

**Dijkbekledingen met
secundaire bouwstoffen en
niveau freatische lijn**



Dijkbekledingen met secundaire bouwstoffen en niveau freatische lijn

Robert 't Hart

1209832-007

Titel

Dijkbekledingen met secundaire bouwstoffen en niveau freatische lijn

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
RWS-WVL	1209832-007	1209832-007-HYE-0002	49

Trefwoorden

Steenzettingen, onderlaag, mijnsteen, puingranulaat, toplaagstabiliteit, afschuiven, oplichten, freatische lijn.

Samenvatting

In dit rapport is aangegeven hoe bij de beoordeling van de stabiliteit van een steenzetting rekening kan worden gehouden met de aanwezigheid van een laag alternatieve bouwstoffen, zoals hydraulische slak en mijnsteen.

Voor de in 2013 onderzochte locaties [t Hart, 2013] zijn vergelijkende stabiliteitsberekeningen gemaakt, waarbij de situatie met de onderlaag van alternatieve bouwstoffen is vergeleken met die waarbij de onderlaag alleen uit klei had bestaan.

De rekenregels zoals die worden gehanteerd voor het oplichten danwel afschuiven van zowel verschillende typen steenzettingen als voor asfaltbekledingen zijn op een rij gezet en met elkaar vergeleken. In deze criteria speelt het niveau van de freatische lijn steeds een belangrijke rol. De factoren die een rol spelen bij het bepalen van een uitzonderlijk hoog niveau van de freatische lijn in de dijk zijn benoemd en een indicatie is afgeleid voor het extreme niveau dat kan worden bereikt bij een homogeen doorlatende situatie.

De onderhavige studie is uitgevoerd in het kader van het meerjarige project 'Advisering steenbekledingen Zeeland' voor het Projectbureau Zeeweringen (PBZ). Dit projectbureau is opgericht ten behoeve van de renovatie van de steenzettingen in Zeeland en is een samenwerking van Rijkswaterstaat en het Waterschap Scheldestromen.




Contractueel is Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving de opdrachtgever namens PBZ voor het onderhavige onderzoek. Het deel van het project dat gericht is op kennisontwikkeling sluit aan op het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen dat uitgevoerd is in de periode van 2003-2009 in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat namens PBZ.

Referenties

Contract 31094141 / 45002226348 van 2 juni 2014

Contactpersoon RWS WVL: de heer K. Saathof

Contactpersoon Projectbureau Zeeweringen van RWS: de heer Y. Provoost

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	apr. 2015	Robert 't Hart		Mark Klein Breteler		Leo Voogt	
2	mei 2015	Robert 't Hart		Mark Klein Breteler		Leo Voogt	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Leeswijzer	2
2 De stabiliteit van een zetting met een laag alternatieve bouwstoffen	3
2.1 Opbouw constructie met een laag alternatieve bouwstoffen	3
2.2 Opbouw 1, gehele kleilaag vervangen door laag van alternatieve bouwstoffen	4
2.3 Opbouw 2, kleilaag gedeeltelijk vervangen door laag van alternatieve bouwstoffen of kleilaag aangevuld met laag van alternatieve bouwstoffen.	5
2.4 Opbouw 3, laag van alternatieve bouwstoffen toegepast als filterconstructie onder toplaag (substituut voor granulaire uitvullaag en kleilaag samen)	6
3 Herberekening onderzochte steenzettingen	9
3.1 Polder De Breede Watering Bewesten Yerseke, dijkpaal 138.7	10
3.2 Polder de Breede Watering Bewesten Yerseke, dijkpaal 139.3	11
3.3 Schouwenpolder bij Heerenkeet, dijkpaal 104	13
3.4 Biezelingsche Ham, dijkpaal 32.8	14
3.5 Willem-Annapolder, dijkpaal 30.95	15
3.6 Vierbannenpolder, dijkpaal 274+70	16
3.7 Conclusies uit herberekening van het ontwerp met klei vervangen door granulair materiaal	17
4 Overzicht criteria voor opdrijven en afschuiven van harde bekledingen	19
4.1 Beoordeling van steenzettingen	19
4.1.1 De steenzetting met standaard constructieopbouw	19
4.1.2 De doorlatende steenzetting die op (een filter op) zand ligt	21
4.2 Beoordeling van asfaltbekledingen	22
4.2.1 Wateroverdrukken bij asfaltbekleding op talud	22
4.2.2 Oplichten van asfaltbodembescherming	23
4.3 Discussie rekenregels oplichten en afschuiven	24
5 Niveau grondwaterstand bij oplichten danwel afschuiven van bekledingen	27
5.1 Factoren die het maximale niveau van de freatische lijn bepalen	28
5.2 Indicatie hoogste niveau freatische lijn in de dijk	30
6 Conclusies en aanbevelingen	33
 Bijlage(n)	
Literatuur	
Symbolenlijst	
A Tekeningen van onderzochte locaties	A-1
B Verkenning criterium voor het oplichten door golven van een dunne ondoorlatende toplaag op zand	B-1

1 Inleiding

In 2013 zijn op een achttal plekken steenzettingen opengebroken om beter inzicht te krijgen in de eigenschappen van de onderlaag van de betreffende steenzettingen. Het ging daarbij om bekledingen waarbij in plaats van een kleilaag een onderlaag van mijnsteen, hydraulische fosforslak of puingranulaat was toegepast.

In de stabiliteitsberekening van steenzettingen speelt de onderlaag een belangrijke rol waar het gaat om het mechanisme afschuiving en toplaagstabiliteit. De sterkte en de doorlatendheid van de onderlaag zijn daarbij de belangrijkste parameters.

Uit de waarnemingen gedaan bij het veldonderzoek in 2013 is het volgende naar voren gekomen:

- een vrij hoge doorlatendheid van de onderlaag, terwijl een lage doorlatendheid beoogd was;
- de onderlaag is soms niet hydraulisch verkit, terwijl dat wel de bedoeling was.

Beide vormen een potentieel probleem voor de stabiliteit van de dijkbekleding. Als de waterdoorlatendheid te groot is, zal dit de stabiliteit van de toplaag verlagen, terwijl als de waterdoorlatendheid te klein is, maar verkitting ontbreekt, dan steekt het mechanisme 'afschuiving in de onderlaag' de kop op.

De methodiek voor het bepalen van de stabiliteit van de steenzetting in geval van een onderlaag die (deels) bestaat uit secundaire bouwstoffen wordt in dit rapport beschreven. Daarbij wordt ingegaan op de consequenties van het deels vervangen van de kleilaag door een laag alternatieve bouwstoffen voor de relevante bezwijkmechanismen: toplaagstabiliteit, materiaaltransport vanuit de ondergrond en afschuiven.

De in 2013 onderzochte constructies worden daartoe herberekend uitgaande van de bij dit onderzoek verzamelde gegevens. Deze cases worden vervolgens gebruikt om de risico's van het gebruik van alternatieve materialen voor onderlagen te verkennen.

Voor wat betreft deze activiteiten kan dit rapport worden opgevat als een vervolg op het veldonderzoek naar granulaire materialen toegepast als onderlaag onder steenzettingen. De voorafgaande werkzaamheden zijn gerapporteerd in [t Hart, 2013] en [t Hart, 2015].

Voor het beoordelen van de stabiliteit van dijkbekledingen bij hoge grondwaterstanden in het dijklichaam zijn in de loop der jaren uiteenlopende rekenregels ontwikkeld. Steenzettingen en asfaltbekledingen hebben verschillende rekenregels en maatgevende belastingen. Teneinde lijn te brengen in deze rekenregels worden deze rekenregels op een rij gezet en geanalyseerd. Vanuit dit overzicht kan worden beoordeeld of verdere ontwikkeling, danwel samenbrengen van de verschillende bekledingen onder één rekenregel mogelijk is.

Het is wel al duidelijk dat de ligging van de freatische lijn van groot belang is voor de verschillende rekenregels voor de bezwijkmechanismen 'oplichten' en 'afschuiven'. De belangrijkste parameters die van belang zijn voor de maatgevende situatie worden in dit rapport geïdentificeerd en met die parameters wordt voor een eenvoudige homogene situatie een globale indicatie voor de ligging van de maatgevende freatische lijn afgeleid.

Het onderhavige onderzoek is uitgevoerd in het kader van het meerjarige project 'Advisering steenbekledingen Zeeland' voor het Projectbureau Zeeweringen (PBZ). Dit projectbureau is opgericht ten behoeve van de renovatie van de steenzettingen in Zeeland en is een samenwerking van Rijkswaterstaat Zeeland en het Waterschap Scheldestromen.

Contractueel is Water Verkeer en Leefomgeving van Rijkswaterstaat de opdrachtgever namens PBZ voor het onderhavige onderzoek. Het deel van het project dat gericht is op kennisontwikkeling sluit aan op het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen dat uitgevoerd is in de periode van 2003-2009 in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat namens PBZ.

1.1 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is aangegeven op welke manier er bij de beoordeling van de stabiliteit van een steenzetting rekening kan worden gehouden met de aanwezigheid van een laag alternatieve bouwstoffen.

In hoofdstuk 3 is voor de in 2013 onderzochte locaties [t Hart, 2013] de stabiliteit van de bekleding berekend als had de laag alternatieve bouwstoffen de doorlatendheid van klei, danwel de werkelijk aangetroffen doorlatendheid.

In hoofdstuk 4 worden de achtergronden van de rekenregels zoals die worden gehanteerd voor het oplichten danwel afschuiven van zowel verschillende typen steenzettingen als voor asfaltbekledingen gememoreerd en met elkaar vergeleken. In deze criteria speelt het niveau van de freatische lijn steeds een rol. Op het niveau daarvan en de factoren die daarbij een rol spelen, wordt in hoofdstuk 5 ingegaan. Hoofdstuk 6 sluit dit rapport af met de conclusies en aanbevelingen.

2 De stabiliteit van een zetting met een laag alternatieve bouwstoffen

Er zijn beoordelingsregels voor de stabiliteit van diverse steenzettingsconstructies. Als er in een standaard steenzettingsconstructie een laag alternatieve bouwstoffen is toegepast, dan is niet altijd evident welke beoordelingsregels moeten worden toegepast. In dit hoofdstuk wordt voor verschillende constructie-opbouwen aangegeven welke eigenschappen in de rekenregels voor de verschillende bezwijkmechanismen moeten worden gehanteerd.

In de volgende paragraaf wordt ingegaan op de opbouw van de verschillende constructies waarin een laag alternatieve bouwstoffen is opgenomen en om welke bezwijkmechanismen het gaat.

Vervolgens worden in de volgende drie paragrafen per constructieopbouw aanwijzingen gegeven voor de relevante mechanismen.

De alternatieve bouwstoffen waar het in dit verband over gaat zijn de volgende materialen:

- Mijnssteen tout venant
- Hydraulische hoogovenslak 0-45mm
- Hydraulische fosforslak 0-45mm
- Puingranulaat 0-40mm

2.1 Opbouw constructie met een laag alternatieve bouwstoffen

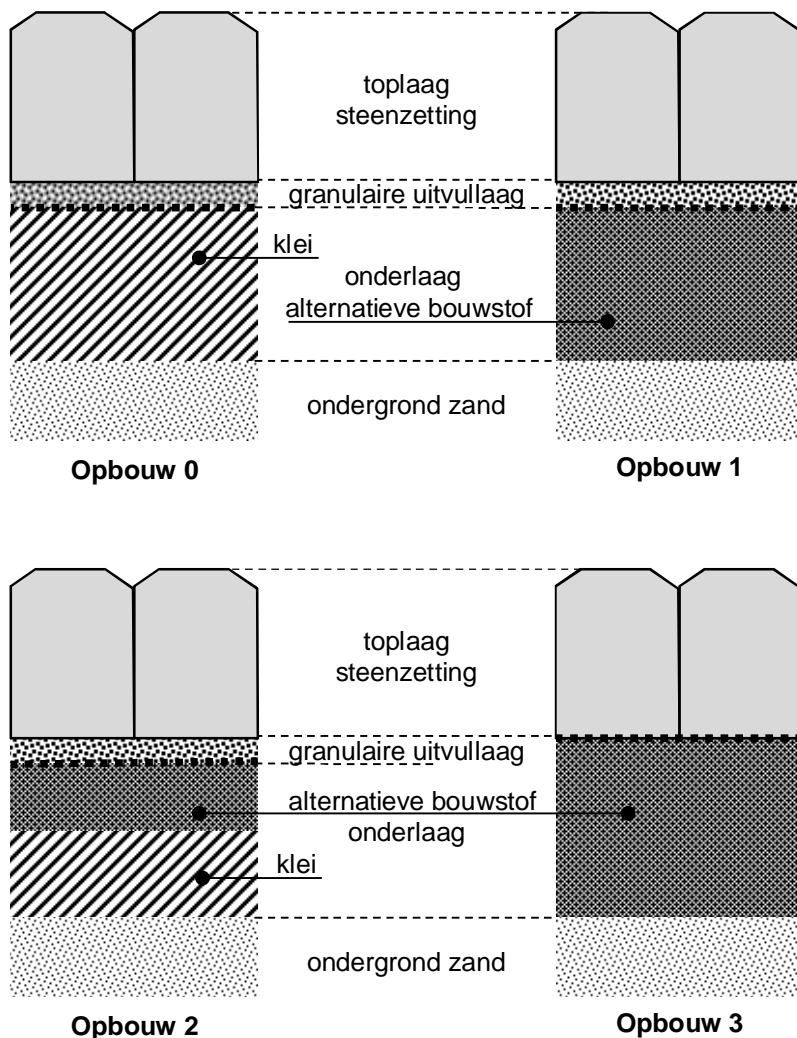
De standaard opbouw van een steenzetting bestaat uit een toplaag van gezette steen. Daaronder ligt een granulaire uitvullaag, die ook wel wordt aangeduid als filterlaag. Daaronder kan nog een tweede granulaire filterlaag liggen, maar veelal ligt de granulaire uitvullaag op een geotextiel. Dit geotextiel heeft ook de functie van filterlaag. Het beschermt de onderlaag van klei die op de zandkern ligt, zie Figuur 2.1,0. Als het geen zanddijk maar een kleidijk betreft, dan kan de bovenste laag van de kleikern worden opgevat als onderlaag van klei.

In deze standaard constructieopbouw is de kleilaag soms geheel vervangen door een laag van alternatieve bouwstoffen, constructieopbouw 1, zie Figuur 2.1,1. Vaker is een deel van de kleilaag vervangen of de te dunne kleilaag aangevuld met alternatieve bouwstoffen, zie Figuur 2.1,2. Tenslotte kan ook een laag van alternatieve bouwstoffen zijn aangebracht op de dijk kern waarop eventueel een geotextiel en daarop de feitelijke steenzetting. De granulaire uitvullaag en onderlaag zijn dan in feite ingeruild voor één laag alternatieve bouwstoffen, zie Figuur 2.1,3. In de figuren is tevens een eventueel geotextiel ingetekend op de meest voor de hand liggende plek.

Alle steenzettingen moeten worden beoordeeld op een viertal bezwijkmechanismen:

- A. Toplaagstabiliteit
- B. Materiaaltransport vanuit de granulaire laag
- C. Materiaaltransport vanuit de ondergrond
- D. Afschuiving

Omdat het gebruik van alternatieve bouwstoffen soms leidt tot een extra laag, of dat er onduidelijkheid bestaat of de vervangende laag wel echt dezelfde rol vervuld als van de laag die is vervangen wordt in de volgende paragrafen per constructie ingegaan op de te hanteren parameters voor de verschillende bezwijkmechanismen.



Figuur 2.1 Verschillende typen constructie-opbouw

In alle weergegeven typen constructie-opbouw is uitgegaan van een ondergrond van zand. Als de ondergrond van de steen-zettingsconstructie de kleikern betreft, dan kan het mechanisme afschuiving buiten beschouwing blijven.

2.2 Opbouw 1, gehele kleilaag vervangen door laag van alternatieve bouwstoffen

Voor de beoordeling van de toplaagstabiliteit dient te worden nagegaan of de doorlatendheid van de onderlaag dusdanig is dat hij als tweede filterlaag in rekening moet worden gebracht. De granulaire uitvullaag is uiteraard eerste filterlaag. Als de doorlatendheid in vergelijking met de eerste filterlaag niet verwaarloosbaar is, dan zal de betreffende onderlaag de toplaagstabiliteit negatief kunnen beïnvloeden. Hij moet bij ontwerp en toetsing dan dus in rekening worden gebracht.

Voor het mechanisme materiaaltransport vanuit de granulaire laag zijn slechts de eigenschappen van de toplaag en de granulaire uitvullaag relevant. Het materiaal van de onderlaag speelt daarbij dus geen rol.

In de berekening voor het mechanisme materiaaltransport vanuit de ondergrond wordt de onderlaag altijd bij de ondergrond gerekend. Er zijn bij dit mechanisme twee mogelijkheden van materiaaltransport die moeten worden gecheckt. De eerste check die moet worden uitgevoerd is of uitspoeling van de onderlaag door de granulaire uitvullaag (danwel het daaronder gelegen geotextiel) kan plaatsvinden. Maar als de onderlaag dusdanig doorlatend is dat hij moet worden opgevat als 2^e filterlaag, dan is het dieper gelegen scheidingsvlak mogelijk maatgevend. In de beoordeling moet dan gebruik worden gemaakt van de eigenschappen van de alternatieve bouwstof en van het eronder gelegen zand.

Ook het mechanisme afschuiving moeten er verschillende mogelijke opties worden gecheckt. Als de onderlaag significant ondoorlatender is dan het onderliggende zand van de dijk, dan treedt de afschuiving op net onder de scheiding van de onderlaag en het zand. De sterkte met betrekking tot dit mechanisme wordt dan geleverd door het gewicht van toplaag, granulaire laag en onderlaag.

Datzelfde afschuifvlak zal maatgevend zijn als de onderlaag wel redelijk doorlatend is, maar voldoende sterkte heeft. Als de onderlaag echter een doorlatendheid heeft als die van zand en hij bestaat uit nagenoeg los materiaal, dan is de ligging van het afschuifvlak niet eenvoudig aan te wijzen. Dan kan de bekleding vooralsnog alleen worden beoordeeld als lag hij direct op zand en niet op een onderlaag. Oftewel de afschuiving moet worden gecheckt met de rekenregel voor de steenzetting direct op zand, waarbij de onderlaag wordt genegeerd.

2.3 Opbouw 2, kleilaag gedeeltelijk vervangen door laag van alternatieve bouwstoffen of kleilaag aangevuld met laag van alternatieve bouwstoffen.

Voor de beoordeling van de toplaagstabiliteit dient te worden nagegaan of de doorlatendheid van de laag alternatieve bouwstoffen dusdanig is dat hij als tweede filterlaag (de granulaire uitvullaag is eerste filterlaag) in rekening moet worden gebracht. Als dat zo is, dan zal de laag alternatieve bouwstoffen tot een wat lagere toplaagstabiliteit leiden.

Voor het mechanisme materiaaltransport vanuit de granulaire laag zijn slechts de eigenschappen van de toplaag en de granulaire uitvullaag relevant. Het materiaal van de onderlaag speelt dus geen rol.

Voor het mechanisme materiaaltransport vanuit de ondergrond zijn er twee mogelijkheden die moeten worden gecheckt, afhankelijk van de doorlatendheid van de laag alternatieve bouwstoffen. De eerste check die moet worden uitgevoerd is of uitspoeling van het bovenste deel van de onderlaag door de granulaire uitvullaag (danwel het daaronder gelegen geotextiel) kan plaatsvinden. Als het bovenste deel van de onderlaag dusdanig doorlatend is dat hij moet worden opgevat als 2^e filterlaag, dan is het scheidingsvlak tussen de alternatieve bouwstof en de klei mogelijk maatgevend. In de beoordeling moet dan gebruik worden gemaakt van de eigenschappen van de alternatieve bouwstof en van de eronder gelegen klei.

Voor het mechanisme afschuiving moeten er twee afschuifvlakken worden gecheckt. Aangezien het onderste deel van de onderlaag significant ondoorlatender is dan het

onderliggende zand van de dijk, ligt een potentieel afschuifvlak net onder de scheiding van de onderlaag en het zand. De stabiliteit van dat afschuifvlak moet worden gecontroleerd.

Als het bovenste deel van de onderlaag een doorlatendheid heeft als die van zand en hij bestaat uit nagenoeg los materiaal, dan zou een afschuifvlak in die laag kunnen optreden. Die situatie kan vooralsnog alleen worden beoordeeld als lag de bekleding (toplaag + granulaire uitvullaag + eventueel geotextiel) direct op zand en niet op een onderlaag. Oftewel de afschuiving moet worden gecheckt met de rekenregel voor de steenzetting direct op zand.

2.4 Opbouw 3, laag van alternatieve bouwstoffen toegepast als filterconstructie onder toplaag (substituut voor granulaire uitvullaag en kleilaag samen)

In deze constructieopbouw wordt de laag van alternatieve bouwstoffen aangeduid als granulaire laag. Deze kan al dan niet gebonden zijn. De constructie kan eventueel nog een geotextiel bevatten tussen de toplaag van gezette steen en de granulaire laag.

Voor de beoordeling van de toplaagstabiliteit dient te worden nagegaan of de doorlatendheid van de onderlaag dusdanig is dat hij als filterlaag in rekening moet worden gebracht. Dat is het geval als de doorlatendheid groter is dan die van zand. De toplaagstabiliteit moet dan worden gecheckt met een berekening waarbij de laag alternatieve bouwstoffen wordt opgevat als 1^e filterlaag.

Als de doorlatendheid van de onderlaag van dezelfde orde of minder is als die van zand en er is een geotextiel aanwezig op de granulaire laag, dan moet de bekleding worden beoordeeld als een steenzetting op geokunststof op zand of klei (steenzetting type 1). Als het geotextiel ontbreekt maar het materiaal is gebonden, dan kan de bekleding worden beoordeeld als een steenzetting op goede klei (steenzetting type 2).

Voor de beide mechanismen met betrekking tot materiaaltransport is van belang of er een geotextiel aanwezig is, of de granulaire laag gebonden is en of de granulaire laag doorlatend is.

Als er een geotextiel aanwezig is, dan kunnen de rekenregels voor materiaaltransport uit de ondergrond worden toegepast, waarbij de eigenschappen van het geotextiel en de granulaire laag relevant zijn.

Als er geen geotextiel aanwezig is, maar de granulaire laag is geheel gebonden, verkit, dan kan er geen materiaaltransport vanuit de granulaire laag optreden.

Als er geen geotextiel aanwezig is en de granulaire laag is niet (geheel) gebonden, dan moet het grensvlak tussen toplaag en granulaire laag worden gecontroleerd met de gebruikelijke rekenregels voor materiaaltransport vanuit de granulaire laag.

In die gevallen waarin de doorlatendheid van de granulaire laag groter is dan die van zand, dient het grensvlak tussen de granulaire laag en ondergrond van zand te worden gecontroleerd met de rekenregels voor materiaaltransport vanuit de ondergrond.

Voor de beoordeling op afschuiving is de doorlatendheid van de laag van belang. Als de laag ondoorlatender is dan zand, dan is het meest voor de handliggende schuifvlak onder de granulaire laag. Dit dient danook te worden gecheckt.

Als de granulaire laag een doorlatendheid heeft als die van zand en hij bestaat uit nagenoeg los materiaal, dan zou een afschuifvlak in die laag kunnen optreden. Die situatie kan vooralsnog alleen worden beoordeeld als lag de bekleding (toplaag + eventueel geotextiel) direct op zand en niet op een onderlaag.

Als de granulaire laag een doorlatendheid heeft die groter is dan die van zand, dan zou een afschuifvlak in het zand kunnen optreden. Die situatie kan ook worden gecheckt met de

rekenregel voor de steenzetting op zand, maar het gewicht van de gehele bekleding (toplaag + granulaire laag), in plaats van alleen de toplaag, mag dan in rekening worden gebracht.

Merk op dat deze opbouw (3) momenteel voor zover bekend niet voor nieuwe constructies wordt toegepast. De toplaagstabiliteit in geval van een ondoorlatende granulaire laag is relatief laag (vergelijkbaar met toplaag op goede klei, zetting type 2). Daarom is deze opbouw niet aanbevelenswaardig.

3 Herberekening onderzochte steenzettingen

In 2013 zijn een aantal steenzettingen onderzocht waarin steeds een laag met alternatieve bouwstoffen was verwerkt [t Hart, 2014]. In die constructies was dat materiaal verwerkt als substituuat voor klei. Het gaat om de locaties genoemd in Tabel 3.1.

Nr. Locatie	dijkpaal	Niveau [m] t.o.v. NAP	Type toplaag, dikte [cm]
1. Polder de breede watering bewesten Yerseke	138,7	4,50; 3,00; 1,31	Basalton, 45
2. Polder de breede watering bewesten Yerseke	139,3	1,32	Basalton, 45
3. Schouwenpolder bij Heerenkeet	104	1,66	Hydro-block, 45
4. Biezelingsche Ham (WS*)	32.8	1,40	Haringman, gekanteld, 25**
5. Willem-Annapolder (WS*)	30.95	1,25	Hydro-block, 40
6. Vierbannenpolder	274+70	0,92	Hydro-block, 50

Tabel 3.1 Onderzochte locaties (* locatie aan de Westerschelde, overige locaties aan de Oosterschelde; ** De toplaagdikte van de gekantelde Haringmanblokken is zoals gebruikelijk 50 cm, maar de oorspronkelijke dikte voor kantelen was 0,25 m)

In de volgende paragrafen worden de betreffende bekledingen beschreven en ingegaan op de resultaten van de stabiliteitsberekeningen. Daarbij worden twee resultaten met elkaar vergeleken: 1 de bekleding zoals die is aangelegd, 2 de bekleding waarbij de kleivervanger daadwerkelijk de eigenschappen van klei heeft. De berekeningen zijn uitgevoerd met het tabblad *Toetsing* van *Steenstoets2014* Versie 14.1.2.1 (augustus 2014).

De profielgegevens zijn ontleend aan de betreffende revisie-tekeningen (hoogtematen t.o.v. NAP en afstanden t.o.v. nulpunt). De tekeningen van de gebruikte profielen zijn opgenomen in Bijlage A. In deze berekeningen is aangenomen dat de ter plaatse van het breekgat aangetroffen laagopbouw representatief is voor de volledige steenzetting (voor zover er in dezelfde dwarsdoorsnede geen andere breekgegevens voor handen zijn).

Verder is gerekend met een aantal standaardgegevens gebaseerd op *Handleiding Toetsing en Ontwerp* (versie april 2012). Zo is o.a. als open oppervlak voor zuilenzettingen uitgegaan van de 10% die voor ontwerp genoemd is (voor toetsing is 12% gebruikelijk). Ook is voor de relevante korreldiameter (D_{15}) van de sorteringen voor het granulaair materiaal uitgegaan van de gegevens uit Tabel 3.2. Om de gewenste veiligheid in rekening te brengen, is een factor 1,2 voor de toplaagdikte en de filterlaagdikte gebruikt (is in overeenstemming met de aanbeveling volgens het *Ontwerpinstrumentarium OI2014*). Nb. afhankelijk van het mechanisme wordt door *Steenstoets* de betreffende parameter vermenigvuldigd met de specifiek voor dat mechanisme opgegeven partiële veiligheidscoëfficiënt, of wordt er juist door de betreffende veiligheidscoëfficiënt gedeeld.

Toepassing (sortering)	D_{15} [mm]
Filter zuilen (14/32 mm)	17
Filter betonblokken (4/20 mm)	5
Inwassing zuilen (4/32 mm)	6

Tabel 3.2 Standaard D_{15} -waarden volgens tabel 5 uit [PZDT-R-12093; 2012]

De hydraulische randvoorwaarden die voor alle berekeningen zijn gehanteerd, zijn ontleend aan de files met ontwerprandvoorwaarden: Golfcondities_OS_verschillende_bekledingstypen_180110.xls en WS-ontwerprandvoorwaarden-091125.xls.

Voor de betreffende dijkpalen zijn de golftrandvoorwaarden overgenomen in Tabel 3.3 voor de locaties aan de Oosterschelde en in Tabel 3.4 voor de locaties aan de Westerschelde.

Nr., locatie, Dp.	Waterstanden		NAP		NAP + 2m		NAP + 3m		NAP + 4m	
	H _s [m]	T _{pm} [s]	H _s [m]	T _{pm} [s]	H _s [m]	T _{pm} [s]	H _s [m]	T _{pm} [s]	H _s [m]	T _{pm} [s]
1. Polder de breede watering bewesten Yerseke 138.7	0,67	2,93	1,34	4,47	1,51	5,39	1,77	5,92		
2. Polder de breede watering bewesten Yerseke 139.3	0,67	2,93	1,34	4,47	1,51	5,39	1,77	5,92		
3. Schouwenpolder bij Heerenkeet 10.4	1,58	4,44	2,03	4,74	2,26	5,08	2,35	5,16		
6. Vierbannepolder 274.4	0,45	4,08	1,45	5,85	1,84	6,17	2,11	5,75		

Tabel 3.3 Golftrandvoorwaarden voor de onderzochte locaties aan de Oosterschelde (Golfcondities_OS_verschillende_bekledingstypen_180110)

Nr., locatie, Dp.	Waterstanden		NAP + 2,0m		NAP + 4,0m		NAP + 6,0m		Windr.
	H _s [m]	T _{pm} [s]	H _s [m]	T _{pm} [s]	H _s [m]	T _{pm} [s]	H _s [m]	T _{pm} [s]	
4. Biezelingsche Ham 32.8	0,6	4,4	1,1	5,5	1,3	5,7		210	
5. Willem-Annapolder 30.95	1,6	5,0	1,9	5,6	2,1	6,3		240	

Tabel 3.4 Golftrandvoorwaarden voor de onderzochte locaties aan de Westerschelde (WS-ontwerprandvoorwaarden-091125)

3.1 Polder De Breede Watering Bewesten Yerseke, dijkpaal 138.7

In de Basaltonbekleding van de dijk van de "Polder de breede watering bewesten Yerseke" zijn bij dijkpaal 138.7 op verschillende hoogtes breekgaten gemaakt om de constructie-opbouw te controleren, om de eigenschappen van de lagen vast te stellen. De resultaten hiervan zijn samengevat in Tabel 3.5.

Laagdikte op niveau:	NAP+4,50 m	NAP+3,00 m	NAP+1,31
Laag			
Zetting	0,45 m	0,45 m	0,45 m
Uitvullaag	0,06 m	0,06 m	0,09 m
Geotextiel	Non-woven	Non-woven	Non-woven
Onderlaag	0,94 m Mijnsteen	1,29 m Mijnsteen	≥ 1,21 m Mijnsteen
Ondergrond	Zand	Zand	??

Tabel 3.5 Laagopbouw bekleding buitentalud bij dijkpaal 138.7 van de Polder De breede watering bewesten Yerseke (1 t/m 3)

De opbouw die op deze dijk is aangetroffen is opbouw 1, waarbij de granulaire onderlaag direct op de zandkern ligt. De mijnsteen had enige samenhang en was duidelijk ondoorlatender dan zand.

Voor een beoordeling van de toplaagstabiliteit is de granulaire laag geschematiseerd als tweede filterlaag. Aangezien de mijnsteen was afgedekt met een toereikend geotextiel is materiaaltransport vanuit de onderlaag niet aan de orde. Doordat de mijnsteen redelijk kleilig is, is migratie van zand de onderlaag in uitgesloten.

Aangezien de mijnsteen toch ten minste een orde ondoorlatender is dan het zand, zal een eventueel afschuifvlak in het zand, juist onder de onderlaag optreden. Voor wat betreft afschuiving is de situatie dus gelijk aan die voor een klei-onderlaag.

Voor de berekeningen is verondersteld is dat de tonronde in het talud betrekking heeft op de zuilenzetting en de gekantelde Haringmanblokken: de tonronde betreft dus het gehele talud beneden de berm. De overgang tussen gekantelde Haringmanblokken blijkt namelijk redelijk netjes op de tonronde voor het gehele benedentalud te liggen.

De vergelijkende Steentoets-berekeningen met de laag mijnsteen enerzijds en deze steenlaag vervangen door een even dikke kleilaag geeft geen verschil in toplaagstabiliteit. De toplaagstabiliteit van deze zuilenzetting is ongevoelig voor beperkte veranderingen in de samenstelling van de filterlaag/lagen omdat de stabiliteit wordt begrensd door het empirisch stabiliteitscriterium (bovengrens voor stabiliteit). En het gaat om een marginale verandering. De dikte van de mijnsteenlaag is weliswaar een orde groter dan de dikte van de granulaire uitvullaag. Maar omdat de doorlatendheid ordes kleiner is ten opzichte van de doorlatendheid van de grove granulaire uitvullaag die onder een zuilenzetting wordt toegepast, is de k-b-waarde van de mijnsteenonderlaag (product van doorlatendheid en laagdikte) verwaarloosbaar ten opzichte van de k-b-waarde van de granulaire uitvullaag.

Voor de afschuiving kan volgens de berekening worden volstaan met een dikte die enkele malen kleiner is dan de aanwezige laagdikte. Dat geldt zowel als er wordt gerekend met klei als met de mijnsteen.

Voor de gekantelde Haringmanblokken die ligt onder de opengebroke zuilenzetting is in de vergelijkende berekeningen aangenomen dat dezelfde opbouw van de onderlaag aanwezig is. Voor die zetting is uiteraard wel het fijnere filter gehanteerd, maar wel met de laagdikte die in het laagst gelegen breekpunt is gemeten (0,09 m). Voor die zetting heeft het vervangen van een deel van de kleilaag door mijnsteen wel enige consequenties voor de berekende toplaagstabiliteit. Dit is omdat voor gekantelde blokken veelal de leklengte-theorie bepalend is voor de toplaagstabiliteit. Bovendien is de representatieve korreldiameter van de filterlaag onder een zetting van gekantelde blokken altijd aanzienlijk kleiner dan onder een zuilenzetting. Daardoor leidt toevoegen van de extra filterlaag (het mijnsteen) tot een wat langere leklengte. Per saldo blijken voor beide uitvoeringsvarianten (onderlaag alleen klei en onderlaag mijnsteen) de g/t-waarden groter dan 1 (1,26 respectievelijk 1,18; oftewel een dikteoverschot van 0,12 m respectievelijk 0,07 m). Ook de veiligheid van deze zetting van gekantelde Haringmanblokken is dus boven het minimale niveau.

Volgens de berekeningen op afschuiving is slechts de minimaal benodigde laagdikte benodigd (0,30m klei, of 0,05m granulair materiaal). Aangezien de aanwezige laagdikte veel groter is, vormt de vervanging van klei door mijnsteen in dit geval geen probleem.

3.2 Polder de Breede Watering Bewesten Yerseke, dijkpaal 139.3

In de Basaltonbekleding van de dijk van de polder "De breede watering bewesten Yerseke" is bij dijkpaal 139.3 op een hoogte van NAP+1,32 m een breekgat gemaakt om de constructie-opbouw te controleren, om de eigenschappen van de lagen vast te stellen. De resultaten hiervan zijn samengevat in Tabel 3.7.

Omdat het diepste deel van de onderlaag klei betreft, is de opbouw die op deze dijk is aangetroffen is van type 2: de granulaire onderlaag ligt op klei op de zandkern. Zowel de fosforslak als de mijnsteen had enige samenhang en zeker de mijnsteen was duidelijk ondoorlatender dan zand.

Voor een beoordeling van de toplaagstabiliteit is de granulaire laag geschematiseerd als tweede filterlaag. Aangezien de mijnsteen was afgedekt met een toereikend geotextiel is materiaaltransport vanuit de onderlaag niet aan de orde. Doordat de mijnsteen redelijk kleilig is, is migratie van zand de onderlaag in uitgesloten.

Aangezien de mijnsteen toch ten minste een orde ondoorlatender is dan het zand, moet een eventueel afschuifvlak in het zand, juist onder de onderlaag worden. Dat betreft dus afschuiving van een situatie die gelijk is aan die voor een klei-onderlaag.

Laag	Laagdikte op niveau: NAP+1,32 m
Zetting	0,45 m (Basalton)
Uitvullaag	0,15 m
Geotextiel	Non-woven
Onderlaag	0,60 m slak 0,15 m mijnsteen 0,35 m klei verontreinigd met zand, hout en puin 0,30 m klei met zandlaagjes
Ondergrond	??

Tabel 3.6 laagopbouw bekleding buitentalud bij dijkpaal 139.3 van de Polder De breede watering bewesten Yerseke (4)

Geconstateerd is dat de op de revisietekening vermelde "afstand t.o.v. nulpunt" voor de teen van het talud niet overeenstemt met de 5 m brede vooroeververdediging, die bij 39,77 m eindigt, en de gesuggereerde taludhelling. Aangenomen is dat de juiste waarde 34,73 m is, i.p.v. 37,73 m.

Voor de berekening is ook voor deze locatie verondersteld dat de tonronde van het talud betrekking heeft op de zuilenzetting en de gekantelde Haringmanblokken samen: de tonronde betreft dus het gehele talud beneden de berm. De overgang tussen gekantelde Haringmanblokken blijkt volgens de revisietekening namelijk redelijk netjes op de tonronde voor het gehele talud beneden de berm te liggen.

Vergelijkende Steentoets-berekeningen met de laag slak enerzijds en deze steenlaag vervangen door een even dikke kleilaag geeft geen verschil in toplaagstabiliteit. De toplaagstabiliteit van deze zuilenzetting is ongevoelig voor beperkte veranderingen in de samenstelling van de filterlaag/lagen omdat de stabiliteit wordt begrensd door het empirisch stabiliteitscriterium (bovengrens voor stabiliteit). En het gaat om beperkte veranderingen omdat de doorlatendheid van de slak gering is ten opzichte van het grove filter dat onder een zuilenzetting wordt toegepast.

Voor wat betreft afschuiving is volgens de vergelijkende berekeningen slechts de minimum laagdikte (0,3m) noodzakelijk. Aangezien de totale laagdikte van filter en onderlagen die is aangetroffen ca. 1,5m bedraagt, vormt afschuiving voor deze constructie geen gevaar.

Voor de gekantelde Haringmanblokken die ligt onder de opengebroken zuilenzetting zijn dezelfde aannamen gedaan als voor de vorige locatie. Voor die zetting heeft het vervangen van een deel van de kleilaag door mijnsteen ook weer enige invloed op de berekende toplaagstabiliteit. Per saldo blijken voor beide uitvoeringsvarianten (onderlaag alleen klei en

onderlaag mijnsteen) de berekende g/t-waarden groter dan 1 (1,28 respectievelijk 1,24; oftewel een dikteoverschot van 0,12 m respectievelijk 0,09 m). Ook deze zetting van gekantelde Haringmanblokken haalt dus het gewenste veiligheidsniveau ruim. Voor wat betreft afschuiving is de situatie vergelijkbaar als voor de erboven gelegen zuilenzetting.

3.3 Schouwenpolder bij Heerenkeet, dijkpaal 104

In de zetting van Hydro-Blocks op de dijk van de Schouwenpolder (westelijk van Heerenkeet, dijkpaal 104) is op NAP+1,66 m een breekgat gemaakt om de constructieopbouw te controleren, om het type en dikte van de lagen vast te stellen. De resultaten hiervan zijn samengevat in Tabel 3.7.

Laag	Laagdikte op niveau: NAP+1,66 m
Zetting	0,45 m (Hydro-blocks)
Uitvullaag	0,08 m
Geotextiel	Non-woven
Onderlaag	1,17 m Mijnsteen
Ondergrond	Klei sterk siltig

Tabel 3.7 Laagopbouw bekleding buitentalud bij dijkpaal 104 van de Schouwenpolder (5)

Omdat er ter plaatse van het breekgat geen ondergrond van zand is aangeboord is de opbouw volgens de indeling uit hoofdstuk 2 niet te typeren: de granulaire onderlaag ligt op klei. Als er op die locatie nog een scheidingsvlak met een zandondergrond aanwezig is dan ligt dat dusdanig diep dat dat voor afschuiving nooit een probleem op zal leveren. De mijnsteen had enige samenhang.

Voor een beoordeling van de top laagstabiliteit is de granulaire laag geschematiseerd als tweede filterlaag. Aangezien de mijnsteen was afgedekt met een toereikend geotextiel is materiaaltransport vanuit de onderlaag niet aan de orde. Doordat de mijnsteen redelijk kleilig is, is interne migratie van kleideeltjes naar de mijnsteen buiten beschouwing uitgesloten. Per saldo hoeft voor deze bekleding alleen de top laagstabiliteit te worden geëvalueerd.

De afronding naar de berm is niet op tekening aangegeven. Daardoor is de helling van de zuilenzetting niet aan de maatvoering op tekening af te lezen. Aangenomen is dat helling van de zuilenzetting (tot aan de afronding naar de berm) gelijk is aan de helling van de gepenetreerde breuksteenoverlaging direct onder de betreffende zetting. Die helling, ca. 1: 2,9 is ontleend aan de taludhelling voor de reconstructie.

Vergelijkende Steentoets-berekeningen met de mijnsteenlaag enerzijds en deze mijnsteenlaag vervangen door een even dikke kleilaag geeft geen verschil in top laagstabiliteit. De top laagstabiliteit van deze zuilenzetting is ongevoelig voor beperkte veranderingen in de samenstelling van de filterlaag/lagen omdat de stabiliteit wordt begrensd door het empirisch stabiliteitscriterium. En het gaat om beperkte veranderingen omdat de doorlatendheid van de mijnsteen gering is ten opzichte van het grove filter dat onder een zuilenzetting wordt toegepast.

3.4 Biezelingsche Ham, dijkpaal 32.8

In de zetting van gekantelde Haringmanblokken op de dijk van de Biezelingsche Ham (dijkpaal 32.8) is op NAP+1,40 m breekgaten gemaakt om de constructieopbouw te controleren, om de eigenschappen van de lagen vast te stellen. De resultaten hiervan zijn samengevat in Tabel 3.8.

Laag	Laagdikte op niveau: NAP+1,40 m
Zetting	0,50 m (Haringman gek.)
Uitvullaag	0,10 m
Geotextiel	Non-woven
Onderlaag	0,75 m Puingranulaat 0,10 m Klei
Ondergrond	Zand?

Tabel 3.8 Laagopbouw bekleding buitentalud bij dijkpaal 32.8 van Biezelingsche Ham (6)

De opbouw die op deze dijk is aangetroffen is van type 2, waarbij de granulaire onderlaag op een kleilaag op de ondergrond van zand ligt. Het puingranulaat was zeer grof zandig met relatief weinig puin en had geen samenhang. De doorlatendheid is vergelijkbaar met grof zand.

Voor een beoordeling van de toplaagstabiliteit is de granulaire laag geschematiseerd als tweede filterlaag. Aangezien het puingranulaat was afgedekt met een toereikend geotextiel is materiaaltransport vanuit de onderlaag niet aan de orde. Doordat het puingranulaat direct op klei ligt, kan migratie van kleideeltjes naar de laag puingranulaat niet worden uitgesloten. De kleilaag verhindert wel de migratie van de ondergrond door de onderlaag.

Met betrekking tot afschuiving moeten twee afschuifvlakken in de beschouwing worden betrokken:

- Een eventueel afschuifvlak in de laag puingranulaat, te beoordelen door een berekening van de top- en granulaire uitvullaag op zand.
- Een eventueel afschuifvlak in het zand, juist onder de onderlaag, de situatie die vergelijkbaar is met die voor een klei-onderlaag.

Voor de berekening is aangenomen dat de gelaagdheid van de constructie onder de toplaag op het gehele talud hetzelfde is als is aangetroffen op NAP+1,4 m (de revisietekening suggereert dat de grondverbetering met puin alleen onder de benedentafel aanwezig is).

Voor de soortelijke massa is voor de beide Haringmanblokken (kleinste afmeting 0,2 m en 0,25 m) niet uitgegaan van de standaardwaarde van 2200 kg/m^3 gegeven op het tabblad *info*, maar van de waarden volgens de Handleiding Toetsing en Ontwerp (versie april 2012): $D = 0,20 \text{ m}: 2.225 \text{ kg/m}^3$; $D = 0,25 \text{ m}: 2.240 \text{ kg/m}^3$.

Vergelijkende Steentoets-berekeningen met de laag puingranulaat enerzijds en deze laag puingranulaat vervangen door een even dikke kleilaag geeft een merkbaar verschil in toplaagstabiliteit. De toplaagstabiliteit van de zetting van gekantelde Haringmanblokken is gevoelig voor veranderingen in de samenstelling van het filter omdat de stabiliteit wordt bepaald door de leklengtetheorie, waarin een doorlatender filterlaag leidt tot een geringere toplaagstabiliteit. En aangezien de laag puingranulaat voor de berekening van de toplaagstabiliteit moet worden geschematiseerd als een tweede filterlaag levert puingranulaat in plaats van klei een wat andere uitkomst op.

In de opnieuw uitgevoerde ontwerpberekening slaat ten gevolge van het vervangen van 0,75 m klei door puingranulaat de toplaagstabiliteit om van stabiel (goed: $g/t = 1,02$) naar instabiel (niet goed: $g/t = 0,92$). Deze waarden zijn gevonden voor het taluddeel op het niveau waar de bekleding is opengebrouwen.

Nagegaan is met welke veiligheidscoëfficiënt de betreffende bekleding nog juist een uitkomst goed wordt gevonden. Dat blijkt 1,08 te zijn, terwijl dat volgens de "Handleiding toetsing en ontwerp, Technische werkwijze van projectbureau Zeeweringen" [Bosters, 2012] 1,2 moet zijn. Als referentie hierbij is nagegaan wat de veiligheid in geval van een kleilaag zou zijn geweest. Voor de constructie met slechts een kleilaag zou bij een veiligheidsfactor van 1,23 nog juist goed worden berekend.

De stabiliteit van het eventueel afschuifvlak in het zand, juist onder de onderlaag is gecontroleerd. De ontwerpberekening eist slechts de minimaal benodigde dikte aan filter en kleilaag (0,3m). Aangezien het pakket van filter- en kleilagen 0,95m bedraagt, vormt afschuiving langs dit schuifvlak geen enkele bedreiging.

Het afschuifvlak in de laag puingranulaat is beoordeeld door een berekening van de top- en granulaire uitvullaag direct op zand aan te nemen. Daaruit bleek dat deze bekleding op dit punt ook voldoet, al is de marge beduidend kleiner dan de afschuiving langs het dieper gelegen schuifvlak.

Het bij het ontwerp gewenst veiligheidsniveau blijkt door de toepassing van het puingranulaat als kleivervanger dus niet te zijn gehaald voor de toplaagstabiliteit. Overigens is de veiligheid wel ruim voldoende om tot in lengte van jaren met als resultaat "voldoende" door de toetsing te komen. Er is voor de hydraulische randvoorwaarden immers uitgegaan van ontwerpwaarden en zelfs met die randvoorwaarde is er nog sprake van een veiligheidscoëfficiënt groter dan 1, namelijk 1,08.

3.5 Willem-Annapolder, dijkpaal 30.95

In de zuilenzetting (Hydro-blocks) op de dijk de Willem-Anna polder (dijkpaal 30.95) is op NAP+1,25 m een breekgat gemaakt om de constructieopbouw te controleren, om de eigenschappen van de lagen vast te stellen. De resultaten hiervan zijn samengevat in Tabel 3.9.

Laag	Laagdikte op niveau: NAP+1,25 m
Zetting	0,40 m (Hydro-Blocks)
Uitvullaag	0,04 m
Geotextiel	Now-woven
Onderlaag	1,00 m Fosforslak 0,24 m Klei sterk siltig
Ondergrond	Zand?

Tabel 3.9 Laagopbouw bekleding buitentalud bij dijkpaal 30.95 van de Willem-Anna polder (7)

Omdat het diepste deel van de aangeboorde onderlaag klei betreft, is de opbouw die op deze dijk is aangetroffen is van type 2: de onderlaag van fosforslak ligt op klei op de zandkern. De fosforslak had enige samenhang en de doorlatendheid is minder dan die van zand. Verondersteld wordt dat onder de onderlaag nog zand aanwezig is.

Voor een beoordeling van de toplaagstabiliteit is de granulaire laag geschematiseerd als tweede filterlaag. Aangezien de mijnsteen was afgedekt met een toereikend geotextiel is materiaaltransport vanuit de onderlaag niet aan de orde. Doordat de fosforslak ondoorlatend

is ten opzichte van zand, hoeft niet te worden gerekend op migratie van kleideeltjes door de fosforslak. De kleilaag van de onderlaag schermt de ondergrond afdoende af tegen erosie. Aangezien de laag fosforslak de nodige samenhang vertoont, zal hierin geen afschuifvlak optreden. Het een eventueel afschuifvlak zal optreden in het zand, juist onder de onderlaag worden. Dat betreft dus afschuiving die overeenkomt met die voor een volledige uit klei bestaande onderlaag.

Als gegevens voor het voorland zijn aangenomen: niveau bij de teen: NAP -1 m; helling voorland: 0,2.

De inwassing van de toplaag (Hydro-blocks) is niet gespecificeerd, maar aangenomen 4/32 mm, met bijbehorend een $D_{15} = 6$ mm.

Qua granulaire uitvullaag staat er een sortering (16/32 mm) genoteerd die afwijkt van de standaard sortering (14-32 mm) die gegeven is in Tabel 3.2. De D_{15} die voor de sortering 16/32 mm is aangenomen bedraagt 19 mm.

Vergelijkende Steentoets-berekeningen met de granulaire onderlaag enerzijds en deze granulaire laag vervangen door een even dikke kleilaag geeft geen verschil in toplaagstabiliteit. De toplaagstabiliteit van deze zuilenzetting is ongevoelig voor beperkte veranderingen in de filterlaag/lagen omdat de stabiliteit wordt begrensd door het empirisch stabiliteitscriterium. En het gaat om beperkte veranderingen omdat, ondanks de veel grotere laagdikte van de slak, de doorlatendheid van de laag fosforslak gering is ten opzichte van het grove filter dat onder een zuilenzetting wordt toegepast.

Omdat granulair materiaal en klei in de rekenregel voor afschuiving via het schuifvlak onder de kleilaag op dezelfde manier in rekening worden gebracht, is er geen verschil in uitkomst of wordt gerekend met klei of met fosforslak. Deze bekleding voldoet ruimschoots aan het afschuifcriterium.

3.6 Vierbannepolder, dijkpaal 274+70

In de zuilenzetting (Hydro-blocks) op de dijk van de Vierbannepolder (dijkpaal 274+70) is op NAP + 0,92 m een breekgat gemaakt om de constructieopbouw te controleren, om de eigenschappen van de lagen vast te stellen. De resultaten hiervan zijn samengevat in Tabel 3.10.

Laag	Laagdikte op niveau: NAP+0,92 m
Zetting	0,50 m (Hydro-Blocks)
Uitvullaag	0,10 m
Geotextiel	Now-woven
Onderlaag	0,23 m Fosforslak 0,30 m Klei sterk siltig
Ondergrond	Zand?

Tabel 3.10 Laagopbouw bekleding buitentalud bij dijkpaal 274+70 van de Vierbannepolder (8)

Omdat het diepste deel van de aangeboorde onderlaag klei betreft, is de opbouw die op deze dijk is aangetroffen is van type 2: de onderlaag van fosforslak ligt op klei op, naar wordt verondersteld, de zandkern. De fosforslak had enige samenhang en de doorlatendheid wordt voor deze locatie als volgt ingeschat: overeenkomend met die van zand.

Voor een beoordeling van de toplaagstabiliteit is de granulaire laag geschematiseerd als tweede filterlaag. Aangezien de onderlaag was afgedekt met een toereikend geotextiel is

materiaaltransport vanuit de onderlaag niet aan de orde. Doordat de fosforslak even doorlatend is als zand, zou eventueel wat migratie van kleideeltjes naar de poriën van de fosforslak kunnen optreden. De kleilaag onderin de onderlaag schermt de ondergrond afdoende af tegen erosie.

Aangezien de laag fosforslak de nodige samenhang vertoont, zal hierin geen afschuifvlak optreden. Het een eventueel afschuifvlak zal optreden in het zand, juist onder de onderlaag worden. Dat betreft dus afschuiving die overeenkomt met die voor een volledige uit klei bestaande onderlaag.

Vergelijkende Steentoets-berekeningen met de laag fosforslak enerzijds en deze laag fosforslak vervangen door een even dikke kleilaag geeft geen verschil in toplaagstabiliteit (g/t-waarden). De toplaagstabiliteit van deze zuilenzetting is ongevoelig voor beperkte veranderingen in de samenstelling van het filter omdat de stabiliteit wordt begrensd door het empirisch stabiliteitscriterium.

Omdat granulaire materiaal en klei in de rekenregel voor afschuiving via het schuifvlak onder de kleilaag op dezelfde manier in rekening worden gebracht, is er geen verschil in uitkomst of wordt gerekend met klei of met fosforslak. Deze bekleding voldoet ruimschoots aan het afschuifcriterium.

Volgens de Steentoetsberekening scoort de overgang van de fosforslak (aangenomen $D_{15} = 1$ mm) naar de kleilaag "goed" op materiaaltransport.

3.7 Conclusies uit herberekening van het ontwerp met klei vervangen door granulaire materiaal

Met betrekking tot de toplaagstabiliteit

De berekeningsresultaten voor de onderzochte bekledingen laten zien dat voor alle zuilenzettingen er geen invloed berekend wordt als gevolg van de vervanging van de klei. De achterliggende oorzaak is dat de betreffende zuilenzettingen eigenlijk niet zijn gedimensioneerd met de leklengte-theorie. Feitelijk zijn de zuilenzettingen gedimensioneerd met de empirische rekenregel die de stabiliteit als berekend met de leklengte-theorie limiteert.

Voor de zetting met gekantelde Haringmanblokken zoals die bij Biezelingsche Ham is onderzocht, is de leklengtetheorie bepalend voor de toplaagstabiliteit. Het vervangen van klei door granulaire materiaal, vergroot de mogelijkheden tot toestroming door het filter, waardoor de toplaag minder stabiel wordt.

De beoogde ontwerpveiligheid wordt door de gerealiseerde constructie niet gehaald. Dat betekent echter niet dat de gerealiseerde bekleding onveilig is volgens een toetsing. Verwacht mag worden dat de bekleding ruimschoots tot het einde van de ontwerpperiode bij de wettelijke toetsing wordt goedgekeurd.

Alvorens (een deel van de) klei in de onderlaag van steenzettingen wordt vervangen door granulaire materiaal, moet het ontwerp eigenlijk worden herberekend, teneinde na te gaan of de toplaagstabiliteit wordt beïnvloed.

Voor de hedendaagse zuilenzettingen blijkt bij de dimensionering meestal de rekenregel, die de stabiliteit volgens de leklengte-theorie begrenst, maatgevend. In die rekenregel speelt de doorlatendheid van het filter geen rol. Bovendien wordt onder zuilenzettingen tegenwoordig een vrij grofkorrelige uitvullaag toegepast om uitspoelen van het filter door de toplaag te voorkomen. Dat maakt dat als de granulaire onderlaag een doorlatendheid heeft die (een orde) kleiner is dan die van zand, waardoor het vervangen van de kleilaag zelfs niet tot

aanpassing van het ontwerp zal leiden als bij de dimensionering op toplaagstabiliteit de leklengte-theorie wel maatgevend is.

Voor de gebruikelijke zuilenzettingen zal herberekening dus vrijwel zeker aantonen dat vervanging van klei door een relatief ondoorlatend gebonden granulair materiaal geen probleem oplevert.

Ongebonden puingranulaat, met een doorlatendheid van grof zand zal bij gekantelde blokken vrijwel zeker invloed hebben op de toplaagstabiliteit. En zelfs als de toplaagstabiliteit geen probleem oplevert, moeten met het oog op afschuiving grote laagdikten van dergelijk ongebonden granulair materiaal onder de toplaag worden vermeden.

Met betrekking tot materiaaltransport

In alle onderzochte bekledingen was de onderlaag, waarvan tenminste het bovenste gedeelte altijd een granulaire was, afgedekt met een adequaat geotextiel. Materiaaltransport uit die granulaire laag is daarmee uitgesloten.

In geval van de Vierbannepolder bleek de laag fosforslak redelijk doorlatend, vergelijkbaar met zand. Daarom is de laagovergang van slak naar klei gecontroleerd voor het mechanisme materiaaltransport, waaruit een score 'goed' bleek te volgen. Het scheidingsvlak van onderlaag met de zandkern levert nooit een probleem, omdat de doorlatendheid van de voor de onderlaag toegepaste granulaire materialen hoogstens die van zand bereiken.

Met betrekking tot afschuiving

In alle gevallen waar het granulaire materiaal min of meer is gebonden, ligt het afschuifvlak in het zand, net onder de onderlaag. Aangezien voor de granulaire materialen uitgegaan wordt van dezelfde relatieve dichtheid als voor klei, maakt vervangen van een (deel van een) onderlaag van klei door relatief ondoorlatend gebonden granulair materiaal niet uit voor de stabiliteit met betrekking tot afschuiven. Bij herberekening bleken al deze constructies dan ook te voldoen.

Anders ligt dat voor ongebonden granulair materiaal zoals het bij Biezelingsche Ham toegepaste puingranulaat. In een dergelijk geval is een afschuifvlak in de granulaire onderlaag niet ondenkbaar. Voor dat soort situaties moet herberekening van de afschuifstabiliteit als zetting op filter op zandondergrond deel uitmaken van de onderbouwing van de beslissing om een dergelijk granulair materiaal toe te passen.

De onderzochte constructie bleek overigens wel te voldoen volgens het afschuifcriterium. Toch wordt het gebruik van dit type ongebonden materiaal ontraden, met als argument dat de reststerkte die aan dit materiaal kan worden toegekend beduidend minder is dan die voor een even dikke kleilaag.

4 Overzicht criteria voor opdrijven en afschuiven van harde bekledingen

In diverse leidraden, Technische Rapporten en het voorschrift voor de toetsing op veiligheid staan mechanismen voor steenzettingen en asfaltbekledingen beschreven waarbij sprake is van opdrijven (hydraulic fracturing) of afschuiven. In dit hoofdstuk worden deze methoden op een rijtje gezet en de uitgangspunten behandeld waarop de rekenregels voor deze mechanismen zijn gebaseerd.

4.1 Beoordeling van steenzettingen

Voor de beoordeling van steenzettingen wordt rekening gehouden met het feit dat er onder de bekleding grondwater aanwezig is, of kan zijn, die het evenwicht beïnvloedt. Of er grondwater onder de bekleding aanwezig is, is afhankelijk van veel factoren (zie hoofdstuk 5), maar ook en in belangrijke mate van de doorlatendheid van de al dan niet aanwezige onderlagen. Daarom wordt onderscheid gemaakt in verschillende typen bekledingsopbouw.

De volgende twee typen worden onderscheiden:

1. de steenzetting met standaard constructieopbouw (doorlatende steenzetting die op een granulaire uitvullaag op een geotextiel op een ondoorlatende (klei)laag op de zandkern ligt);
2. de steenzetting die (op een filter) op zand ligt.

In dit kader blijft buiten beschouwing:

- de over grote oppervlakten ingegoten steenzetting op een goed doorlatend filter op een ondoorlatende kleilaag, omdat deze als slecht opgebouwde bekleding geen aanbeveling verdient.
- de steenzetting die op een kleidijk ligt, bij deze bekleding spelen waterspanningen in de kern geen rol voor afschuiven of oplichten van de bekleding.

4.1.1 De steenzetting met standaard constructieopbouw

In de standaard constructieopbouw voor steenzettingen ligt de doorlatende steenzetting op een granulaire uitvullaag op een geotextiel op een ondoorlatende onderlaag (klei of ondoorlatende alternatieve bouwstof) op de zandkern.

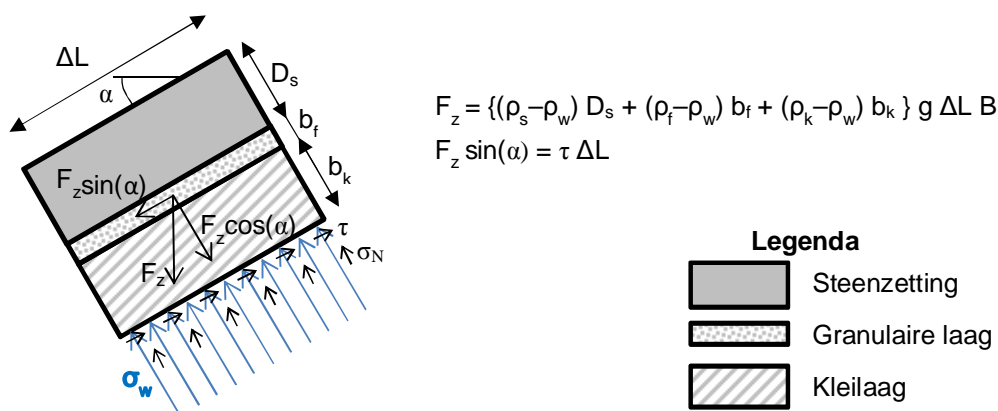
Bij dit type constructieopbouw kunnen de potentiële afschuifvlakken op voorhand worden aangewezen: De overgangen waar een wat ondoorlatender laag op een doorlatender laag ligt. Het gaat hierbij om twee scheidingsvlakken:

1. tussen de steenzetting zelf (toplaag) en de granulaire uitvullaag;
2. tussen de kleilaag en de zandondergrond.

Ad 1. Het is gebruikelijk om het evenwicht langs dit scheidingsvlak, oftewel afschuiving, niet te evalueren. Verondersteld wordt dat de onderliggende zetting en/of teenconstructie voldoende steun biedt om afschuiven van de toplaag te voorkomen. Het evenwicht loodrecht op dit scheidingsvlak, het oplichten van de toplaag, wordt wel geëvalueerd. De belasting daarbij wordt gevormd door de drukken op en onder de toplaag als gevolg van golfaanval. Bij dat dynamisch evenwicht wordt ook rekening gehouden de massatraagheid, de toestroomweerstand en de interactie tussen de zetstenen. Deze evaluatie wordt aangeduid als mechanisme *toplaaginstabiliteit onder golfaanval* (ZTG in VTV2006).

Ad 2. Het evenwicht langs het scheidingsvlak van klei en zandondergrond wordt volgens het VTV2006 geëvalueerd met een formule die feitelijk is ontwikkeld voor de zetting waarbij de toplaag zonder ondoorlatende onderlaag van klei o.i.d. direct op zand ligt. Dit mechanisme wordt *afschuiving* (ZAF) genoemd.

De evenwichtsvergelijking waarbij het hier eigenlijk om gaat, beschrijft feitelijk het evenwicht in de richting van het vlak van de bekleding van een mootje van de granulaire laag en de kleilaag, zonder een beroep te doen op de wisselwerking met aangrenzende mootjes. De schuifspanning die evenwicht moet maken met de component van het eigengewicht, volgt uit de hoek van inwendige wrijving maal de normaalspanning in het ondervlak. Die normaalspanning volgt op zijn beurt uit de evenwichtsvergelijking loodrecht op het talud.



Figuur 4.1 Afschuiven van een steenzetting op een granulaire laag op een kleilaag langs schuifvlak onder de kleilaag

Uitwerken en combineren met een beschrijving van de belasting leverde het volgende afschuifcriterium:

$$\Delta D_s + b_f + b_k > \min\{0,16H_s^{0,2}T_p^{1,6}(\tan\alpha)^{0,8}; 1,5H_s\} - 1,334(1-1,19\tan\alpha)D_{15}\sqrt{T_p} \quad (4.1)$$

Deze vergelijking is overigens afgeleid uitgaande van de voorwaarde dat het teenschot voldoende sterkte heeft om de toplaag te ondersteunen: de eigengewichtsc component langs het talud van de toplaag maakt namelijk geen deel uit van de in rekening gebrachte belasting.

Inmiddels is deze wijze van beoordelen voor constructies met een kleilaag vervangen door een empirische rekenregel die is opgesteld op basis van de resultaten van de Deltagootproeven uitgevoerd in 2005 (Bosters, 2008). De rekenregel luidt:

$$\frac{H_s}{(\Delta D)_{\text{bekleding}} \cdot \cos(\alpha)} \leq 3 \quad (4.2)$$

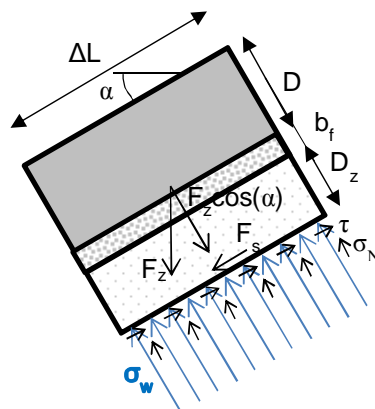
Qua structuur hoort deze vergelijking bij het evenwicht loodrecht op het talud: oplichten van de gehele bekleding. De eigengewichtsc component loodrecht op het vlak van de bekleding $\Delta D \cdot \cos(\alpha)$ moet groter zijn dan een belastingterm die lineair is met de golfhoogte. Omwerken geeft namelijk:

$$(\Delta D)_{\text{bekleding}} \cdot \cos(\alpha) \geq \frac{H_s}{3} \quad (4.3)$$

4.1.2 De doorlatende steenzetting die op (een filter op) zand ligt

In tegenstelling tot het hiervoor behandelde type steenzetting heeft de steenzetting op (een filter of geotextiel op) zand geen evidente laagovergang waaronder de wateroverdrukken kunnen oplopen. Dat komt omdat bij iedere laagscheiding de bovenste laag telkens doorlatender is dan de onderliggende laag. Dit soort zettingen wordt beoordeeld op afschuiving langs een vlak evenwijdig aan het talud, maar de ligging van het afschuifvlak is voor dit type constructieopbouw niet evident. Het afschuifvlak zal op enige afstand onder de steenzetting in de homogeen veronderstelde zandondergrond liggen.

De evenwichtsvergelijking die hierbij is gehanteerd, is het evenwicht van een mootje materiaal onder de zetting die stabiel moet zijn, zonder een beroep te doen op de wisselwerking met aangrenzende mootjes, zie Figuur 4.2. De toplaag zelf wordt geacht te worden gesteund door de teenconstructie. De toplaag levert dus wel een bijdrage aan de normaalkracht op het zand ($F_z \cos(\alpha)$), maar levert geen bijdrage aan de kracht (F_s) langs het talud die de afschuiving veroorzaakt.



$$F_z \cos(\alpha) = \{(\rho_s - \rho_w) D + (1-n_f)(\rho_f - \rho_w) b_f + (1-n_z)(\rho_z - \rho_w) D_z\} g \Delta L B \cos(\alpha)$$

$$F_s = \{ (1-n_f)(\rho_f - \rho_w) b_f + (1-n_z)(\rho_z - \rho_w) D_z \} g \Delta L B \sin(\alpha)$$

Legenda

	Steenzetting
	Granulaire laag
	Zandlaag

Figuur 4.2 Afschuiven van steenzetting op zand, met eventueel een tussengelegen granulaire laag

De dikte van de laag zand die met de toplaag afschuift (D_z), volgt uit het verloop van de waterspanningen (σ_w) als functie van de afstand loodrecht op de toplaag. Nadere uitwerking van het evenwicht met een reeks aannamen voor verschillende parameters, zie paragraaf 4.2 van (TAW. 2003), levert het volgende afschuifcriterium:

$$\Delta D_s + b_f > \min \{ 0, 16 H_s^{0,2} T_p^{1,6} (\tan \alpha)^{0,8}; 1, 5 H_s \} - 1, 334 (1 - 1, 19 \tan \alpha) D_{15} \sqrt{T_p} \quad (4.4)$$

4.2 Beoordeling van asfaltbekledingen

Voor asfaltbekledingen zijn er in de categorie afschuiven en oplichten twee criteria / dimensioneringsregels in gebruik. Het gaat om:

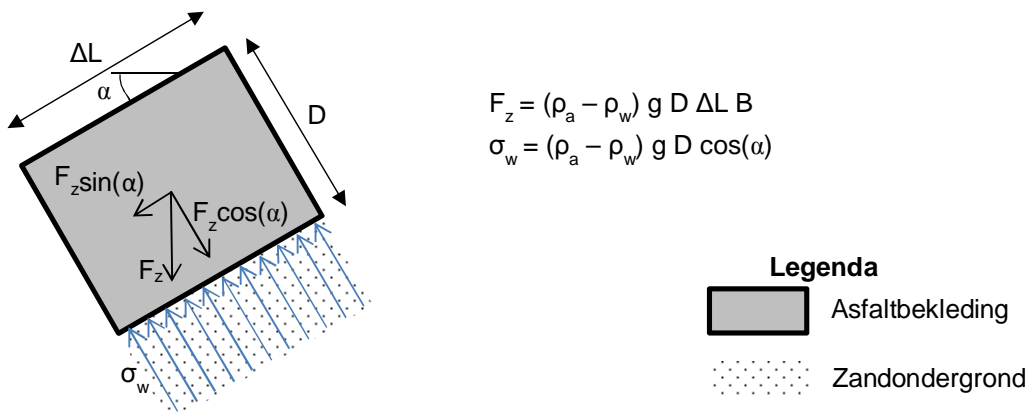
- het mechanisme wateroverdrukken bij dichte asfalttaludbekledingen;
- en het oplichten van dichte asfaltbodembeschermingen.

In dit kader blijft de dichte bekleding die op een goed doorlatend filter ligt buiten beschouwing. Voorbeelden daarvan zijn de ingegoten steenzetting op een open filter en de overlaging met waterbouwasfaltbeton of vol en zat gepenetreerde breuksteen op een open (=doorlatende) steenzetting. Dit type wordt beschouwd als een slecht opgebouwde bekleding die geen aanbeveling verdient.

4.2.1 Wateroverdrukken bij asfaltbekleding op talud

Asfaltbekledingen worden evenals de toplaag van steenzettingen niet beoordeeld op afschuiven. Aangenomen wordt dat de toplaag voldoende wordt gesteund door een teenconstructie en/of een eronder gelegen bekleding. Het mechanisme dat er wel sterk op lijkt wordt aangeduid als het mechanisme wateroverdrukken. Dit mechanisme wordt in de toetsing aangeduid met de afkorting AWO.

Voor asfaltbekledingen is voor het mechanisme wateroverdrukken de rekenregel gebaseerd op het evenwicht van een elementje van de bekleding in de richting loodrecht op het talud, zie Figuur 4.3. Het gaat daarbij om de situatie waarbij de buitenwaterstand lager is dan de grondwaterstand in de dijk, waardoor er sprake is van een netto statische opwaarts gerichte waterdruk op de bekleding. Dit evenwicht gaat feitelijk over het *oplichten* van de toplaag door waterdrukken. De beoordeling op wateroverdrukken voor asfaltbekledingen stelt daarom minder zware eisen aan het gewicht van de bekleding dan een beoordeling op afschuiven van een bekledings-elementje over de ondergrond.



Figuur 4.3 Evenwicht loodrecht op het talud: oplichten asfaltbekleding door wateroverdruk

Er wordt namelijk verondersteld dat het evenwicht langs het talud wordt verzorgd door krachtsoverdracht naar aanliggende bekledingselementjes. Dat gaat vooral om drukkkrachten die worden uitgeoefend op eronder gelegen elementen. Asphalt is maar in beperkte mate in staat om trekkrachten op te nemen. Als een element daadwerkelijk opdrijft, zal ook zijn bovenbuur door een dusdanige waterdruk worden belast dat dit element niet op wrijving met de ondergrond kan blijven liggen. Oftewel ook dat element heeft steun van zijn

buurelementen nodig. Als het evenwicht langs het talud uitsluitend van trekkrachten zou moeten komen, dan loopt de trekkracht al snel op tot een niveau groter dan de toelaatbare trekspanning. Let op, omdat hier sprake is van een statische wateroverdruk gaat het om de sterkte die gedurende langere tijd kan worden geleverd (kruiptreksterkte met tijdschaal van een uur). Die treksterkte is minstens een orde kleiner dan de buigtreksterkte die altijd wordt bepaald voor de beoordeling op golfklappen. In [Molenaar, 2014] zijn waarden in de orde van 0,1 MPa gevonden.

Omdat het evenwicht van een elementje van de bekleding wordt verzorgd door een drukkracht met de benedenburen, is steun van de eronder gelegen bekleding dan wel een afdoende teenconstructie essentieel. Als die steun van beneden niet in voldoende mate kan worden geleverd, zullen er in geval van oplichten trekspanningen in het asfalt optreden die de treksterkte van het asfalt mogelijk te boven gaan. Als dat daadwerkelijk zo is, ontstaan er trekscheuren evenwijdig aan de bekleding, schuift de bekleding af en is het dijklichaam niet meer afdoende beschermd tegen erosie. Een afdoende teenconstructie, of bij een lang talud met een afdoende stabiele bekleding die drukkrachten op kan nemen in het vlak van het talud, is dus een vereiste.

4.2.2 Oplichten van asfaltbodembescherming

Een mechanisme dat niet onvermeld mag blijven, is het oplichten van een asfaltbodembescherming door golfbeweging (paragraaf 7.6, TRAW, 2002). Nb. dit mechanisme wordt niet beoordeeld in de toetsing omdat het veelal geen wezenlijk veiligheidsrisico op zal leveren.

Bij dit mechanisme wordt het verticaal evenwicht van de bodembescherming beoordeeld. De bodembescherming kan worden opgelicht door waterdruk vanuit de ondergrond als de druk op de bekleding door het passeren van een golfdal te ver terugvalt.

Dit criterium zou ook van toepassing kunnen worden verklaard voor asfaltstroken op lage bermen, als deze aan één of beide randen niet van een afdoende afdichting zijn voorzien. De betreffende "berm" dient dan zodanig laag te liggen dat onder maatgevende omstandigheden de grondwaterstand in de dijk tot boven het bermniveau reikt, oftewel het gaat niet om de gebruikelijke stormvloedbermen, maar om bermen die substantieel onder de maatgevende hoogwaterstand liggen.

Als de bodembescherming duidelijk korter is dan de golflengte dan wordt uitgegaan van de volgende conservatieve eis aan de bekledingsdikte:

$$D \geq \frac{\rho_w}{\rho_a} \frac{H}{2} \quad (4.5)$$

Hierin is nog geen rekening gehouden met de gebruikelijke afname van de drukamplitude met de diepte onder water. Verder is de opwaartse kracht op de bodembescherming steeds maar kort aanwezig (paar seconde), waardoor de asfaltplaat nauwelijks in beweging kan komen door de verhinderde toestromingen onder de bewegende plaat. De verschillendruk neemt snel af zodra de plaat een minimale beweging maakt. Daarom is dit een conservatief criterium.

4.3 Discussie rekenregels oplichten en afschuiven

Voor steenzettingen worden er drie stabiliteitscriteria gehanteerd. De belasting is voor alle drie de golfaanval. Het zijn achtereenvolgens:

- oplichten van elementen uit de toplaag voor als deze op een granulaire uitvullaag op klei(laag) is aangelegd (ZST);
- oplichten van de ondoorlatende onderlaag (klei) die onder veel steenzettingen ligt;
- afschuiven in de zandondergrond voor het geval de toplaag zonder ondoorlatende onderlaag op zand is aangelegd (ZAF).

Voor asfaltbekledingen op taluds is er een enkel stabiliteitscriterium waarbij de belasting de **statische** wateroverdruk is:

- oplichten asfaltbekleding (AWO).

Voor waterdichte bodembeschermingen is er voorts nog een stabiliteitscriterium dat uitgaat van golfbelastingen:

- oplichten bodembescherming.

Als de criteria die worden gehanteerd voor de stabiliteit van de toplaag van steenzettingen en asfaltbekledingen met elkaar worden vergeleken, dan vallen er een aantal zaken op.

Asfaltbekledingen op dijktaaluds worden **niet** beoordeeld met dynamische netto opwaartse waterdrukken als belasting. De dynamische belasting (oplichten) bij golfterugtrekking wordt buiten beschouwing gelaten om een aantal redenen. Allereerst is een asfaltbekleding een plaatbekleding, als deze wordt opgelicht, dan is dat niet op een enkel punt, ter plaatse van een enkele losse steen zoals bij een zetting. Vervolgens ligt de asfaltbekleding normaliter op zand en niet zoals de toplaag van de meeste steenzettingen op een veel doorlatender granulaire uitvullaag. En ten slotte is de weg waarover grondwater aan moet stromen naar het punt waar tijdelijke wateroverdrukken tot oplichten zouden kunnen leiden normaliter erg lang. De twee laatste punten maken dat oplichten feitelijk niet snel zal optreden omdat in de periode van dynamische overdruk (een deel van de golfperiode) er nauwelijks water kan toestromen naar de plek die omhoog zou moeten komen.

Voor de toplaag van steenzettingen is dat duidelijk anders: de doorlatendheid van de granulaire laag onder de steenzetting is ordes groter dan die van de zandlaag onder asfaltbekledingen. En ook de lengte van de lekweg is ten minste een orde kleiner dan die bij asfaltbekledingen. Daarom is het noodzakelijk dat de stabiliteit van de toplaag van steenzettingen wordt beoordeeld op basis van golfbelastingen, terwijl dat voor asfaltbekledingen niet wordt gedaan.

Voor de toplaag van steenzettingen wordt, evenals voor asfaltbekledingen, normaliter alleen een oplichtcriterium gehanteerd, geen afschuifcriterium. Om afschuiven te voorkomen, wordt in beide gevallen, zonder dat dit in een concreet dimensioneringscriterium is vertaald, een beroep gedaan op de teenconstructie danwel de lager op het talud gelegen harde bekleding. De afschuiving van de toplaag van steenzettingen en asfaltbekledingen wordt dus op dezelfde impliciete manier afgedaan.

Voor het afschuiven van een steenzettingsconstructie over het schuifvlak tussen de klei-onderlaag en het zandbed, is de belasting dynamisch (lineair met H_s).

Men kan echter stellen dat een steenzetting op een onderlaag van klei een relatief ondoorlatende bekleding op een zandbed is. Die gedachtenlijn volgend, moet voor dit

mechanisme **niet alleen** de dynamische belastingen (golf-gerelateerd) maar ook de statische grondwateroverdrukken als belasting van een steenzettingsconstructie beschouwd worden, net als bij asfaltbekledingen.

Daar zijn de volgende kanttekeningen bij te maken:

1. De doorlatendheid van een gestructureerde kleilaag die hoger op het talud wordt aangetroffen is vele malen groter dan van een bekleding van waterbouwasfaltbeton. Het lijkt reëel om te veronderstellen dat statische wateroverdrukken achter een gestructureerde kleilaag op zand niet langdurig in stand zullen blijven; oftewel hoog op het talud kunnen statische wateroverdrukken niet hoog oplopen (mocht de freatische lijn wel een dergelijk hoog niveau in de dijk bereiken).
2. Verder wordt verondersteld dat als de statische overdrukken een rol gaan spelen, dat er beperkte schade ontstaat waardoor de statische overdrukken al snel wegvallen. Voor een steenzetting, die gekenmerkt wordt door een open toplaag bestaande uit losse elementen op een filterconstructie, is een dergelijke kleine schade niet echt een probleem. Als een dergelijke schade aan een dichte asfaltbekleding optreedt, dan leidt dit tot doorgaande scheuren. De kans op materiaaltransport door de toplaag wordt voor de gebruikelijke constructie-opbouw (asfalt direct op zandkern) dan groot. Oftewel een schade die tot ontlasting van de wateroverdrukken leidt, wordt voor steenzettingen niet als probleem gezien, maar is voor asfaltbekledingen **niet** toelaatbaar.

Daarom mag in geval van steenzettingen worden aangenomen dat statische overdrukken geen rol van betekenis spelen, terwijl statische overdrukken voor asfaltbekledingen wel degelijk van belang zijn.

Blijft over dat steenzettingen wel op dynamische overdrukken worden beoordeeld, maar asfaltbekledingen niet.

Voor de steenzettingen laag op het talud, waarvan niet mag worden verondersteld dat de kleilaag volledig is gestructureerd, kunnen dezelfde argumenten worden gebruikt als voor asfaltbekledingen: de lekweg is lang en door relatief ondoorlatend zand.

Als echter zowel de statische als de dynamische belasting buiten beschouwing mag blijven, dan zou de stabiliteit van de steenzetting op een onderlaag van klei onbeperkt zijn met betrekking tot mechanismen waarbij het grensvlak tussen klei en zand een rol speelt (afschuiven of oplichten). En dat is natuurlijk geen reële gedachte. Het huidige empirische oplichtcriterium, gebaseerd op Deltagootproeven (formule (4.2)), lijkt daarmee een goede pragmatische oplossing.

Voor bitumineuze bodembeschermingen geldt hetzelfde als voor asfaltbekledingen op dijktaaluds: beperkte schade die tot ontlasten kan leiden, is ontoelaatbaar omdat kleine schades bij asfaltbekledingen die direct op zand zijn aangelegd al snel tot materiaaltransport en ondermijning van de bekleding gaan leiden. Voor bodembeschermingen zullen statische overdrukken echter geen rol spelen. (Uitzondering is een heel specifiek geval waarbij de dichte bodembescherming naadloos aansluit op een dichte dijkbekleding met een hoge grondwaterstand in de dijk.) Omdat statische wateroverdrukken normaliter geen rol spelen, is ook in geval van de asfaltbodembescherming het criterium ontleend aan de dynamische belastingen.

Opmerkelijk is dat er voor open steenasfalt (OSA) geen rekenregel voor afschuiving bestaat, terwijl OSA soms wel wordt aangelegd op een geotextiel op een zandondergrond. Een dergelijke constructie zal voor wat betreft instabiliteit als gevolg van waterspanningen in het

zandbed analoog reageren als een steenzetting zonder ondoorlatende tussenlaag op een zandondergrond.

Uit een grootschalige proef op een bekleding van materiaal enigszins vergelijkbaar met OSA, te weten Elastocoast, is komen vast te staan dat grondmechanisch bezwijken bij een te dunne (= te lichte) toplaag niet denkbeeldig is. De proefopstelling met de dunne bekleding bezweek (Oumeraci et al., 2010). OSA (op zandasfalt op zand) zal zich op dit punt niet wezenlijk onderscheiden van Elastocoast. Daarom moet ook voor OSA op zandasfalt de rekenregel voor afschuiving van steenzettingen op zand worden gehanteerd.

Gegeven de beperkte experimentele en praktijkervaring met afschuiving en oplichten van dichte bekledingen lijkt de set beoordelingscriteria die momenteel wordt gehanteerd correct. Voor wat betreft de randvoorwaarden voor deze beoordelingsrekenregels is er echter nog wel wat te verfijnen. Oplichten en afschuiven is immers alleen mogelijk als de grondwaterstand voldoende hoog tegen de binnenzijde van de bekleding staat. Het niveau tot waar de grondwaterstand onder maatgevende omstandigheden kan oplopen is echter niet goed bekend en verdient daarom meer aandacht.

5 Niveau grondwaterstand bij oplichten danwel afschuiven van bekledingen

Als wordt gekeken naar de verschillende criteria voor afschuiven of oplichten van bekledingen, dan is een voldoende hoge lokale grondwaterstand steeds een voorwaarde voor het optreden van het mechanisme. Voor een aantal situaties is die vrijwel gelijk aan de buitenwaterstand, omdat de bekleding (tot aan die lagen) zeer doorlatend is. Alleen voor type 2 en 4, zie Tabel 5.1, zal de grondwaterstand in de dijk onder een relatief ondoorlatende bekleding voldoende omhoog moeten komen om het betreffende mechanisme überhaupt te kunnen laten optreden. Het is danook voor die twee situaties dat het niveau van de freatische lijn in de dijk uitsluitel kan geven of het mechanisme optreedt of niet.

Nr.	Type bekleding	scheidingsvlak	Type criterium	Type belasting
1	Steenzetting	toplaag - granulaire laag	Oplichten	Dynamisch
2	Steenzetting	kleilaag - zand	Oplichten	Dynamisch
3	Steenzetting	toplaag - zand of in zand	Afschuiven	Dynamisch
4	Asfalt	asfalt - zand	Oplichten	Statisch
5	Asfalt	bodembescherming - zand	Oplichten	Dynamisch

Tabel 5.1 Situaties waarvoor oplicht- of afschuifregels beschikbaar zijn

Merk op dat voor asfaltbekledingen niet het hoogste niveau van de freatische lijn wordt bepaald, maar het niveau waarbij de belasting maatgevend is. Voor asfaltbekledingen (4) zijn er voor verschillende watersystemen een aantal vuistregels gegeven over de hoogte van de maatgevende freatische lijn tijdens toetsomstandigheden. Die vuistregels zijn gebaseerd op een flink aantal niet-stationaire sommen. Het maximale niveau tot waar de freatische lijn kan komen is daarbij overigens niet bepaald, het onderzoek heeft zich indertijd gericht op de maximale belasting die kan optreden (= niveauverschil tussen hoge grondwaterstand en lage buitenwaterstand).

Als het gaat om een talud met steenzettingen op het talud (type 2) dan kan er ook sprake zijn van enige infiltratie via de bekleding hoog op het talud. De grondwaterstand kan dus hoger oplopen dan op grond van de vuistregels voor asfalt wordt verondersteld. En aangezien de vuistregels voor asfalt betrekking hebben op het maatgevende niveau voor de statische wateroverdruk, kunnen deze vuistregels sowieso een onderschatting opleveren voor de toepassingsvoorwaarden voor de steenzettingen.

Kortom, om te komen tot vuistregels voor het niveau tot waar de freatische lijn kan reiken onder toetsomstandigheden, is het wenselijk dat een nieuwe set niet-stationaire grondwaterstromingssommen wordt gemaakt voor de verschillende watersystemen.

Aanvullend daarop moet worden opgemerkt dat ook bij het opstellen van de toetsschema's voor WT12017 is geconstateerd dat het niveau tot waar de freatische lijn onder maatgevende omstandigheden kan komen ook voor de beoordeling op golfklappen een relevant gegeven is. Als het zand onder de bekleding min of meer verzadigd raakt, dan zal de stijfheid van de ondergrond hierdoor worden beïnvloed.

Tot op heden zijn altijd valgewicht-deflectie-metingen ingezet voor het bepalen van de stijfheid van de ondergrond. Op het moment van meten zal de ondergrond echter nooit min of meer verzadigd zijn.

5.1 Factoren die het maximale niveau van de freatische lijn bepalen

De grondwaterstand in de dijk wordt bepaald door de balans tussen infiltratie door regen, buitenwater, grondwater en golfloop en door afstroming naar het buitenwater en het polderpeil.

Op hoge grondwaterstanden in de dijk moet worden gerekend als de infiltratie gemakkelijk verloopt, terwijl de afstroming wordt belemmerd.

Infiltratiemogelijkheden

Dichte dijkbekledingen verhinderen de infiltratie van neerslag en buitenwater via talud en/of kruin. Als er geen sprake is van een dichte bekleding kan buitenwater infiltreren via de zone beneden de buitenwaterstand. Maar ook hoger op het buitentalud, kruin en zelfs het binnentalud kan sprake zijn van infiltratie als er golfloop en eventueel golfoverslag is. Een kleilaag boven de gemiddelde grondwaterstand danwel hoogwaterlijn zal in de loop der tijd structureren en doorlatend worden. Een dergelijke kleilaag zal op het talud wel voor enige afstroming van de golfloop en extreem intensieve neerslag zorgen, maar zeker niet alle infiltratie uitsluiten.

Een ongestructureerde kleilaag, beneden de gemiddelde buitenwaterstand, zal hydrologisch gezien wel een afsluitende laag zijn. Ook een waterbouwasfaltbetonbekleding moet als dicht worden beschouwd.

Een hoge buiten- en eventueel een hoge binnenwaterstand zullen via het watervoerend pakket leiden tot een verhoging van de freatische lijn.

Een bijzonder geval van infiltratie kan een wegverharding op een funderingslaag opleveren. Als de wegfunderingslaag voldoende doorlatend is en toegankelijk voor het water dat van of door de wegverharding afstroomt, dan kan deze funderingslaag mogelijk als buffer gaan fungeren van waaruit continu water kan infiltreren in het dijklichaam. De infiltratie van neerslag op de kruin of berm van de dijk is dan maximaal.

Als de wegverharding een asfaltverharding betreft, dan wordt aanbevolen om de overgangen van de gesloten asfaltverharding naar de (gras)bermen zodanig af te dichten dat afstromend water niet ongeremd de wegfundering inloopt.

Uitstroombmogelijkheden

De uitstroombmogelijkheden van de dijk worden enerzijds bepaald door waterafsluitende lagen en anderzijds door de (grond)waterstand voor en achter de dijk.

Als de dijk is aangelegd op een (relatief gezien) ondoorlatende laag, dan zal in- en uitstromen vooral via de schil van de dijk moeten plaatsvinden. Een afsluitende laag aan de teen van de dijk zal maken dat water dat eenmaal via infiltratie het dijklichaam is ingekomen, niet snel meer uitstroomt.

Als het zandlichaam van de dijk is opgespoten, dan kunnen ook sliblagen in het dijklichaam zelf een barrière vormen voor in of uitstromen.

In de rest van dit hoofdstuk is aangenomen dat het dijklichaam in goed contact staat met de eerste watervoerende laag en dat zij min of meer dezelfde doorlatendheid hebben. De bekleding zal echter een doorlatendheid hebben die ten minste een orde ondoorlatender is. Dit is zeker niet voor alle situaties een correcte schematisatie, en levert zeker niet altijd een

veilige benadering. Het is echter wel een simpele schematisatie waarvoor, aan de hand van wat bijzondere randvoorwaarden, de invloed van verschillende factoren zichtbaar kan worden gemaakt.

Als het polderpeil achter de dijk laag is, zal er grondwater naar de polder afstromen: de grondwaterstand in de dijk wordt daardoor naar beneden getrokken. Is het polderpeil achter de dijk hoog, dan zal de grondwaterstand juist relatief hoog uit kunnen vallen. Het polderpeil wordt meestal bepaald door het niveau van het achterland. In uitzonderlijke gevallen kan het polderpeil extreem hoog worden. Voorbeelden daarvan zijn een opgespoten haventerrein achter de dijk of een havenbekken waarvan het havenpeil als gevolg van golfoverslag hoog op mag lopen.

Niveau voorland

Ook de situatie buitendijks beïnvloedt de grondwaterstand in de dijk. Als het voorland erg diep ligt, dan zal de grondwaterstand in de dijk tenderen naar de gemiddelde buitenwaterstand.

Het niveau van het voorland ligt bij de Nederlandse zeedijken echter vaak rond NAP. In dat geval zal de (grond)waterstand tegen de dijk nauwelijks onder NAP komen. Immers de freatische lijn in het voorland zal niet wezenlijk beneden het niveau van het voorland komen, zolang het voorland bij dagelijks hoog water onderloopt. De grondwaterstand onder dagelijkse omstandigheden tendeeert ook voor deze situatie naar de gemiddelde buitendijkse (grond)waterstand. Maar dat levert in geval van een niet al te laag voorland het gemiddelde van het verloop van het hoogwater van de buitenwaterstand aangevuld met als minimum het niveau van het voorland. In geval van een niet al te laag voorland zal de freatische lijn in de dijk onder dagelijkse omstandigheden dus altijd tenderen naar een niveau ruim boven het niveau van het voorland.

Ter verkenning zijn wat fictieve cases aan de Westerschelde berekend. Daar is het getijverschil aanzienlijk, dus de invloed van het voorland ook. Voor de cases is aangenomen dat het getij sinusvorming slingert rond NAP, de getijamplitude overeenkomt met het gemiddeld hoogwater en dat er een voorland aanwezig is op NAP.

Uitgangspunt (bron: RWS slotgemiddelden 1991.0)

Vlissingen gemiddeld HW = NAP+ 2,05 m

Terneuzen gemiddeld HW = NAP+ 2,29 m

Het gemiddelde sinusvormig aangenomen verloop van de buitenwaterstand, van beneden begrensd op NAP met hoogwater reikend tot NAP +2,05 m bedraagt ca. NAP + 0,65 m; reikend tot NAP +2,29 m bedraagt het ca. NAP + 0,73 m.

Per saldo is het gemiddelde grofweg gelijk aan $NAP + 1/3 \cdot (GHW - NAP)$.

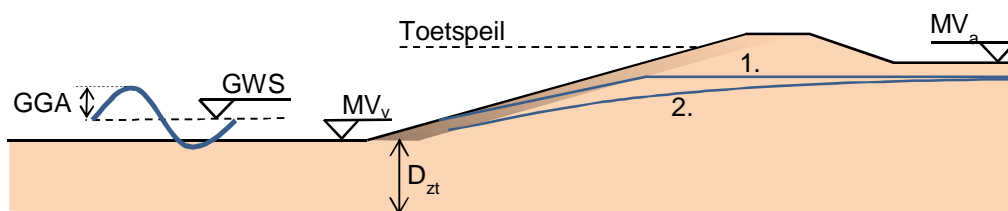
Hoog achterland

Een hoog achterland achter de dijk is meestal een opgespoten (haven)terrein (zand). Bij een "hoog achterland" is het niveau van het maaiveld hoog ten opzichte van de gemiddelde buitenwaterstand. In Nederland moet rekening worden gehouden met een freatische vlak dat niet ver beneden het maaiveld ligt (ca. MV-0,25 m), zeker in extremere neerslagsituaties. Dit geldt dus ook voor een hoog achterland als dit redelijk uitgestrekt is. Een goed drainagesysteem in het hoge achterland zal het hoge niveau van de freatische lijn eventueel naar een lager niveau dwingen. Het hoge niveau van de freatische lijn in het achterland doet zich gelden in het aangrenzende dijklichaam als de dikte van de watervoerende laag onder de teen van de dijk (D_2) niet al te groot is, zie Figuur 5.1. Veelal is het voorland ook nog afgedekt met een slibrijke laag die de uitstroming belemmert. Het niveau van de freatische lijn aan de onderzijde van de relatief dichte bekleding zal in de praktijk liggen tussen de volgende uiterste grenzen:

1. Het niveau van de freatische lijn van het hoog liggende achterland, als de afstroommogelijkheden naar het buitenwater (vrijwel) volledig geblokkeerd zijn ($D_{zt} \approx 0$);
2. De buitenteen van de dijk, als de afstroommogelijkheden naar het buitenwater uitzonderlijk goed zijn.

Afhankelijk van de feitelijke afmetingen en doorlatendheid zal de werkelijke freatische lijn dichter bij de onder- of de bovengrenswaarde liggen. Omdat een relatief dun watervoerend pakket een reële mogelijkheid is, wordt hier uitgegaan van de conservatieve bovengrens: 1. de freatische lijn van het hoge achterland.

Het ligt voor de hand om de taludbekleding redelijk dicht te veronderstellen. Als het een steenzetting betreft, dan ligt die veelal op een kleilaag die tot hoog in de getijzone redelijk ondoorlatend is. Waterbouwasfaltbetonbekledingen en vol en zat gepenetreerde breuksteenbekledingen vormen sowieso een waterafsluitende laag; alleen open steenasfalt op zand-asfalt of geotextiel kan als een redelijk doorlatende bekleding worden aangemerkt. Ook gabions op een geotextiel zijn wel toegepast als “drukventiel” in de teenconstructie.



Figuur 5.1 Mogelijke verlopen van de freatische lijn in geval van een hoog achterland dat zich doorzet in het dijklichaam; doorlatendheid van eerste watervoerend pakket, dijklichaam en achterland is gelijk.

5.2 Indicatie hoogste niveau freatische lijn in de dijk

Voor de situatie waarbij het dijklichaam min of meer dezelfde doorlatendheid heeft als de eerste watervoerende laag waarmee het dijklichaam in verbinding staat, wordt in deze paragraaf op basis van gegevens uit de voorgaande paragrafen een indicatie voor het hoogste niveau van de freatische lijn in de dijk samengesteld. Voor situaties waarin de dijk direct op een ondoorlatende ondergrond ligt of een oude kleikern bevat, zullen specifieke grondwaterstromingsberekeningen moeten worden gemaakt.

Een hoog niveau van de freatische lijn in de dijk voor aanvang van de (maatgevende) storm kan worden veroorzaakt door een hoog niveau van het achterland of van het voorland. Voor aanvang van de maatgevende storm geeft het maximum van de niveaus waarnaar de grondwaterstand tendeert als gevolg van de buiten- respectievelijk de binnendijkse randvoorwaarde een redelijke indicatie voor de ligging van de freatische lijn:

$$\max\{ (MV_v + 1/3 \text{ GGA}); (MV_a - 0,25)\}.$$

Voor de symbolen zie Figuur 5.1.

Als vervolgens wordt verondersteld dat de grondwaterstand in de dijk met de storm mee omhoog gaat tot 1/3 van het stormpeil voor zover dat boven de freatische lijn bij aanvang uitkomt, dan wordt het niveau tot waar de freatische lijn in de dijk oploopt:

$$1/3 \text{ Toetspeil} + 2/3 \max\{ (MV_v + 1/3 \text{ GGA}); (MV_a - 0,25)\}.$$

Dit is een peil behorende bij situaties waar er sprake is van een hoog liggend voor- of achterland. Als deze indicatie wordt gecombineerd met de maatgevende grondwaterstand waarmee wordt gerekend voor asfaltbekledingen (aannamen: kust, homogene zanddijk in goed contact met eerste watervoerende laag), dan moet het niveau van de freatische lijn nog neerwaarts worden begrensd met 1/2 Toetspeil. Als indicatie tot waar de freatische lijn kan oplopen bij getijsituaties kan dus worden uitgegaan van:

$$\max(1/2 \text{ Toetspeil}; 1/3 \text{ Toetspeil} + 2/3 \max\{ (MV_v + 1/3 \text{ GGA}); (MV_a - 0,25)\}) \quad (5.1)$$

Dit betreft slechts een indicatie die enige zeggingskracht heeft als de werkelijkheid overeenkomt met de gedane aannamen. Als er sprake is van afsluitende lagen direct aansluitend op het dijklichaam, zoals een oude ondoorlatende zate, dan is deze indicatie niet bruikbaar.

Voor situaties waarin de dijk direct op een ondoorlatende ondergrond ligt of waarin de dijk een oude kleikern bevat, zullen specifieke grondwaterstromingsberekeningen moeten worden gemaakt om te komen tot (maatgevende) grondwaterstanden.

Omdat bekend is dat de variabiliteit in doorlatendheid vaak groter is dan wordt aangenomen en de doorlatendheid in horizontale richting vaak groter is dan in verticale richting (anisotrope doorlatendheid), is ijken van de voor de berekeningen aangenomen doorlatendheden aan de tijdens een storm gemeten respons van de grondwaterstand, in kritische gevallen zinvol. Deze aanbeveling geldt zowel voor situaties waarvan bekend is dat het dijklichaam of ondergrond (ongewenste) heterogeniteiten bevat, als voor situaties waarbij op grond van de indicatie (vergelijking (5.1)) mogelijk problematische grondwaterstanden kunnen worden verwacht.

6 Conclusies en aanbevelingen

Criteria die moeten worden gehanteerd voor bekledingen waarbij redelijk ondoorlatende granulaire materialen als onderlaag onder steenzettingen worden toegepast zijn voor een aantal meest voor de hand liggende uitvoeringsvarianten op een rij gezet (hoofdstuk 2).

De toplaagstabiliteit van de bekledingen die in 2013 zijn onderzocht [t Hart, 2015], is opnieuw berekend en vergeleken met een fictieve situatie waarin de onderlaag alleen uit klei bestaat (hoofdstuk 3). De resultaten van deze berekeningen leiden tot de conclusie dat voor zuilenzettingen het vervangen van (een deel van) een onderlaag van klei door een granulaire onderlaag niet tot een lagere dan de bij het ontwerp gewenste veiligheid leidt. Voor de zetting van op hun kant toegepaste Haringmanblokken blijkt de toepassing van puingranulaat als kleivervanger wel tot een wat lagere veiligheid te leiden. Het veiligheidsniveau dat bij het ontwerp was gewenst, blijkt daar dus niet te zijn gehaald. Overigens is de veiligheid van de betreffende bekleding wel ruim voldoende om tot in lengte van jaren met als resultaat “voldoende” door de toetsing te komen.

Voor wat betreft de stabiliteit tegen afschuiven verandert de ontwerpberekening feitelijk alleen als er sprake is van ongebonden granulair materiaal in de onderlaag. Een voorbeeld daarvan is de bekleding bij Biezelingsche Ham, waar ongebonden puingranulaat is toegepast. In een dergelijk geval kan een schuifvlak in de ongebonden granulaire laag optreden. Of dit schuifvlak stabiel is kan worden nagegaan door een berekening uit te voeren voor de top- en filterlaag (op geotextiel) op een ondergrond van zand. Voor de onderzochte locatie bleek het tweede afschuifvlak niet problematisch, al is het wel een stuk kritischer dan het gebruikelijke afschuifvlak in het zand onder de onderlaag.

Alvorens (een deel van de) klei in de onderlaag van steenzettingen wordt vervangen door granulair materiaal, dient het ontwerp te worden herberekend, teneinde na te gaan of de toplaagstabiliteit wordt beïnvloed.

Hedendaagse zuilenzettingen worden tegenwoordig veelal gedimensioneerd met een rekenregel waarin de doorlatendheid van het filter geen rol speelt. Voor dat type zettingen zal herberekening meestal aantonen dat vervanging van klei door relatief ondoorlatend gebonden granulair materiaal geen probleem oplevert.

Ongebonden puingranulaat, met een doorlatendheid van grof zand zal bij gekantelde blokken vrijwel zeker invloed hebben op de toplaagstabiliteit. En zelfs als de toplaagstabiliteit geen probleem oplevert, met het oog op afschuiving moeten grote laagdikten van dergelijk ongebonden granulair materiaal onder de toplaag worden vermeden. De reststerkte, die weliswaar bij een ontwerp niet in rekening wordt gebracht, zal voor ongebonden granulair materiaal altijd minder zijn dan bij een onderlaag van klei of gebonden granulaire materialen.

Voor verschillende bekledingstypen worden verschillende rekenregels gehanteerd voor oplichten en afschuiven. Deze rekenregels zijn op een rij gezet en met elkaar vergeleken (hoofdstuk 4).

Gegeven de beperkte experimentele en praktijkervaring met afschuiving en oplichten van dijkbekledingen lijkt de set beoordelingscriteria die momenteel wordt gehanteerd correct. Voor wat betreft de randvoorwaarden voor deze beoordelingsrekenregels is er echter nog wel wat te verfijnen. Oplichten en afschuiven is immers alleen mogelijk als de grondwaterstand voldoende hoog tegen de binnenzijde van de bekleding staat. Het niveau tot waar de

grondwaterstand onder maatgevende omstandigheden kan oplopen is echter niet goed bekend en verdient daarom meer aandacht.

Op grond van wat vergaande schematisaties en aannamen is een uitdrukking voor een indicatie van de hoogte van de freatische lijn afgeleid (vergelijking (5.1)) die kan worden gebruikt voor situaties waarin achterland, dijklichaam en eerste watervoerend pakket direct met elkaar in contact staan en redelijk homogeen doorlatend zijn.

Voor situaties waarin de dijk direct op een ondoorlatende ondergrond ligt of waarin de dijk een oude kleikern bevat, zullen specifieke grondwaterstromingsberekeningen moeten worden gemaakt om te komen tot (maatgevende) grondwaterstanden.

Omdat bekend is dat de variabiliteit in doorlatendheid vaak groter is dan wordt aangenomen en de doorlatendheid in horizontale richting vaak groter is dan in verticale richting (anisotrope doorlatendheid), is ijken van de voor de berekeningen aangenomen doorlatendheden aan de tijdens een storm gemeten respons van de grondwaterstand, in kritische gevallen zinvol. Deze aanbeveling geldt zowel voor situaties waarvan bekend is dat het dijklichaam of ondergrond (ongewenste) heterogeniteiten bevat, als voor situaties waarbij op grond van de indicatie (vergelijking (5.1)) mogelijk problematische grondwaterstanden kunnen worden verwacht.

Literatuur

Lindenberg, 1985

Verweking van zand onder een steenzetting.

J. Lindenberg, Grondmechanica Delft.

Rapport CO-416640/16 (sectie 1 uit band C: Taludbekledingen van gezette steen, deel XXII, grondmechanische stabiliteit in de golfzone; verweking van zand door golfaanval, januari 1988), Delft, december 1985.

Lindenberg, 1986

Verweking van zand onder een steenzetting talud 1:3 onder invloed van golfbelasting, verslag experimenteel onderzoek in de Deltagoot.

J. Lindenberg, Grondmechanica Delft.

Rapport CO-416751/16 (sectie 2 uit band C: Taludbekledingen van gezette steen, deel XXII, grondmechanische stabiliteit in de golfzone; verweking van zand door golfaanval, januari 1988), Delft, oktober 1986.

Meijers, 1990

Handleiding beoordeling grondmechanische stabiliteit taludbekledingen onder golfaanval.

P. Meijers, A. Bezuijen, Grondmechanica Delft.

Rapport CO-311480/6 (sectie 1 uit band A: Taludbekledingen van gezette steen, deel XXII, grondmechanische stabiliteit in de golfzone; handleiding en samenvatting van onderzoeksresultaten, maart 1991), Delft, april 1990.

RWS slotgemiddelde 1991.0:

http://www.rijkswaterstaat.nl/images/Referentiewaarden%20waterstanden_tcm174-326696.pdf

Derks, 1992

Gedrag van asfaltbekleding onder golfaanval, Verslag modelonderzoek in Deltagoot.

H. Derks, M. Klein Breteler, Waterloopkundig Laboratorium|WL.

Rapport H1480, Marknesse, 1992.

TRAW, 2002

Technisch Rapport Asfalt voor Waterkeren

TAW, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen

Delft, november 2002

TAW, 2003

Technisch Rapport Steenzettingen, deel: Achtergronden

TAW, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen

Delft, december 2003

VTV2006

Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, (ISBN 978-90-369-5762-5)

Den Haag, september 2007.

Bosters, 2008

Aanpassing toetsmethodiek Afschuiving bij steenzettingen

Ruud Bosters, Ministerie van Verkeer en Waterstaat

PBZDT-R-08300, september 2008

Oumeraci et al., 2010

Hydraulic Performance, Wave Loading and Response of Elastocoast Revetments and their Foundation - A Large Scale Model Study -

H. Oumeraci, T. Staal, S. Pfoertner, G. Ludwigs, M. Kudella; Leichtweiß-Institut für Wasserbau

LWI Report no. 988, Braunschweig, January 2010.

Bosters, 2012

Handleiding toetsing en ontwerp, Technische werkwijze van projectbureau Zeeweringen

R. Bosters; Projectbureau Zeeweringen

Document PZDT-R-12093 ken, versie 2. Middelburg, april 2012

't Hart, 2013

Het beoordelen van onderlagen van steenbekledingen

R `t Hart, Deltares.

Rapport 1206424-014, Delft, februari 2013.

Molenaar, 2014

Analysis Report Material Testing, An Investigation into the Retained Strength of Bituminous Dike Revetments Lauwersmeerdijk and Flaauwe Werk.

J.M.M. Molenaar, M.P. Davidse.

KOAC-NPC Report e130313301-2, Aug. 2014

't Hart, 2015

Veldonderzoek betreffende onderlagen van steenzettingen in Zeeland, Methodiek en meetgegevens en analyse.

R `t Hart, D.J. Peters, Deltares.

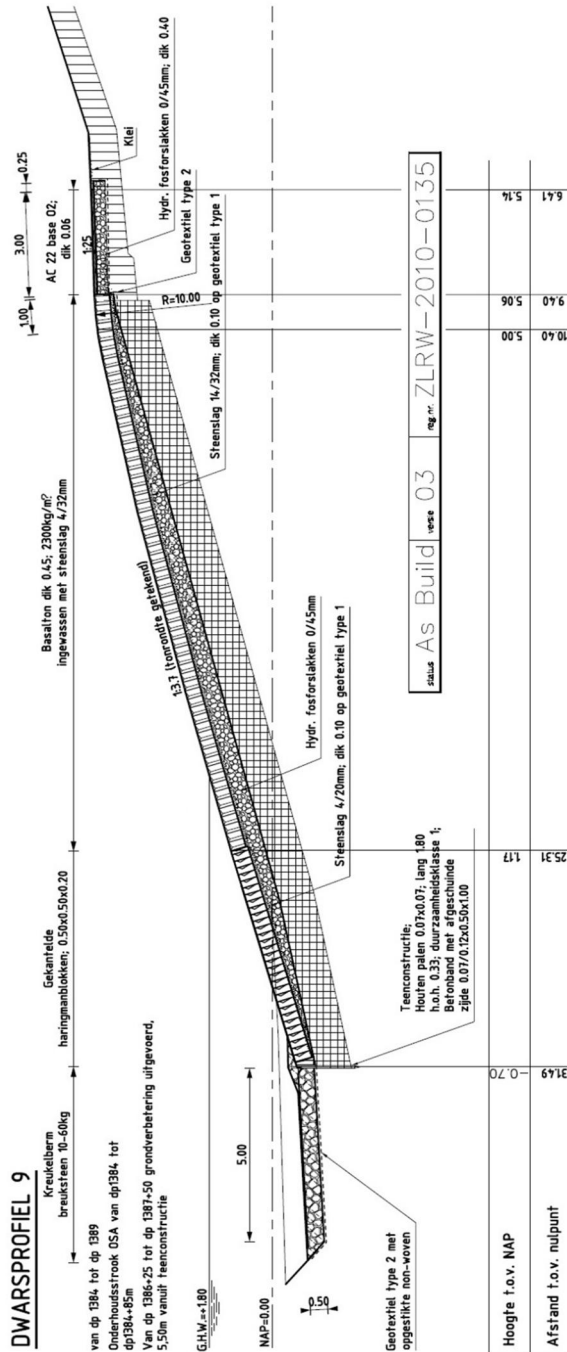
Rapport 1208045-011, Delft, 2015.

Symbolenlijst

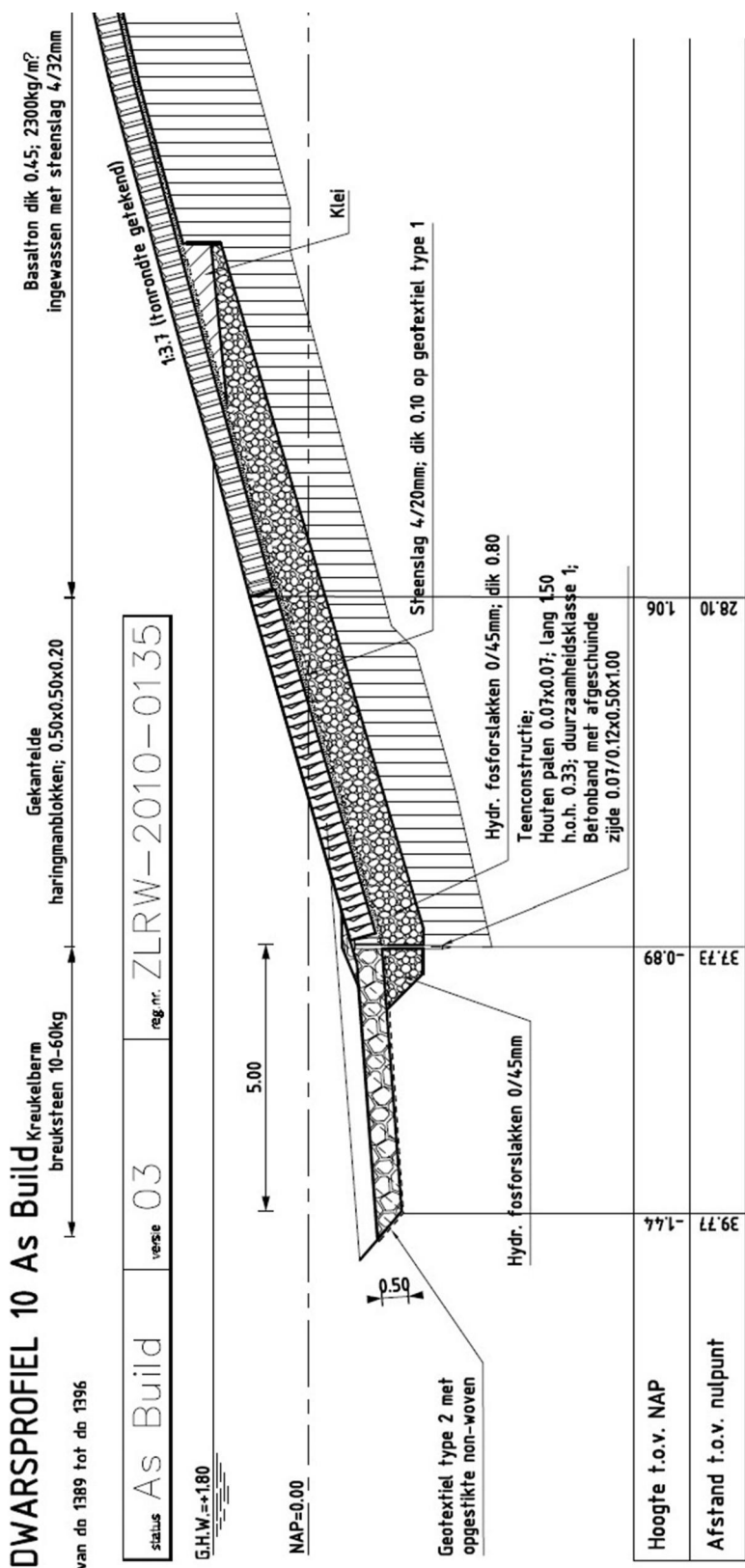
Symbol	Omschrijving	Eenheid
B	breedte van het beschouwde element dat afschuift	m
b_f	dikte filterlaag onder de steenzetting	m
b_k	dikte kleilaag onder de steenzetting	m
D	dikte (asfalt)bekleding	m
D_s	dikte toplaag van de steenzetting	m
D_z	dikte zandlaag die afschuift	m
D_{zt}	dikte eerste watervoerende zandlaag bij de teen van de dijk	m
D_{15}	korreldiameter van het zand	m
D_{10}	korreldiameter van het zand	m
F_s	schuifkracht	N
F_z	zwaartekracht	N
GGA	gemiddelde getijamplitude	m
GWS	gemiddelde buitenwaterstand, ten opzichte van referentie	m
g	versnelling zwaartekracht	m/s^2
H	golfhoogte	m
H_s	significante golfperiode	m
HW	niveau hoogwater ten opzichte van referentie (NAP)	m
L	lengte van het achterland dat naar het buitenwater afwatert	m
L	(effectieve) lengte waarover water moet toestromen naar de locatie waar het oplichten plaats moet vinden	m
MV_a	niveau maaiveld achterland van de dijk ten opzichte van referentie	m
MV_v	niveau maaiveld voorland van de dijk ten opzichte van referentie	m
n_f	porositeit van de filterlaag onder de steenzetting	-
n_z	porositeit van de zandlaag onder de steenzetting	-
T_p	piekperiode van de golfbelasting	s
SWL	niveau van stilwaterlijn ten opzichte van de referentie ($z = 0$)	m
s_{0p}	golfsteilheid	-
z	verticale coördinaat ten opzichte van de onderrand van de onderzijde van de bekleding	m
α	hoek van het talud met de horizon	rad
Δ	relatieve dichtheid onder water ($\rho_s - \rho_w$)/ ρ_w	-
ΔL	lengte van het beschouwde element dat afschuift/ wordt opgelicht	m
Δh	niveaoverschil tussen de actuele grondwaterstand achter de bekleding en de stilwaterlijn	m
ρ_a	soortelijke massa asfaltconstructie	kg/m^3
ρ_f	soortelijke massa het filtermateriaal	kg/m^3
ρ_s	soortelijke massa steenzetting	kg/m^3
ρ_w	soortelijke massa (zee)water	kg/m^3
ρ_z	soortelijke massa zand	kg/m^3
σ_N	normaalspanning in het afschuifvlak	N/m^2
σ_w	grondwaterspanning	N/m^2
Φ_{min}	niveaoverschil golfsterkte trekking ten opzichte van de stilwaterlijn	m
θ_f	hoek van het stijghoogtefront met de horizontaal	rad
τ	schuifspanning	N/m^2

A Tekeningen van onderzochte locaties

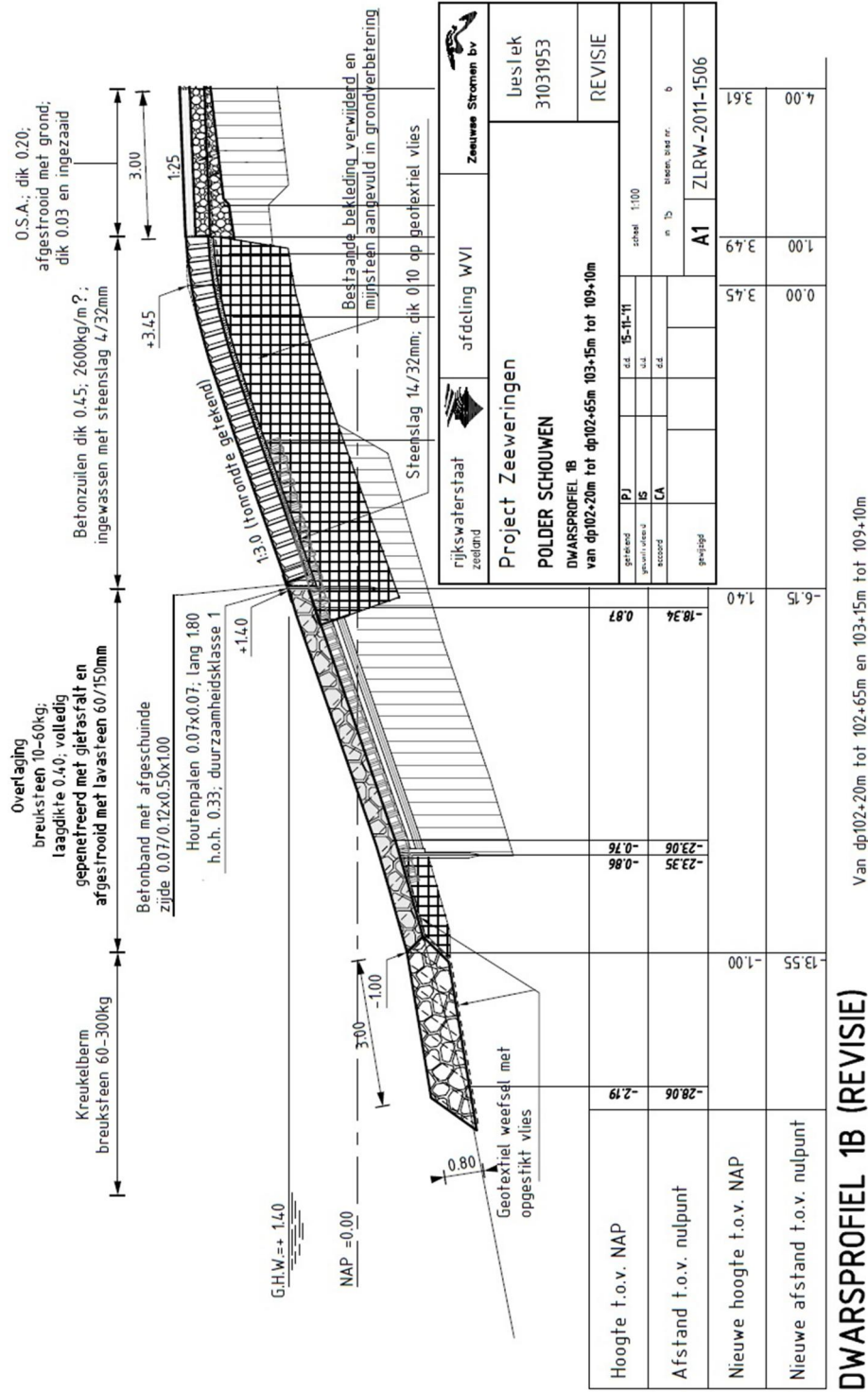
In deze bijlage zijn de laatst beschikbare tekeningen verzameld die betrekking hebben op de onderzochte locaties. Dit zijn steeds de revisietekeningen.



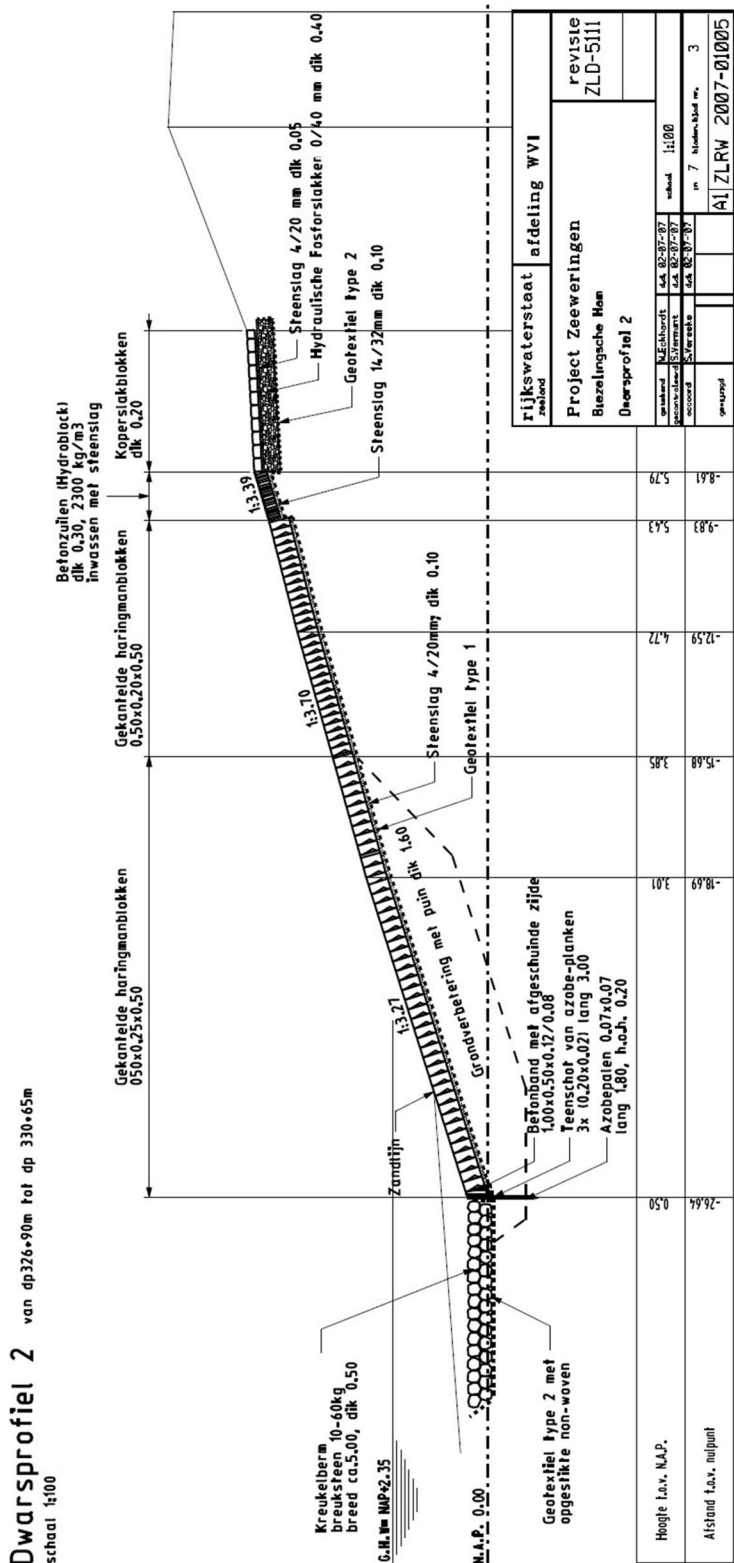
Figuur A.1 Locatie Polder de breede watering bewesten Yerseke, dwarsprofiel 9 revisietekening



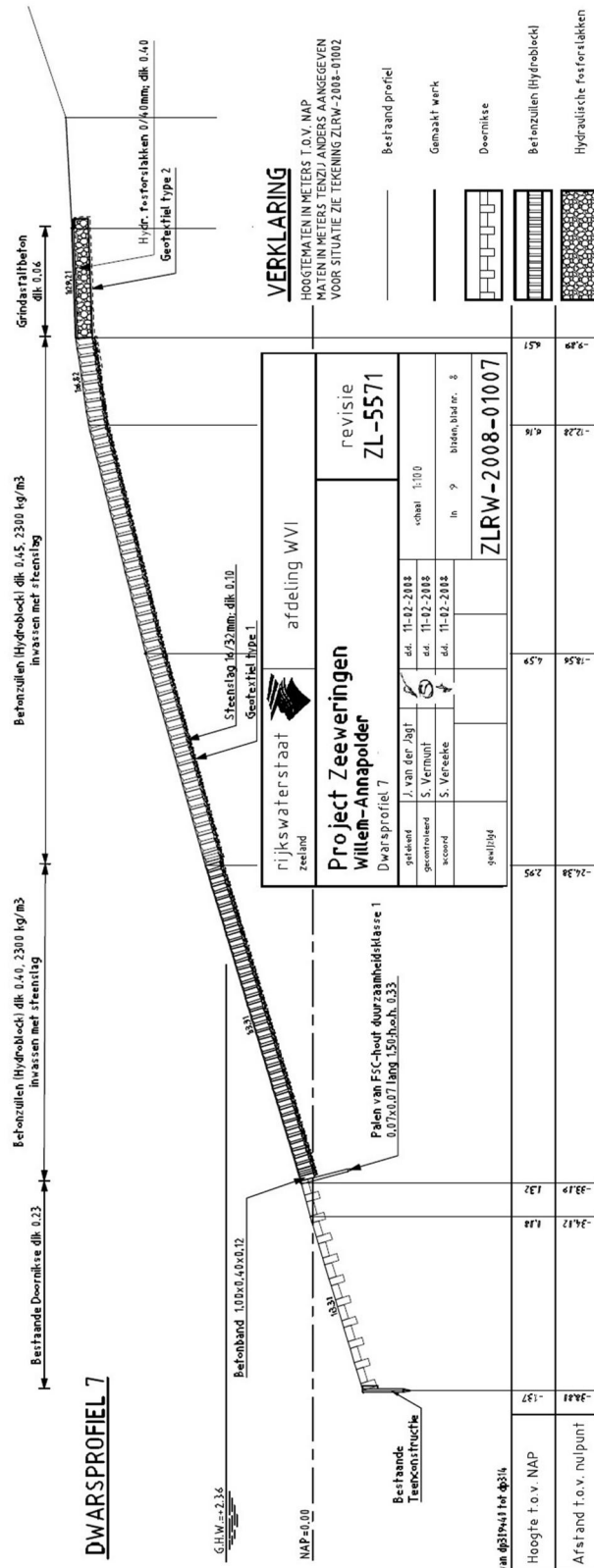
Figuur A.2 Locatie Polder de breede watering bewesten Yerseke, dwarsprofiel 10 revisietekening



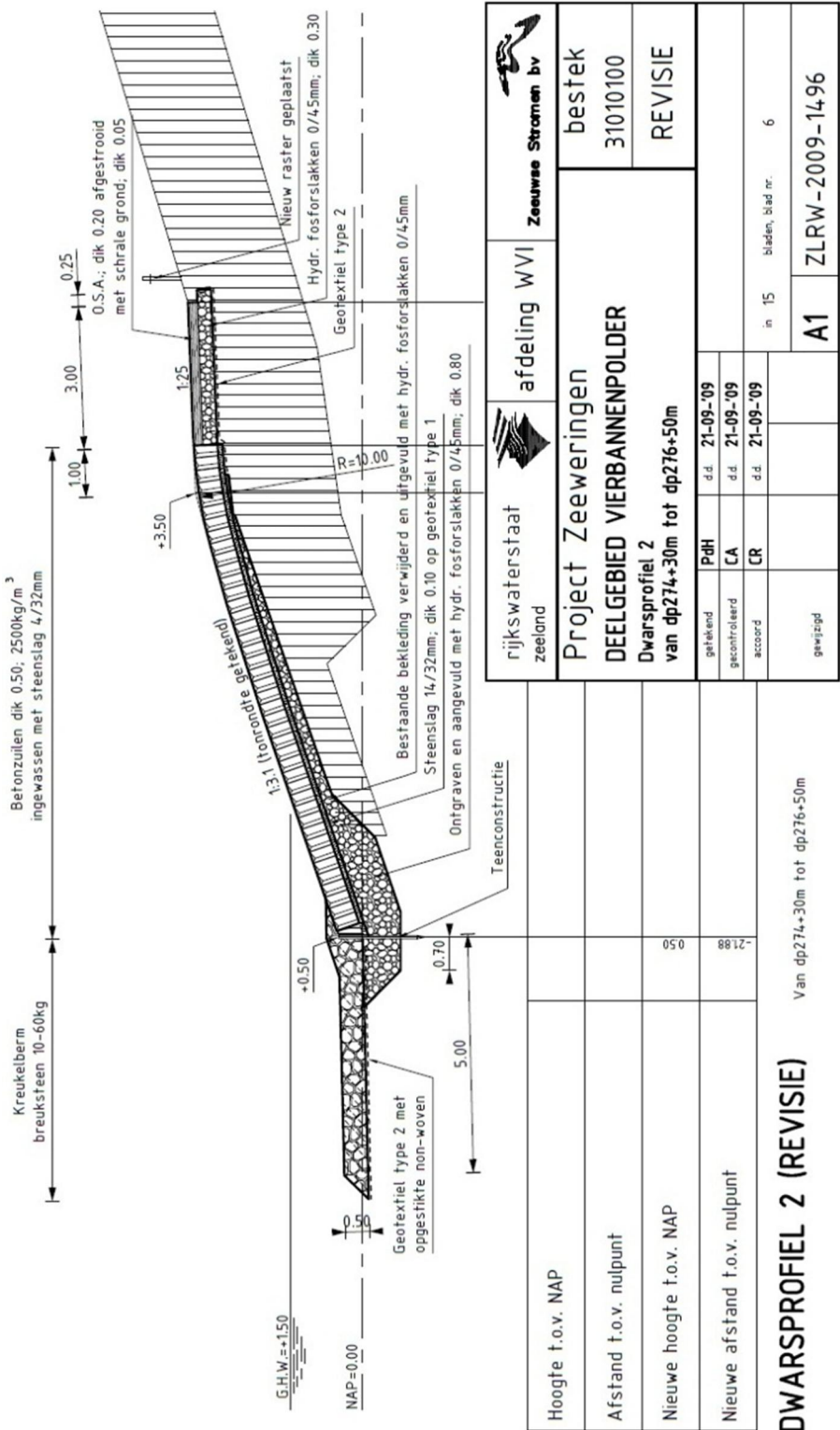
Figuur A.3 Locatie Schouwenpolder, Heerenkeet, dwarsprofiel 1, revisietekening.



Figuur A.4 Locatie Biezelingsche Ham, dwarsprofiel 2, revisietekening



Figuur A.5 Locatie Willem-Annapolder, dwarsprofiel 7, revisietekening



Figuur A.6 Locatie Vierbannenpolder, dwarsprofiel 2, revisietekening

B Verkenning criterium voor het oplichten door golven van een dunne ondoorlatende toplaag op zand

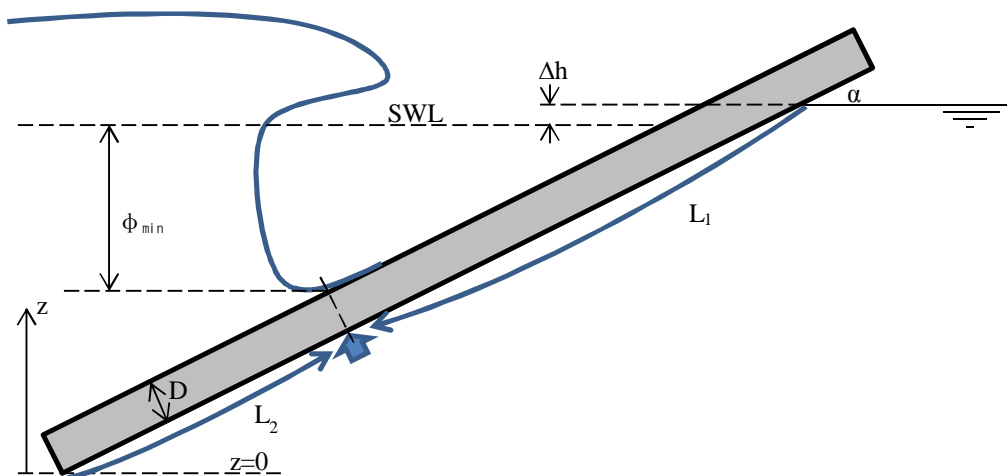
In de huidige methodiek voor het beoordelen van asfaltbekledingen wordt oplichten van de bekleding als gevolg van golfterugtrekking buiten beschouwing gelaten. De redenering daarbij is dat oplichten door drukken als gevolg van golfterugtrekking ondanks een hoge grondwaterstand niet op kan treden omdat de overdruk die lijkt te ontstaan op het moment van golfterugtrekking niet in stand zal blijven. Om te beginnen zal het talud als gevolg van het ontlasten van de bekleding door het terugtrekken van de golf elastisch (reversibel) al iets omhoog komen. De volumetoename onder het talud die bij die vervorming hoort, zal toestroming van water vereisen, wat tot lagere drukken onder het talud leidt. Verder opdrukken van het talud, zodanig dat het zand onder de bekleding kan verplaatsen, zal nog een grotere toestroming vereisen. Het buiten beschouwing laten van van de belastingssituatie bij golfterugtrekking is gebaseerd op de veronderstelling dat gedurende de tijd dat de golf zich heeft teruggetrokken er onvoldoende water kan toestromen om het talud zover op te lichten dat er problemen door ontstaan.

Aangezien ook voor andere lichte bekledingstypen de wens bestaat om een oplichten van de bekleding als gevolg van golfterugtrekking te negeren als mechanisme, is het verstandig toch een criterium te hanteren waarmee situaties met een relatief groot risico bij het ontwerp kunnen worden onderkend en vermeden. Door middel van een simpele beschouwing van de fysica wordt een relatie gelegd tussen de belangrijkste parameters die bij dit mechanisme een rol spelen.

Omdat vergaande versimpelingen worden gehanteerd is verificatie van het criterium met veld- of proefgegevens wenselijk.

Uitgangspunt is de situatie weergegeven in Figuur B.1. Die situatie wordt gekenmerkt door de volgende parameters:

ϕ_{\min}	niveaoverschil golfterugtrekking ten opzichte van de stilwaterlijn [m]
Δh	niveaoverschil tussen de actuele grondwaterstand achter de bekleding en de stilwaterlijn [m]
SWL	niveau van stilwaterlijn ten opzichte van de referentie ($z = 0$) [m]
D	dikte bekleding [m]
α	hoek tussen talud en de horizon [rad]
L	(effectieve) lengte waarover water moet toestromen naar de locatie waar het oplichten plaats moet vinden [m]
ρ_a	soortelijke massa van de toplaag [kg/m^3]
ρ_w	soortelijke massa van (zee)water [kg/m^3]
z	verticale coördinaat ten opzichte van de onderrand van de onderzijde van de bekleding [m]



Figuur B.1 Toestroming langs twee mogelijke paden naar de plek waar oplichten ten gevolge van golfterugtrekking moet plaatsvinden

Een uitdrukking voor ϕ_{\min} kan worden ontleend aan de beschrijving van de theorie voor de steenzettingen. En in die beschrijving wordt nog een vereenvoudiging aangebracht door te veronderstellen dat het talud daadwerkelijk droog is tot het niveau beschreven door ϕ_{\min} .

Als kortste weg voor de toestroming naar de plek waar als eerste oplichten van de bekleding zal plaatsvinden komen de twee paden langs de onderkant van de bekledingslaag in aanmerking:

- 1) Van de plek van de maximale overdruk (= ter plaatse van de doorsnede onder de maximale golfterugtrekking) tot aan het snijpunt van bekleding met de actuele grondwaterstand: $(\phi_{\min} + \Delta h + D \cos(\alpha)) / \sin(\alpha)$;
- 2) Van de plek van de maximale overdruk tot aan de onderrand van de bekleding ($z=0$): $(SWL - \phi_{\min} - D \cos(\alpha)) / \sin(\alpha)$.

Om het verhang langs deze twee paden uit te kunnen rekenen moet de stijghoogte ter plaatse van het vertrek en eindpunt bekend zijn.

Als de liggerwerking van de bekleding wordt verwaarloosd, dan zal er sprake zijn van oplichten van de bekleding als de druk onder de bekleding groter wordt dan de eigengewichtscomponent van de daar aanwezige toplaag: $\rho g D \cos(\alpha)$. Uitgedrukt als stijghoogte is deze druk: $(\rho/\rho_w) D \cos(\alpha)$.

Op het niveau van de grondwaterstand is de stijghoogte per definitie gelijk aan nul. De stijghoogte aan de teen van de dichte bekleding is zeer variabel als gevolg van de passerende golven. Op het moment van de maximale golfterugtrekking zal de stijghoogte ter plaatse tenminste gelijk zijn aan het niveau van de SWL. Het lijkt echter reëler om te veronderstellen dat hij gelijk is aan $SWL + f \cdot H_s$, waarin f een nog onbepaalde waarde heeft tussen 0 en 1.

Met deze gegevens kan, rekening houdend met de plaatshoogte van de verschillende punten, het verhang langs pad 1 worden berekend:

$$i_1 = \frac{\phi_{\min} + \Delta h + D \cos(\alpha) - D \cos(\alpha) \frac{\rho_a}{\rho_w}}{L_1} \quad (B.1)$$

Uitwerken geeft:

$$i_1 = \frac{\phi_{\min} + \Delta h + D \cos(\alpha) - D \cos(\alpha) \frac{\rho_a}{\rho_w}}{(\phi_{\min} + \Delta h + D \cos(\alpha)) / \sin(\alpha)} = \sin(\alpha) \left(1 - \frac{D \cos(\alpha) \frac{\rho_a}{\rho_w}}{\phi_{\min} + \Delta h + D \cos(\alpha)} \right) \approx \sin(\alpha)$$

Pad 2 is door de positie van de onderrand en de onzekerheid over stijghoogte die daar heerst wat minder gemakkelijk uit te werken.

Uit de figuur volgt in ieder geval de suggestie dat als de onderrand relatief dicht bij het punt van de grootste golfterugtrekking ligt, dat dan pad 2 maatgevend zal zijn. Uiteraard moet de onderrand dan wel diep genoeg liggen om de overdruk voldoende te laten oplopen zodat oplichten plaats kan vinden.

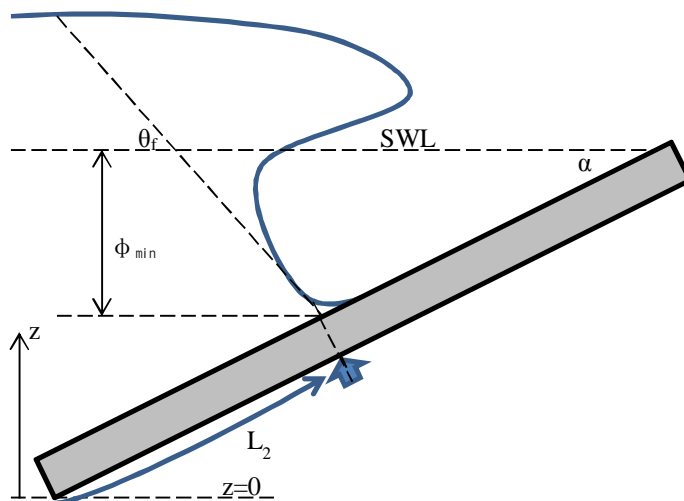
Voor de druk (stijghoogte) ter plaatse van de onderrand van de bekleding wordt gebruik gemaakt van de hydraulische randvoorwaarde van het hoog stijghoogtefront zoals dat bij steenzettingen is geschematiseerd. De front-helling wordt gegeven door [Documentatie Steentoets2010; 1208045-009-HYE-003]:

$$\tan(\theta_f) = \max \left\{ 1; \min \left\{ 8 - 0,6 \frac{\xi}{\tan(\alpha)}; 2,5 \right\} \right\} \quad (\text{B.2})$$

Door deze gradiënt op het talud van het punt waar oplichten plaatsvindt tot aan de teen van de dichte bekleding te veronderstellen krijgen we het volgende verhang onder de bekleding:

$$i_2 = \frac{(L_2 \cos(\alpha) \tan(\theta_f) + D \cos(\alpha) - D \cos(\alpha) \frac{\rho_a}{\rho_w})}{L_2} \quad (\text{B.3})$$

$$= \cos(\alpha)(\tan(\theta_f) - \Delta D/L_2) \approx \cos(\alpha) \tan(\theta_f)$$



Figuur B.2 Schematisatie voor berekening toestroming via onderrand van de bekleding

Bij de laatste stap in de uitwerking is gebruik gemaakt van de aanname dat de bekledingsdikte relatief gezien gering is.

Van beide berekende verhangen zal verhang i_2 normaliter veel groter zijn dan verhang i_1 , oftewel i_2 levert het maatgevende verhang op. Alhoewel er langs beide paden toestroming

plaatsvindt, wordt in deze grove schematisatie alleen de grootste bijdrage meegenomen, de bijdrage van verhang 1 wordt verwaarloosd. Feitelijk zal toestroming naar het punt van oplichten plaatsvinden vanuit alle kanten uit de "halfruimte" onder de bekleding. Maar in deze grove schematisatie wordt ook daar niet mee gerekend.

De toestroming naar het punt waar het eerst oplichten optreedt, is volgens Darcy:

$$q = k \cdot i \quad (\text{B.4})$$

Deze toestroming moet voldoende zijn om een spleet te creëren waarin zand in beweging kan komen. Hiervoor wordt 10 maal de D_{10} van het zand aangehouden. Nb. als de karakteriserende korrelgrootte voor het zand wordt de D_{10} gebruikt omdat die een goede correlatie met de doorlatendheid heeft, de factor 10 is slechts een grofstoffelijke aanname. Verondersteld wordt dat effectief toestroming gedurende een kwart van de golfperiode plaatsvindt. Op het punt van de diepste golf terugtrekking zal dit een kortere tijdsduur zijn, aan de andere kant, er is hier niet gerekend met de formule voor het steilste front en afregelen van deze formules op reële situaties is in ieder geval noodzakelijk. Verstoring van het zandbed en dus vervormingen van het talud mogen worden verwacht als wordt voldaan aan de volgende ongelijkheid:

$$0,25T_p \cdot q = 0,25T_p \cdot k \cdot \cos(\alpha) \tan(\theta_f) > 10D_{10} \quad (\text{B.5})$$

Dit wordt uitgewerkt voor een tweetal concrete cases:

- de ondergrond bestaat uit fijn zand, $D_{10} = 0,04$ mm met een doorlatendheid van 10^{-4} m/s, danwel grover zand, $D_{10} = 0,2$ mm met een doorlatendheid van $2 \cdot 10^{-3}$ m/s;
- de taludhelling relatief steil is: 1:3 ($\rightarrow \cos(\alpha) = 0,95$);
- de golfhoogte $H_s = 2,0$ m, de golfsteilheid $s_{0p} = 0,05$.

De hydraulische randvoorwaarden resulteren in:

$$\begin{aligned} \tan(\theta_f) &= \max \left\{ 1; \min \left\{ 8 - 0,6 \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\alpha) \sqrt{s_{0p}}}; 2,5 \right\} \right\} \\ &= \max \left\{ 1; \min \left\{ 8 - \frac{0,6}{\sqrt{0,05}}; 2,5 \right\} \right\} = 2,5 \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

Voor beide typen zand wordt aan bovenstaande ongelijkheid voldaan als:

$$\text{Fijn zand} \quad T_p > \frac{40D_{10}}{k \cdot \cos(\alpha) \tan(\theta_f)} = \frac{40 \cdot 0,04 \cdot 10^{-3}}{10^{-4} \cdot 0,95 \cdot 2,5} = 6,7 \text{ s} \quad (\text{B.7})$$

$$\text{Grov zand} \quad T_p > \frac{40 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 \cdot 2,5} = 1,7 \text{ s}$$

Nb. het lijkt vreemd dat de golfhoogte niet in de formules voorkomt, maar deze zijn afgeleid onder de voorwaarde dat de bekledingsdikte klein is ten opzichte van de golfafmetingen. Per saldo moet de golfhoogte dus aanzienlijk zijn. Voorts is een specifieke golfsteilheid aangenomen, dus feitelijk is met de golfperiode ook een golfhoogte bekend.

Het is verleidelijk om op grond van deze cases conclusies te gaan trekken. Dat kan slechts onder voorbehoud. De schematisatie is zeer grof en bevat een aantal redelijk arbitraire aannamen (problematische vervorming = $10.D_{10}$) en moet eigenlijk eerst worden geijkt met praktijk of proefgegevens.

Als met dit voorbehoud toch wordt gekeken naar de resultaten dan moge het duidelijk zijn dat, ongeacht de zandsoort, problemen niet kunnen worden uitgesloten als er sprake is van zware golfaanval en een open teen. Golven die in proefopstellingen zijn gebruikt lijken gezien de uitkomst bij fijn zand al tot problemen te leiden. Grof zand, dat gemakkelijke toestroming toestaat, zal bij een volledig open teen constructie al snel tot problemen leiden.

De proefopstelling met asfaltbekledingen in de Deltagoot, had overigens nooit een open overgangsconstructie, er was een volledig dichte aansluiting: de asfaltbekleding was tegen de lager op het talud gelegen betonplaat aangelegd. Slechts nabij de gootbodem was een open teen (drainage), waardoor pad 2 vele malen langer was, al bleef natuurlijk pad 1 altijd actief. Maar het verhang langs pad 1 is aanzienlijk geringer (ca. factor 10) dan langs een open onderste overgangsconstructie. De modelproeven met een hoge grondwaterstand onder de asfaltbekleding hebben nooit grote problemen met de ondergrondstabiliteit opgeleverd. Maar in het asfalttalud in de proefopstelling [Derks, 1992] is na langdurig golven wel een S-vorm opgetreden met een uitwijking van enkele centimeters.

De trend in de uitkomst is logisch: een grote doorlatendheid leidt eerder tot problemen.

Bestaande proefresultaten zullen niet snel verificatie/ijken van de formules mogelijk maken omdat de onderste overgangsconstructie voor zover bekend altijd (nagenoeg) dicht is.

Wellicht dat praktijkcases nog enig aanknopingspunt kunnen bieden. (De dichte bekleding van de Veersegatdam is ooit voorzien van een ventielconstructie in de teen: gabions.) Maar ook in de praktijk zal een geheel open teen die al erg zware belastingen te verwerken heeft gehad niet veel voorkomen. Als een asfaltbekleding relatief laag op het talud is aangelegd, dan ligt daaronder veelal een bekleding die niet even doorlatend zal zijn als het zandbed onder het asfalt. Het gaat namelijk normaliter om een steenzetting op een kleilaag. En die kleilaag blijft in de getijzone tot in lengte van jaren redelijk ondoorlatend.

Geconcludeerd moet worden dat deze uitwerking om te komen tot een criterium voor het oplichten door golven van een dunne ondoorlatende toplaag op zand niet tot een bruikbaar criterium heeft geleid. Deze exercitie heeft wel aannemelijk gemaakt dat open teenconstructies bij lichte waterdichte bekledingen op zand tot migratie van het zand onder de bekleding kan leiden. Die bevinding is in overeenstemming met de rekenregel voor het oplichten van dichte bodembeschermingen, zie paragraaf 4.2.2.