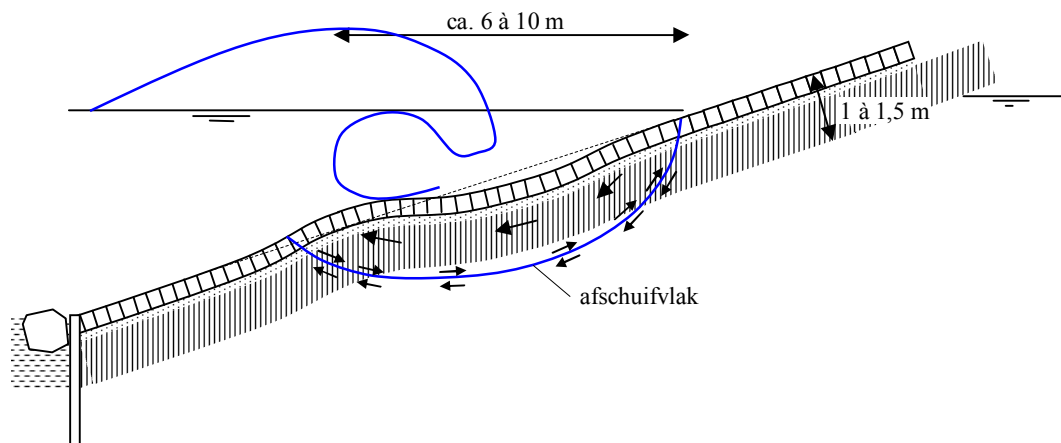
I Inleiding

Ingevolge de Wet op de Waterkering dienen steenzettingen op waterkeringen vijfjaarlijks getoetst te worden. In de praktijk kan aan veel steenzettingen geen definitief toetsoordeel toegekend worden wegens een gebrek aan wetenschappelijke kennis.

In 2003 is daarom door de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen opgestart, zie bijlage A. Doel van dit programma is het reduceren van deze kennisleemtes teneinde te komen tot scherpere toetsregels en daarmee sneller en vaker tot definitieve toetsresultaten. In het kader van dit onderzoeksprogramma heeft voorliggende rapport betrekking op het deelonderzoek B.1.1 “toetsregel afschuiving”.

Het mechanisme afschuiving bij steenzettingen betreft de grondmechanische instabiliteit en het daardoor ontstaan van een vervorming zoals getekend in figuur 1 als gevolg van de golfbelasting.

Het onderhavige onderzoek richt zich op het opstellen van een black-box model dat de relatie geeft tussen de hydraulische omstandigheden (waterstand, grondwaterstand, golfhoogte en periode) en de eigenschappen van de steenbekleding (taludhelling, toplaagdikte, filterlaag, kleilaagdikte en wellicht de klei-eigenschappen) enerzijds en het al dan niet optreden van het bezwijkmechanisme anderzijds. Dit black-box model moet uiteindelijk bruikbaar worden voor het toetsen van steenzettingen op het mechanisme afschuiving (grondmechanische instabiliteit) voor normale Nederlandse zeedijken. Het onderzoek beperkt zich tot steenzettingen op een kleilaag, met eventueel een filterlaag en/of geotextiel ertussen. Onder de kleilaag bevindt zich het zand van de dijk kern.



Figuur 1.1, traditionele weergave van het afschuifvlak

Om te komen tot een black-box model is inzicht in het bezwijkmechanisme belangrijk en daarom is in hoofdstuk 2 begonnen met een beschrijving van het bezwijkmechanisme. Op basis van dit inzicht is het mogelijk om een lijst op te stellen van relevante invloedsparameters, zoals de eigenschappen van de golfbelasting en statische belasting

enerzijds en de eigenschappen van de constructie anderzijds. Deze parameters zijn in hoofdstuk 3 op een logische wijze gegroepeerd tot dimensieloze parameters. Verder is het inzicht nodig om de grenzen van de toepasbaarheid te schatten.

Het mechanisme afschuiving is bij een steenzettingen met een kleilaag nog nooit in de praktijk geconstateerd, en bovendien is het mechanisme niet opgetreden tijdens de recente Deltagootproeven (Hofland en Klein Breteler, 2006). Omdat het nog niet eerder is opgetreden zijn er geen objectieve gegevens omtrent dit bezwijkmechanisme. Daarom is voor een nauwkeurige beschrijving van het mechanisme gebruik gemaakt van het inzicht van een groep deskundigen:

- ir M.W.C. Nieuwjaar (Provincie Flevoland)
- ir T.P. Stoutjesdijk (GeoDelft)
- ir M.C.J. Bosters (Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde)
- ir R. 't Hart (Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde)
- ir S. Nurmohamed (Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde)
- ir M. Klein Breteler, auteur van dit verslag (WL | Delft Hydraulics)

Het streven naar een black-box model betekent dat niet alle aspecten van de mechanismen met evenwichtsformules zullen worden gekwantificeerd, maar dat vooral gebruik gemaakt wordt van de ervaring in het veld en in de Deltagoot. Dit wordt aangevuld met veilige, maar arbitraire, keuzes. Die keuzes zijn door de deskundigen gezamenlijk gemaakt.

De black-box beoogt een grens te stellen aan de maximaal toelaatbare golfbelasting en is van toepassing op situaties waar het statische stijghoogteverschil kleiner is dan het eigengewicht van de bekleding. Bij de toetsing wordt ervan uitgegaan dat zolang een dijk niet abnormaal doorlatend is of een uitzonderlijke geometrie heeft, de statische stijghoogteverschillen beperkt zullen blijven, al dan niet door het optreden van de ventielwerking (Bosters 2007). De ventielwerking bestaat uit het ontstaan van scheuren waardoor de overdruk kan wegvloeien. Bij normale dijken zal er onvoldoende aanvoer van water zijn om na het ontstaan van scheuren nog een substantiële overdruk te laten ontstaan.

Met 'bekleding' wordt in dit rapport de toplaag van gezette steen, filterlaag en de kleilaag tezamen bedoeld.

Ten aanzien van de belasting en het mechanisme wordt globaal gedacht aan:

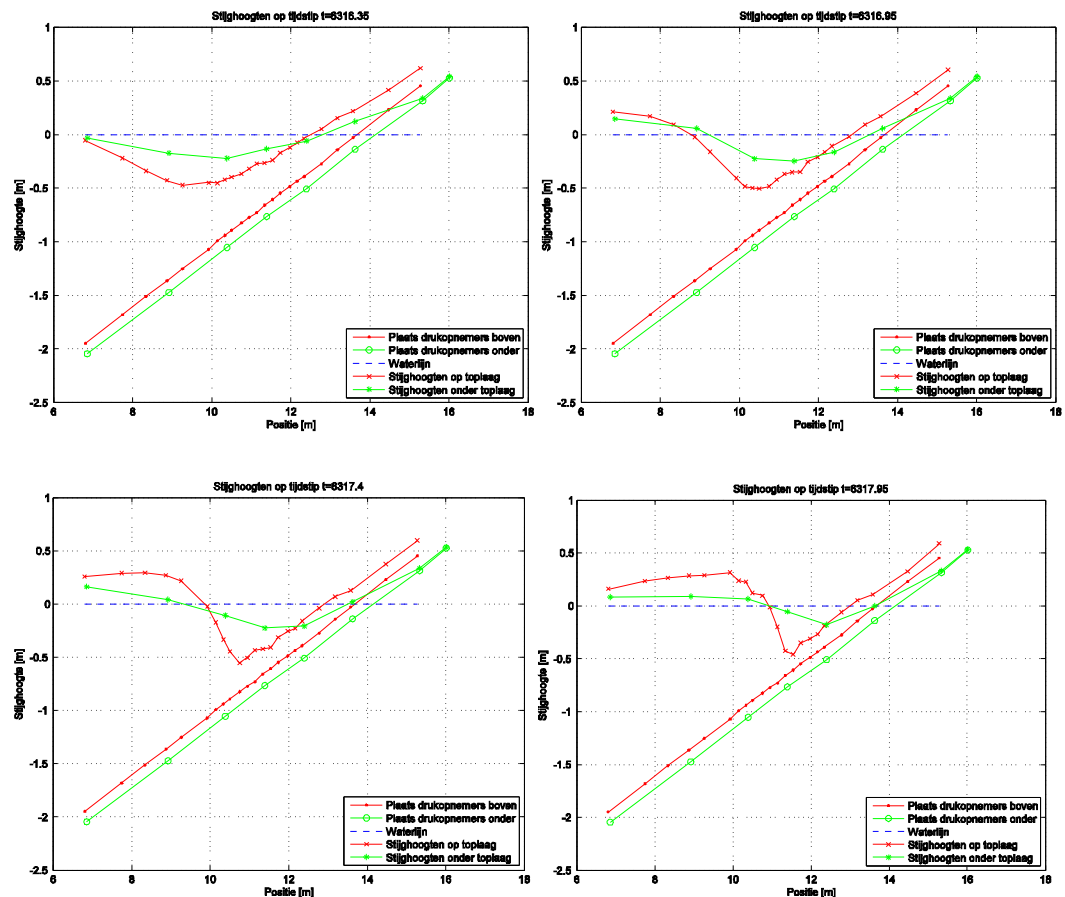
- belasting:
 - statisch (hogere freatische lijn dan buitenwaterstand)
 - dynamisch (golven)
- mechanisme:
 - oplichten van de bekleding
 - afschuiven van de bekleding
 - vorming van een ontoelaatbaar S-profiel

2 Mechanisme

Tijdens extreme omstandigheden is het de verwachting dat de belasting bestaat uit een hoge freatische lijn in het zand onder de klei, en golven. Juist als er sprake is van golfneerloop, is de druk op de toplaag klein, terwijl er wel een aanzienlijke druk onder de klei aanwezig is. Op dat moment zou de bekleding (gezette steen, filterlaag en kleilaag tezamen) in beweging kunnen komen.

Dit moment wordt voorafgegaan door een korte periode vanaf het moment van maximale golfoploop waarin de golfoplooptong naar beneden aan het stromen is en er een golfdal boven het onderwatertalud zit. Ook dan kan er zich al een netto opwaartse belasting onder de klei opbouwen, die zijn maximum bereikt op het moment vlak vóór de golfklap.

Enkele momenten uit deze belastingperiode zijn gegeven in figuur 2.1.



Figuur 2.1, Deel van de golfcyclus met opwaartse belasting (proef P01, ingegoten bekleding) (boven = op de toplaag; onder = in het filter)

De genoemde momenten zijn schematisch weergegeven in figuur 2.2 en 2.3.

Onderstaand wordt een hypothese gepresenteerd over de wijze waarop onder deze omstandigheden de bekleding zou kunnen bezwijken. Deze hypothese is gebaseerd op

globaal fysisch inzicht, ervaring bij andere bezwijkmechanismen en engineering judgement. Er is helaas geen concrete informatie uit de praktijk of uit modelonderzoek beschikbaar. Door de hypothese te toetsen aan de inzichten van deskundigen is hierin vertrouwen ontstaan.

Voor het bezwijkmechanisme zijn twee extreme varianten denkbaar, en is het denkbaar dat er een combinatie van beide optreedt:

1. De initiële beweging is met name haaks op het talud gericht en wordt primair veroorzaakt doordat het stijghoogteverschil over de bekleding lokaal oplichten veroorzaakt.
2. De initiële beweging is met name parallel aan het talud waarbij er een afschuifvlak ontstaat in de klei.

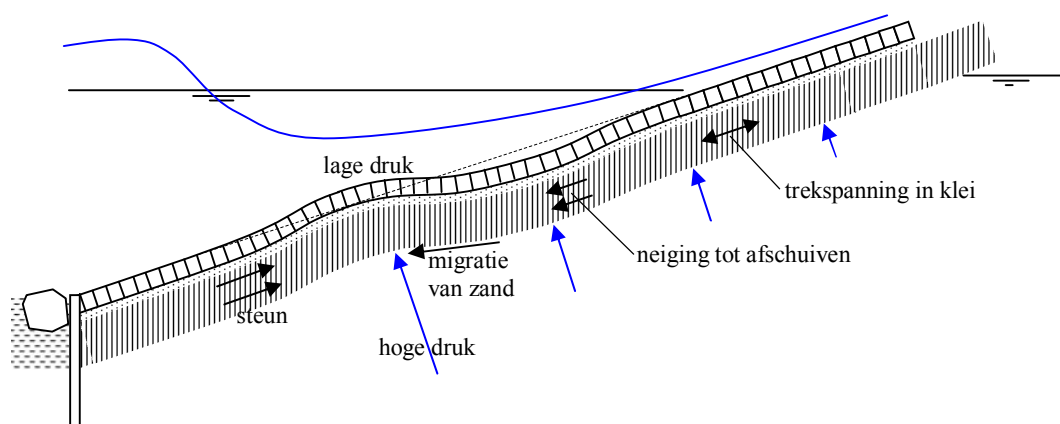
Het eerste mechanisme wordt kort aangeduid met oplichten en het tweede met afschuiven. Onderstaand worden ze nader beschreven.

In de beschouwing van de bezwijkmechanismen is ervan uitgegaan dat de teenconstructie voldoende stabiel is.

Oplichten

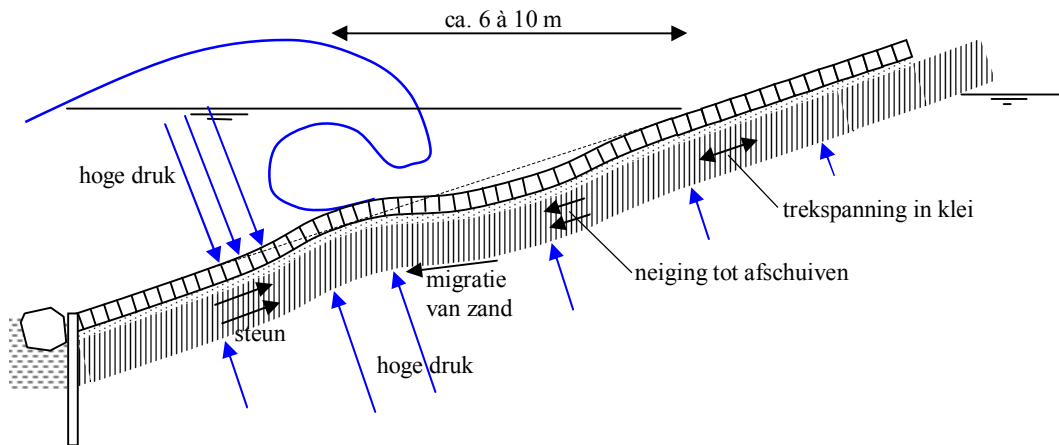
In figuur 2.2 en 2.3 is de mogelijke reactie van de bekleding op de belasting geschetst. In de figuren is te zien dat er onder de stilwaterlijn een zone is waarin het stijghoogteverschil over de bekleding groter is dan het eigen gewicht. In die zone is het denkbaar dat de bekleding, inclusief kleilaag, wat omhoog beweegt (haaks op het talud). De ruimte onder de klei zou tijdens dit proces opgevuld kunnen worden door zand. Dit zand kan wellicht gemakkelijk migreren doordat het volledig verzadigd is met water en plotseling zijn bovenbelasting kwijtraakt, terwijl er ook verhangen zijn die stroming in het zand veroorzaken. Deze belastingsituatie duurt echter maar kort, omdat even later er weer een hogere druk op de bekleding aanwezig is vanwege het feit dat de golf dan verder het talud opgelopen is.

Daardoor zouden de traagheid van de bekleding, het migrerende zand en het water een belangrijke rol kunnen spelen.



Figuur 2.2, oplichten tijdens beginnende golfneerloop

In de zone tussen het gebied dat opgelicht wordt en de stilwaterlijn is er verminderd contact tussen klei en onderliggend zand. Hier kan de bekleding de neiging hebben naar beneden te gaan schuiven, maar wordt daarin tegengewerkt door de ondersteunende kracht van de lager gelegen bekleding en enige trekkracht die ontstaat in de kleilaag boven deze zone. De ondersteunende kracht lager op het talud kan vrij aanzienlijk zijn omdat hier een hoge druk op het talud aanwezig is door de aankomende golf die even later een golfklap gaat veroorzaken.



Figuur 2.3, oplichten vlak voor de golfklap

In bovenstaande hypothese is het oplichten van de bekleding een belangrijke eerste fase in het bezwijkproces. Verondersteld is dat zonder deze oplichting er geen sprake kan zijn van afschuiving, omdat het stabiele deel van de bekleding onder de zwaar belaste zone verhindert dat er afschuiving kan optreden. Doordat de bekleding bij de teen wordt ondersteund is er geen ruimte om naar beneden te schuiven zonder eerst op te lichten. Een gevolg van deze veronderstelling is dat het black-box model er op gericht zou moeten zijn te beoordelen of het oplichten zodanige vormen aan kan nemen dat de cumulatieve verticale verplaatsing van de bekleding lokaal onacceptabele vormen aanneemt.

Afschuiven

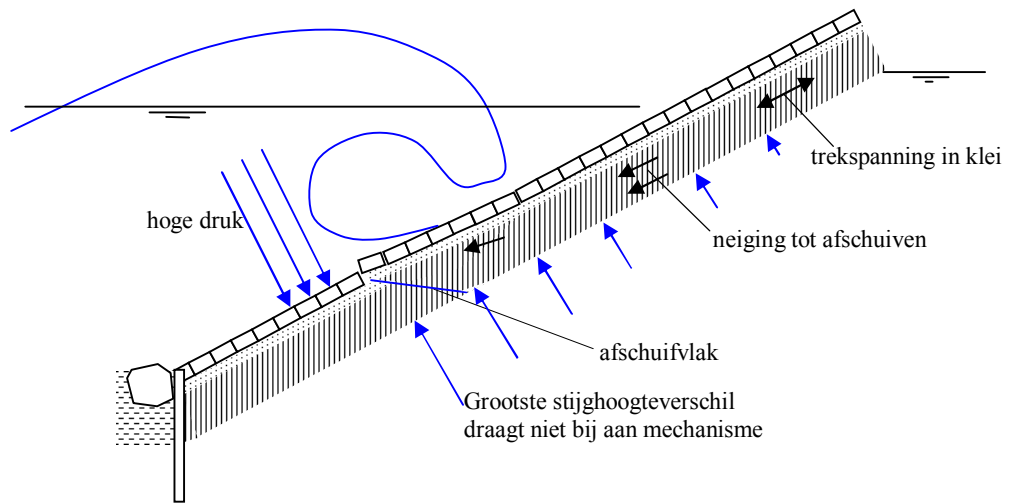
Anderzijds zou het bezwijkmechanisme kunnen starten met een beweging van de bekleding langs het talud naar beneden. Er zijn twee varianten denkbaar:

1. De bekleding zou naar beneden kunnen schuiven als er een schuin afschuifvlak in de klei ontstaat en de samenhang in de toplaag verbroken wordt op de lokatie waar dit afschuifvlak naar buiten treedt (zie figuur 1.1 en 2.4).
2. Het is denkbaar dat het stijghoogteverschil zorgt voor vermindering van de wrijving tussen klei en zand, waarna de klei naar beneden schuift zonder dat de toplaag meeschuift (zie figuur 2.5). Dit leidt lager op het talud tot verknedden/samenpersen van de klei waardoor daar de laagdikte groter wordt en de toplaag wordt opgelicht. Hierdoor wordt de samenhang in de toplaag verbroken en kan er een afschuifvlak ontstaan.

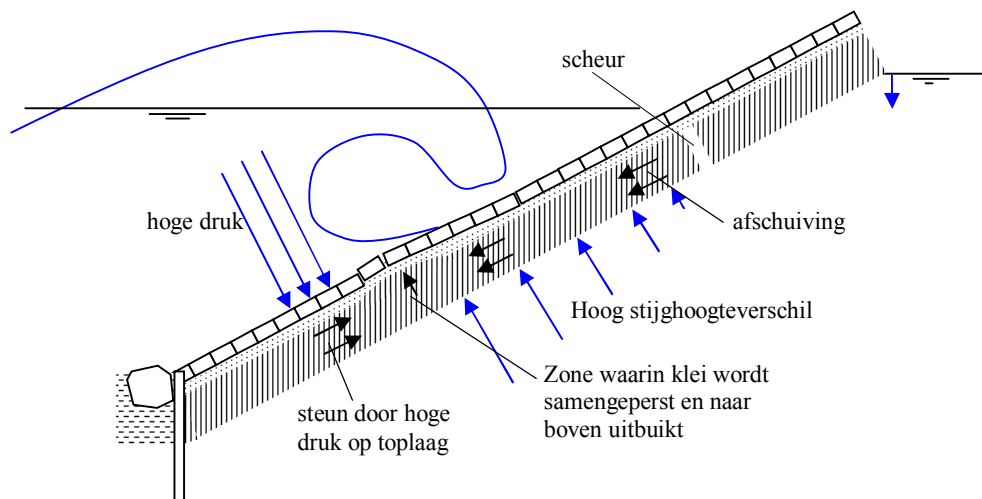
Er wordt eerst nader ingegaan op het afschuiven met alleen een schuin afschuifvlak (zonder het verknedden/samenpersen).

Om dit mechanisme te kunnen laten optreden moet er een schuin afschuifvlak door de klei lopen. Omdat klei een grote schuifsterkte heeft, zal het mechanisme zoeken naar een vrij kort afschuifvlak door de klei, bijvoorbeeld orde 45° ten opzichte van het taludoppervlak.

In figuur 2.4 is verder te zien dat de grootste stijghoogteverschillen niet bijdragen aan het optreden van het mechanisme. Deze zitten immers onder de kleidriehoek die niet beweegt. Iets hoger op het talud is er echter ook nog een aanzienlijk stijghoogteverschil dat de schuifsterkte tussen klei en zand verkleint. De grootste sterkte zal echter ontleend worden aan het deel van het schuifvlak door de klei, waar geen stijghoogteverschillen zijn. Verder zal de toplaag ook een aanzienlijke bijdrage geven aan de sterkte. In feite moet de samenhang in de toplaag eerst op de plaats waar het schuifvlak naar buiten treedt verbroken worden, voordat dit mechanisme kan optreden. De samenhang in de toplaag kan echter pas verbroken worden nadat de klei is afgeschoven, en dat kan juist niet vanwege de toplaag.



Figuur 2.4, Afschuifmechanisme

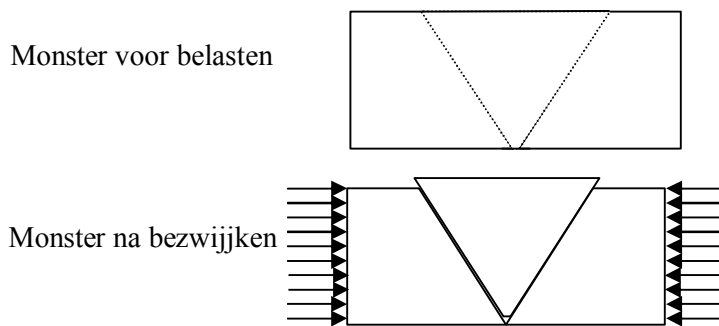


Figuur 2.5, Afschuifmechanisme waarbij de klei tussen de toplaag en het zand naar beneden schuift (freatische lijn gaat dalen nadat er een scheur is ontstaan)

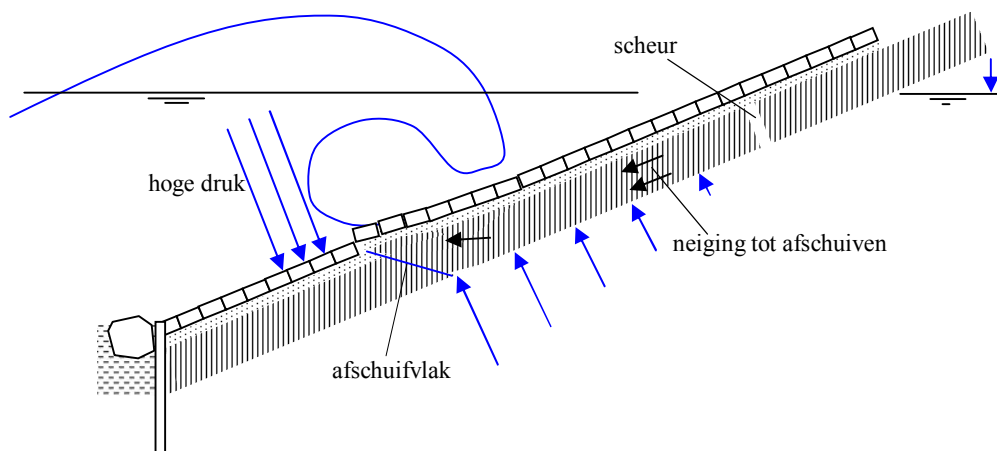
Geconcludeerd wordt dat dit mechanisme niet zo waarschijnlijk is. Als het al kan optreden, dan zal dit alleen bij zeer steile taluds kunnen voorkomen. Er wordt voor gekozen om dit mechanisme buiten beschouwing te laten in het black-box model, en daarom moet de toepasbaarheid van het black-box model beperkt worden tot de normale taluds, tot een taludhelling van ca. 1:2,5.

Bij de tweede variant van dit mechanisme zorgt het stijghoogteverschil ervoor dat de klei gemakkelijk over het zand naar beneden kan schuiven. De toplaag kan echter niet naar beneden schuiven, omdat die steunt op de teenconstructie. Het is dan denkbaar dat alleen de klei naar beneden gaat. In de buurt van de golfneerloop zou een zone kunnen ontstaan waar de klei verkneed wordt (samengeperst), wat leidt tot lokale vergroting van de laagdikte. Dit is geschetst in figuur 2.5. Het kneden kan ook vergeleken worden met het bezwijkproces dat optreedt tijdens een triaxiaalproef. Dit is schematisch weergegeven in figuur 2.6.

In de zone waar de klei in de richting evenwijdig aan het talud wordt samengeperst, zal de klei in de richting haaks daarop gaan uitzetten. Daardoor wordt de toplaag plaatselijk opgelicht en kan zijn samenhang verliezen. Als die samenhang verloren is, is er meer kans op een kort afschuifvlak door het verkneede deel van de klei, zoals geschetst in figuur 2.7.



Figuur 2.6, Schematische weergave van het bezwijken van een grondmonster tijdens een triaxiaalproef.



Figuur 2.7, Afschuiving nadat klei omhoog is geperst in de golfneerloop zone en daardoor de toplaag zijn samenhang heeft verloren (freatische lijn is wat gedaald)

Het afschuiven van de klei tussen de toplaag en het zand zou in een extreem geval kunnen leiden tot de vorming van scheuren in de klei. Deze scheuren zorgen ervoor dat het statisch stijghoogteverschil verdwijnt. Hierdoor is er minder aandrijvende kracht voor de afschuiving. Aan de hand van de klei-eigenschappen moet beoordeeld worden hoe ver de kleilaag langs het talud moet afschuiven om de samenhang in de toplaag te verbreken en of de rek nabij de waterlijn dan zo groot wordt dat scheuren ontstaan.

Een noodzakelijke voorwaarde voor het optreden van dit mechanisme is het schuiven van de klei en het zodanig verknedend dat daardoor de toplaag wordt opgelicht. Voor dit laatste is een aanzienlijke kracht noodzakelijk die geleverd moet worden door de gewichtsc component van de kleilaag evenwijdig aan het talud, terwijl er (kleine) schuifkrachten zijn tussen klei en zand en tussen klei en filter/toplaag, en trekspanningen zijn in de klei rond de waterlijn (of de treksterkte van de klei moet worden overschreden). Doordat dit plaatsvindt tijdens zware golfaanval zal er waarschijnlijk een zone zijn met opwaarts stijghoogteverschil over de toplaag, waardoor de wrijving tussen filter en de klei lokaal niet zo groot zal zijn.

De kans op dit mechanisme is groter als het talud steiler is. Ook een groot statisch stijghoogteverschil over de bekleding draagt hieraan bij, maar die is niet waarschijnlijk (Bosters 2007). Met een afleiding op basis van een krachterevenwicht is het mogelijk te bepalen vanaf welke omstandigheden dit mechanisme kan optreden. Dit krachterevenwicht is uitgewerkt in het spreadsheet van GeoDelft (Vastenburg, 2006) voor een plotselinge waterstandsverlaging (geen golfbelasting) en zonder de wrijving tussen klei en filter. Als in een krachterevenwicht blijkt dat het verticale evenwicht eerder overschreden wordt dan het horizontale evenwicht, dan zal oplichten eerder gebeuren dan afschuiven. Enige berekeningen met het spreadsheet van GeoDelft geven aan dat dit veelvuldig optreedt.

Combinatie van oplichten en afschuiven

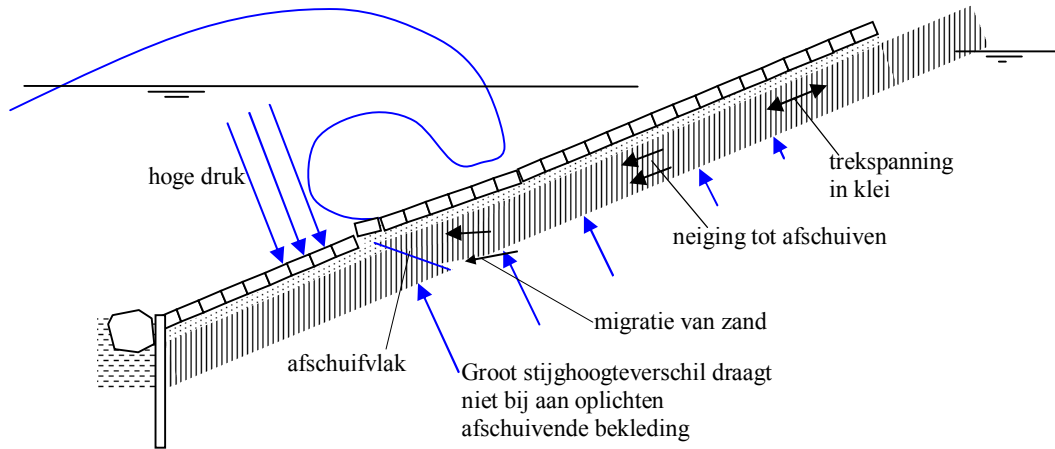
Ook een combinatie van oplichten en afschuiven zou denkbaar kunnen zijn. Het ontstaan van het afschuifvlak zou dan geholpen kunnen worden door het oplichten. Het afschuifvlak kan dan nog wat korter worden (steiler). Dit is geschetst in figuur 2.8.

In de figuur is te zien dat het grote stijghoogteverschil de bekleding iets oplicht, waarbij ook enige migratie van het zand optreedt. Tegelijkertijd ontstaat er een afschuifvlak door de klei terwijl de klei wat omlaag schuift (tussen filter en zand, zoals in figuur 2.5) en vervolgens de samenhang in de toplaag verbroken kan raken.

Het grote stijghoogteverschil onder de bekleding ter plaatse van de golfneerloop wordt niet volledig benut om het mechanisme te laten optreden. Het grootste stijghoogteverschil treedt op onder de driehoek klei die niet beweegt en die draagt dus niet bij aan het optreden van het mechanisme.

Uitgangspunt voor het optreden van deze combinatie van oplichten en afschuiven is dat het oplichten zelf nauwelijks optreedt en dus niet zelfstandig tot bezwijken kan leiden. Het zou dus alleen bijdragen aan het verlies aan samenhang in de kleilaag en de toplaag waardoor het afschuifvlak kan ontstaan. De flexibiliteit van de klei maakt echter dat dit minder logisch lijkt. Een kleine oplichting zal waarschijnlijk geen afschuifvlak in de klei stimuleren. Bovendien zal een kleine oplichting ter plaatse van het grensvlak tussen klei en zand

vermoedelijk nog onvoldoende beweging in de toplaag geven om de samenhang te doen verliezen.

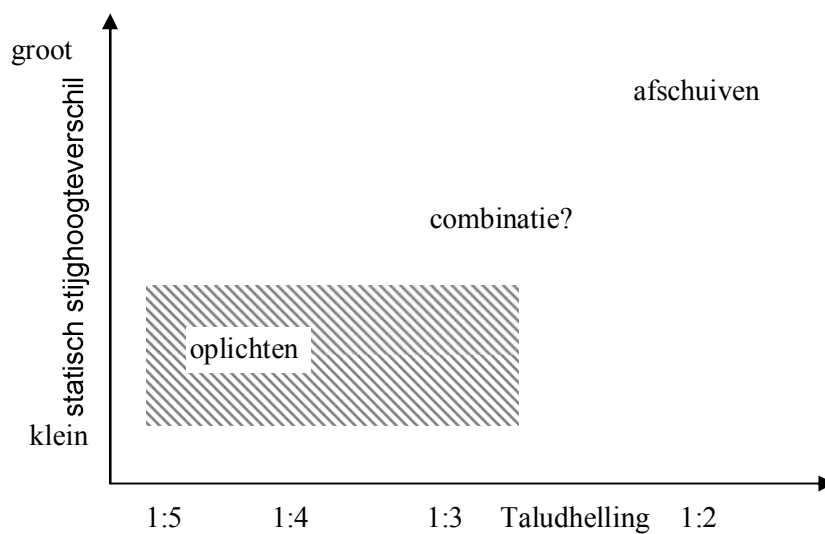


Figuur 2.8, Combinatie van oplichten en afschuiven

Concluderend kan gesteld worden dat dit mechanisme toch minder waarschijnlijk is dan het mechanisme waarin uitsluitend oplichten optreedt. Als er na het aanzienlijk oplichten van de bekleding sprake is van afschuiven, dan wordt dit niet gezien als een combinatie van oplichten en afschuiven, maar als een mechanisme met als initiële beweging het oplichten.

Conclusie ten aanzien van het mechanisme

Uit het bovenstaande wordt geconcludeerd dat voor de thans beschouwde situatie (geen steile taluds en zonder groot statisch stijghoogteverschil) het oplichten als initiële mechanisme het meest waarschijnlijk is. In figuur 2.9 is op basis van bovenstaande overwegingen schematisch weergegeven in welke gevallen welk mechanisme zal gaan optreden. Gezien het feit dat het hier beschouwde toepassingsgebied linksonder in de figuur ligt, is het oplichten maatgevend.



Figuur 2.9, bezwijkmechanismen en hier beschouwde toepassingsgebied (gearceerd) als functie van het statisch stijghoogteverschil en de taludhelling.

3 Invloedsparameters

Op basis van de veronderstellingen uit het vorige hoofdstuk omtrent het mechanisme zijn er een aantal aspecten van de belasting en de constructie te identificeren die van invloed kunnen zijn op het al dan niet ontstaan van dit mechanisme:

- Golfcondities:

De golfhoogte H_s en golfperiode T_p bepalen de lokatie van de zone met lage stijghoogte op het talud ten opzichte van de stilwaterlijn. Naarmate deze dieper zit, zijn de stijghoogteverschillen groter en is er een groter gebied met opwaartse stijghoogteverschillen. Naarmate de golfhoogte en/of golfperiode groter zijn, zijn de stijghoogteverschillen groter. Het minimale stijghoogteverschil tijdens golfneerloop kan berekend worden met:

$$\frac{\phi_{\min 2\%}}{H_s} = \max \left\{ -0,16 \left(\frac{\tan \alpha}{s_{op}} \right)^{0,63} ; \frac{-2,5}{1 + 0,9 / \sqrt{\xi_{op}}} \right\}$$

Met:

$\phi_{\min 2\%}$ = minimale stijghoogte op het talud tijdens het optreden van het golffront met 2% onderschrijdingsfrequentie (m)

s_{op} = $H_s / (1,56 T_p^2)$ = golfsteilheid (-)

ξ_{op} = $\tan \alpha / \sqrt{s_{op}}$ = brekerparameter (-)

α = taludhelling ($^\circ$)

Uit deze formule blijkt dat de invloed van de golfperiode vrijwel verdwenen is als $\xi_{op} > 4$.

- Taludhelling:

Een steiler talud zorgt voor een lagere minimum stijghoogte (meer negatief, dus zwaardere belasting), maar heeft nauwelijks invloed op het taludniveau ten opzichte van de stilwaterlijn waar dit minimum plaatsvindt. Onder een steiler talud is het denkbaar dat ook het zand gemakkelijker kan migreren.

Waarschijnlijk gaat het bij de invloed van de taludhelling op de minimale stijghoogte meer om de gemiddelde taludhelling over een hoogte van H_s à $2H_s$ onder de stilwaterlijn. Maar bij de migratie van het zand gaat het waarschijnlijk meer om de lokale taludhelling ter plaatse van het oplichten van de toplaag.

- Statisch stijghoogteverschil:

Als de freatische lijn in het zand hoger staat dan de buitenwaterstand, geeft dit een extra stijghoogteverschil over de bekleding, waardoor het mechanisme al bij een kleinere golfbelasting zou kunnen ontstaan.

- Gewicht van toplaag, filter en kleilaag:

Naarmate dit groter is, zal de sterkte groter zijn.

- Buigstijfheid van de bekleding:

In de zone met grote opwaartse stijghoogteverschillen zou de bekleding opgelicht kunnen worden, maar hoger op het talud en laag op het talud zal dit niet gebeuren. Er ontstaat dus een buiging in de bekleding, die tegengewerkt wordt door de buigstijfheid van de toplaag en de kleilaag. Hoe groter deze buigstijfheid, hoe groter de stabiliteit zal

zijn. Naarmate de dikte van de toplaag groter is, zal de buigstijfheid van de toplaag groter zijn. Daarnaast draagt ook het al dan niet ingegoten zijn van de toplaag bij aan de buigstijfheid.

Wellicht heeft ook de kleikwaliteit invloed op de buigstijfheid ervan.

Voor het black-box model wordt ten aanzien van de belasting gebruikgemaakt van het statisch stijghoogteverschil en de golfhoogte, omdat gezien het mechanisme deze het meest relevant lijken te zijn. Er wordt niet gewerkt met de minimale stijghoogte op de toplaag, omdat dit een te gedetailleerde beschrijving van de belasting is ten opzichte van de mate van detail waarin het mechanisme thans begrepen wordt.

Ten aanzien van de sterkte wordt alleen gebruikgemaakt van het gewicht van de toplaag, filter en kleilaag, en niet van de buigstijfheid van de bekleding. Dit laatste is moeilijk kwantificeerbaar en kan daardoor niet op een praktische wijze in het black-box model opgenomen worden.

Dit leidt tot de volgende dimensieloze parameters voor het black-box model:

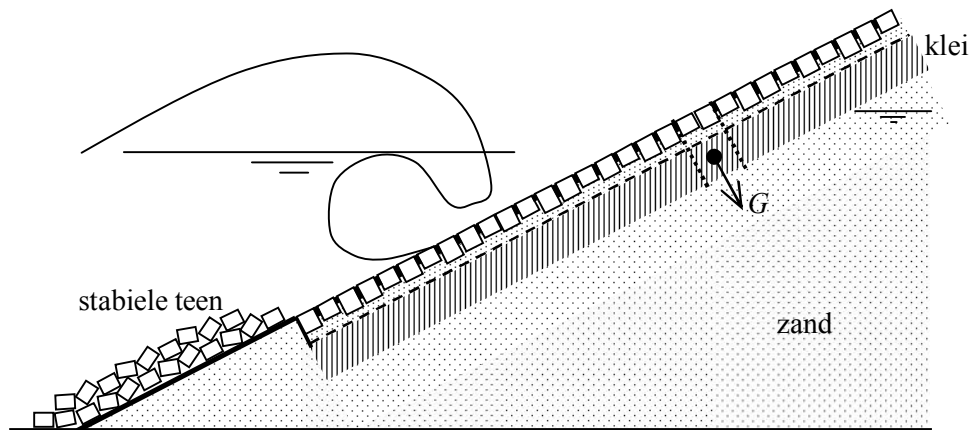
- $\frac{H_s}{G}$
- $\frac{\phi_{sz}}{G}$

met:

H_s = significante golfhoogte aan de teen van het talud (m)

ϕ_{sz} = statisch stijghoogteverschil (m)

G = gewichtscomponent haaks op het talud van de bekleding (toplaag, filter en kleilaag) per m^2 , uitgedrukt in meters waterkolom (zie figuur 3.1) (m)



Figuur 3.1, Schets van de modelopstelling.

De invloed van de taludhelling komt daardoor slechts met een geringe invloed ($\cos\alpha$) in het black-box model.

4 Samenvatting van de Deltagootproeven

In de Deltagoot is in 2005 een model van een Nederlandse zeedijk met taludhelling van 1:3,5 op schaal 2 nagebouwd en belast met een statische overdruk in combinatie met brekende golven (Hofland en Klein Breteler, 2007). Onderstaand worden alle maten van het model op modelschaal weergegeven. De bekleding bestond uit ingegoten basalt op een filterlaag op klei (modelschaal):

- toplaag: $D = 0,129$ m; $\Delta = 1,88$; $\Delta D = 0,242$ m
- filterlaagdikte: $b = 0,08$ m
- kleilaagdikte: $b_{\text{klei}} = 0,302$ m

Na afloop van het onderzoek is tijdens het uitbreken de dikte van de klei nauwkeurig nagemeten. De gemiddelde dikte was 30,2 cm, variërend van 27 tot 32 cm.

Het dijklichaam bestond uit zand, met als zeefdiameters: $D_{15} = 165$ μm , $D_{50} = 206$ μm , en $D_{85} = 254$ μm

Een belangrijke sterktecomponent is de gewichtscomponent van de bekleding per m^2 haaks op het talud ($G = \text{onderwatergewicht} \cdot \cos\alpha$), uitgedrukt in meters waterkolom ($\text{onderwatergewicht} \cdot \cos\alpha / \rho$). Dit kan vergeleken worden met de golfhoogte. Het gaat om de som van de toplaag, de filterlaag en de kleilaag:

$$G = (\Delta D + \Delta_f b(1 - n) + \Delta_{\text{klei}} b_{\text{klei}}) \cdot \cos\alpha$$

met:

G = onderwatergewichtcomponent van de bekleding per m^2 , haaks op het talud, zie figuur 3.1 (m)

Δ = $(\rho_s - \rho) / \rho$ = relatieve soortelijke massa van de toplaag (-)

Δ_f = $(\rho_f - \rho) / \rho$ = relatieve soortelijke massa van de filterkorrels (-)

Δ_{klei} = $(\rho_{\text{klei}} - \rho) / \rho$ = relatieve soortelijke massa van de klei (-)

ρ = soortelijke massa van water (kg/m^3)

ρ_s = soortelijke massa van de toplaag (kg/m^3)

ρ_f = soortelijke massa van de filterkorrels (kg/m^3)

D = dikte van de toplaag (m)

b = dikte van de filterlaag (m)

ρ_{klei} = soortelijke massa van de klei (kg/m^3)

b_{klei} = dikte van de kleilaag (m)

α = taludhelling ($^\circ$)

n = porositeit van het filter (-)

In het schaalmodel was dit:

$$G \approx (1,88 \cdot 0,129 + 1,60 \cdot 0,08 \cdot (1 - 0,4) + 0,85 \cdot 0,302) \cdot 0,96 \approx 0,55 \text{ m.}$$

De proeven die gericht waren op het mechanisme afschuiving zijn weergegeven in tabel 1, met:

H_s = significante golfhoogte (m)

ϕ_{sz} = statisch stijghoogteverschil (m)

ξ_{op} = brekerparameter (-)

h = waterstand in de goot (m)

Proef	H_s [m]	ξ_{op} [-]	h [m]	Duur [min]	ϕ_{sz} [m]	$\phi_{min2\%}$ [m]
P11	0,67	1,83	3,91	150,0	0,07	-0,50
P11b	0,67	1,76	3,92	140,5	0,07	-0,48
P12	1,11	1,57	4,11	66,7	0,17	-0,68
P13	0,97	1,52	4,11	60,0	0,28	-0,57
P14	1,02	1,96	4,25	80,0	0,31	-0,83
P17	0,93	2,10	2,90	79,2	0,46	-0,82
P18	1,10	2,07	3,15	83,3	0,52	-0,96
P19	1,13	1,94	3,15	120,0	0,24	-0,91
P20	1,14	1,95	3,17	120,0	0,28	-0,92
P21	1,24	2,25	3,46	93,3	0,44	-1,20
P22	1,41	1,96	4,68	88,3	0,36	-1,14
P23	1,59	1,96	4,71	103,0	0,33	-1,29
P23a	1,64	1,86	4,70	24,1	0,33	-1,25

Tabel 1. Proeven relevant voor schademechanisme afschuiving, met globale parameters (ϕ_{sz} = statische stijghoogteverschil over de gehele de bekleding)

De minimale stijghoogte op het talud tijdens golfneerloop is berekend met de formule uit Klein Breteler e.a. (2006):

$$\frac{\phi_{min2\%}}{H_s} = \max \left\{ -0,16 \left(\frac{\xi_{op}}{\sqrt{\tan \alpha}} \right)^{1,25}; \frac{-2,5}{1+0,9/\sqrt{\xi_{op}}} \right\}$$

Met:

$\phi_{min2\%}$ = minimale stijghoogte op het talud tijdens het optreden van het golffront met 2% onderschrijdingsfrequentie (m)

Volgens de rekenmethode van het Technisch Rapport Steenzettingen, die vervangen moet worden, zou proef P21 de grootste belasting moeten hebben gegeven. Dit geldt ook voor als gekeken wordt naar $\phi_{sz} - \phi_{min2\%}$ als indicatie van de belastinggrootte. Als echter de significante golfhoogte als dominante belastingparameter wordt gehanteerd, dan was tijdens proef 23a de zwaarste belasting opgetreden. Bij geen van deze proeven is instabiliteit opgetreden.

Uit de tabel blijkt dat vanaf proef 12 geldt dat $\phi_{sz} - \phi_{min2\%} \gg G$, hetgeen duidt op potentiële instabiliteit. Gezien het feit dat er geen bezwijken is opgetreden, kan mogelijk afgeleid worden dat de overbelastingsduur tijdens elke golf zo kort is dat er geen beweging in de

bekleding kan komen als gevolg van de traagheid en vooral ook de verhinderde toestroming. Dit duidt erop dat de golfbelasting, gerepresenteerd door de waarde van $\phi_{\min 2\%}$, slechts gedeeltelijk in het black-box model meegeteld hoeft te worden.

Anderzijds moet geconstateerd worden dat we nog niet precies begrijpen welk aspect van de golfbelasting maatgevend is. Daarom wordt aanbevolen het voorlopig eenvoudig te houden en de belasting te beschrijven met alleen de golfhoogte.

5 Toetscriterium voor het mechanisme afschuiving

Het black-box model voor het mechanisme afschuiving is gebaseerd op het volgende:

- de conclusie uit hoofdstuk 2 dat het oplichten van de bekleding (toplaag, filter en kleilaag tezamen) de initiële beweging is voor het optreden van het mechanisme;
- de veronderstelling dat de verhouding tussen de golfhoogte en de gewichtscomponent van de bekleding belangrijk is;
- metingen in de Deltagoot (waarbij geen afschuiving is opgetreden).

Tijdens de proeven in de Deltagoot is in geen van de proeven zelfs maar het begin van instabiliteit geconstateerd. De grootste verhouding tussen golfhoogte en eigengewichtscomponent van de bekleding, H_s/G , was tijdens de proeven $1,64/0,55 = 3,0$. In combinatie met bovenstaande conclusies en veronderstellingen, resulteert dit in het volgende black box model voor het toetsen op afschuiving:

- Als $\frac{H_s}{(\Delta D + \Delta_f b(1-n) + \Delta_{klei} b_{klei}) \cos \alpha} \leq 3$ dan is toetsresultaat 'goed'
- anders: 'geavanceerd'

Naast dit toetscriterium geldt dat wanneer de beheerder slechte ervaringen heeft ten aanzien van het mechanisme afschuiving, het toetsresultaat uiteraard 'onvoldoende' is.

Het black-box model is toepasbaar als er geen grote statische stijghoogteverschillen optreden. Bosters (2007) heeft aannemelijk gemaakt dat in de meeste gevallen hieraan voldaan wordt. Het model is volgens hem niet toepasbaar voor zeer brede dijken, of dijken met een hoog opgespoten achterland, omdat in de praktijk is gebleken dat er dan soms slechte ervaringen zijn die verband kunnen houden met grote statische stijghoogteverschillen. In die situaties moet doorverwezen worden naar de geavanceerde toetsing. Dit geldt ook voor als er sprake is van een zandscheg.

Verder is dit criterium gebaseerd op metingen met een talud van 1:3,5 en beperkte informatie uit de praktijk. Daarom wordt aanbevolen om voor steile taluds, waarbij het mechanisme mogelijk anders zou kunnen verlopen, het toetsresultaat 'geavanceerd' toe te kennen. Voorlopig wordt de grens gelegd bij een talud van 1:2,5.

Bovenstaande toetscriteria zijn geldig als er een kleilaag aanwezig is. Het is te betwijfelen of de toetscriteria ook van toepassing zijn als de kleilaag vrij dun is. Daarom wordt voorlopig gesteld dat de criteria slechts toepasbaar zijn als de kleilaag enkele decimeters dik is. Als de kleilaag erg dun is, kan de toetsing uitgevoerd worden met de oude toetscriteria, waarbij men de kleilaag wegdenkt. Leidt dit tot niet tot het toetsresultaat 'goed', dan wordt het toetsresultaat 'geavanceerd'.

Gezien de geringe hoeveelheid data waar dit toetscriterium op gebaseerd is, moet aanbevolen worden om aanvullend onderzoek te doen. Daarin kan geverifieerd worden of bij een groot statisch stijghoogteverschil er scheuren in de klei ontstaan waardoor de overdruk wegvloeit, en kan met proeven de stabiliteit van steile taluds onderzocht worden.

6 Conclusies

Aanvullend op het Deltagootonderzoek waarbij een steenzetting op een filterlaag en kleilaag belast is met een statisch stijghoogteverschil en golfbelasting (Hofland en Klein Breteler 2007), is in dit onderzoek een hypothese opgesteld over het initiële mechanisme dat kan leiden tot het mechanisme afschuiving. Er is hierin geconcludeerd dat het oplichten van de bekleding (toplaag, filterlaag en kleilaag tezamen) het meest waarschijnlijk is.

Op basis van de hypothese, de resultaten van Deltagootonderzoek en ervaringen uit de praktijk (Bosters 2007) is het volgende black-box model voor het mechanisme afschuiving opgesteld:

$$- \text{ Als } \frac{H_s}{(\Delta D + \Delta_f b(1-n) + \Delta_{klei} b_{klei}) \cos \alpha} \leq 3 \text{ dan is het toetsresultaat 'goed'}$$

Met:

H_s = significante golfhoogte (m)

D = dikte van de toplaag (m)

b = dikte van de filterlaag (m)

b_{klei} = dikte van de kleilaag (m)

n = porositeit van het filter (-)

α = taludhelling, gemiddeld over een strook met breedte van $4 \cdot (D+b+b_{klei})$, gemeten langs het talud ($^\circ$).

Δ = $(-1 + \rho_s/\rho)$ = relatieve soortelijke massa van de toplaag (-)

Δ_f = $(-1 + \rho_f/\rho)$ = relatieve soortelijke massa van de filterkorrels (-)

Δ_{klei} = $(-1 + \rho_{klei}/\rho)$ = relatieve soortelijke massa van de klei (-)

ρ = soortelijke massa van water (kg/m^3)

ρ_s = soortelijke massa van de toplaag (kg/m^3)

ρ_f = soortelijke massa van de filterkorrels (kg/m^3)

ρ_{klei} = soortelijke massa van de klei (kg/m^3)

- Anders: 'geavanceerd'

Dit black-box model is toepasbaar als:

- de ervaring van de beheerder ten aanzien van dit mechanisme goed is.
- er sprake is van een talud flauwer dan 1:2,5
- er geen zandscheg is
- de dijk een normaal profiel heeft (niet zeer breed, of een dijk met hoog opgespoten achterland)
- er een kleilaag is

Gezien de geringe hoeveelheid data waar dit toetscriterium op gebaseerd is, moet aanbevolen worden om aanvullend onderzoek te doen. Daarin kan geverifieerd worden of bij een groot statisch stijghoogteverschil er scheuren in de klei ontstaan waardoor de overdruk wegvloeit, en kan met proeven de stabiliteit van steile taluds onderzocht worden.

Referenties

Bosters, M.C.J. (2004)

Afschuiving en freatische lijn

Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, notitie, 10 oktober 2004 (ontvangen op 20 december 2004)

Bosters, M.C.J. (2007)

Toelichting bij overleg kwalitatieve toetsmethodiek afschuiving

Rijkswaterstaat, memo van november 2007

Hofland, B. en M. Klein Breteler (2007)

Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

Stabiliteit ingegoten basalt en afschuiving ondergrond

WL | Delft Hydraulics, verslag H4635, augustus 2007

Klein Breteler, M., I. van der Werf en I. Wenneker (2006)

Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

Kwantificering golfbelasting en invloed lange golven

WL | Delft Hydraulics, conceptverslag H4421, juni 2006

VTV 2004

De veiligheid van primaire waterkeringen in Nederland

Voorschrift Toetsen op Veiligheid voor de tweede toetsronde 2001-2006 (VTV)

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, januari 2004

Technisch Rapport Steenzettingen

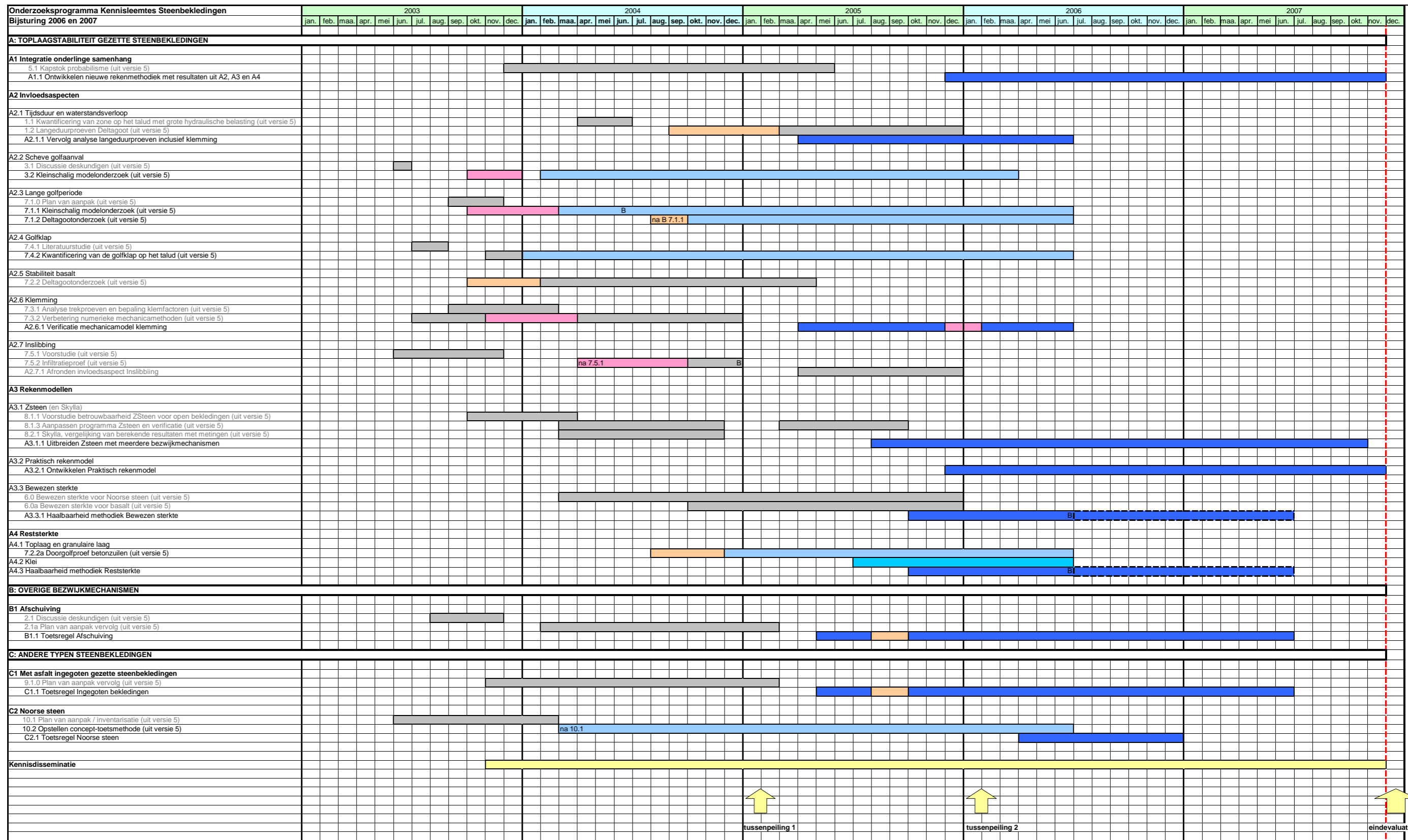
TAW, december 2003

Vastenburg, E.W. (2006)

Korte studie grondmechanische stabiliteit steenzettingen op steile talud

GeoDelft, verslag CO-421330-0009, januari 2006

A Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen



Planningschema
Versie 7 - 5 januari 2006

DIT PLANNINGSCHEMA IS EEN MOMENTOPNAME
VERMELDE TERMIJNEN ZIJN INDICATIEF EN KUNNEN IN DE LOOP VAN
HET ONDERZOEK VERANDEREN OP BASIS VAN NIEUWE INZICHTEN EN
ONTWIKKELINGEN.

- LEGENDA:**
- █ = Vervolgacties conform bijsturing 2005
 - █ = Bureaustudie
 - █ = Informatie reststerkte Wieringermeerdijk
 - █ = Deltagootonderzoek
 - █ = Overige proeven
 - █ = Algemeen
 - = Afgerond
 - = Afhankelijk van B
 - B** = Beslismoment go / no go