

## **Open steenasfalt in de golfoploopzone**

**Verkenning belastingen en sterkte**





# **Open steenasfalt in de golfoploopzone**

**Verkenning belastingen en sterkte**

Robert 't Hart

1209832-015



**Titel**

Open steenasfalt in de golfoploopzone

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
RWS-WVL	1209832-015	1209832-015-HYE-0002	25

**Trefwoorden**

Open steenasfalt, OSA, golfoploop, stroomsnelheid

**Samenvatting**

Open steenasfalt (OSA) wordt toegepast in de golfoploopzone van dijken die door hoge golven worden belast. In de golfoploopzone wordt het materiaal belast door stromend water wat slijterosie kan veroorzaken.

De literatuur geeft wel aan welke stroomsnelheden in de oploopzone op kunnen treden, maar niet welke krachten en spanningen dit in het OSA veroorzaakt.

De stroombestendigheid van verschillende nieuwe open steenasfaltmengsels is in verschillende proeven bepaald. Over de ontwikkeling van de stroombestendigheid gedurende de levensduur van de bekleding is echter niets bekend. Het ontbreken van een sterkte-levensduurmodel is de ontbrekende schakel om te komen tot een betrouwbare rekenregel waarop toets- en ontwerpmethoden voor OSA-bekledingen kunnen worden gebaseerd.

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
C	nov. 2014	R `t Hart		M. Klein Breteler		L. Voogt	
1	mrt. 2015	R `t Hart		M. Klein Breteler		L. Voogt	

**Status**

definitief



## Inhoud

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2 Stroomsnelheden op dijktafuds</b>	<b>3</b>
2.1 Stroomsnelheden op het buitentalud	3
2.2 Stroomsnelheden op het binnentalud	5
<b>3 Metingen stroombestendigheid OSA</b>	<b>7</b>
3.1 Slijtage Onderzoek Steenasfalt	7
3.2 Fixtone®, 1983	9
3.3 Lange duur onderzoek goot te Lith 1984	10
3.4 Overslagproef OSA Kattendijke 2008	10
<b>4 Kwaliteit OSA</b>	<b>13</b>
4.1 Algemeen	13
4.2 Levensduurmodel open steenasfalt	13
4.3 Praktijkervaringen	14
<b>5 Aanzet ontwerp- en monitoringsmethode OSA in golfoploopzone</b>	<b>17</b>
<b>6 Conclusies</b>	<b>21</b>
<b>Bijlage(n)</b>	
<b>Symbolenlijst</b>	<b>ii</b>
<b>Literatuur</b>	<b>23</b>

## Symbolenlijst

Symbol	Omschrijving	Eenheid
$f$	invloedsfactor wrijving binnentalud	[-]
$g$	versnelling zwaartekracht	[m/s <sup>2</sup> ]
$h_k$	hoogte kruin boven de stilwaterlijn	[m]
$h_0$	laagdikte van de overslag op de binnenkruinlijn	[m]
$H_i$	hoogte inkomende golven (regelmatige golven)	[m]
$H_s$	significante golfhoogte bij de teen van de dijk	[m]
$H_{max}$	maximale golfhoogte	[m]
$P_V$	kans op overschrijden van volume $V$	[-]
$P_{ov}$	kans op overslag per golf	[-]
$T_m$	gemiddelde golfperiode	[s]
$T_p$	golfperiode (regelmatige golven)	[s]
$q$	tijdsgemiddelde golfoverslagdebiet	[m <sup>3</sup> /s/m <sup>1</sup> ]
$s_{0p}$	golfsteilheid	[-]
$u_{A,2\%}$	stroomsnelheid in het punt A op het buitentalud die door 2% van de oplopen wordt overschreden	[m/s]
$u_{bi}$	stroomsnelheid op het binnentalud	[m/s]
$u_{biV}$	stroomsnelheid op het binnentalud ten gevolge van een overslag $V$	[m/s]
$u_0$	stroomsnelheid van de overslag op de binnenkruinlijn	[m/s]
$V$	volume van een overslag	[m <sup>3</sup> /m <sup>1</sup> ]
$z_A$	niveau van punt A op het buitentalud, ten opzichte van de stilwaterlijn	[m]
$z_r$	golfoplooptniveau ten opzichte van de stilwaterlijn (regelmatige golven)	[m]
$z_{2\%}$	golfoplooptniveau ten opzichte van de stilwaterlijn dat door 2% van de golven wordt overschreden	[m]
$\alpha$	taludhelling buitentalud	[rad]
$\beta$	taludhelling binnentalud	[rad]
$\xi_0$	brekerparameter	[-]



## 1 Inleiding

Opensteenafalt (OSA) wordt steeds vaker toegepast in de golfoploop- en golfoverslagzone van dijken. Voor deze toepassing van open steenafalt is echter geen rekenregel voor dimensioneren en toetsen beschikbaar. Zelfs het bezwijkmechanisme is niet echt evident. Omdat het materiaal in deze zones wordt belast door stromend water wordt verondersteld dat bezwijken voorafgegaan wordt door slijterosie. Feitelijk bezwijken treedt waarschijnlijk op als het open steenafalt plaatselijk te dun is geworden of zelfs geheel is verdwenen. Dan zullen plotseling grote delen van de resterende bekleding door een langstreckende golfoploop- of golfoverslagtong worden meegevoerd.

Als aanzet om te komen tot een rekenregel voor open steenafalt in de golfoploop- en golfoverslagzone is in dit rapport de beschikbare kennis geïnteriseerd.

In de loop der jaren is het materiaal open steenafalt (OSA) een aantal malen beproefd. Daarnaast is meer inzicht verkregen in hoe open steenafalt van een goede kwaliteit kan worden verkregen, zodat een goede kwaliteitsbeheersing tegenwoordig tot een sterk materiaal kan leiden.

Op grond van een grove literatuur scan worden er in hoofdstuk 2 wat theoretisch danwel experimenteel onderbouwde formules gepresenteerd die bij de beoordeling van de proeven en praktijksituaties een rol kunnen spelen.

In hoofdstuk3 wordt ingegaan op de belangrijkste uitgevoerde beproevingen van OSA en voor zover de stroomsnelheden over de OSA-bekleding geen opgelegde randvoorwaarden betroffen, worden deze voor de proeven afgeleid.

Hoofdstuk 4 gaat in op de materiaalkwaliteit, die gedurende de levensduur zal afnemen. In hoofdstuk 5 is een eerste aanzet voor een ontwerpmethodode gegeven. Hoofdstuk 6 geeft de conclusies.

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.



## 2 Stroomsnelheden op dijktaluds

In dit hoofdstuk worden de stroomsnelheden ten gevolge van golfoploop en golfoverslag op het buiten- en binnentalud van de dijk beschreven met formules die ontleend worden aan recente publicaties.

Verondersteld wordt dat de krachten op de bekleding evenredig zijn met de kinetische energie van het over de bekleding stromende water en eventueel daardoor meegevoerd materiaal. Die kinetische energie is evenredig met het kwadraat van de stroomsnelheid. Dat maakt dat de stroomsnelheid van het water wordt gezien als belangrijkste kenmerk van de belasting op open steenasfalt in de golfoploopzone.

### 2.1 Stroomsnelheden op het buitentalud

Omdat wordt verondersteld dat de belasting op de bekleding evenredig is met het kwadraat van de stroomsnelheid zullen hoge stroomsnelheden onevenredig grote belastingen voor de bekleding opleveren. Niet de gemiddelde stroomsnelheden zijn van belang, maar de extreme stroomsnelheden zijn maatgevend. Hier wordt daarom, zoals vrij gebruikelijk, uitgegaan van de stroomsnelheid die in 2% van de golfoplopen wordt overschreden.

De stroomsnelheid op een niveau  $z_A$  op het buitentalud die slechts in 2% van de gevallen wordt overschreden, wordt gegeven door Bosman (2007):

$$\frac{u_{A,2\%}}{\sqrt{gH_s}} = \frac{0,30}{\sin(\alpha)} \sqrt{\frac{(z_{2\%} - z_A)}{H_s}} \quad (1)$$

Waarin:

$g$	versnelling zwaartekracht [m/s <sup>2</sup> ];
$H_s$	significante golfhoogte [m];
$z_{2\%}$	golfoploop niveau dat door 2% van de inkomende golven wordt overschreden [m boven SWL];
$z_A$	niveau van punt A [m boven SWL].
$\alpha$	taludhelling buitentalud [rad]

Als slechts een globale waarde voor de stroomsnelheid moet worden bepaald kan de vertraging op de kruin en de versnelling danwel de vertraging van het water op het binnentalud worden verwaarloosd. De formule (1) kan dan ook worden gebruikt voor het berekenen van de stroomsnelheid op het binnentalud, waarbij dan uiteraard voor  $z_A$  moet worden uitgegaan van het niveau van de kruin. Omwerken van formule (1) levert:

$$u_{A,2\%} = \frac{0,30}{\sin(\alpha)} \sqrt{g(z_{2\%} - z_A)} \quad (2)$$

De ophoofpformuleringen (verwachtingswaarden) voor de 2% golfploophoogte die door het Technisch Rapport Golfploop en Golfoverslag (2002) [TRG&G] worden gegeven zijn (simplerste situatie: glad recht talud met loodrechte golfinval):

$$z_{2\%} = 1,65 \cdot H_s \cdot \xi_0 \quad (3)$$

Met als maximum:

$$z_{2\%} = H_s \left( 4,0 - \frac{1,5}{\sqrt{\xi_0}} \right) \quad (4)$$

Waarin:

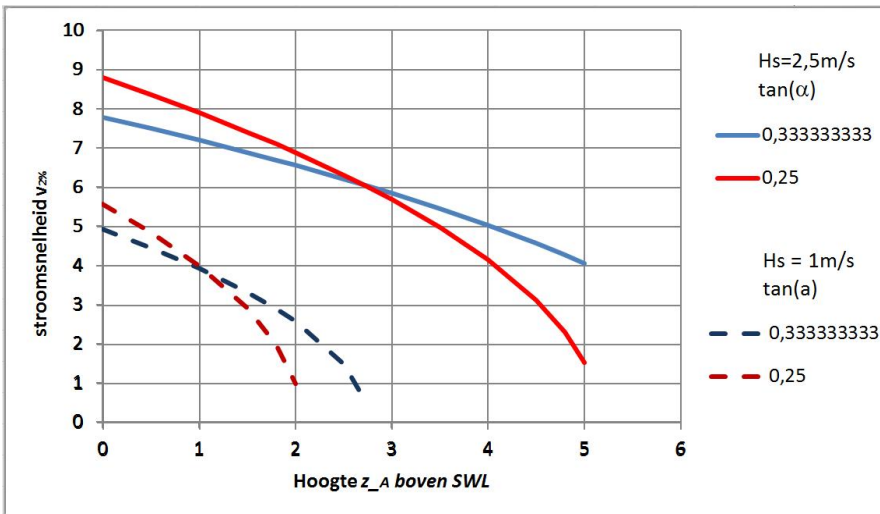
$\xi_0$  brekerparameter [-]:

$$\xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_{0p}}} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_s}{g T_m^2}}} \quad (5)$$

$s_{0p}$  golfsteilheid [-]

$T_m$  gemiddelde golfperiode [s]

Voor situaties waarin de golfhoogte  $H_s = 1,0$  m of  $2,5$  m (golfsteilheid 0,04) zijn de 2%-overschrijdingswaarden voor de stroomsnelheid gegeven in Figuur 2.1.



Figuur 2.1 Stroomsnelheid voor  $H_s = 2,5$  en  $1,0$  m als functie van de hoogte boven de stilwaterlijn.

Als van een bekleding bekend is welke stroomsnelheid zonder schade kan worden doorstaan, dan kan op basis van een dergelijke grafiek, danwel de daaraan ten grondslag liggende formules ((2) ... (5)), worden nagegaan boven welk niveau de bekleding kan worden toegepast.

## 2.2 Stroomsnelheden op het binnentalud

Als er sprake is van golfoverslag dan zal ook op het binnentalud een watertong passeren. De frontsnelheid van die tong wordt als maatgevende snelheid aangemerkt.

Afhankelijk van de ruwheid en helling van het binnentalud kan de snelheid op het binnentalud af- of toenemen. De stroomsnelheid op het binnentalud  $u_{bi}$  gaat volgens Schüttrumpf en Van Gent (2003) bij een lang talud naar:

$$u_{bi} = \sqrt[3]{\frac{2gh_0u_0 \sin \beta}{f}} \quad (6)$$

Waarin:

$g$	versnelling zwaartekracht [m/s <sup>2</sup> ]
$h_0$	laagdikte van de overslag op de binnenkruinlijn [m]
$\beta$	taludhelling binnentalud [rad]
$u_0$	stroomsnelheid van de overslag op de binnenkruinlijn [m/s]
$f$	invloedsfactor wrijving binnentalud [-]

Voor praktijksituaties wordt verondersteld dat de versnelling danwel vertraging op het binnentalud niet significant is. Een pragmatische formule voor de stroomsnelheid op het binnentalud wordt gegeven door Van der Meer et al. 2010. Dit betreft de volgende fitfunctie:

$$u_{biV} = 5,0V^{0,34} \quad (7)$$

Waarin:

$u_{biV}$	maximale stroomsnelheid op het binnentalud ten gevolge van een overslag [m/s]
$V$	volume van een overslag [m <sup>3</sup> /m <sup>1</sup> ]

Voor het berekenen van het golfoverslagvolume wordt een beroep gedaan op de formules uit het Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag [TRG&G] (2002). Met behulp van die formules kan uitgaande van een concrete situatie een overslagvolume en dus een stroomsnelheid op het binnentalud worden berekend.

Het overslagvolume kan worden berekend met de volgende formule:

$$V = \frac{0,84T_m q}{P_{ov}} \{-\ln(1-P_V)\}^{4/3} \quad [\text{TRG\&G, form31}] \quad (8)$$

Waarin:

$T_m$	gemiddelde golfperiode [s]
$q$	gemiddeld golfoverslagdebiet [m <sup>3</sup> /s/m <sup>1</sup> ]
$P_{ov}$	kans op overslag per golf [-]:
$P_{ov} = \exp\left(-\left\{\sqrt{-\ln 0,02} \frac{h_k}{z_{2\%}}\right\}^2\right)$	[TRG&G, form30] <span style="float: right;">(9)</span>
$h_k$	hoogte kruin boven de stilwaterlijn [m]
$z_{2\%}$	golfploophoogte ten opzichte van de stilwaterlijn die door 2% van de golven wordt overschreden [m]

$P_V$  kans op overschrijden van volume  $V$  [-]

Voor de simpelste situatie (recht, glad talud met loodrechte golfaanval) wordt het gemiddelde overslagdebiet gegeven door:

$$q = \sqrt{gH_s^3} \frac{0,067}{\sqrt{\tan(\alpha)}} \xi_0 \exp\left(-4,3 \frac{h_k}{H_s} \frac{1}{\xi_0}\right) \text{ [TRG\&G, form22]} \quad (10)$$

Met als maximum:

$$q = \sqrt{gH_s^3} 0,2 \exp\left(-2,3 \frac{h_k}{H_s}\right) \text{ [TRG\&G, form23]} \quad (11)$$

Voor de simpelste situatie (recht glad talud met loodrechte golfaanval) wordt de 2%-waarde voor de oploophoogte gegeven door de formules (3) en (4).

### 2.3 Belastingen op het OSA-oppervlak

De stroomsnelheden van het water wat over de bekleding schiet, zijn een maat voor de belasting van de OSA-bekleding. Maar de vertaling naar krachten en materiaalspanningen is nooit op een bevredigende manier gemaakt. Een notitie door F. Tolman (1996) geeft hiervoor een aantal elementen. Hij berekent bijvoorbeeld de schuifspanning van het water op het oppervlak van de bekleding. Hij moet echter constateren dat deze schuifspanningen meerdere ordes kleiner zijn dan de buigspanningen ten gevolge van golfklappen.

Hij stelt danook de vraag "of belasting op afschuiving (door stromend schoon water) wel zo belangrijk is bij het ontstaan van oppervlakteschade/vermoeiingsschade. Een factor die mogelijk (wel) van invloed kan zijn is de schurende werking van losgeraakte stenen: i.e. abrasie-effecten". Dit is voor de waterbouw een "braakliggend onderzoeksterrein".

Verondersteld mag worden dat erosie vooral optreedt door voorwerpen die meegevoerd worden door het over de bekleding stromend water. Het proces van het afschuren van het oppervlak, danwel het uitbreken van een steen uit het oppervlak is echter nooit goed beschreven. Vooralsnog zal de belasting dus niet specifieker kunnen worden omschreven dan met de snelheid van het water wat over het talud heen stroomt.

### 3 Metingen stroombestendigheid OSA

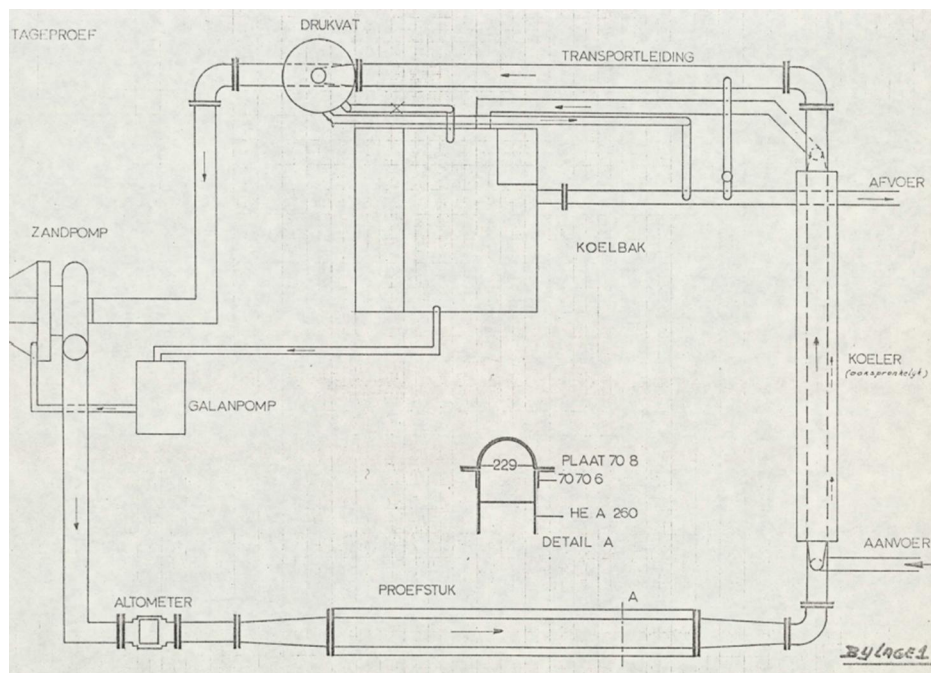
In het verleden zijn er enkele onderzoeken uitgevoerd op opensteenafalt die enig inzicht verschaffen in de erosiebestendigheid van OSA. In de volgende paragrafen worden deze onderzoeken beschreven.

#### 3.1 Slijtage Onderzoek Steenasfalt

Van Campen (1976) heeft onderzoek naar slijtage van steenasfaltmengsels gerapporteerd. De betreffende proeven zijn uitgevoerd in een speciaal geconstrueerd pompcircuit te Schelphoek, zie Figuur 3.1. De proeven zijn uitgevoerd om de slijtbestendigheid van de asfaltmengsels als bodembescherming nabij de Oosterschelde-kering te testen. In de gerapporteerde proef (76.09) zijn twee asfaltmengsels beproefd:

1. een overvuld mengsel (35% gietasfalt – 65% kalksteen 20/40) (proef A, B en C) en
2. een opensteenafalt mengsel (20% gietasfalt – 80% kalksteen 20/40) (proef D).

Gegevens op basis waarvan de omhullingsdikte van de stenen kan worden gekarakteriseerd zijn niet gerapporteerd. Nb. de omhullingsdikte is een belangrijke parameter voor zowel de sterkte als de duurzaamheid van OSA.



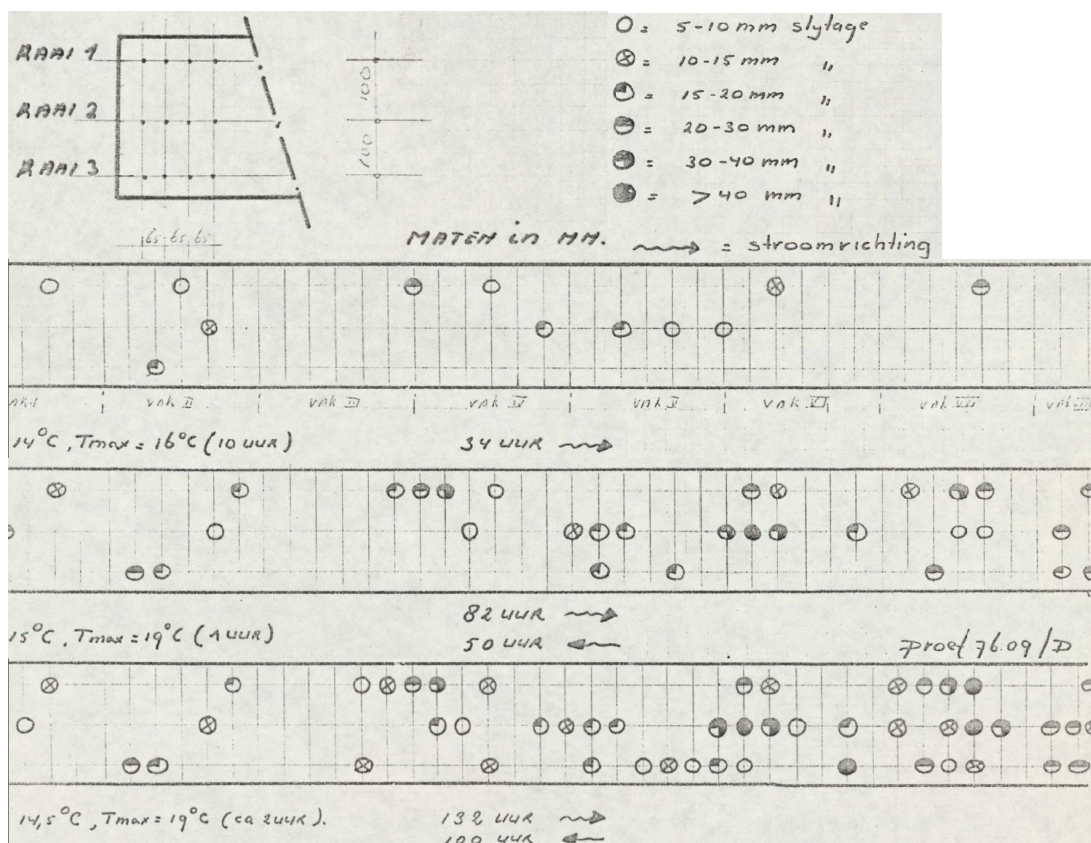
Figuur 3.1 Pompcircuit van slijtageonderzoek steenasfalt (Van Campen, 1976)

Hier wordt uitsluitend ingegaan op de resultaten voor het open mengsel. In die proef is getracht de temperatuur op gemiddeld 15°C te houden, al wordt ook vermeld dat gedurende één van de perioden die er is gestroomd over het monster de “maximale temperatuur gedurende ca. 1 uur bedroeg 23°C”. Omdat de sterkte van bitumineuze mengsels sterk temperatuursafhankelijk zijn, is controle van de temperatuur tijdens belasten van belang. Zo wordt het bepalen van de buigtreksterkte op monsters in het laboratorium altijd uitgevoerd bij

5°C, de temperatuur die ongeveer overeenkomt met de (water)temperatuur onder maatgevende omstandigheden.

Er is niet gestroomd met schoon water maar met 20% zand in het water, vermeerderd met eventueel losgeslagen materiaal.

De slijtage is opgenomen na 23 uur stromen met 6 m/s. Vervolgens werd nogmaals 48 uur gestroomd. Daarna is het monster omgekeerd, zodat de stroomrichting over het monster tegengesteld was aan de aanvankelijke stroomrichting. In deze richting is 100 uur belast en de schade is tussentijds (50 uur) ook opgenomen. Ten slotte is het monster nogmaals omgekeerd en weer 50 uur gestroomd. Figuur 3.2 geeft enkele resultaten van de geconstateerde schade op een drietal momenten in de proevenreeks (opname na 23 uur, "halverwege de proeven" en na afloop van de proevenreeks).



Figuur 3.2 Enkele resultaten voor de stroomproef 76.09/D (Van Campen, 1976)

De cumulatieve gemiddelde slijtage bedroeg na 132 uur heen en 100 uur terugstromen voor de drie raaien: 6,4; 10,1 en 5,7 mm. De maximaal geconstateerde verdieping betrof 55 mm, maar dat was slechts op 1 punt waargenomen.

Naar aanleiding van de proeven is geconcludeerd: "Slijtage ontstaat in hoofdzaak door loslaten van kalksteen en in veel mindere mate door erosie". "In de overgrote meerderheid van de gevallen neemt een eenmaal ontstane verdieping niet toe in de resterende stroomuren".



Tot slot wordt opgemerkt: “Belangrijk is op te merken dat niet nagegaan kan worden wat de invloed is van de losgekomen kalkstenen, welke in het stroomcircuit worden opgenomen en daardoor met kracht in aanraking kunnen komen met het oppervlak van het proefstuk”.

### 3.2 Fixtone®, 1983

Fixtone was de merknaam waaronder Bitumarin B.V. het product open steenasfalt op de markt bracht. Op een 1:3 talud in de Deltagoot is dit materiaal in de golfklap- en golfploopzone aangebracht en beproefd. Visser [1983] heeft deze golfproeven op Fixtone in de Deltagoot gerapporteerd.

Toentertijd was de golfschotsturing in de Deltagoot nog niet zo geavanceerd. De uitgevoerde proeven betreffen danook kort durende proeven met regelmatige golven. Het golfschot was toen niet voorzien van een reflectiecompensatie die kon voorkomen dat na verloop van enige tijd een ongewenste trage slingering van het water in de goot optrad, die het opgelegde golfklimaat verstoortte.

De proeven zijn uitgevoerd in een aantal reeksen met stapsgewijs oplopende golfhoogten tot de maximale capaciteit van het golfschot was bereikt. Per golfhoogte-stap zijn de signalen van de instrumentatie telkens gedurende 300 sec geregistreerd. De proefduur per belastingstap is niet gerapporteerd, maar zal net voldoende zijn geweest om het regelmatige golfveld in de goot op te wekken en de gewenste meting te kunnen doen: ca. 6 minuten.

De maximale geregistreeerde golfbelasting betrof proef T33:  $H_i = 1,89$  m;  $T_p = 4,10$  s;  $z_r / H_i = 1,51$  [-].

Na afloop van het geplande proevenprogramma is de bekleding 4 à 5 uur onderworpen aan golfaanval (regelmatige golven), waarbij de golfhoogte wederom stapsgewijs is opgevoerd van  $H_i = 0,41$  m tot  $H_i = 1,90$  m ( $H_{max} = 2,76$  m).

Op grond van de gegeven beschrijving van het proefverloop na afloop van het officiële proevenprogramma, wordt aangenomen dat de bekleding effectief ca. 1 uur is blootgesteld aan regelmatige golven  $H_i = 1,90$  m.

Met betrekking tot erosie van het oppervlak door op- en afstromend water wordt gerapporteerd: “Slechts een zeer klein aantal steentjes is losgeraakt van het Fixtone talud. Het betreft hier slechts die steentjes die, door onvolkomenheden in het “nawalsen” slechts via één contactvlak met de onderliggende Fixtone waren verbonden. Er is niets gebleken van een voortgaande erosie van het oppervlak.”

Volgens de formules gerapporteerd door Bosman (2007), zie paragraaf 2.1 leidt de opgelegde golfbelasting tot stroomsnelheden ter plaatse van de stilwaterlijn van ca. 5,8 m/s. Daarbij wordt er aan voorbij gegaan dat deze proef is uitgevoerd met een golfveld van regelmatige golven. Dat betekent dat de berekende stroomsnelheid ook kan worden opgevat als de stroomsnelheid die (gemiddeld) bij elke golf optrad. De belastingsduur van ca. 1 uur in deze proef is dus qua belasting ten minste een orde zwaarder dan een belastingsduur van 1 uur met onregelmatige golven die een even hoge stroomsnelheid met een 2%-overschrijdingsfrequentie oplevert.

Omdat bij deze proeven zowel in de golfploopzone als in de golfklapzone dezelfde Fixtone-bekleding lag, kan die 5,8 m/s worden beschouwd als een ondergrenswaarde voor de sterkte met betrekking tot stroombestendigheid.

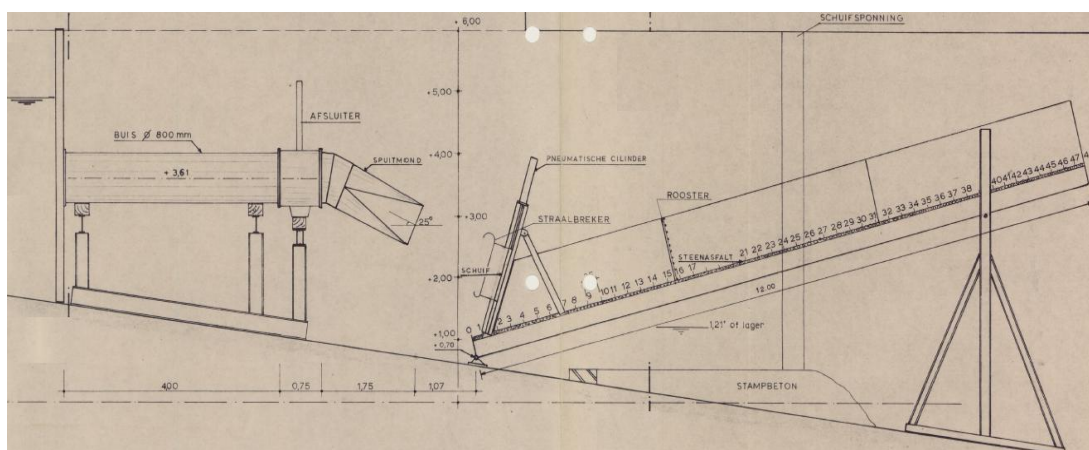
Opgemerkt moet worden dat er bij de uitgevoerde proeven geen extra los materiaal op het talud is aangebracht met als doel eventuele erosie te bespoedigen. Dat was wel het geval in het vorige en volgende onderzoek.

### 3.3 Lange duur onderzoek goot te Lith 1984

In de door Van der Hoek (1984) gerapporteerde proeven is in de stroomgoot te Lith met een golfklapinstallatie een 12 meter lang, 0,68 m breed dijktaalud belast door een pulserende schuin invallende waterstraal, zie Figuur 3.3. Met de golfklapinstallatie zijn op het talud inslaande golven met een golfhoogte van ca. 2 m gesimuleerd ( $T = 5,3$  s).

Na een belastingsduur van ca. 250.000 lastherhalingen (ca. 350 uur) op het OSA (20-40 mm) is geen noemenswaardig steenverlies geconstateerd aan het open steenoppervlak in de zone waar de golven insloegen.

Omdat na 200.000 lastherhalingen al duidelijk was dat geen significant steenverlies als gevolg van het stromend water optrad, is loodrecht op het talud een rooster aangebracht waarboven ca. 10 kg steen 30/60 mm is aangebracht. Het deel rechts van het rooster is aldus gedurende 50.000 lastherhalingen (ca. 74 uur) belast door de met de golfplooptong meegevoerde stenen. Dit heeft geresulteerd in een gemiddeld steenverlies van ca. 1 tot 2 steendiameters diep over de eerste twee meter achter het rooster.



Figuur 3.3 Detail van bouwtekening van de golfklapinstallatie en het te beproeven talud in de stroomgoot te Lith (Van der Hoek, 1984)

### 3.4 Overslagproef OSA Kattendijke 2008

In een serie overslagproeven uitgevoerd met een golfoverslagsimulator zijn er ook een aantal proeven uitgevoerd op speciaal hiervoor aangelegde harde bekledingen. Er is een strook Elastocoast® en een strook open-steenasfalt op het binnentalud bij Kattendijke aangelegd en deze zijn belast met de overslagsimulator. Deze proeven zijn gerapporteerd door Bakker et al. (2008) De uitgevoerde proeven op de strook open steenasfalt betroffen proeven van elk ca. 6 uur, met gemiddelde overslagdebieten ( $q$ ) van 30, 75 en 125 l/s per m<sup>1</sup>.

Het talud was grofweg 1:3 met een lengte van 15 m

De maximale capaciteit van de overslagsimulator tijdens de betreffende proeven bedroeg  $5,5 \text{ m}^3/\text{m}^1$ .



Figuur 3.4 Proef op open steenasfalt te Kattendijke (Bakker et. al. 2008)

Op basis van de set formules (7) tot (11) uit paragraaf 2.2 is gezocht naar de stroomsnelheden op het binnentalud die zijn opgetreden bij deze proef met de overslagsimulator op het open steenasfalt.

Globale kenmerken van de meest extreme belasting volgens Bakker et al. (2008):  $q = 125 \text{ l/s/m}^1$  gedurende 6 uur. Voorts is uitgegaan van een 4% golfsteilheid en een volume per extreme ( $P_v = 0,98$ ) overslag van  $5,6 \text{ m}^3/\text{m}^1$ . Dit levert voor dat overslagvolume wat door 2% van de golven wordt overschreden een stroomsnelheid op van  $9,0 \text{ m/s}$ . Nb. bij het overslagvolume wat door 5% van de golven wordt overschreden is de stroomsnelheid  $8,0 \text{ m/s}$ .

Bij een dergelijke belasting is geen vermeldenswaardige schade aan het belaste talud opgetreden.

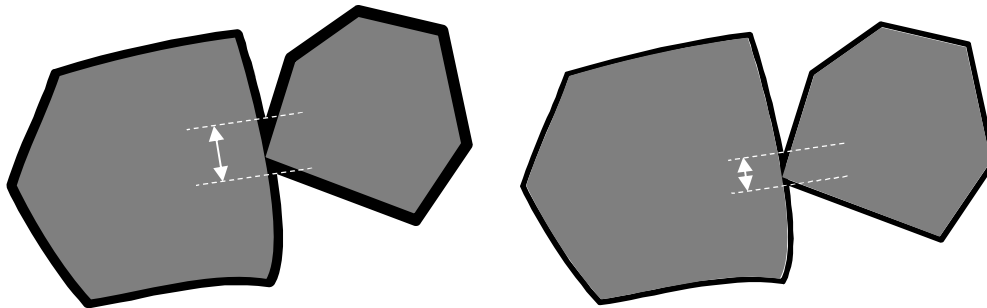
Het lijkt dus reëel om te veronderstellen dat nieuw OSA stroombestendig is in de golfoverslagzone (incidenteel belast) zolang de stroomsnelheden beperkt blijven tot  $8 \text{ à } 9 \text{ m/s}$ .



## 4 Kwaliteit OSA

### 4.1 Algemeen

Open steenasfalt is een mengsel van grof en eenzijdig gegradeerde steenslag die wordt omhuld met asfaltmastiek. De mastiek bestaat uit een continue gegradeerd mengsel van zand en vulstof met een overmaat aan bitumen. Bij de productie van open asfaltmengsels is het belangrijk dat de stenen die samen het doorlatende steenskelet vormen, goed omhuld zijn door mastiek. Immers de sterkte van het materiaal wordt voor een groot gedeelte bepaald door de trek die bij de contactvlakken van de stenen kan worden opgenomen. Als de stenen slechts voorzien zijn van een dun huidje mastiek, dan is de doorsnede van het contactvlak dat de trekspanningen moet opnemen gering, zie Figuur 4.1.



Figuur 4.1 Contactzone tussen twee omhulde stenen bij een dikke (links) en dunne (rechts) omhulling

In het verleden is proefondervindelijk getracht de optimale mix tussen mastiek en steenfractie voor het OSA te bepalen. Als te weinig mastiek wordt gebruikt in het mengsel is de omhulling van de stenen gering. Maar als teveel mastiek wordt gebruikt in het mengsel, dan wordt de omhulling rond de stenen zodanig dik dat deze niet meer stabiel is. De mastiek druipt van de stenen af, waarbij de stenen toch met een veel te dunne omhulling eindigen.

Inmiddels is er echter al weer geruime tijd ervaring met de volumetrische ontwerpmethodede waarmee op grond van de steensortering de juiste verhouding kan worden berekend om tot een optimale omhulling van de stenen te komen. Indien een mengsel met die methode wordt ontworpen, verkrijgt men een mengsel waarbij erosie waarschijnlijk niet optreedt door steenverlies, maar door geleidelijke slijtage van het bekledingsoppervlak.

Overigens is een essentiële voorwaarde voor een goed mengselontwerp dat er sprake is van een goede affiniteit tussen de toegepaste steen en het bitumen. Hierop dient in het vooronderzoek dus te worden getest.

Voorts is van het grootste belang dat de stenen voldoende vochtvrij zijn, omdat anders de kiem voor stripping en dus steenverlies in feite al is opgenomen in het mengsel.

### 4.2 Levensduurmodel open steenasfalt

Asfaltdijkbekledingen op waterkeringen worden in Nederland veelal aangelegd boven de zone die onder dagelijkse omstandigheden door golven wordt aangevallen. Dit geldt meestal ook voor opensteenasfalt, wat meestal in de golfoploopzone op het buitentalud, of op kruin en

binnentalud als bescherming tegen golfoverslag wordt toegepast. Deze bekledingen worden gedurende hun levensduur slechts zelden daadwerkelijk belast. De proeven die beschreven zijn in hoofdstuk 3 hadden een belastingsduur van tientallen uren. Die belastingsduur sluit aan bij de belastingsduur die in de praktijk mag worden verwacht.

De uitgevoerde proeven zijn echter alle uitgevoerd op nieuw materiaal. Er zijn specifiek voor die proeven materiaalmonsters gemaakt, danwel er is een nieuwe taludbekleding aangelegd die is beproefd. Dat betekent dat de gevonden resultaten gelden voor nieuw aangelegde open steenasfaltbekledingen.

Dijken en hun bekledingen worden doorgaans ontworpen met een levensduur van 50 jaar. Open steenasfalt is een mengsel met een hoog holle ruimtepercentage waardoor het een open, doorlatende bekleding betreft. Bij dichte mengsels kan slechts vanaf het bekledingsoppervlak aantasting/veroudering plaatsvinden. Maar bij een open mengsel kunnen verouderingsprocessen de bekleding op alle niveaus aantasten, al zal de UV-aantasting beperkt blijven tot de bovenste oppervlakken die blootgesteld zijn aan zonlicht. Met het oog op duurzaamheid van open mengsels is een optimale omhulling van de stenen van essentieel belang.

Aangenomen wordt dat schade door hydraulische belastingen evenredig is met de kinetische energie van het langsstromende water. De belasting op OSA is dan dus evenredig met het kwadraat van de stroomsnelheid. Een terugval van 50% in de sterkte van het materiaal leidt dan tot een  $\frac{1}{2}\sqrt{2}$  maal kleinere toelaatbare stroomsnelheid.

Helaas is er voor OSA nog geen bruikbaar levensduurmodel beschikbaar waarmee de achteruitgang van de sterkte als functie van de ouderdom en/of de gemiddelde omhullingsdikte kan worden gekarakteriseerd. Daarnaast zou bij de sterkte-ontwikkeling ook een eventuele afdekking van de bekleding door zand, grond of vegetatie een factor van belang kunnen zijn.

Voor een doelmatig ontwerp en voor het toetsen van bestaande OSA-bekledingen is een levensduurmodel onontbeerlijk.

### 4.3 Praktijkervaringen

In 2002 tot 2009 is in opdracht van Waterdistrict Zeeuwse Delta onderzoek uitgevoerd naar de toestand van het open steenasfalt op een havendammen van het werkeiland Neeltje-Jans door KOAC-NPC en de TUD ([Weijers et.al., 2007], [Van de Ven et.al., 2007], [Van de Ven en Montauban, 2009]). Deze bekledingen zijn aangelegd in de periode 1975-1980 en waren ten tijde van het onderzoek dus ca. 25 jaar oud. In het onderzoek lag de nadruk op het uitproberen van diverse monitoringstechnieken, zoals grondradar voor de laagdiktebepaling, seismische techniek voor de stijfheidsbepaling en VGD-metingen voor de stijfheidsbepaling. Ook zijn stijfheid en breuksterktes bepaald met laboratoriumproeven op materiaalmonsters uit boorkernen. Er zijn daarvoor proefopstellingen gebruikt waarmee niet eerder OSA is onderzocht. Ondanks dat het merendeel van de metingen een experimenteel karakter had, zijn bij dat onderzoek toch metingen beschikbaar gekomen met betrekking tot de laagdikte en de sterkte.

Omdat er geen aanvangssterkte voor deze bekledingen bekend zijn, kunnen uit de gemeten sterkte-gegevens geen directe conclusies worden getrokken met betrekking tot het teruglopen van de sterkte. Wel opvallend was een grote range in de gemeten breuksterkten

(0,37 – 1,08 MPa). Daarbij moet worden opgemerkt dat op diverse boorlocaties het materiaal zodanig slecht was dat er geen proefstukken uit het daar verzamelde materiaal konden worden gezaagd.

Gerapporteerd wordt dat de relatief grote steendiameter van het open steenasfaltmengsel in verhouding tot de proefstukafmetingen een oorzaak kan zijn voor een relatief grote spreiding in de gemeten breuksterktes. Maar het uiteenvallen van boorkernen wijst erop dat lage gemeten waarden niet moeten worden toegeschreven aan tekortkomingen van de beproevingswijze. Aannemende dat bij aanleg een redelijke sterkte aanwezig was, is de sterkte in 30 jaar lokaal teruggelopen tot (vrijwel) nihil.

Bij het onderzoek zijn door het nemen van boorkernen betrouwbare waarden voor de bekledingsdikte bepaald, echter ook hier doet zich het gebrek aan referentiegegevens van eerder datum gelden. Hoog op een talud zijn laagdiktes gemeten (16 en 20 cm) die gezien de besteksdikte (50 cm) en de geringe golfbelasting op dat niveau eigenlijk niet vanuit slijterose verklaarbaar zijn. In de rapportage wordt opgemerkt: "Vermoedelijk is er geen relatie tussen de besteksdikte en wat is aangebracht terplekke van de kern".

Bij deze werken is een over grotere eenheden gemiddelde afname van 30% van de bekledingsdikte in ruim 20 jaar geconstateerd ten opzichte van de besteksdikte.

Overigens zijn in de jaren '80 en '90 schadeplekken regelmatig uitgevuld met gietasfalt om verdere erosie te voorkomen. Bij aanleg van het open steenasfalt was er nog weinig ervaring met het materiaal. Daardoor was de beheersing van de materiaalkwaliteit kennelijk nog niet optimaal. Deze ervaringsgegevens zijn daarom wellicht niet representatief voor open steenasfalt zoals dat nu kan worden aangelegd.

Alhoewel begroeiing soms als een bedreiging voor een open steenasfalt-bekleding wordt beschouwd, concluderen Van de Ven en Montauban [2009] dat dichte begroeiing ook bescherming kan bieden tegen erosie door stenen die over het talud rollen (zie Figuur 4.2).



Figuur 4.2 Begroeiing van open steenasfalt in de getijzone

Dhr. N. Leguit heeft in de Klankbordgroep Asfaltbekledingen d.d. 30 oktober 2014 praktijkervaringen gepresenteerd met betrekking tot kustverdedigingen aan de Engelse oostkust, zie



Figuur 4.3. Die ervaringen wijzen erop dat ook op redelijk frequent aangevallen locaties OSA ten minste twintig jaar schadevrij kan functioneren als bekleding. Bij de getoonde beelden grensde de bekleding direct aan het voorland, waardoor op die locaties sediment en/of drijfvuil moet zijn meegevoerd door de golven.

Op een enkele locatie is in het OSA-mengsel gebruik gemaakt van een slijtvastere steensoort. Omdat afslijpen van de stenen niet wordt gezien als het belangrijkste mechanisme wat tot dikteverlies van OSA-bekledingen leidt, lijkt dat niet essentieel.



Figuur 4.3 Tollesbury river Blackwater (getijzone: 1989-2014; foto N. Leguit)



## 5 Aanzet ontwerp- en monitoringsmethode OSA in golfoploopzone

Een ontwerpmethodologie voor OSA in de golfoploopzone moet als belangrijkste elementen de belastingen en de sterkte bevatten. Vooralsnog bestaat er geen beschrijving van de belasting die op het talud aangrijpt en tot schade leidt (zie paragraaf 2.3). Daarom moet vooralsnog de sterkte en belasting voor het erosieproces worden gekarakteriseerd met de stroomsnelheden op het talud. Als de sterkte, uitgedrukt in de toelaatbare stroomsnelheid, altijd groter is dan de belasting, de op een bepaalde hoogte optredende stroomsnelheid, dan voldoet de bekleding.

Als belasting wordt dus de stroomsnelheid op het talud gehanteerd. Deze kan worden berekend met formules gegeven in paragraaf 2.1. Afgezien van de eventuele onzekerheid in deze empirische formules en de keuze welke karakteristieke overschrijdingsfrequentie van de stroomsnelheid (2%-waarde of een 5%-waarde) maatgevend is voor de belasting, is de stroomsnelheid op het talud voldoende bekend.

Voor de sterkte ligt het een stuk gecompliceerder.

Voordat er een sterkte kan worden gekwantificeerd moet het bezwijkmechanisme en faalcriterium gedefinieerd zijn. Voor het mechanisme volgens welke OSA in de golfoploopzone zal bezwijken en uiteindelijk falen, wordt vooralsnog uitgegaan van de volgende beschrijving:

Bij eerste belasting door de oploop zullen alle (vrijwel) losse delen van de bekleding worden weggevoerd. Vervolgens zal door slijtage van de OSA-toplaag door de overtrekkende stroom de dikte van de bekleding afnemen. Uiteindelijk zullen lokaal gaten in het open steenasfalt vallen. Aannemende dat zich onder het open steenasfalt nog een redelijk erosiebestendige onderlaag bevindt (geotextiel of laag van zandasfalt), zal dit niet meteen tot onderspoeling van de toplaag leiden. Daardoor zullen de gaten eerst nog wat groter worden tot de stroming voldoende vat krijgt op de OSA-bekleding en deze oplicht en in stukken breekt. De (rest)sterkte van de onderlaag zal een orde kleiner zijn dan die van het OSA, temeer daar rondslingerende grote delen van de toplaag het erosieproces aanzienlijk kunnen versnellen. Daarom wordt verondersteld dat het in stukken breken van het OSA inhoudt dat de totale bekleding faalt.

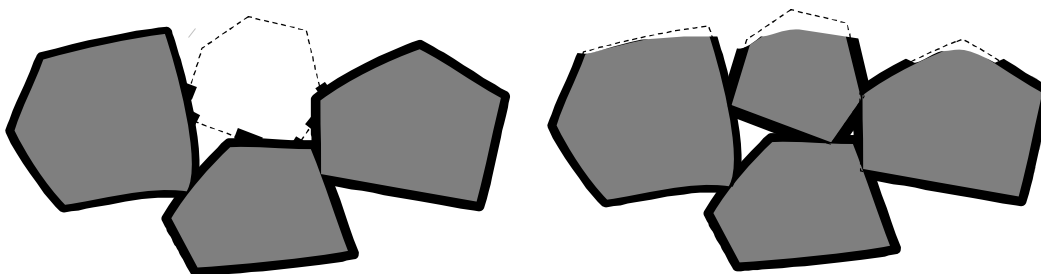
Voor het erosieproces van de toplaag is het van belang hoe dat plaatsvindt. Enerzijds kunnen individuele stenen uit het oppervlak van de bekleding los worden geslagen. Dit erosieproces zal vooral optreden als de hechting onvoldoende is. Onvoldoende hechting kan te wijten zijn aan te geringe omhulling van de stenen of als gevolg van stripping.

Als de hechting voldoende is, dan zal de erosie plaatsvinden door geleidelijk afschuren van het oppervlak: de stenen breken niet uit maar de mastiek wordt geleidelijk afgeslepen en uiteindelijk zelfs de stenen, zie Figuur 5.1.

De praktijkervaring, gerapporteerd in paragraaf 4.3, wijst erop dat voor bekledingen met een goede aanvangskwaliteit in de eerste twintig jaar er eerder sprake is van afschuren dan van steenverlies. Als de bekleding ouder wordt is het denkbaar dat stripping toch een rol gaat spelen. Dan slaat het erosietype tijdens de levensduur om van "afschuren" naar "steenverlies".

Als de bekleding slechts incidenteel wordt belast, dan moet steenverlies bij een kortdurende belasting als problematisch worden gezien. Door het open karakter van dit type bekleding

kunnen verouderingsprocessen immers over de volle hoogte optreden. Wellicht is door aanslibbing onderin de bekledingslaag de inwerking van vocht daar zelfs nog wat langduriger en dus ernstiger dan aan het oppervlak van de bekleding. Kortom voor incidenteel, kortdurend belaste bekledingen lijkt beginnend steenverlies het begin van een relatief snelle degradatie van de bekleding. Nb. het verlies van een enkele ongelukkig uitstekende of toevalligerwijs slecht gebonden steen bij een eerste belasting moet uiteraard niet als het begin van structureel steenverlies worden aangemerkt.



Figuur 5.1 Erosie oppervlak door steenverlies (links) en door afschuren (rechts)

De sterkte in de golfploopzone moet worden gekwantificeerd met een toelaatbare stroomsnelheid. Dit lijkt alleen mogelijk als van voldoende oude monsters een erosiebestendigheid is vastgesteld en op grond daarvan een levensduurmodel is samengesteld.

Als toch OSA-bekledingen in de golfploopzone worden toegepast, dan is monitoren van de erosiebestendigheid een noodzaak.

Als eerste onzekere schatting voor een levensduurmodel zou kunnen worden verondersteld dat de sterkte van een goede OSA-bekleding in 50 jaar tot 30% terugvalt. Hier wordt bewust het woord terugvallen gehanteerd omdat het te verwachten is dat de afname van de sterkte niet geleidelijk gaat, maar geruime tijd goed op peil blijft, waarna een vrij snelle afname van de sterkte plaatsvindt. Monitoren van het verloop van de sterkte van de bekleding is dus essentieel. Als de bekleding zodanig hoog ligt dat deze zelden of nooit wordt belast door vrijwel kritische omstandigheden, dan moeten voor dit monitoren specifieke proeven worden uitgevoerd.

Als de bekleding regelmatig fors wordt belast door golven, dan kan het erosieproces na elke storm, of elke paar jaar, worden gemonitord en het erosie-type worden geïdentificeerd. Als op de betreffende locatie geen evident extremere belastingen mogen worden verwacht, dan diegene die met enige regelmaat optreden, dan kan een restlevensduur eenvoudig aan de hand van extrapolatie van het minimum laagdikteverloop worden vastgesteld. Verwacht wordt dat de snelheid waarmee de toplaagdikte afneemt voor het erosietype "steenverlies" aanzienlijk groter zal zijn dan voor "afschuren". Een eventuele omslag van het erosietype "afschuren" naar "steenverlies" moet daarom door regelmatige monitoring worden vastgesteld. Uitgaan van een minimum laagdikte na erosie, bijvoorbeeld 10 cm, lijkt een verstandig uitgangspunt om enige onzekerheid in de prognose van de erosie te kunnen opvangen.

Per saldo moet worden geconstateerd dat de belastingen, de stroomsnelheden over het talud, redelijk nauwkeurig bekend zijn. De kennis van de stroombestendigheid van oude OSA-mengsels is echter onvoldoende om de bekleding te kunnen toetsen en ontwerpen. Een levensduurmodel voor OSA is daarvoor een absolute noodzaak.

Om op dit punt een fundamentele stap voorwaarts te maken, zou moeten worden vastgesteld welke krachten inwerken op het oppervlak van de bekleding en daar de schade veroorzaken. Als het erosieproces op dat niveau kan worden beschreven, dan kan een directe link worden gelegd tussen de belasting en de sterkte die kan worden gemeten in proeven op asfaltmonsters uit specifieke bekledingen.

Het is echter ook mogelijk om een empirisch sterkte-levensduurmodel te baseren op gegevens uit stroomproeven, vergelijkbaar met de proeven gerapporteerd door van Campen (1976), zie paragraaf 3.1. Daarbij moet dan de erosie worden bepaald van een groot aantal uit verschillende oudere dijkbekledingen genomen monsters. De mate van sedimentlast / rollende stenen in het stroomcircuit, zal naar verwachting een parameter zijn die een belangrijke invloed heeft op de mate van erosie. Als de vraag naar een sterkte-levensduurmodel zich uitsluitend richt op golfoploop en –overslag, dan zullen overigens rollende stenen beperkt blijven tot incidentele gebeurtenissen, waarbij de maat van de stenen bepaald wordt door wat er op de dijk voorhanden is. In het gunstigste geval gaat het om een enkele uit het open steenasfalt losgeslagen steen die in geval van golfoverslag over buiten en binnentalud naar de binnenteen van de dijk verdwijnt.

Ongeacht langs welk spoor een sterktemodel wordt ontwikkeld, de omhullingsdikte is een belangrijke parameter die daarbij moet worden betrokken.



## 6 Conclusies

Teneinde na te gaan of op basis van de literatuur aanbevelingen kunnen worden gedaan voor het toepassingsgebied van OSA in de golfoploopzone is een aantal elementen uit de literatuur verzameld en gecombineerd in deze studie.

Op grond van de beschikbare literatuur kunnen stroomsnelheden in de golfoploop en golfoverslagzone voor concrete situaties worden berekend, zie hoofdstuk 2. Daarmee kan, gegeven de dijkgeometrie en de golfrandvoorwaarden, de hydraulische belasting worden berekend.

In diverse proeven is vastgesteld onder welke condities er enige danwel geen schade optrad, zie hoofdstuk 3. De proefcondities kunnen worden vertaald naar stroomsnelheden over de bekleding. Daaruit ontstaat het beeld dat stroomsnelheden van 8 tot 9 m/s geen schade zullen opleveren voor een goede nieuw aangelegde OSA bekleding.

Volgens Figuur 2.1 is er daarom in de oploopzone bij golven van  $H_s = 2,5$  m geen schade te verwachten bij nieuw OSA op minstens 1 m boven de maatgevende waterstand (ontwerp-peil).

Voor een gedegen ontwerp is echter een sterkte aan het einde van de levensduur noodzakelijk. Aangezien een sterkte-levensduurmodel voor OSA vooralsnog ontbreekt, kan nog geen betrouwbare ontwerpmethodode worden gepresenteerd. Slechts in die situaties waar regelmatig een (nagenoeg) maatgevende belasting optreedt, kan op basis van regelmatige monitoring van de erosie een restlevensduur voor de aanwezige bekleding worden afgeleid. Al moet daarbij worden aangetekend dat voor een betrouwbare prognose van de restlevensduur het waargenomen mechanisme “steenverlies” moet betreffen.

Omdat er in Nederland weinig OSA-bekledingen onder dagelijkse omstandigheden worden belast, zal dit niet snel tot een algemeen toepasbaar sterkte-levensduurmodel leiden. Toch vormen de ervaringen van enkele praktijkgevallen altijd een goed ijkpunt voor de ontwikkeling van een sterktemodel. Daarom wordt aanbevolen om meer praktijkervaringen te verzamelen.

De gerapporteerde ervaringen met de open steenasfalt bekledingen op Neetje Jans tonen aan dat een (goede) nulmeting, vaststellen van de kwaliteit bij aanvang, onmisbaar is om een momentopname te kunnen gebruiken als ijkpunt voor een levensduurmodel. Momenteel zijn de ervaringen met de kwaliteit van open steenasfalt nog te divers om te komen tot een bruikbare eerste sterkte-levensduurmodel.

De ontwikkeling van een sterktemodel waarop een ontwerpmethodiek zou kunnen worden gebaseerd, is denkbaar langs twee sporen:

- een beschrijving van de fysica van afschuren danwel steenverlies leidt tot een relatie tussen de belasting enerzijds en relevante materiaalparameters anderzijds;
- een groot aantal erosieproeven op monsters uit dijken van verschillende leeftijd en materiaalsamenstelling leidt tot een empirische relatie tussen de belasting enerzijds en relevant veronderstelde materiaalparameters anderzijds.



## Literatuur

- Bakker, 2008  
*Factual Report, Golfoverslagproeven Zeeuwse zeedijken*  
J.J. Bakker, R.J.C. Mom, G.J. Steendam  
Infram, rapport 08i011, Marknesse, september 2008
- Bosman, 2007  
*Velocity and flow depth variations during wave overtopping*  
G. Bosman  
Master Thesis TUD, Delft, August 2007
- Van Campen, 1976  
*Slijtage Onderzoek Steenasfalt*  
M.L.P. van Campen  
RWS-Deltadienst afdeling ONW, Rapport ONW-R-76015,  
Burghsluis, december 1976.
- Van den Hoek, 1984  
*Golfaanval op open steenasfalt, verslag lange duur onderzoek goot te Lith*  
K.A. van den Hoek  
2<sup>e</sup> concept notitie: ONW-R/N-84009 M1919/M1931 proef 82.12/proj.8108-OSF  
Waterloopkundig laboratorium / RWS-Deltadienst ONW (Ontwikkeling nieuwe werkmethode)  
Februari 1984
- Van Hoven et al., 2013  
*Evaluation and Model Development, Grass Erosion Test at the Rhine dike*  
A. van Hoven, H. Verheij, G.J.C.M. Hoffmans, J. van der Meer  
Rapport 1207811-002  
Deltares, Delft 2013
- Van der Meer et al. 2010  
*Flow depths and velocities at crest and landward slope of a dike, in theory and with the wave overtopping simulator*  
J.W. van der Meer, Bianca Hardeman, Gosse-Jan Steendam, Holger Schüttrumpf, H. Verheij.  
Proceedings of Coastal Engineering, 2010
- Steendam et al, 2012  
*SBW Wave overtopping and grass cover strength, Model development*  
G.J. Steendam, G.J.C.M. Hoffmans, J.J. Bakker, J. van der Meer, J. Frissel, M. Paulissen, H.  
Verheij Report 1206016-007  
Deltares, Delft, Concept Juni 2012
- Schüttrumpf, 2001  
*Wellenüberlaufströmung bei Seedeichen, Experimentelle und theoretische Untersuchungen*  
H.F.R. Schüttrumpf  
Dissertation Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2001

Schüttrumpf en Van Gent, 2003

*Wave overtopping at seadikes*

H.F.R. Schüttrumpf, M.R.A. van Gent

ASCE, Proc. Coastal Structures 2003, pp. 431-443

Schüttrumpf en Oumeraci, 2005

*Layer thicknesses and velocities of wave overtopping flow at seadikes*

H. Schüttrumpf, H. Oumeraci

Journal of Coastal Engineering 52, 2005, pp. 473-495

TAW, 2002

*Technisch Rapport Golfploop en Golfoverslag bij dijken*

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen

RWS-Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, 2002.

Tolman, 1996

*Notitie dimensionering open steenasfalt constructies*

F. Tolman

(Concept) notitie, Netherlands Pavement Consultants

Oprachtnr. 96156, Utrecht, 1996.

Van de Ven, 2004

*Studie naar het resultaat van het onderzoek van de open steen asfalt bekleding in de Oosterschelde*

*Onderzoek Open Steen Asfalt Havendammen Oosterschelde*

M.F.C. van de Ven.

TU Delft, Rapport 7-04-133-1 (ISSN 0169-9288) in opdracht van RWS-DZL, Waterdistrict Zeeuwse Delta.

Delft, april 2004.

Van de Ven et.al., 2007

*Eindrapport Onderzoek Open Steen Asfalt Havendammen Oosterschelde*

M.F.C. van de Ven, M.R. Poot, E. Slob, W. Verwaal, E. Hagos.

TU Delft, rapport in opdracht van RWS-DZL, Waterdistrict Zeeuwse Delta.

Delft, oktober 2007.

Van de Ven, 2009

*Eindadvies monitoring open steenasfalt*

M.F.C. van de Ven, C.C. Montauban

TU Delft, rapport in opdracht van RWS-DZL, Waterdistrict Zeeuwse Delta.

Delft, mei 2009.

Visser, 1983

*Fixtone, stabiliteit onder golfaanval, verslag modelonderzoek*

P.J. Visser

WL project M1942, LGM project CO266520

De Voorst, juni 1983.



Weijers et. al., 2007

*Opzet monitoringsprogramma open steenasfalt havendammen Oosterschelde – resultaten laboratoriumonderzoek.*

M. Weijers, A.K. de Looff, M. Moenielal

KOAC-NPC rapport nr. e0500131 in opdracht van RWS-DZL Waterdistrict Zeeuwse Delta.

Utrecht, juli 2007.