



## **TOETSING VAN POLYURETHAAN GEBONDEN BREUKSTEEN BEKLEDINGEN**

WETTERSKIP FRYSLÂN

5 oktober 2015  
077963042:E - Definitief  
C03011.000043.0600



**Deltares**

# Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b> .....	<b>4</b>
1.1	Algemeen.....	4
1.2	Belastingzones.....	5
1.3	Beoordelingssporen.....	5
<b>2</b>	<b>Toetsing van bekledingen</b> .....	<b>7</b>
2.1	Beoordeling ernstige schade PES.....	7
2.2	Belasting toplaag door golfaanval PTG.....	8
2.2.1	Invoer parameters.....	9
2.2.2	Controle laagdikte met analytische formule.....	12
2.3	Belasting toplaag door overslag PTO.....	13
2.4	Afschuiving PAF.....	14
2.4.1	Controle laagdikte PBA op klei.....	16
2.4.2	Controle laagdikte PBA op zand.....	17
2.5	Materiaaltransport vanuit de onderlagen PMT.....	18
2.6	Wateroverdruk PWO.....	18
2.7	Bezwijken van overgangsconstructies POC.....	18
<b>3</b>	<b>Toetsing van overlagingen</b> .....	<b>20</b>
3.1	Toetsschema.....	20
3.2	Beoordeling ernstige schade PES.....	20
3.3	Belasting toplaag door golfaanval PTG.....	20
3.4	Belasting toplaag door overslag PTO.....	23
3.5	Afschuiving PAF.....	23
3.5.1	Controle laagdikte PBA-overlaging op klei.....	23
3.5.2	Controle laagdikte PBA-overlaging op zand.....	24
3.6	Materiaaltransport vanuit de onderlagen PMT.....	24
3.7	Wateroverdruk PWO.....	24
3.8	Bezwijken van overgangsconstructies POC.....	25
<b>4</b>	<b>Toets op maat en ontwikkelingen</b> .....	<b>26</b>
4.1	Algemeen.....	26
4.2	Handreiking innovaties waterkeringen.....	26
4.3	Geavanceerde rekenmodellen.....	27
4.4	Aandachtspunten bij overlagingen van steenzettingen.....	27
	<b>Referenties</b> .....	<b>28</b>
<b>Bijlage 1</b>	<b>Schadebeelden</b> .....	<b>29</b>
<b>Bijlage 2</b>	<b>Case Waddenzeedijk</b> .....	<b>34</b>
	<b>Colofon</b> .....	<b>41</b>

# Gebruikte afkortingen en symbolen

## Afkortingen

GHW	=	Gemiddeld hoogwater
GLW	=	Gemiddeld laagwater
GWS	=	Gemiddelde grondwaterstand
MGW	=	Maatgevende grondwaterstand
MHW	=	Maatgevende hoogwaterstand
PAF	=	Beoordelingsspoor afschuiving
PBA	=	<i>Polyurethane Bonded Aggregate</i> (polyurethaan gebonden breuksteen)
PES	=	Beoordelingsspoor ernstige schade
PMT	=	Beoordelingsspoor materiaaltransport vanuit de onderlagen
POC	=	Beoordelingsspoor bezwijken van overgangsconstructies
PTG	=	Beoordelingsspoor belasting toplaag door golfaanval
PTO	=	Beoordelingsspoor belasting toplaag door overslag
PWO	=	Beoordelingsspoor wateroverdruk
SWL	=	Still Water Level
TP	=	Toetspeil
VTV2006	=	Voorschrift Toetsen op Veiligheid 2006
WP	=	Winterpeil

## Symbolen

$b_f$	=	totale dikte van alle filter- en/of uitvullagen	[m]
$b_k$	=	dikte van de kleilaag onder de bekleding	[m]
$c$	=	beddingsconstante ondergrond	[Pa/m]
$D$	=	dikte van de zetsteen toplaag	[m]
$D_{15}$	=	korreldiameter van het zand onder de bekleding die door 15% van het materiaal wordt onderschreden	[m]
$d$	=	laagdikte PBA	[m]
$E$	=	buigstijfheid PBA	[Pa]
$g$	=	zwaartekrachtsversnelling	[m/s <sup>2</sup> ]
$H_s$	=	significante golfhoogte	[m]
$P_{max}$	=	maximale drukstoot bij golfklap	[Pa]
$q$	=	stootfactor	[-]
$T_{m-1,0}$	=	spectrale golfperiode	[s]
$T_p$	=	piekperiode	[s]
$z$	=	halve breedte van de driehoeksbelasting (=0,5·H)	[m]
Z2%	=	golfploophoogte die door 2% van de golven wordt overschreden	[m]
$\alpha$	=	taludhelling	[°]
$\Delta_{steen}$	=	relatieve soortelijke massa van zetsteen	[-]
$\Delta_{PBA}$	=	relatieve soortelijke massa van PBA	[-]
$\nu$	=	constante van Poisson	[-]
$\xi_{om}$	=	Irribarren parameter (brekerparameter)	[-]
$\rho_w$	=	dichtheid water	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	=	dichtheid steen	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_{max}$	=	rekenwaarde buigtreksterkte PBA	[Pa]

# 1 Inleiding

## 1.1 ALGEMEEN

Het onderhavige rapport geeft de toetsmethode van polyurethaan gebonden breuksteen bekledingen, ook wel bekend onder de naam *polyurethane bonded aggregate* (PBA), of de merknaam *Elastocoast®*. De term breuksteen of *aggregate* wordt bij deze benamingen vrij gebruikt en duidt niet op specifieke afmetingen van de stenen. In de praktijk wordt PBA toegepast met standaardsorteringen variërend van 8/11 mm tot 40/60 mm.

De hier beschreven methoden voor de toetsing zijn toegespitst op twee belangrijke toepassingen van PBA, namelijk:

- **Bekledingen** – zelfstandig functionerende bekleding, bestaande uit een PBA toplaag met daaronder een (granulair) filter direct aangebracht op een ondergrond van klei of zand met een geotextiel. Zie hoofdstuk 2.
- **Overlagingen** – verbetermaatregel met als doel extra gewicht en sterkte toevoegen aan een bestaande bekleding, door een toplaag van PBA direct over de bestaande bekleding (bijvoorbeeld een steenzetting, maar ook asfaltbekledingen) aan te brengen. Zie hoofdstuk 3.

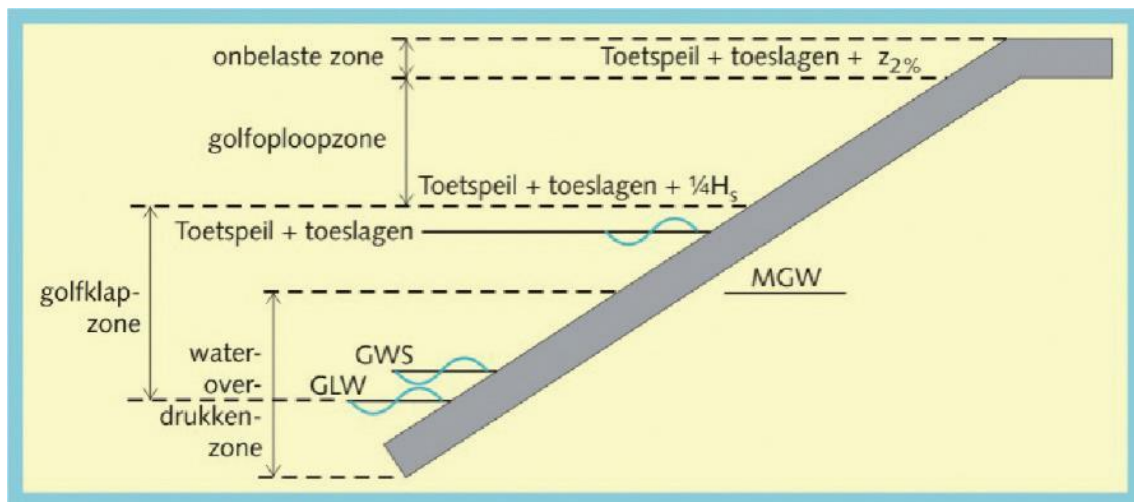


Figuur 1. Aanleg van een taludbekleding met polyurethaan gebonden breuksteen (foto: Bijlsma, 2007)

## 1.2 BELASTINGZONES

Een PBA bekleding is een niet-waterdichte, samenhangende plaatbekleding. Voor dit type bekleding worden de volgende belastingzones onderscheiden:

- **Wateroverdrukkenzone:** buitentalud onder de maatgevende grondwaterstand MGW in het dijklichaam.
- **Golfklapzone:** buitentalud tussen gemiddeld laagwater GLW en Toetspeil + toeslagen +  $\frac{1}{4}H_s$ .
- **Golfoploop- en overslagzone:** buitentalud tussen Toetspeil + toeslagen +  $\frac{1}{4}H_s$  en Toetspeil + toeslagen +  $z_{2\%}$ .
- **Onbelaste zone:** buitentalud boven Toetspeil + toeslagen +  $z_{2\%}$ .



Figuur 2 Schematische weergave van de belastingzones op het talud (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007).

Uit overslagproeven blijkt een PBA bekleding goed bestand tegen een debiet van 125 l/s/m. Beoordeling van PBA toepassing op de kruin en het binnentalud – binnen de onbelaste zone – op golfoverslag en oploop is naar verwachting niet noodzakelijk en resulteert in de score ‘voldoet’.

## 1.3 BEOORDELINGSSPOREN

De beoordeling van de stabiliteit van PBA vindt plaats op verschillende beoordelingssporen:

- beoordeling ernstige schade PES;
- belasting toplaag door golfaanval PTG;
- belasting toplaag door overslag PTO;
- afschuiving PAF;
- materiaaltransport vanuit de onderlagen PMT;
- wateroverdruk PWO;
- bezwijken van overgangsconstructies POC.

Welke beoordelingssporen moeten worden getoetst, hangt af van de belastingzone(s) waarin de te toetsen bekleding zich bevindt. Een overzicht van relevante beoordelingssporen is opgenomen in Tabel 1. Als van één of meer van deze toetsporen de deelscore ‘voldoet niet’ is, dan moet de bekleding worden afgekeurd, of worden verder gegaan met de toets op maat indien de verwachting is dat dit nog tot een wijziging van de score kan leiden.

Locatie PBA bekleding	Relevante beoordelingssporen:						
	PES	PTG	PTO	PAF	PMT	PWO	POC
<b>Onbelaste zone:</b> buitentalud boven Toetspeil + toeslagen + z2%.	-	-	-	-	-	-	-
<b>Golfoploop- en overslagzone:</b> buitentalud tussen Toetspeil + toeslagen + ¼ Hs en Toetspeil + toeslagen + z2%;	<b>PES</b>	-	<b>PTO</b>	-	<b>PMT</b>	-	<b>POC</b>
<b>Golfklapzone:</b> buitentalud tussen gemiddeld laagwater GLW en Toetspeil + toeslagen + ¼ Hs;	<b>PES</b>	<b>PTG</b>	-	<b>PAF</b>	<b>PMT</b>	-	<b>POC</b>
<b>Wateroverdrukkenzone:</b> buitentalud onder de maatgevende grondwaterstand MGW in het dijklichaam.	<b>PES</b>	-	-	-	<b>PMT</b>	<b>PWO</b>	<b>POC</b>
<b>Paragraaf toetsmethode</b>	<b>2.1</b>	<b>2.2</b>	<b>2.3</b>	<b>2.4</b>	<b>2.5</b>	<b>2.6</b>	<b>2.7</b>

Tabel 1. Relevante beoordelingssporen afhankelijk van ligging PBA-bekleding.

Er is geen verplichte volgorde voor het doorlopen van de beoordelingssporen. Als bij één van de beoordelingssporen op een deelscore 'voldoet niet' wordt uitgekomen, dan hoeven de resterende beoordelingssporen niet te worden doorlopen. In dit geval mag direct de eindscore 'voldoet niet' worden gegeven.

# 2 Toetsing van bekledingen

## 2.1 BEOORDELING ERNSTIGE SCHADE PES

Voordat men met de beoordeling van de individuele bezwijkmechanismen begint, wordt de onderhavige bekleding geïnspecteerd op de aanwezigheid van ernstige schade. Bij de toetsing kan direct de deelscore ‘voldoet niet’ worden gegeven als uit ervaring blijkt dat onder hydraulische belasting (bijvoorbeeld tijdens stormen) ernstige schade is opgetreden. In dit geval is het zeer waarschijnlijk dat hetzelfde (in ernstiger mate) gebeurt onder maatgevende omstandigheden. Deze score geldt dan als eindscore (een toets op maat is dan niet meer zinvol).

Minder ernstige schade kan eveneens een indicatie zijn voor een gebrek van de constructie, dat onder maatgevende omstandigheden kan leiden tot bezwijken. Een dergelijk gebrek kan het resultaat zijn van onregelmatigheden bij de uitvoering, ontwerp, onvoorziene belastingen of aantasting. Daarom dient altijd een visuele inspectie plaats te vinden, waarbij onder meer wordt gelet op:

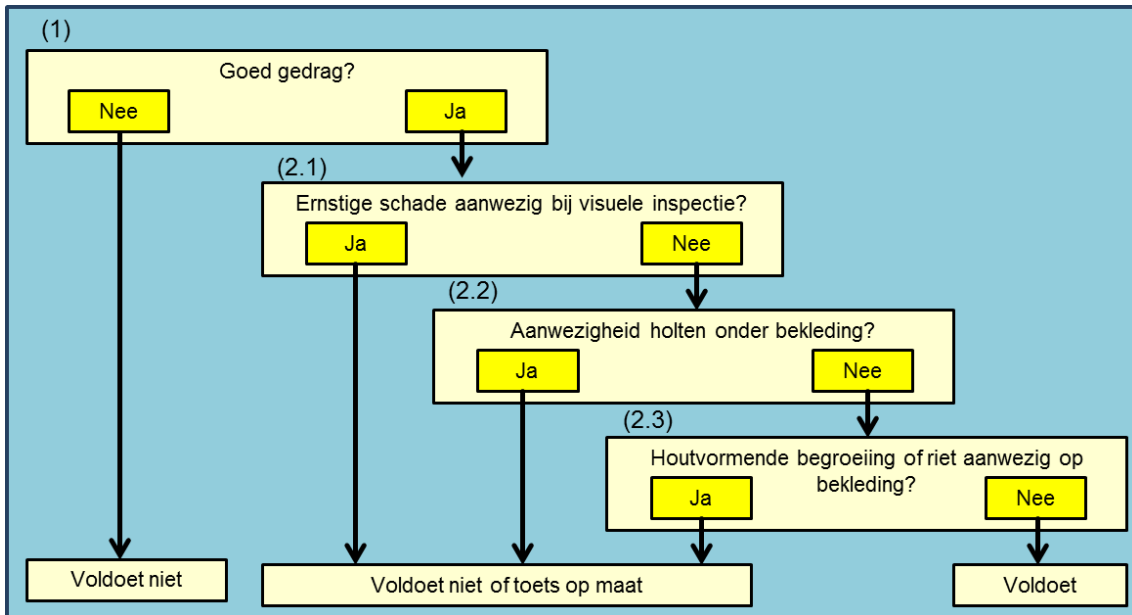
- schadebeelden aan het oppervlak (zoals verkleuring van het oppervlak, gebroken of ontbrekende stenen, gaten of scheuren in de bekleding, verzakkingen);
- aanwezigheid van holten onder de bekleding (t.g.v. materiaaltransport kunnen ondermijnende holten ontstaan waardoor ongelijkmatige zettingen zichtbaar worden en schade ontwikkelt);
- begroeiing door houtvormende gewassen of riet (waarvan de wortelgroei schade kan aanrichten).



Figuur 3. Opname van een scheur in polyurethaan gebonden bekleding (foto: Oumeraci et. al., 2010).

Het toetschema voor de toetsing is weergegeven in Figuur 4. De inspectie kan in de eerste instantie visueel gebeuren. Enkele typische schadebeelden zijn opgenomen in Bijlage 1. Holten onder de PBA bekleding zijn vaak echter moeilijk visueel vast te stellen, of alleen indirect door de aanwezigheid van uitgespoeld materiaal uit de uitvullaag of kern. Bij twijfel kan (non)destructief onderzoek worden ingezet, zoals valgewicht-deflectie meting, *remote sensing*, (grond)radar of kernboringen.

Lichte schade kan direct worden hersteld of opgenomen in het onderhoudsplan.

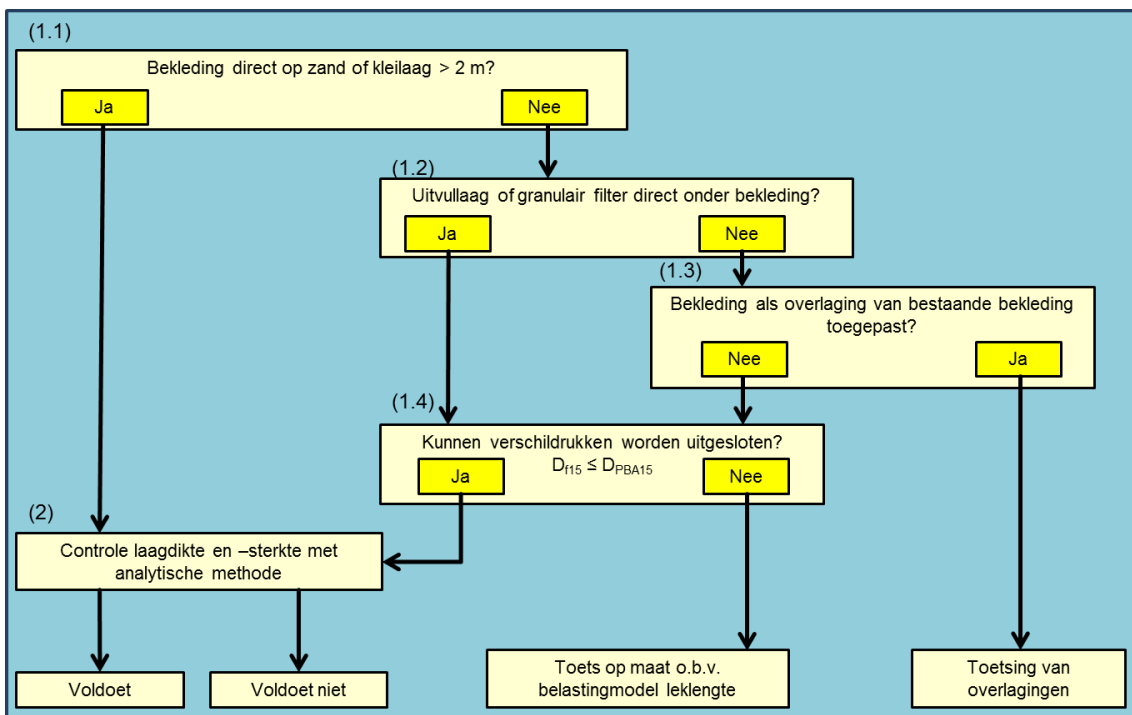


Figuur 4. Toetsschema beoordeling ernstige schade PES.

## 2.2 BELASTING TOPLAAG DOOR GOLFAANVAL PTG

Het belangrijkste mechanisme voor een PBA bekleding onder golfaanval is breuk door overschrijding van de buigtreksterkte onder invloed van golfklappen.

Het toetsschema voor de toetsing is weergegeven in Figuur 5.



Figuur 5. Toetsschema belasting toplaag door golfaanval PTG.



Eerst moet worden gecontroleerd of verschildrukken onder de PBA bekleding kunnen worden uitgesloten. Hiervoor worden de volgende controlestappen doorlopen:

- **Stap 1.1** - Is de PBA bekleding direct op de zand- of kleilaag >2 m aangebracht (eventueel met geokunststof filter)? Dan mag de toetsing direct worden vervolgd met stap 2.
- **Stap 1.2** - Is er een uitvullaag of granulair filter aanwezig tussen de bekleding en het dijklichaam? Dan is het mogelijk dat verschildrukken in de filterlaag optreden. Dit wordt getoetst in stap 1.4.
- **Stap 1.3** - Als de PBA bekleding is toegepast als overlaging van een bestaande bekleding, dan moet de toetsing worden uitgevoerd met de specifieke aandachtspunten voor overlagingen (zie paragraaf 3.3).
- **Stap 1.4** - Het optreden van verschildrukken onder de bekleding kan worden uitgesloten als de  $D_{f15}$  van de uitvullaag of granulair filter kleiner dan of gelijk is aan de  $D_{PBA15}$  van het PBA mengsel, oftewel  $D_{f15} \leq D_{PBA15}$ . In dit geval kan de toetsing worden vervolgd met stap 2, de controle van de laagdikte. Deze staat in de volgende paragrafen beschreven.

Als verschildrukken niet kunnen worden uitgesloten, moet een toets op maat plaatsvinden op basis van het belastingmodel lek lengte (zoals voor steenzettingen wordt gebruikt).

## 2.2.1 INVOER PARAMETERS

De relevante invoerparameters voor de controle van de laagdikte en –sterkte zijn:

- significante golfhoogte  $H_s$  [m];
- spectrale golfperiode  $T_{m-1,0}$  [s];
- rekenwaarde laagdikte  $d$  [m];
- rekenwaarde buigtreksterkte PBA mengsel  $\sigma_{max}$  [Pa];
- rekenwaarde buigstijfheid PBA mengsel  $E$  [Pa];
- rekenwaarde beddingsconstante ondergrond  $c$  [Pa/m].

### *Hydraulische randvoorwaarden*

De toetsing van de PBA bekleding dient te gebeuren op basis van de juiste hydraulische randvoorwaarden. Deze hydraulische randvoorwaarden dienen afgeleid te zijn ter hoogte van de teen van de constructie. Voor bekledingen in de zone tussen Toetspeil minus  $0,6 \cdot H_s \cdot \xi_{om}$  en Toetspeil+toeslagen kan worden uitgegaan van de maatgevende golfhoogte  $H_s$  en golfperiode  $T_{m-1,0}$  bij Toetspeil+toeslagen.

Een uitzondering hierop vormen bekledingen die geheel op lager taluddelen liggen, ver onder het Toetspeil, en in combinatie met een door waterdiepte beperkte golfhoogte. Deze taluddelen liggen onder maatgevende omstandigheden onder water en ondervinden nauwelijks belasting door de zware golven bij Toetspeil. Dit geldt voor bekledingen, waarvan de bovenkant minimaal op een diepte van  $0,6 \cdot H_s \cdot \xi_{om}$  onder Toetspeil ligt. Hiervoor mogen specifiek bij lagere waterstanden afgeleide golfhoogten worden gebruikt, waarbij de maatgevende waterstand gelijk wordt gesteld aan de bovenkant van de constructie plus  $0,6 \cdot H_s \cdot \xi_{om}$ . Bekledingen die hier niet volledig onder vallen, dienen alsnog te worden getoetst op de maatgevende golfhoogte en golfperiode bij Toetspeil+toeslagen.

Opgemerkt wordt dat de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden op voorgeschreven wijze voor specifieke constructiedelen conservatieve resultaten kan opleveren. Voor deze delen is het raadzaam de maatgevende waterstand,  $H_s$  en  $\xi_{om}$  ter hoogte van de bekleding vast te stellen door middel van interpolatie. In programmatuur zoals 'Steentoets' (gebruikt voor het toetsen of ontwerpen van steenzettingen) wordt dit automatisch gedaan.

### ***Invoer laagdikte***

De laagdikte speelt een belangrijke rol in de toetsing. Bij de toetsing wordt voor de rekenwaarde van de aanwezige laagdikte de karakteristieke waarde gebruikt, met een onderschrijdingskans van 5% ( $d_{5\%}$ ). De wijze van bepaling van  $d_{5\%}$  is afhankelijk van de beschikbaarheid van informatie:

- Als alleen de bestekswaarde bekend is, dan kan worden gerekend met een veilige schatting afhankelijk van de te verwachten diktevariatie en eventuele slijtage tijdens de levensduur. Om tot de rekenwaarde van de laagdikte te komen moet de besteklaagdikte worden verminderd met de verwachte slijtage. De slijtage kan worden ingeschat op basis van metingen uit het verleden. Bij de eerste toetsing wordt aanbevolen altijd een laagdiktemeting uit te voeren.
- Als wél metingen beschikbaar zijn (zoals in- en uitmetingen van de aanleg), of kunnen worden uitgevoerd, dan dient de 5%-grens te worden bepaald uit de waarnemingen (niet-destructief onderzoek of minimaal 6 aselekt geselecteerde boringen).



Figuur 6. Uitvoeren kernboring op polyurethaan gebonden bekleding (links) en boorkern (rechts) (foto: Bijlsma, 2008).

### ***Sterkte en stijfheid van de bekleding***

Indien al eerder de sterkte en stijfheid van de bekleding door laboratoriumonderzoek zijn bepaald, en de metingen zijn niet ouder dan 12 jaar (één toetscyclus), dan kunnen hiervan de karakteristieke waarden worden gebruikt voor de berekeningen. Deze parameters zijn gekoppeld aan de project specifieke eigenschappen zoals steengrootte en gradering, steensoort en mengverhouding met de polyurethaanlijm.

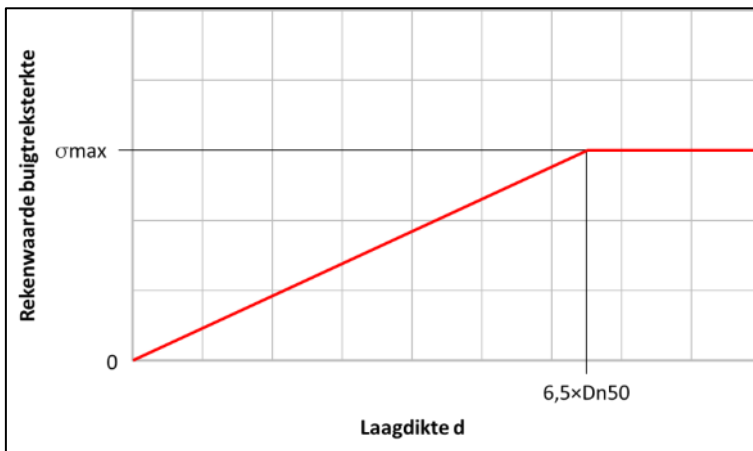
Voor nieuwe bekledingen, niet ouder dan 12 jaar en waarvan voldoende aanleg- en besteksgegevens maar geen project specifieke eigenschappen bekend zijn, kunnen standaard ontwerp waarden voor de buigtreksterkte en buigstijfheid van een aantal mengsels worden gebruikt. De waarden zijn afkomstig uit de design manual voor PBA bekledingen (bron ARCADIS, 2013), zie Tabel 2, en geldig voor mengsels met circa 2-3 vol% PU-lijm afhankelijk van de gebruikte sortering.

In alle andere gevallen, of als veroudering van de bekleding daartoe aanleiding geeft, moeten de sterkte en stijfheid alsnog met laboratoriumonderzoek bepaald worden. Voor de karakteristieke waarden voor de parameters worden altijd veilige waarden gekozen. Een kleinere buigtreksterkte en een hogere buigstijfheid zijn ongunstig voor de veiligheid van de constructie. Voor de buigtreksterkte wordt dus een karakteristieke ondergrens en voor de buigstijfheid wordt een karakteristieke bovengrens gebruikt bij de toetsing.

Voor laagdikten  $< 6,5 D_{n50}$  moet altijd een reductie op de buigtreksterkte worden toegepast volgens Figuur 7.

Mengsel o.b.v. sortering	Buigtreksterkte $\sigma_{max}$ (MPa)	Buigstijfheid E (MPa)
8/11 mm	1,09	3000
10/14 mm	0,97	3000
20/40 mm	0,62	3000
30/60 mm	0,50	3000

Tabel 2. Standaard ontwerpwaarden buigtreksterkte mengsels (Bron ARCADIS, 2013).



Figuur 7. Bepalen rekenwaarde buigtreksterkte bij dunne lagen.

#### *Stijfheid ondergrond*

In de afgelopen jaren zijn op veel asfaltglooiingen valgewicht-deflectiemetingen uitgevoerd. Dit heeft inzicht gegeven in de draagkracht van de ondergrond onder de bekledingen. Deze informatie wordt ook gebruikt voor de toetsing van PBA bekledingen.

Voor de toets mag een karakteristieke waarde voor de beddingsconstante worden gehanteerd van 64 (MPa/m). Deze waarde is voor een zandondergrond. Voor een ondergrond van klei wordt een lagere beddingsconstante van 30 (MPa/m) gehanteerd.

#### *Vermoeingsparameters*

Polyurethaan gebonden breuksteen is zeer resistent tegen veroudering door blootstelling aan (zout) water, UV-bestraling of andere weersinvloeden en is niet gevoelig voor vermoeiing. Bij berekening met de analytische formules wordt geen rekening gehouden met het verschijnsel vermoeiing.

## 2.2.2 CONTROLE LAAGDIKTE MET ANALYTISCHE FORMULE

Uitgangspunt van de analytische uitwerking is dat golfklappen buiging in een plaat veroorzaken en dat de optredende spanning ten gevolge van het buigend moment de bezwijkspanning van de plaat niet mag overschrijden. De bekleding en ondergrond zijn geschematiseerd tot een elastisch ondersteunde ligger. De golfklap is geschematiseerd tot een driehoeksbelasting.

Er wordt in de sterkteberekening geen rekening gehouden met vermoeiing. PBA is niet gevoelig voor vermoeiing. Het gaat hier om het toetsen aan één storm, met één extreme waarde voor de golfklap.

De maximale drukstoot wordt bepaald door de golfhoopte en de stootfactor. In lijn met de rekenmethoden voor asfaltdekkingsbekledingen (KOAC-NPC, 2009) wordt de variatie in golfhoopte verdisconteerd in de stootfactor. Voor PBA bekledingen is de grootte van de stootfactor onderzocht met proeven in een golfgoot op prototype schaal (Oumeraci et al. 2010). Hieruit is een waarde voor de stootfactor van  $q = 5,0$  geadviseerd (ARCADIS, 2013), geldig bij gebruik van de significante golfhoopte  $H_s$ .

De halve belastingbreedte van de driehoeksbelasting is gelijk aan  $z = 0,5 \cdot H$ , waarin  $H$  in een onregelmatig golfveld kan variëren tussen circa  $0,1-1,5 \cdot H_s$  (De Looff, et. al., 2006). In de toetsmethode is voornamelijk gekozen voor een benadering met  $z = 0,5 \cdot H_s$ .

De maximale drukstoot wordt als volgt berekend:

$$P_{max} = \rho_w g q H_s$$

Waarin:

$P_{max}$	=	maximale drukstoot bij golfklap	[Pa]
$\rho_w$	=	dichtheid water	[kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	=	zwaartekrachtsversnelling	[m/s <sup>2</sup> ]
$q$	=	stootfactor	[-]
$H_s$	=	significante golfhoopte	[m]

Vervolgens wordt de optredende buigtrekspanning aan de onderzijde van de bekleding berekend en getoetst aan de rekenwaarde van de buigtreksterkte:

$$\sigma_{max} \geq \frac{P_{max}}{4\beta^3 z} [1 - e^{(-\beta z)} (\cos(\beta z) + \sin(\beta z))] \frac{6}{d^2}$$

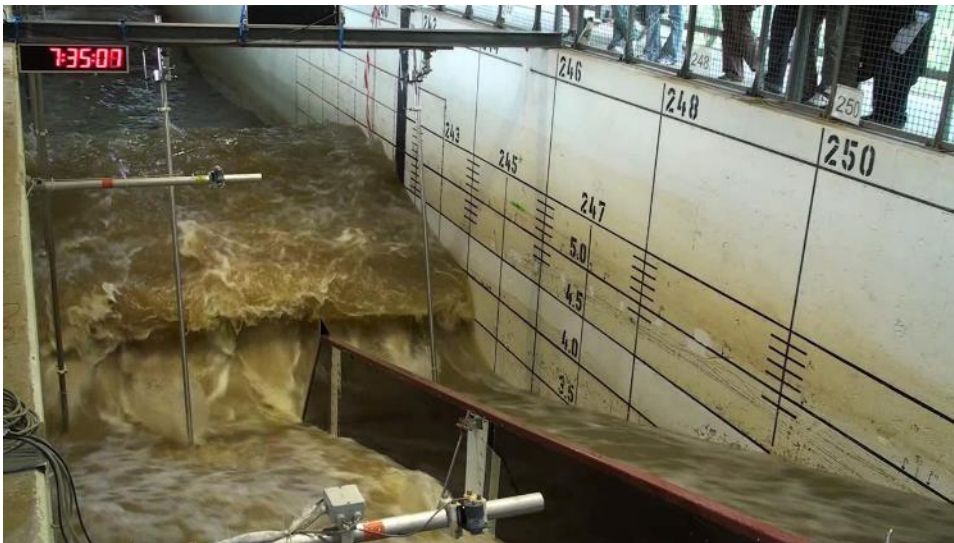
Met:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3c(1 - \nu^2)}{E d^3}}$$

Waarin:

$\sigma_{max}$	=	rekenwaarde buigtreksterkte PBA	[Pa]
$P_{max}$	=	maximale drukstoot bij golfklap	[Pa]
$c$	=	beddingsconstante ondergrond	[Pa/m]
$E$	=	buigstijfheid PBA	[Pa]
$d$	=	laagdikte PBA	[m]
$\nu$	=	constante van Poisson (aanname $\nu=0,35$ )	[-]
$z$	=	halve breedte van de driehoeksbelasting ( $=0,5 \cdot H_s$ )	[m]

N.B. hoeken in voorgenoemde formule worden in radialen ingevoerd



Figuur 8. Golfgoot onderzoek golven op de PBA bekleding (foto: Oumeraci et al., 2010).

### 2.3 BELASTING TOPLAAG DOOR OVERSLAG PTO

Overslag is relevant binnen de golfoploop- of overslagzone. In standaard gevallen, waarbij geen sprake is van extreme overloop of golfoverslag over de kruin van de dijk, is een beoordeling op stroming niet relevant.

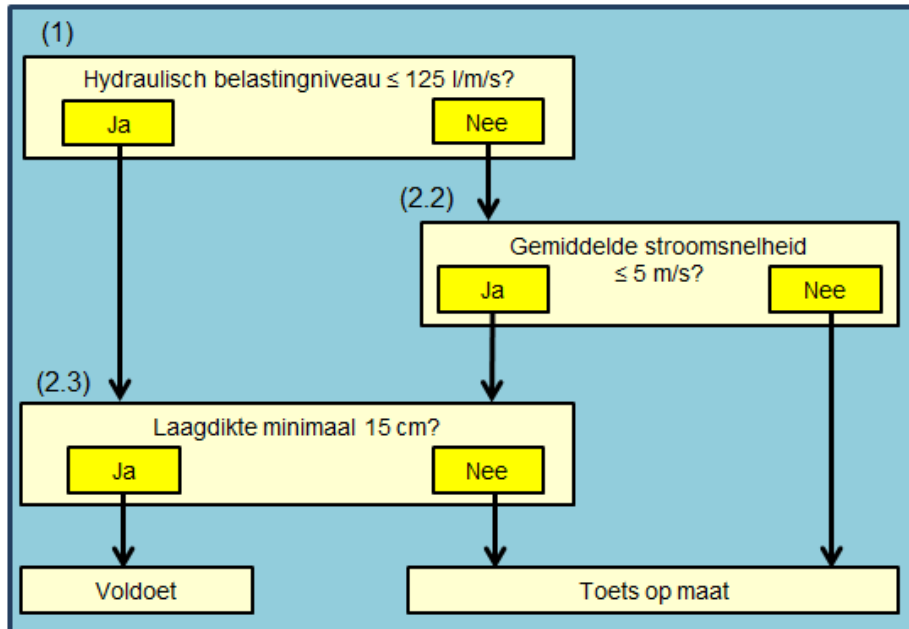
In de periode medio maart/april 2008 zijn golfoverslagproeven uitgevoerd om de erosiebestendigheid van de taludbekleding van het binnentalud van de zeedijk te testen. Deze golfoverslagproeven zijn uitgevoerd met behulp van een golfoverslagsimulator. Hieruit bleek dat PBA zeer overslagbestendig is. Een overslagdebiet van 125 l/s/m (afhankelijk van de locatie op het talud bedraagt de stroomsnelheid circa 5-6 m/s) heeft geen enkele vorm van schade opgeleverd bij de dijkbekleding.



Figuur 9. Overslagtest door Infram te Kattendijke (foto: Bijlsma, 2008).

De toets is gebaseerd op bewezen sterkte en geeft een zeer veilige benadering. De stroomsnelheden waarbij daadwerkelijk schade optreedt zullen namelijk veel hoger liggen dan waarop is getest.

Het toetsschema voor de toetsing is weergegeven in Figuur 10.



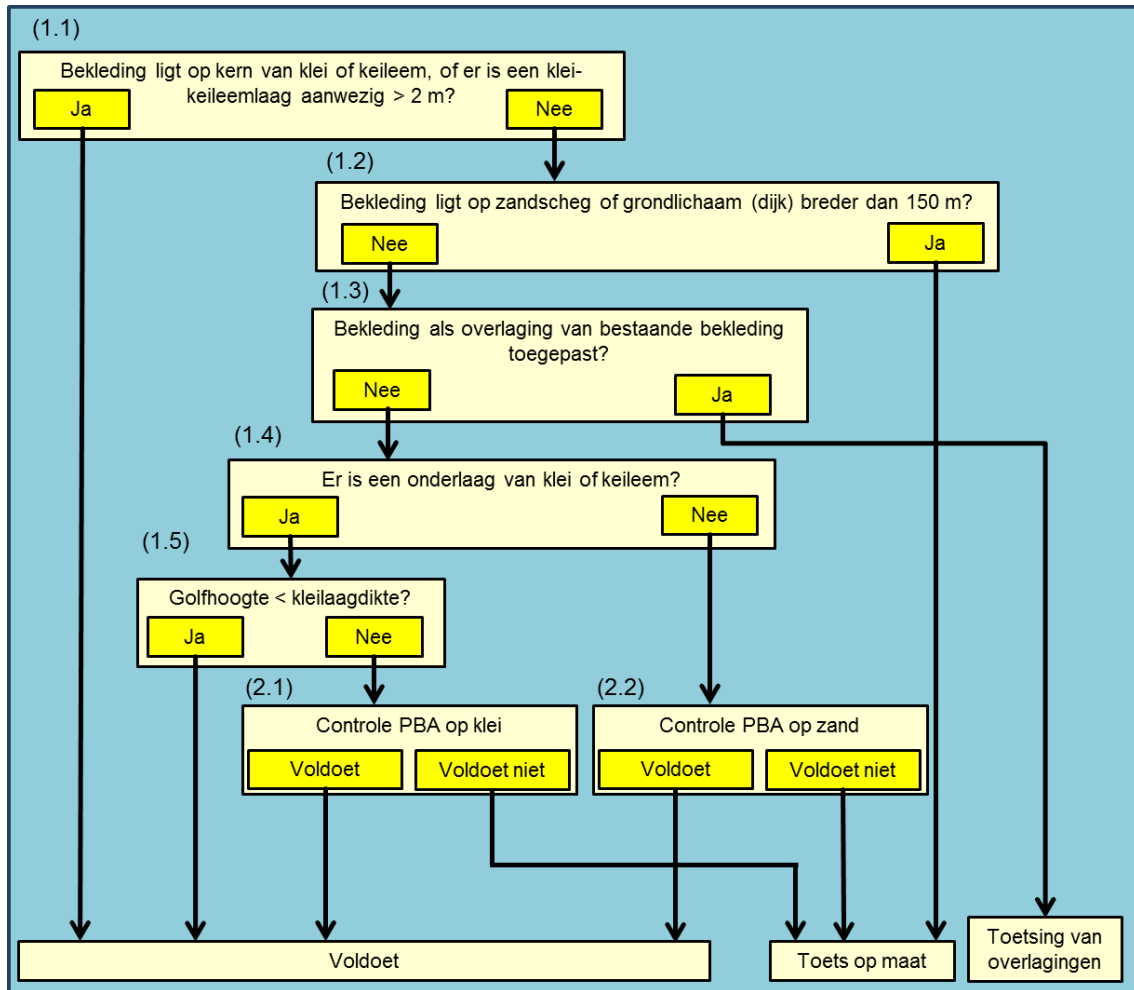
Figuur 10. Toetsschema Belasting toplaag door overslag PTO.

## 2.4 AFSCHUIVING PAF

De toetsing op 'afschuiving' betreft het mechanisme dat ontstaat bij golfaanval op een talud met een relatief dunne laag bovenop het zand van de dijk kern, eventueel met een geotextiel. Ten gevolge van de opbouw van wateroverspanningen door repetitieve golfaanval kan verweking van het zandlichaam optreden. Als dit mechanisme optreedt, ontstaat er een S-profiel in het talud waarna de ondersteuning van de toplaag verloren gaat met mogelijk bezwijken tot gevolg.

De toetsing op het mechanisme 'Afschuiving PAF' is alleen van toepassing op delen van de bekleding in de golfklapzone.

Het toetsschema voor de toetsing is weergegeven in Figuur 11.



Figuur 11. Toetsschema afschuiving PAF.

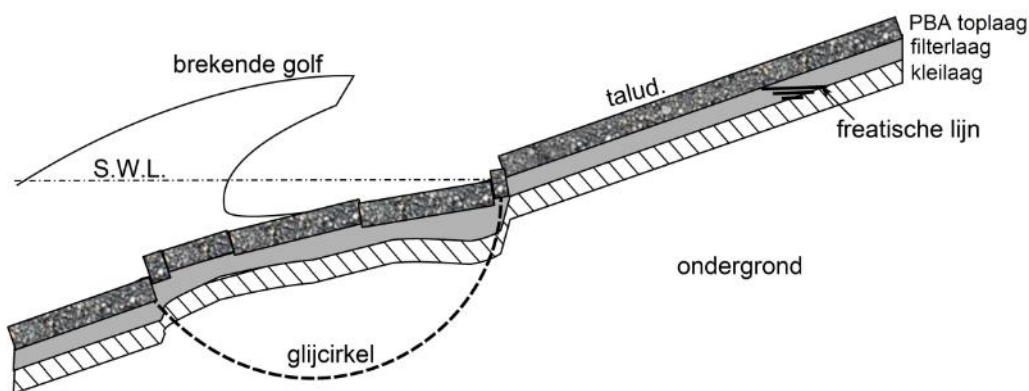
### Dijkopbouw

Allereerst wordt gekeken naar de opbouw van de bekleding en het dijklichaam. Hierin worden twee bijzondere dijkopbouwen onderscheiden:

- **Stap 1.1 Kern van klei of keileem** - Indien de bekleding (inclusief filterlaag) is aangelegd op een kern van klei of keileem (of klei of keileemlaag van ten minste 2 m dik, gemeten haaks op het talud) mag direct de deelscore 'voldoet' worden gegeven. In deze situatie is er namelijk geen sprake van een grensvlak tussen de bekleding en dijk kern, waarlangs opbouw van waterspanningen kan optreden.
- **Stap 1.2 Zandscheg of zeer brede dijk** - In bijzondere gevallen is er sprake van een dijkopbouw waarbij zich opgesloten grondwater kan bevinden onder de bekleding. In deze gevallen moet een toets op maat worden uitgevoerd:
  - Als er sprake is van een zandscheg (insluiting van zand tussen de kleilaag van de bekleding en een oude kleikern). Als deze van onderen is afgesloten, maar van boven niet, kan hierin water worden opgesloten.
  - In het specifieke geval van een verholten kering of hoge grond is het grondlichaam waar de waterkering deel van uitmaakt zeer breed (> 150 m). Wanneer in dit specifieke geval een kleilaag onder de bekleding aanwezig is, dan kan er sprake zijn van een bijzonder hoge freatische lijn in het dijklichaam. Dit resulteert in een statische overdruk tegen de onderzijde van de kleilaag. Maatgevend is de breedte op een niveau van 2,5 m boven de gemiddelde buitenwaterstand, maar niet hoger dan Toetspeil+toeslagen.

- **Stap 1.3 Overlaging** - Als de PBA bekleding is toegepast als overlaging van een bestaande bekleding, dan moet de toetsing worden uitgevoerd met de specifieke aandachtspunten voor overlagingen (zie paragraaf 3.5).
- **Stap 1.4 Onderlaag van klei of keileem** - Indien geen sprake is van een bijzondere dijkopbouw, zoals hierboven beschreven, kan worden vervolgd met de toets. Er wordt onderscheid gemaakt tussen PBA bekledingen op een onderlaag van klei of keileem en bekledingen op zand;
- **Stap 1.5 Golfhoogte** - Indien uit stap 1.4 volgt dat er een klei- of leemlaag aanwezig is, en deze heeft een dikte groter dan de maatgevende golfhoogte, dan mag direct een score 'voldoet' aan de beoordeling op afschuiving worden gegeven.
- **Stap 2.1 Controle PBA op klei** - Als de PBA bekleding met filterlaag op een onderlaag van klei of keileem ligt, wordt de controle laagdikte PBA op klei toegepast (zie paragraaf 2.4.1).
- **Stap 2.2 Controle PBA op zand** - Als de PBA bekleding met filterlaag (bijv. geotextiel) direct op zand ligt, wordt de controle laagdikte PBA op zand toegepast (zie paragraaf 2.4.2).

Beide methoden voor controle op laagdikte zijn in de volgende paragrafen beschreven.



Figuur 12. Principe afschuiving PBA bekleding met filter op kleilaag

#### 2.4.1 CONTROLE LAAGDIKTE PBA OP KLEI

Als er een klei- of keileemlaag aanwezig is onder de bekleding, geschiedt de beoordeling op basis van de totale laagdikte op het zand van de dijk kern, namelijk de kleilaagdikte, de dikte van de filterlaag en de toplaag. Deze methode is ontleend aan (Bosters, 2008). De bekleding krijgt de deelscore 'voldoet' als de taludhelling niet steiler is dan 1:2,5 en de som van de laagdikten voldoet aan het onderstaande criterium. Hierbij moet voor de taludhelling de helling van de onderlaag worden aangehouden, waarlangs een schuifvlak kan ontstaan. Daarnaast moet rekening worden gehouden met de relatieve dichtheid per laag.

$$\frac{H_s}{(\Delta D)_{bekleding}} < 3 \cos \alpha$$

Met:

$$(\Delta D)_{bekleding} = \Delta_{PBA} d_{PBA} + \Delta_f d_f + \Delta_{klei} d_{klei}$$

Waarin:

$H_s$	=	significante golfhoogte	[m]
$\Delta_{PBA}$	=	relatieve dichtheid PBA ( $\approx 0,8$ )	[-]
$d_{PBA}$	=	laagdikte PBA	[m]



$\Delta_f$	=	relatieve dichtheid filterlaag	[-]
$b_f$	=	totale dikte filterlaag	[m]
$\Delta_{klei}$	=	relatieve dichtheid kleilaag	[-]
$b_{klei}$	=	dikte van de kleilaag onder de bekleding	[m]
$\alpha$	=	taludhelling	[°]

Indien niet aan het criterium wordt voldaan, moet een toets op maat worden uitgevoerd.

## 2.4.2 CONTROLE LAAGDIKTE PBA OP ZAND

Als de PBA bekleding met filterlaag (bijv. geotextiel) direct op zand ligt, kan de opbouw van waterspanningen onder de bekleding onder golfaanval aanleiding zijn voor afschuiving. Bovendien kan het verlies aan ondersteuning door verweking van het zand leiden tot mechanisch falen van de bekleding onder golfaanval. Onder afschuiving wordt hier zowel het mechanisme van afschuiven als verweking van het zand onder de bekleding verstaan.

De beoordelingsmethode is ontleend aan (Bosters, 2008). De controle op laagdikte bevat een toets op de volgende twee criteria:

- taludhelling niet steiler dan 1:2,5;
- de totale laagdikte voldoet aan:

$$\Delta d_{PBA} + b_f > \min \left\{ \frac{0,16 \cdot H_s^{0,2} \cdot T_p^{1,6} \cdot \tan(\alpha)^{0,8}}{1,5 \cdot H_s} \right\} - 1334 \cdot (1 - 1,19 \tan(\alpha)) \cdot D_{15} \cdot \sqrt{T_p}$$

Waarin:

$\Delta_{PBA}$	=	relatieve dichtheid PBA ( $\approx 0,8$ )	[-]
$d_{PBA}$	=	laagdikte PBA	[m]
$b_f$	=	dikte van de granulaire filterlaag (indien aanwezig)	[m]
$\alpha$	=	taludhelling van de onderlaag	[°]
$D_{15}$	=	korreldiameter van het zand onder de bekleding die door 15% van het materiaal wordt onderschreden	[m]

Het is de bedoeling om bij de berekening het minimum te gebruiken van de twee factoren tussen de accolades. Indien niet aan de criteria wordt voldaan, moet een toets op maat worden uitgevoerd.

### Toelichting optredende afschuiving

Bij dit mechanisme is het de repeterende golfklap die ervoor zorgt dat de waterspanningen onder de bekleding spronggewijs oplopen, tot het moment dat de korrelspanningen in het zand onder de bekleding zodanig zijn afgenomen, dat verweking en afschuiving plaatsvindt. Het verlies aan ondersteuning kan vervolgens leiden tot mechanisch falen van de bekleding.

Dat de opbouw van waterspanningen onder PBA bekledingen aanleiding kan zijn voor afschuiving is tot nu toe alleen nog waargenomen onder gecontroleerde omstandigheden in de golfgoot (Grosser Wellenkanal te Hannover). In het verleden zijn door GeoDelft theoretische modellen opgesteld die dit mechanisme beschrijven. Uit de modellen en de tests in de golfgoot volgt dat het dikker maken van de bekleding gunstig is voor de stabiliteit.

Uit de tests in de golfgoot volgt bovendien dat dit mechanisme voor PBA bekledingen op zand effectief kan worden bestreden door het toevoegen van een (ongebonden) granulaire filter- of uitvullaag tussen de toplaag en de zandkern.

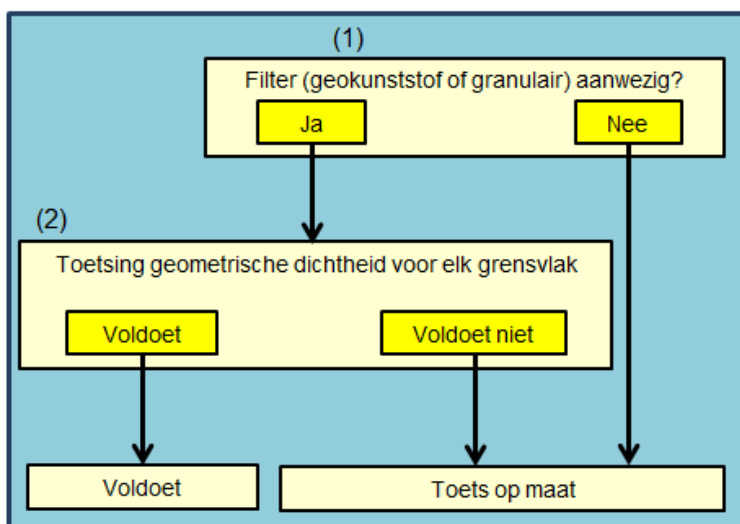
## 2.5 MATERIAALTRANSPORT VANUIT DE ONDERLAGEN PMT

Toetsing op materiaaltransport vanuit de onderlagen geschiedt op basis van de standaard filterregels voor geometrische dichtheid en moet voor elk grensvlak tussen toplaag en ondergrond afzonderlijk worden uitgevoerd. Bij een geometrisch-dichte laagovergang komt geen materiaaltransport voor omdat de afmetingen van het materiaal van de onderliggende laag groter zijn dan de openingen van de bovenliggende laag.

De drie typen grensvlakken, die moeten worden getoetst zijn:

- tussen PBA en granulair filter;
- tussen granulair filter en ondergrond;
- tussen geokunststof filter en ondergrond.

Het toetschema voor de eenvoudige toetsing is weergegeven in Figuur 13. Voor de filterregels per type overgang wordt verwezen naar het VTV2006 Kader 8 – 2.3 Toetsing geometrisch-dichtheid (eenvoudig).



Figuur 13. Toetschema materiaaltransport vanuit onderlagen PMO.

## 2.6 WATEROVERDRUK PWO

Vanwege het doorlatend karakter van de PBA bekleding, is het niet waarschijnlijk dat statische overdrukken leiden tot opdrukken van de bekleding. Op dit mechanisme kan zonder uitvoerige beschouwing direct de score 'voldoet' worden gegeven.

## 2.7 BEZWIJKEN VAN OVERGANGSCONSTRUCTIES POC

De eenvoudige toets op bezwijken van overgangsconstructies POC is gebaseerd op een kwalitatieve beoordeling. Onder overgangsconstructies worden verstaan:

- teenconstructies;
- aansluitingsconstructies op een onder- of bovenliggende bekleding;
- aansluitingen op starre constructies;
- interne aansluitingen tussen de (dag)producties van de PBA bekleding;
- beëindigingen of overgangen naar een grondlichaam.

De beoordeling van overgangsconstructies vormt in wezen een bijzonder onderdeel van de beoordeling op ernstige schade PES (zie paragraaf 2.1) en kan op dezelfde wijze worden uitgevoerd. Hierbij kan specifiek worden gelet op:

- verzakkingen van de constructie,
- materiaaltransport vanuit de onderlagen en/of
- slechte staat van de materialen van de constructie zelf;

De deelscore is 'voldoet' voor de beoordeling van overgangsconstructies POC indien aan de volgende voorwaarden wordt voldaan:

- Aan de overgangen is geen ernstige schade geconstateerd.
- De constructie heeft een aantal malen hydraulische belastingen ondergaan. Aangenomen mag worden dat een hydraulische belasting al is opgetreden als de constructie minimaal 5 jaar oud is en lager ligt dan GHW (bij zeedijken) of winterstreefpeil WP (bij meerdijken).
- Specifiek voor teenconstructies:
  - de bovenliggende bekleding is niet steiler dan 1:2;
  - er geen zodanige morfologische ontwikkeling van het voorland is dat de teen erdoor wordt bedreigd.

# 3

## Toetsing van overlagingen

### 3.1 TOETSSHEMA

De toetsing van overlagingen van bestaande bekledingen met PBA verloopt volgens dezelfde stappen als de toetsing van bekledingen (zie hoofdstuk 2). Voor enkele beoordelingssporen gelden echter specifieke aandachtspunten:

- Belasting toplaag door golfaanval PTG – rekenen met aangepaste stijfheid van de ondergrond en beoordeling op aanvullend mechanisme toplaagstabiliteit. Zie paragraaf 3.3;
- Afschuiving PAF – de laagdikten van de onderliggende bekleding mogen worden meegenomen in de beoordeling. Zie paragraaf 3.5.
- Materiaaltransport vanuit de onderlagen PMT – indien de onderliggende bekleding reeds voldoet op het mechanisme materiaaltransport, dan hoeft de overlaging zelf niet beoordeeld te worden. Zie paragraaf 3.6.
- Wateroverdrukken PWO – bij overlaging van gesloten bekledingen, moet rekening worden gehouden met het mechanisme opdrukken door statische overdruk.

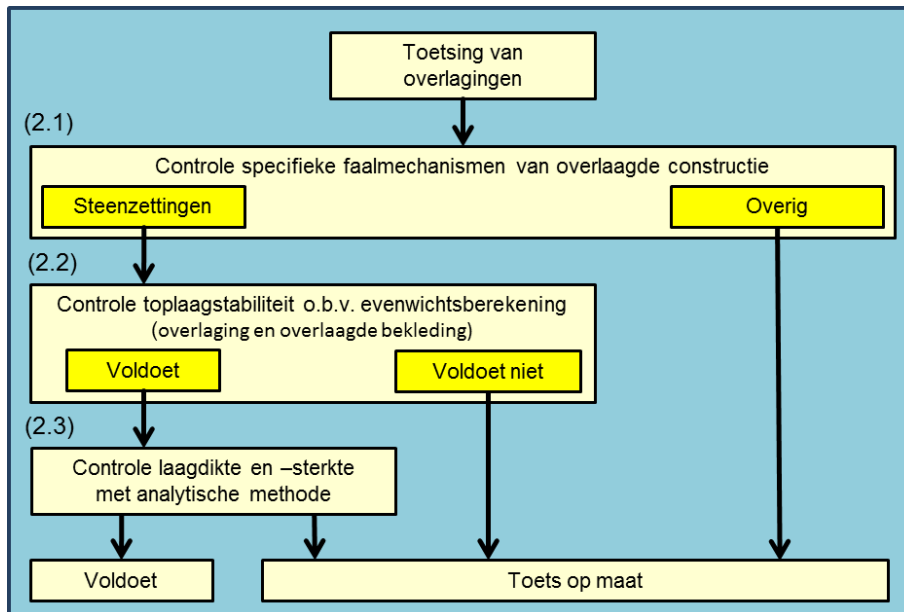
In dit hoofdstuk zijn de aandachtspunten per deelspoor beschreven.

### 3.2 BEOORDELING ERNSTIGE SCHADE PES

De beoordeling verloopt hetzelfde als bij de toetsing van bekledingen, zoals beschreven in paragraaf 2.1 (Beoordeling ernstige schade PES). Voor dit beoordelingsspoor zijn geen specifieke aandachtspunten ten aanzien van de toetsing van overlagingen.

### 3.3 BELASTING TOPLAAG DOOR GOLFAANVAL PTG

Bij de beoordeling van PBA overlagingen belast door golfaanval wordt de PBA laagdikte niet alleen gecontroleerd op overschrijding van de buigtreksterkte, maar ook de stabiliteit van het systeem van overlaging en overlaagde bekleding in zijn geheel. Het toetsschema voor de toetsing is weergegeven in Figuur 14.



Figuur 14. Toetsschema belasting door golfaanval PTG – overlagingen.

#### ***Overlaging van steenzettingen: controle laagdikte op toplaagstabiliteit***

Specifiek voor overlagingen op steenzettingen wordt de beoordeling van belasting door golfaanval uitgebreid met de beoordeling op toplaagstabiliteit van het systeem van overlaging en overlaagde bekleding. Voor deze beoordeling is het vereist dat reeds een toets/ontwerp berekening van de steenzetting in het programma Steentoets heeft plaatsgevonden, of alsnog wordt uitgevoerd.

De eenvoudige beoordeling vindt plaats op basis van een evenwichtsberekening. Hierbij wordt het diktetekort van de overlaagde steenzetting vergeleken met de dikte van de aangebrachte overlaging, rekening houdend met de relatieve dichtheden van beide materialen. Deze toetsmethode houdt geen rekening met het (gunstige) effect dat de overlaging heeft op de samenhang en daarmee de stabiliteit van de bekleding.

De beoordeling verloopt als volgt:

- Bereken de minimaal benodigde dikte van de zetsteen toplaag in Steentoets en vergelijk deze met de aanwezige dikte. Houdt hierbij rekening met een afname van de doorlatendheid van de toplaag als gevolg van de bedekking van stoot- en langsvogen of open ruimte tussen de blokken/zulen als gevolg van lijm en stenen van het te verwerken PBA. Hiervoor wordt een reductiefactor van 0,8 op de spleetbreedte of percentage open ruimte toegepast, oftewel een reductie naar 80% van de originele waarde (veilige waarde op basis van expert-judgement).
- Met de relatieve dichtheid van de zetsteen kan het dikte tekort worden omgerekend naar een 'relatief laagdiktetekort'.
- Controleer of de aangebrachte laagdikte van de PBA overlaging voldoende is om het tekort op te heffen.

Als voldoende gewicht is aangebracht om het diktetekort van de steenzetting te compenseren mag de deelscore 'voldoet' worden gegeven. In andere gevallen dient een toets op maat te worden uitgevoerd.

**Rekenvoorbeeld**

Op een dijk is een steenzetting getoetst met Steentoets. Hieruit volgt dat de huidige blokken, dik 0,18 m, niet voldoen op top laagstabiliteit onder golfaanval. De minimaal benodigde dikte bedraagt 0,27 m. Met een soortelijke massa van  $2.690 \text{ kg/m}^3$  en een relatieve dichtheid van  $\Delta_{\text{steen}} = (2.690 - 1.025) / 1.025 = 1,62$  is het diktetekort te vertalen naar een relatief laagdiktetekort van  $0,09 \times 1,62 = 0,15 \text{ m}$ . Dit is gecompenseerd door een PBA overlaging dik 0,20 m aan te brengen. De relatieve dichtheid van de PBA bedraagt vanwege het hoge open ruimte percentage (n) circa  $\Delta_{\text{PBA}} = (1 - 0,5) \times (2.700 - 1.025) / 1.025 = 0,8$ . De aangebrachte relatieve laagdikte is dan  $0,20 \times 0,8 = 0,16 \text{ m}$ .

Toetsing:

De Steentoets wordt nogmaals uitgevoerd, maar nu met een reductie van de spleetgrootte van 80% om het effect van de overlaging op de doorlatendheid mee te nemen. De spleetgrootte in stoot- en langsvog reduceert van 6,3 mm naar 5,0 mm. De minimaal benodigde dikte bedraagt na deze wijziging 0,29 m. Dit betekent dat het relatieve laagdiktetekort  $0,11 \times 1,62 = 0,18 \text{ m}$  bedraagt. Om dit massatekort te compenseren is een minimale PBA laagdikte van  $0,18 / 0,8 = 0,22 \text{ m}$  nodig. De aangebrachte PBA overlaging komt hier dus 0,02 m dikte tekort.

**Controle laagdikte op sterkte**

De beoordeling op sterkte verloopt in principe hetzelfde als bij toetsing van bekleding paragraaf 2.2. Er is hier echter sprake van een zeer stijve ondersteuning van de PBA overlaging door de onderliggende steenzetting en bijbehorende onderlagen. Hierdoor zal de overlaging niet of nauwelijks op buiging worden belast en kan vrijwel altijd direct de deelscore 'voldoet' worden toegekend. Dit moet echter wel in een berekening worden aangetoond.

Als de overlaging op een steenzetting ligt, kan een beddingsconstante gelijk aan die van het onderliggende filter worden aangehouden.

Een aandachtspunt bij overlaging van steenzettingen met polyurethaan gebonden breuksteen is het (mogelijk) optreden van spanningsconcentraties ter plaatse van de voegen tussen de zetstenen bij het indrukken en/of oplichten van de bekleding. Hierop wordt nader ingegaan in paragraaf 4.4.

**Rekenvoorbeeld**

Er is sprake van een PBA overlaging direct op een bestaande steenzetting. Dikte PBA overlaging 0,15 m, sortering 20/40 mm ( $D_{n50} = 22,5 \text{ mm}$ ). Steenzetting bestaat uit betonblokken dik 0,20 m op grindlaag dik 0,10 m op puin c.q. mijnsteen dik 0,60 m. Golfhoogte  $H_s = 1,5 \text{ m}$ , golfperiode  $T_{m-1,0} = 5 \text{ s}$ .

Toetsing:

De PBA laagdikte bedraagt meer dan  $6,5 \times D_{n50}$ , hiervoor wordt aangenomen  $\sigma_{\text{max}} = 0,62 \text{ MPa}$  en  $E = 3.000 \text{ MPa}$ . Voor de steenzetting als ondergrond wordt de beddingsconstante overgenomen van het onderliggende filter, in dit geval wordt deze geschat op  $c = 125 \text{ MPa/m}$ .

$$P_{\text{max}} = 1025 \times 9,81 \times 5,0 \times 1,5 \times 10^{-6} = 0,075 \text{ MPa}$$

$$\beta = ((3 \times 125 \times (1 - 0,35^2)) / (3.000 \times 0,15^3))^{1/4} = 2,39 \text{ m}^{-1}$$

$$\sigma = 0,075 / (4 \times 2,39^3 \times 0,75) \times (1 - e^{-(2,29 \times 0,75)}) \times (\cos(2,39 \times 0,75) + \sin(2,39 \times 0,75)) \times 6 / (0,15^2) = 0,43 \text{ MPa} < 0,62 \text{ MPa}$$

De optredende buigspanning ligt ruim onder de buigtreksterkte.

### 3.4 BELASTING TOPLAAG DOOR OVERSLAG PTO

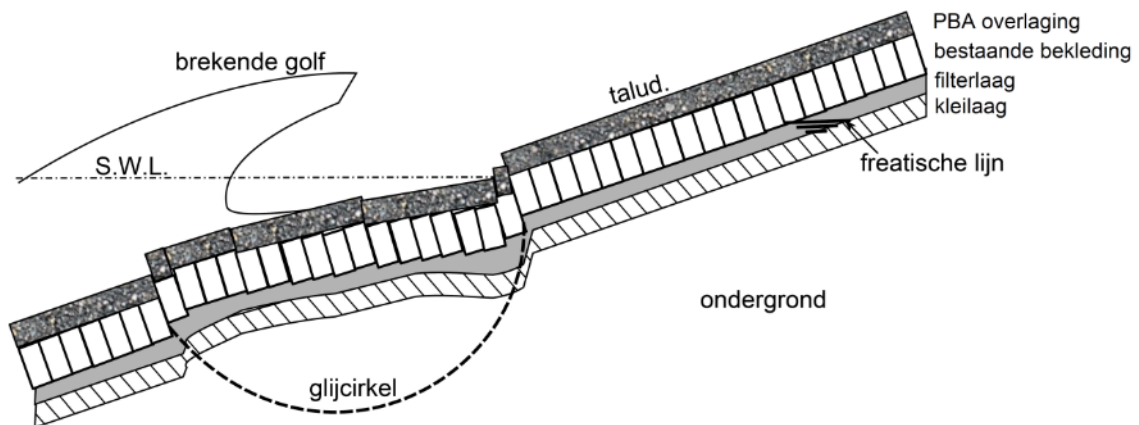
De beoordeling verloopt hetzelfde als bij de toetsing van bekledingen, zoals beschreven in paragraaf 2.3 (Belasting toplaag door overslag PTO). Voor dit beoordelingsspoor zijn geen specifieke aandachtspunten ten aanzien van de toetsing van overlagingen.

### 3.5 AFSCHUIVING PAF

De beoordeling verloopt in principe hetzelfde als bij de toetsing van de bekledingen die geen overlaging zijn, zoals beschreven in paragraaf 2.4 (Afschuiving PAF). Bij de beoordeling van overlagingen met PBA mogen echter ook de laagdikten van de steenzetting en bijbehorende onderlagen worden meegenomen in de beoordeling.

#### 3.5.1 CONTROLE LAAGDIKTE PBA-OVERLAGING OP KLEI

Als er een kleilaag aanwezig is onder de bekleding, geschiedt de beoordeling op basis van de totale laagdikte op het zand van de dijk kern, namelijk de kleilaagdikte, de dikte van de filterlagen, de zetsteen toplaag en de overlaging.



Figuur 15. Principe afschuiving PBA bekleding als overlaging.

De bekleding krijgt de deelscore 'voldoet' als de taludhelling niet steiler is dan 1:2,5 en de som van de laagdikten voldoet aan het criterium:

$$\frac{H_s}{0,8d + \Delta D + b_f + b_k} < 3 \cos \alpha$$

Waarin:

$H_s$	=	significante golfoogte	[m]
$\Delta$	=	relatieve soortelijke massa van de zetsteen	[-]
$D$	=	dikte van de zetsteen toplaag	[m]
$d$	=	dikte van de PBA overlaging	[m]
$b_f$	=	totale dikte van alle filter- en/of uitvullagen	[m]
$b_k$	=	dikte van de kleilaag onder de bekleding	[m]

$\alpha$  = taludhelling van de onderlaag [°]

### 3.5.2 CONTROLE LAAGDIKTE PBA-OVERLAGING OP ZAND

Analoog aan de hiervoor beschreven controle voor een PBA-overlaging op klei, verloopt de controle voor een PBA-overlaging op zand conform paragraaf 2.4.2, maar met de bijdrage van de zetsteen als parameter  $\Delta D$  toegevoegd aan het linkerlid van de formule.

### 3.6 MATERIAALTRANSPORT VANUIT DE ONDERLAGEN PMT

Is er sprake van een uitvullaag of (granulair) filter tussen de PBA overlaging en de steenzetting? Dan verloopt de beoordeling volgens paragraaf 2.5 (Materiaaltransport vanuit de onderlagen PMT). Is dit niet het geval, dan hoeft de overlaging zelf niet beoordeeld te worden, mits de onderliggende steenzetting eerder is getoetst en voldoet op de mechanismen Materiaaltransport vanuit de ondergrond ZMO en materiaaltransport vanuit de granulaire laag ZMG. Voor de beoordeling op deze mechanismen wordt verwezen naar de vigerende toetsmethode voor steenzettingen.

### 3.7 WATEROVERDRUK PWO

#### *Overlaging van open en doorlatende bekledingen: controle doorlatendheid*

Bij open bekledingen (zoals breuksteen en opensteenasfalt) of doorlatende bekledingen (zoals blokken, of zuilenbekledingen) zullen geen statische wateroverdrukken kunnen ontstaan, mits de doorlatendheid geborgd blijft. Dit houdt in dat bij een overlaging van open en doorlatende bekleding moet worden gecontroleerd of de opbouw van de overlaging zodanig is, dat de onderliggende bekleding niet waterdicht wordt afgesloten.

In de praktijk leidt een overlaging met PBA niet tot een waterdichte afsluiting van de onderliggende bekleding, onafhankelijk van de toegepaste laagdikte. Bij gebruik van de door de fabrikant voorgeschreven mengverhoudingen zal er niet of nauwelijks sprake zijn van overtollige, afdruipende lijm.

Het spreekt voor zich dat onder het PBA alleen doorlatende filterlagen bestaand uit granulair materiaal of een doorlatend geotextiel dienen te worden toegepast. Uit proeven bij applicatie op een geotextiel blijkt dat de ruimte tussen de stenen niet worden geblokkeerd (Figuur 16).





Figuur 16. Onderzijde proefstuk met PBA aangebracht op een geotextiel (bron: Gu, 2007).

#### ***Overlaging van gesloten bekledingen: statische wateroverdruk***

Speciale aandacht gaat uit bij overlaging van gesloten bekledingen op een ondergrond van zand of op een kleilaag van beperkte dikte, zoals:

- dichte asfaltbekledingen (zoals waterbouwasfaltbeton en vol-en-zat gepenetreerde breuksteen);
- gesloten betonnen bekleding.

Voor deze bekledingen kan de eenvoudige toetsing op wateroverdruk worden uitgevoerd zoals beschreven in het vigerende toetsinstrumentarium. De methode bestaat uit een vergelijking tussen de aanwezige laagdikte en de vereiste laagdikte, waarbij de vereiste laagdikte afhankelijk is van de dichtheid, de taludhelling en het niveauverschil tussen de maatgevende grondwaterstand en de onderste begrenzing van de gesloten bekleding.

Bij het bepalen van de vereiste laagdikte dient rekening te worden gehouden met de bijdragen van de individuele laagdikten en relatieve dichtheden van respectievelijk de overlaging zelf en de overlaagde bekleding.

### **3.8 BEZWIJKEN VAN OVERGANGSCONSTRUCTIES POC**

De beoordeling verloopt hetzelfde als bij de toetsing van bekledingen, zoals beschreven in paragraaf 2.7 (Bezwingen van overgangsconstructies POC). Voor dit beoordelingsspoor zijn geen specifieke aandachtspunten ten aanzien van de toetsing van overlagingen.

# 4

## Toets op maat en ontwikkelingen

### 4.1 ALGEMEEN

In voorliggend rapport is een methode gegeven voor de toetsing van polyurethaan gebonden breuksteen bekledingen en –overlagen. De methode is zodanig opgezet dat voor veelvoorkomende situaties een beoordeling kan worden uitgevoerd op eenvoudig dan wel gedetailleerd niveau. In een aantal situaties zal een toets op maat noodzakelijk zijn, bijvoorbeeld in het geval van een afwijkende bekledingsopbouw, of wanneer met de hier beschreven methode niet tot een oordeel ‘voldoet’ kan worden gekomen.

Voor de toets op maat zijn (nog) geen algemeen toepasbare beoordelingsmethoden beschikbaar. Dit hoofdstuk geeft enkele handreikingen voor toetsingen op maat, in relatie tot geavanceerde rekenmethoden en recente kennisontwikkeling. Omdat dit vrijwel altijd maatwerk betreft, zijn geen concrete toetsmethoden of werkwijzen voorgeschreven.

Aangezien innovaties per definitie een ontwikkeling doormaken, wordt het altijd aanbevolen te controleren of er nieuwe versies van (ontwerp)handleidingen zijn, nieuwe inzichten en/of navraag te doen bij de productleverancier.

### 4.2 HANDREIKING INNOVATIES WATERKERINGEN

In 2013 is door Deltares een handreiking (groene versie) opgesteld, waarin een algemene toetsmethode is beschreven voor de beoordeling van innovaties. Deze methode omvat drie toetsniveau's:

- De **eenvoudige toets** van innovaties bestaat uit een toets op basis van eerder uitgevoerde analyses. De beoordeling leunt sterk op documentatie van ontwikkeling van de innovatie, het ontwerp, de aanleg en beheer en onderhoud. Als de (ontwerp)documentatie gedegen is, wordt volstaan met een controle op gewijzigde inzichten, randvoorwaarden het waargenomen gedrag.
- De algemene toetsmethode voor innovaties kent geen **gedetailleerde toets**. Het ontwikkelen van een gedetailleerde toets voor een specifieke innovatie is een onderdeel van de ontwerpfase. Met voorliggend rapport ‘Toetsing van polyurethaan gebonden breuksteen bekledingen’ is een dergelijke toets voor deze specifieke innovatie beschreven.
- De **geavanceerde toets** is eigenlijk een toets op maat. Deze toets kan bestaan uit:
  - Het met terugwerkende kracht opstellen van de bij het ontwerp, uitvoering en monitoring behorende toetsdocumentatie, en/of;
  - Het uitvoeren van een berekening op basis van nieuwe inzichten, en/of;
  - Het bepalen of het ontwerp voldoet bij de vigerende randvoorwaarden, en/of;
  - Nader onderzoek van afwijkend gedrag en vaststelling of dit nog binnen de uiterste grenstoestand valt.

### 4.3 GEAVANCEERDE REKENMODELLEN

De in deze toetsmethode gepresenteerde rekenkundige controles van laagdikten onder golfaanval zijn alle gebaseerd op een analytisch model, waarin de bekledingslaag op de ondergrond is geschematiseerd als elastisch ondersteunde buigligger, met daarop werkend een driehoekvormige golfbelasting. Deze methode is gangbaar voor ontwerp en toetsing van o.a. asfaltdekkingsbekledingen en is vrij algemeen toepasbaar.

Voor een toets op maat voor meer specifieke situaties kan worden gedacht aan:

- Uitbreiding van de analytische methode naar een meerlagig systeem (samengestelde ligger) en/of aanpassing van oplegcondities (voor randverschijnselen);
- Modelleren van de constructie met de eindige elementen methode (EEM), zoals PLAXIS of ABAQUS. In ABAQUS is reeds eerder een model opgesteld voor overlagingen van steenbekledingen (Kruis, 2014).

Een toets op maat is in het algemeen arbeidsintensief en vereist een gedegen kennis van rekentechnieken en constructiemechanica.

### 4.4 AANDACHTSPUNTEN BIJ OVERLAGINGEN VAN STEENZETTINGEN

Een aandachtspunt bij overlaging van steenzettingen met polyurethaan gebonden breuksteen is het (mogelijk) optreden van spanningsconcentraties ter plaatse van de voegen tussen de zetstenen bij het indrukken en/of oplichten van de bekleding. Dit fenomeen is beschreven in de PBA design manual (Arcadis, 2013) en in (Deltares, 2014). Het gaat hier onder andere over de vraag welke eisen moeten worden gesteld aan de aanwezigheid van hechting tussen de PBA overlaging en de onderliggende zetsteen, en de daaruit vloeiende spanningsverdeling in het PBA. Hierover is op het moment van schrijven van de toetsmethode nog geen definitief uitsluitel.

#### Aandachtspunt toepassing geotextiel bij overlaging van steenzettingen

In paragraaf 4.5 van de PBA design manual (ARCADIS, 2013) wordt gesteld dat het ontstaan van hechting tussen de PBA overlaging en de zetsteenbekleding moet worden voorkomen, bijvoorbeeld door een geotextiel op het scheidingsvlak toe te passen. In het kader van deze toetsmethode wordt gebruik van een geotextiel echter afgeraden: Het risico op een ondoorlatend geotextiel wordt te groot geacht. Als het geotextiel in de loop der jaren dichtslaat, dan is het risico op bezwijken door overdrukken onder het geotextiel aanzienlijk. Feitelijk vormt de te overlagen steenzetting al een filterconstructie en is een filterdoek overbodig.

Voorgenoemd aandachtspunt zal worden behandeld in een nieuwe herziene versie van de PBA design manual (verschijningsdatum nog onbekend).

Voor de in dit rapport beschreven toetsmethode is bij de controle van laagdikte van overlagingen enkel uitgegaan van een evenwichtsbeschouwing. Hierbij wordt de opgebrachte massa van de overlaging getoetst aan het massatekort van de onderliggende bekleding. Deze methode houdt derhalve geen rekening met de toegevoegde stabiliteit door belastingopname in het PBA. Dit resulteert in een conservatieve beoordeling van de laagdikte, die onafhankelijk is van de hechting tussen het PBA en de onderliggende zetsteen.

Indien men wel gebruik wil maken van de toegevoegde stabiliteit door de wisselwerking tussen het PBA en de onderliggende bekleding, dan zal een toets op maat moeten plaatsvinden. Een uitgewerkte ontwerp- en toetsmethode hiervoor is momenteel nog niet beschikbaar.

# Referenties

- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen, september 2007
- A.K. de Looff, R. 't Hart, K. Montauban en M.F.C. van de Ven, 2006, GOLFKLAP a model to determine the impact of waves on dike structures with an asphaltic concrete layer, 2006.
- ARCADIS, 2013, Polyurethane bonded aggregate revetments design manual, BASF Polyurethanes GMBH, 073962493:C, 13 september 2013
- Bosters, 2008, Aanpassing toetsmethodiek Afschuiving bij steenzettingen, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, PZDT-R-08300, 1 september 2008
- Deltares, 2013, Handreiking Innovaties Waterkeringen – groene versie, Deltares, 1207086-000-GEO-0008, Versie 2, 28 mei 2013
- Deltares, 2014, Memo: Elastocoast als overlaging van steenzetting, Deltares, 1210374-000-HYE-0002, 13 augustus, 2014
- Gu, D., 2007, Hydraulic properties of PUR-revetments compared to those of open stone asphalt revetments. Technische Universiteit Delft, 2007
- Infram, 2008, Factual Report Golfoverslagproeven Zeeuwse zeedijken, Projectbureau Zeeweringen, 8 september 2008
- Kruis, 2014, Structural Analysis of Polyurethane Bonded Aggregate on Block Revetments, Technische Universiteit Delft, juli 2014
- STOWA, 2010, State of the art asfaltdijkbekledingen, rapport 2010 w06, Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, 2010
- TAW, 2002, Technisch Rapport Asfalt voor Waterkeren, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, november 2002
- KOAC-NPC, 2009, GOLFKLAP – gebruikershandleiding bij versie 1.3, Rijkswaterstaat Waterdienst, 10 april 2009.
- Oumeraci, Prof.Dr.-Ing. H., et. al., Hydraulic performance, Wave loading and response of Elastocoast revetments and their foundation – A large scale model study, LWI Report no. 988, Technische Universität Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, 8 januari 2010.

# Bijlage 1 Schadebeelden

Onderstaand overzicht van schadebeelden is overgenomen en vertaald uit Annex 6 van de *Polyurethane bonded aggregate revetments design manual*, BASF Polyurethanes GMBH, 073962493:C, 13 september 2013.

## *Tijdens en direct na de aanleg*

### *Verkleuring als gevolg van gebruik vochtige stenen*

Bij toepassing op natte stenen of met een te hoog vochtigheidsgehalte, vertoont de polyurethaancoating een troebele verkleuring (vaak lichter van kleur). De oorzaak hiervan is de vorming van kleine belletjes aan het scheidingsvlak tussen de steen en de coating, met als gevolg een zwakkere hechting.



Afbeelding 1. Links: optimale situatie. Rechts: typische verkleuring als gevolg van gebruik natte stenen in mengsel.

Hierbij moet worden opgemerkt dat ook een (overmatige) aanwezigheid van fijne fracties (stof) in het steenmengsel zorgt voor een lichte verkleuring. Dit verzwakt de hechting niet, maar heeft wel een hogere lijmconsumptie tot gevolg.

### *Stripping als gevolg van natte of vochtige stenen*

In ernstige gevallen van bovenstaande zal stripping optreden, het volledig loslaten van de PU coating van het steenoppervlak. De oorzaak hiervan is dat de PU-lijm niet hecht aan een nat oppervlak. De hechting tussen de stenen wordt hierdoor verzwakt.



Afbeelding 2. Bij stripping is er onvoldoende hechting van de PU-lijm aan een nat oppervlak, waardoor de lijmlaag loslaat van de steen.

### *Regen tijdens de uitvoering*

Wanneer het begint te regenen nadat de steenslag is vermengd met de PU-lijm, maar geen uitharding heeft plaatsgevonden, dan kunnen regendruppels kleine putjes in het oppervlak van de coating veroorzaken. Dit heeft geen gevolgen voor de sterkte van de binding tussen de stenen.



Afbeelding 3. Regen kort na aanbrengen van de PBA-bekleding kan het oppervlak aantasten, maar resulteert niet in een verzwakking van de structuur.

### *Hydrofoob gedrag*

De PU-lijm gedraagt zich hydrofoob. Met name bij harde steensoorten zoals graniet, kan een nat steenoppervlak leiden tot onderstaand beeld. Hier is geen sprake meer van een functionerende coating of hechting.



Afbeelding 4. Extreem geval van hydrofoob gedrag.

### *Gedurende de levensduur van de bekleding*

#### *Microschade*

Individuele stenen of zwakkere verbindingen kunnen breken als gevolg van belastingen door golfaanval of andere belastingen zoals verkeer, botsingen met drijvende objecten of vandalisme. Dit is geen probleem, zolang er geen sprake is van veel schade binnen een klein gebied. Dit laatste geval kan duiden op een lokaal ontoelaatbaar zware belasting met mogelijk ook schade onder het oppervlak.



Afbeelding 5. Breuk van steen.



Afbeelding 6. Breuk ter plaatse van hechtingspunten tussen stenen.

### *Aantasting van het oppervlak*

Als gevolg van de erosieve krachten van water en meegevoerd zand en ander materiaal kan het oppervlak van de coating slijten, waardoor de onderliggende steen bloot komt te liggen. Dit is oppervlakkige schade en zal de sterkte van de bekleding niet aantasten zolang er geen sprake is van een laagdiktereductie.



Abbeelding 7. Oppervlakkige slijtage van coating.

### *Dichtslibben*

Afhankelijk van de hoeveelheid slib in het water en de locatie, oriëntatie en taludhelling van de bekleding, kan fijner materiaal worden afgezet in de open ruimten van de bekleding. Dit heeft een negatieve invloed op de doorlatendheid en golfremmende eigenschappen van de bekleding.



Abbeelding 8. Ophoping van materiaal tussen de stenen.



### Schade tijdens extreme condities

#### Breuk

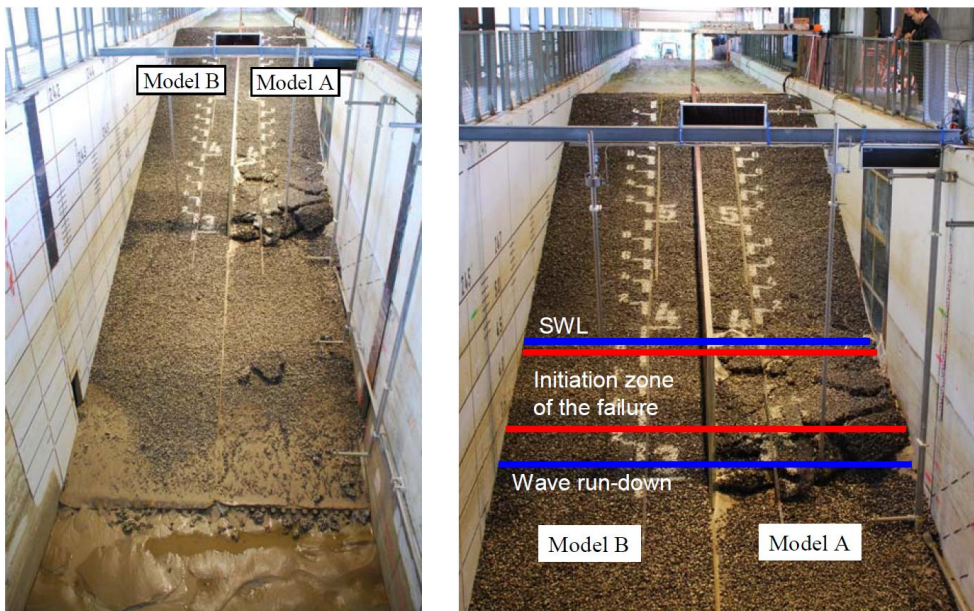
Breuk van de bekleding treedt op wanneer de optredende (buig)spanningen groter zijn dan de sterkte van het materiaal, bijvoorbeeld door zware golfaanval. Breuk kan resulteren in grote openingen in de bekleding en het wegslaan van delen ervan, waardoor de onderlaag bloot komt te liggen. Bij reparatie moet worden opgelet of de onderliggende filterlaag nog functioneert.



Afbeelding 9. Breuk van de toplaag.

#### Afschuiving/verweking

Afschuiving/verweking vindt plaats in het grondlichaam direct onder de bekleding. Afschuivende of verweekte grondlagen kunnen resulteren in het wegvallen van de ondersteuning of de bekleding zelfs lokaal opdrukken, waardoor breuk optreedt. Dit soort schade vindt plaats net onder de waterlijn.



(a) Overall view

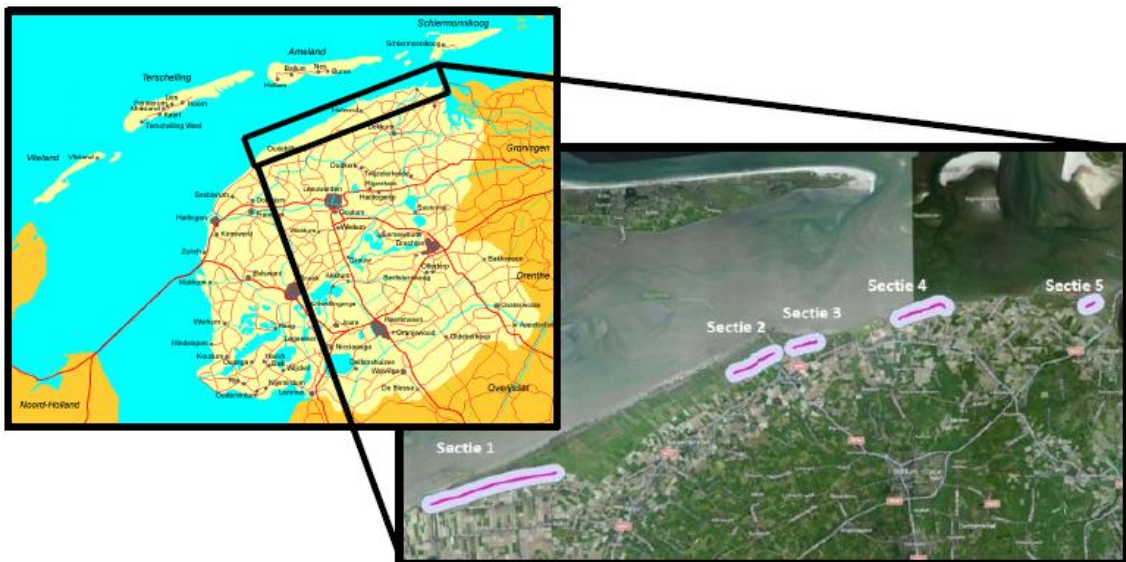
(b) Detailed view

Afbeelding 10. Breuk en afschuiving van de toplaag.

## Bijlage 2 Case Waddenzeedijk

### Inleiding

Hoewel de dijken in Friesland sterk zijn, voldoen onderdelen ervan niet aan de huidige wettelijk gestelde veiligheidseisen. Om de veiligheid weer op niveau te brengen neemt Wetterskip Fryslân maatregelen om de steenbekleding te versterken.



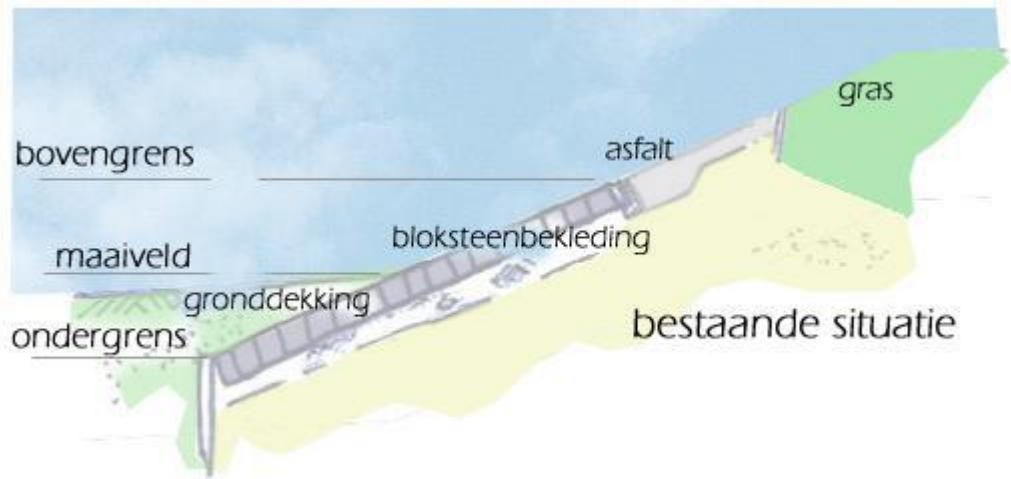
Voor de afzonderlijke versterkingssecties is een afweging op basis van milieueffecten, uitvoerbaarheid en uitvoeringskosten van verschillende oplossingsrichtingen uitgevoerd, ter bepaling van het voorkeursalternatief (VKA). Voor de versterking van de Waddenzeedijk Friese kust worden de volgende oplossingen van het VKA toegepast:

- Bestorting van losse breuksteen (Sectie 1B);
- Overlaging met polyurethaan gebonden breuksteen (Elastocoast) met aanvulling van grond in de dijkteen (Secties 1A en 2) of met dijkteen van breuksteen (Secties 3 en 4).

De toetsing op veiligheid van de overlaging met polyurethaan gebonden breuksteen is hieronder uitgewerkt als case. Ten tijde van de uitwerking van deze case is de versterking nog niet uitgevoerd. Het betreft dus een theoretische situatie op basis van het huidige ontwerp.

### Beschrijving bestaande bloksteenbekleding

De huidige bloksteenbekleding ligt laag op het buitentalud en sluit in de dijkteen aan op het nagenoeg overall aanwezige voorland (alleen sectie 4 heeft geen voorland). In de teen is een deel van de blokken afgedekt met een grond- of sliblaag. Bij het aanbrengen van de overlaging met grond, de Elastocoast scheg en de aansluiting van het waterbouwasfalt op aangrenzend asfalt dijkbekleding (sectie 1A, 2 en 3) blijft het bestaande voorland grotendeels liggen.

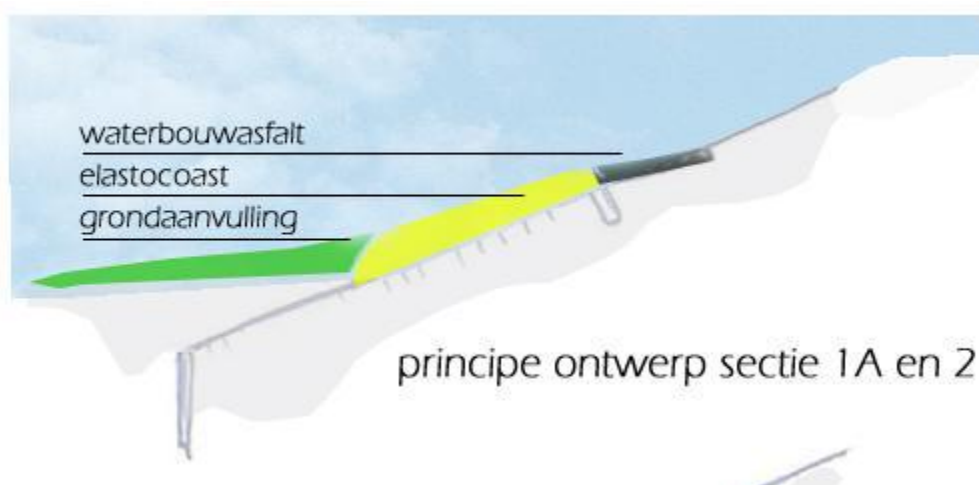


Sectie		Ondergrens [m tov NAP]	Bovengrens [m tov NAP]	Maaiveld [m tov NAP]	Helling [1 : n]
1A	Zwarte Haan	+ 1.10	+ 2.50	+ 1.60	3
1B	Zwarte Haan	+ 2.05	+ 2.40	-	10
2	Holwerd / Veerdam West	+ 1.20	+ 2.50	+ 1.80	3
3	Spaarndam-Teyebuorren	+ 0.50	+ 2.60	+ 1.20	3
4	Wierum	+ 0.00	+ 2.50	+ 1.40	3

#### Beschrijving PBA bekleding

De huidige blokkenbekleding wordt gehandhaafd. Vanwege het ontbreken van stabiel voorland wordt binnen de secties 3 en 4 een ophoging van het voorland of een teenbescherming bestaande uit losse breuksteen toegepast in plaats van de grondophoging.

Met een overlaging kan het gewichtstekort van de afgekeurde steenbekleding worden gecompenseerd. Dit tekort varieert van orde 25 tot 250 kg/m<sup>2</sup>, afhankelijk van de beschouwde sectie. Een dunne overlaging met Elastocoast volstaat om dit tekort op te heffen. De PBA overlaging is aangebracht met een toenemende laagdikte van boven naar beneden. Aan de bovenzijde bedraagt de laagdikte minimaal 0,15 m.



**Beoordelingssporen**

De beoordeling start met het bepalen van de locatie van de bekleding in de belastingzones. Voor de waddenzeedijk gelden de volgende waterstanden:

- MHW = NAP +5,21 m                       $H_s = 1,93\text{m}$                        $T_{m-1,0} = 7,7\text{s}$                        $T_p = 12,1\text{s}$
- GHW = NAP +0,95 m
- GLW = NAP -0,95 m

De bovengrens van de PBA overlaging ligt op een niveau van maximaal NAP+2,60 m en ligt daarmee ruim onder het MHW-niveau. De ondergrens van de overlaging ligt minimaal op een niveau van NAP+0,00 m, onder het GWH-niveau. Onder de aanname dat de maatgevende grondwaterstand (MGW) hier gelijk is aan GHW, valt de volledige bekleding binnen de Golfklapzone, en het onderste deel in de Wateroverdrukzone. Dit betekent dat op alle beoordelingssporen moet worden getoetst:

- Beoordeling ernstige schade PES;
- Belasting toplaag door golfaanval PTG;
- Belasting toplaag door overslag PTO;
- Afschuiving PAF;
- Materiaaltransport vanuit de onderlagen PMT;
- Wateroverdruk PWO;
- Bezwijken van overgangsconstructies POC.

**Beoordeling ernstige schade PES**

Stap 1.1 De PBA bekleding is recent aangelegd en gedraagt zich goed → Ja, vervolg met stap 2.1;

Stap 2.1 Uit visuele inspectie volgt dat er (nog) geen ernstige schade heeft plaatsgevonden → Nee, vervolg met stap 2.2;

Stap 2.2 Er zijn geen holten onder de bekleding aanwezig → Nee, vervolg met stap 2.3;

Stap 2.3 Er is geen sprake van houtvormende begroeiing → Nee, **deelscore 'voldoet'**.

**Belasting toplaag door golfaanval PTG**

Stap 1.1 De PBA bekleding is direct op de bestaande bloksteenbekleding aangebracht en ligt dus niet direct op een zand- of kleikern → Nee, vervolg met stap 1.2;

Stap 1.2 Er is geen filterlaag aanwezig direct onder de PBA bekleding → Nee, vervolg met stap 1.3;

Stap 1.3 De bekleding is toegepast als overlaging van een bestaande bloksteenbekleding → Ja, vervolg met toetsing van overlagingen;

Stap 2a Controle laagdikte:

De PBA overlaging is aangebracht op een 1:3 talud met een minimale laagdikte van 0,15 m. Er is gekozen voor een sortering 20/40 mm met  $D_{n50} = 22,5$  mm. In sectie 1 en 2 ligt de onderliggende bloksteenstelling op een filterlaag van grind, met daaronder een geotextiel en kleilaag. In sectie 3 en 4 ligt de bloksteenstelling op een ondergrond van grind, mijnsteen, geotextiel en een zandkern.

Bij Toetspeil+toeslagen bedraagt de maximale golfhoogte  $H_s = 1,93$  m met golfperiode  $T_{m-1,0} = 7,7$  s.

$$\xi_{0m} = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot H_s}{g \cdot T_{m-1,0}^2}}} = 2,31$$

$$\text{Toetspeil} - 0,6 \cdot H_s \cdot \xi_{0m} = \text{NAP} + 2,54 \text{ m}$$

De bovenkant van de PBA overlaging ligt maximaal op circa NAP +2,75m, nabij de grens van  $0,6 \cdot H_s \cdot \xi_{om}$  diepte onder Toetspeil. Voor een veilige benadering worden bij de toetsing daarom de golfrandvoorwaarden bij Toetspeil+toeslagen gehanteerd.

De minimale PBA laagdikte bedraagt meer dan  $6,5 \cdot D_{n50}$ , hiervoor wordt aangenomen  $\sigma_{max} = 0,62$  MPa en  $E = 3.000$  MPa. Voor de steenzetting als ondergrond wordt de beddingsconstante overgenomen van het onderliggende filter, in dit geval wordt deze geschat op  $c = 125$  MPa/m.

Uit de analytische formules uit paragraaf 0 voor de controle van de laagdikte volgt:

$$P_{max} = 1025 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 5,0 \cdot 1,93m = 9,70 \cdot 10^4 Pa$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot 125 \cdot 10^6 Pa/m \cdot (1 - 0,35^2)}{3000 \cdot 10^6 Pa \cdot (0,15m)^3}} = 2,39 \frac{1}{m}$$

$$z = 0,5 \cdot 1,93m = 0,965m$$

$$\sigma = \frac{9,70 \cdot 10^4 Pa}{4 \cdot \left(2,39 \frac{1}{m}\right)^3 \cdot 0,965m} \left[1 - e^{\left(-2,39 \frac{1}{m} \cdot 0,965m\right)} \left(\cos\left(2,39 \frac{1}{m} \cdot 0,965m\right) + \sin\left(2,39 \frac{1}{m} \cdot 0,965m\right)\right)\right] \cdot \frac{6}{(0,15m)^2}$$

$$= 4,87 \cdot 10^5 Pa = 0,487 MPa$$

De optredende buigtrekspanningen à 0,487 MPa blijven ruim onder de toelaatbare spanningen à 0,62 MPa. Hieruit volgt een **deelscore 'voldoet'**.

#### Stap 2c Controle top laagstabiliteit o.b.v. laagdikte

De bloksteenzetting is getoetst met Steentoets. Hieruit volgt dat de huidige blokken niet voldoen op top laagstabiliteit onder golfaanval. Het maximale laagdiktekort bedraagt 0,09 m. Met een soortelijke massa van  $2690 \text{ kg/m}^3$  is het diktekort te vertalen naar een massatekort van  $0,09 \cdot 2690 = 242 \text{ kg/m}^2$ . Dit is gecompenseerd door een PBA overlaging dik 0,20 m aan te brengen. De bulk massa van de PBA is vanwege het hoge open ruimte percentage (n) circa  $n \cdot \rho_{steen} = 0,5 \cdot 2700 = 1350 \text{ kg/m}^3$ . De aangebrachte massa is dan  $0,20 \cdot 1350 = 270 \text{ kg/m}^2$ .

Voor de controle op top laagstabiliteit wordt Steentoets nogmaals uitgevoerd, maar nu met een reductie van de spleetgrootte van 80% om het effect van de overlaging op de doorlatendheid mee te nemen. Per sectie resulteert dit in:

- Sectie 1A; reductie spleetbreedte 2,6 mm → 2,08 mm; toename laagdiktekort 0,03 m → 0,07 m
- Sectie 2; reductie spleetbreedte 2,4 mm → 1,92 mm; toename laagdiktekort 0,03 m → 0,05 m
- Sectie 3; reductie spleetbreedte 4,8 mm → 3,84 mm; toename laagdiktekort 0,01 m → 0,01 m
- Sectie 4; reductie spleetbreedte 8,1 mm → 6,48 mm; toename laagdiktekort 0,09 m → 0,09 m

Het is duidelijk te zien dat de reductie in spleetbreedte alleen bij relatief kleine spleetbreedten effect heeft. Het maximale laagdiktekort blijft 0,09 m. De aangebrachte massa voldoet dus → **deelscore 'voldoet'**.

**Belasting toplaag door overslag PTO**

Stap 1 De bekleding ligt niet in de golfoploopzone → Nee, vervolg met stap 2.2;

Stap 2.2 Voor de dijk is een breed voorland aanwezig, er is hier geen sprake van een bocht of stroomgeul, waarin grote stroomsnelheden optreden. Daarom kan worden aangenomen dat de gemiddelde stroomsnelheid minder dan 5 m/s bedraagt → Ja, vervolg met stap 2.3;

Stap 2.3 De laagdikte bedraagt minimaal 0,15 m → Ja, **deelscore 'voldoet'**.

**Afschuiving PAF**

Binnen de beschouwde secties van de Waddenzeedijk zijn verschillende opbouwen van de zetsteenbekleding te onderscheiden:

- Sectie 1 en 2: 0,20 m betonblok | 0,10 m grind | geotextiel | klei
- Sectie 3 en 4 (gedeeltelijk): 0,20 m koperslak | 0,10 m grind | 0,80 m mijnsteen | geotextiel | zandkern
- Sectie 4 (gedeeltelijk): 0,20 m koperslak | 0,10 m grind | geotextiel | klei

In Secties 1, 2 en een deel van 4 is onder de bestaande bekleding een kleilaag aanwezig. In Sectie 3 en een deel van Sectie 4 is geen of slechts gedeeltelijk een kleilaag aanwezig. Dit betekent dat zowel de eenvoudige controle op de laagdikte (met kleilaag) als de gedetailleerde controle moet worden uitgevoerd.

**Afschuiving PAF Secties 1 en 2:**

Stap 1.1 De PBA bekleding is direct op de bestaande bloksteenbekleding aangebracht en ligt dus niet direct op een kleikern of kleilaag → Nee, vervolg met stap 1.2;

Stap 1.2 Er is geen sprake van een zandscheg of brede dijk → Nee, vervolg met stap 1.3;

Stap 1.3 De bekleding is toegepast als overlaging van een bestaande bloksteenbekleding → Ja, vervolg met toetsing van overlagingen;

Stap 1.4a Onder de huidige bloksteenbekleding is een kleilaag aanwezig.

→ Ja, vervolg met stap 2a;

**Stap 2a** Eenvoudige controle laagdikte

- De taludhelling bedraagt 1:3 en is dus niet steiler dan 1:2,5.
- De dikte van de PBA overlaging bedraagt minimaal 0,15 m. De bloksteenbekleding heeft een dikte van 0,20 m, met een soortelijke massa van minimaal 2400 kg/m<sup>3</sup> ( $\Delta = 1,34$ ). De filterlaag onder de blokken heeft een dikte van 0,10 m. Daaronder is minimaal 1 m klei aanwezig.

De som van de laagdikten moet voldoen aan het criterium:

$$\frac{1,93m}{0,8 \cdot 0,15m + 1,34 \cdot 0,20m + 0,10m + 1m} = 1,30$$

$$3 \cdot \cos(18,4^\circ) = 2,85$$

Er wordt voldaan aan het criterium van de eenvoudige controle:  $1,30 < 2,85$  → **deelscore 'voldoet'**.

**Afschuiving PAF Secties 3 en 4:**

Stap 1.1 De PBA bekleding is direct op de bestaande bloksteenbekleding aangebracht en ligt dus niet direct op een kleikern of kleilaag → Nee, vervolg met stap 1.2;

Stap 1.2 Er is geen sprake van een zandscheg of brede dijk → Nee, vervolg met stap 1.3;

Stap 1.3 De bekleding is toegepast als overlaging van een bestaande bloksteenbekleding → Ja, vervolg met toetsing van overlagingen;

Stap 1.4a Onder de huidige bloksteenbekleding is géén kleilaag aanwezig → Nee, vervolg met stap 2b;

Stap 2b Gedetailleerde controle laagdikte

- Taludhelling flauwer dan 1:2,7
- De dikte van de PBA overlaging bedraagt minimaal 0,15 m. De bloksteenbekleding heeft een dikte van 0,20 m, met een soortelijke massa van 2690 kg/m<sup>3</sup> ( $\Delta = 1,62$ ). De filterlaag onder de blokken heeft een dikte van 0,10 m. Daaronder is een laag mijnsteen dik 0,80 m aanwezig met daaronder een nylondoek en zandkern.

De som van de laagdikten moet voldoen aan het criterium:

$$0,8d + b_f + b_k > \min \left\{ \frac{0,16 \cdot H_s^{0,2} \cdot T_p^{1,6} \cdot \tan(\alpha)^{0,8}}{1,5 \cdot H_s} \right\} - 1334 \cdot (1 - 1,19 \tan(\alpha)) \cdot D_{15} \cdot \sqrt{T_p}$$

Waarin:

$$0,8 \cdot 0,15m + 1,62 \cdot 0,20m + 0,90m + 0m = 1,34$$

$$\min \left\{ \frac{0,16 \cdot (1,93m)^{0,2} \cdot (12,1s)^{1,6} \cdot \tan(18,4^\circ)^{0,8}}{1,5 \cdot (1,93m)} = 4,09 \right\} = 2,90$$

$$2,90 - 1334 \cdot (1 - 1,19 \tan(18,4^\circ)) \cdot (120 \cdot 10^{-6}m) \cdot \sqrt{12,1s} = 2,56$$

Er wordt niet voldaan aan het criterium van de gedetailleerde controle:  $1,34 < 2,56 \rightarrow$  **deelscore** **'voldoet niet'**.

#### **Toets op maat Afschuiving PAF**

Uit de gedetailleerde controle van de laagdikte voor het mechanisme Afschuiving PAF volgt de deelscore **'voldoet niet'**. Dit betekent dat een toets op maat moet worden uitgevoerd om tot een eindscore te komen.

Hierbij wordt het volgende opgemerkt:

- De hier gevolgde rekenregel, afkomstig uit het VTV2006, is conservatief. Het is daarom niet mogelijk om in de toetsing op basis van deze regel tot een eindoordeel 'voldoet niet' te komen.
- Een eerste stap in de toets op maat is daarom een nadere beschouwing van de gebruikte hydraulische randvoorwaarden in de gedetailleerde methode voor afschuiving.

Bij invoer van de dwarsdoorsnede met bijbehorende eigenschappen in steentoets, volgt een maatgevende waterstand van NAP+3,36m voor het criterium afschuiving. De bijbehorende golfhoogte en piekperiode bedragen  $H_s = 1,03m$  en  $T_p = 6,42s$ . Wanneer de nauwkeuriger bepaalde hydraulische randvoorwaarden worden toegepast in de gedetailleerde methode voor afschuiving volgt:

$$0,8 \cdot 0,15m + 1,62 \cdot 0,20m + 0,90m + 0m = 1,34$$

$$\min \left\{ \frac{0,16 \cdot (1,03m)^{0,2} \cdot (6,42s)^{1,6} \cdot \tan(18,4^\circ)^{0,8}}{1,5 \cdot (1,03m)} = 1,31 \right\} = 1,31$$

$$1,31 - 1334 \cdot (1 - 1,19 \tan(18,4^\circ)) \cdot (120 \cdot 10^{-6}m) \cdot \sqrt{6,42s} = 1,06$$

Er wordt nu wel voldaan aan het criterium voor afschuiving:  $1,34 > 1,06 \rightarrow$  **deelscore** **'voldoet'**.

***Materiaaltransport vanuit de onderlagen PMT***

De bloksteenetting is getoetst met Steentoets. Hieruit volgt dat de huidige blokken voldoen op de mechanismen Materiaaltransport vanuit de ondergrond ZMO en materiaaltransport vanuit de granulaire laag ZMG. De PBA overlaging is direct op de blokken aangebracht (zonder granulaire tussenlaag). Er mag dus vanuit worden gegaan dat de gehele constructie voldoet op het beoordelingsspoor materiaaltransport vanuit de onderlagen PMT → **deelscore 'voldoet'**.

***Bezwijken overgangsconstructies POC***

Aan de bovenzijde sluit de PBA overlaging aan op een asfaltbekleding. Het hoogteverschil tussen deze twee bekledingen wordt opgevuld met waterbouwasfaltbeton, waarbij eerst een sleuf in de bestaande asfaltbekleding is gefreesd.

Aan de onderzijde sluit de PBA overlaging aan op een grondaanvulling (Sectie 1A en 2) of losse breuksteen (Sectie 3 en 4). Onder maaiveld is een teenconstructie aanwezig van de huidige bloksteenbekleding.

- De overgangen zijn robuust uitgevoerd en worden regelmatig geïnspecteerd op schade en/of verzakkingen. Schade is (nog) niet geconstateerd.
- De constructie ondergaat regelmatig hydraulische belastingen bij hoogwater.
- De bovenliggende bekleding is niet steiler dan 1:2.

Op basis van bovenstaande geldt de **deelscore 'voldoet'**.

***Conclusie toetsing op veiligheid***

Deelscores per beoordelingsspoor:

- Beoordeling ernstige schade PES → deelscore 'voldoet'
- Belasting toplaag door golfaanval PTG → deelscore 'voldoet'
- Belasting toplaag door overslag PTO → deelscore 'voldoet'
- Afschuiving PAF → deelscore 'voldoet'
- Materiaaltransport vanuit de onderlagen PMT → deelscore 'voldoet'
- Wateroverdruk PWO → deelscore 'voldoet'
- Bezwijken van overgangsconstructies POC → deelscore 'voldoet'

Eindscore voor polyurethaan gebonden breuksteen bekleding: 'voldoet'.



# Colofon

## TOETSING VAN POLYURETHAAN GEBONDEN BREUKSTEEN BEKLEDINGEN

### **OPDRACHTGEVER:**

Wetterskip Fryslân

### **STATUS:**

Definitief

### **AUTEUR:**

ir. E. Bijlsma

ir. M. Klein Breteler – Deltares (ondersteuning bij opzet toetsmethode)

### **GECONTROLEERD DOOR:**

Ing. N.J. Betten

### **VRIJGEGEVEN DOOR:**

Ing. N.J. Betten

5 oktober 2015

077963042:E

ARCADIS NEDERLAND BV

La Guardiaweg 36-66

Postbus 56825

1040 AV Amsterdam

Tel 088 4 261 261

[www.arcadis.nl](http://www.arcadis.nl)

Handelsregister 09036504

©ARCADIS. Alle rechten voorbehouden. Behoudens uitzonderingen door de wet gesteld, mag zonder schriftelijke toestemming van de rechthebbenden niets uit dit document worden verveelvoudigd en/of openbaar worden gemaakt door middel van druk, fotokopie, digitale reproductie of anderszins.