

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat, Directie Zeeland,
Projectbureau Zeeweringen

Reststerkte van steenzetting met zuilen na initiële schade

Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

M. Klein Breteler en W.D. Eysink

Verslag Deltagootproeven

Oktober 2005

Inhoud

Lijst van tabellen

Lijst van figuren

Lijst van symbolen

1	Inleiding	1
2	Modelopstelling en proevenprogramma	2
2.1	Modelopstelling	2
2.2	Meetsysteem	3
2.3	Locaties van kunstmatige initiële schade.....	4
2.4	Proevenprogramma.....	5
3	Resultaten	6
4	Analyse van de resultaten.....	10
4.1	Verwachting op basis van eerder onderzoek.....	10
4.2	Analyse van de huidige proefresultaten.....	13
5	Conclusies	18
	Referenties	20
A	Tabellen	A-1
B	Figuren.....	B-1
C	Overzicht van het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen.....	C-1

Lijst van tabellen in de tekst

- 2.1 Proevenprogramma reststerkteproef
- 3.1 Waterpassing van gemerkte Basaltonstenen op het talud tijdens reststerkteproef
- 3.2 Afstand gemerkte Basaltonstenen langs het talud tot een vast punt tijdens reststerkteproef

Lijst van figuren

In de tekst:

- 2.1 Echolood en stalen rooster
- 3.1 Uitspoeling van inwasmateriaal en filtermateriaal bij echolood
- 4.1 Schematische weergave van de ondermijning van de toplaag als gevolg van uitspoeling van het filter
- 4.2 Grootte van de ondermijning als functie van de belastingduur
- 4.3 Grootte van de ondermijning als functie van de locatie van het gat t.o.v. de stilwaterlijn
- 4.4 Gemeten en berekende ondermijning (Klein Breteler 1991)
- 4.5 Ondermijning na 1000 golven (sop = golfsteilheid)
- 4.6 Grootte van de ondermijning als functie van het aantal golven bij loodrechte golfaanval
- 4.7 Verhouding tussen gemeten en met formule (4.12) berekende ondermijning

Bijlage B:

- 1 Dwarsdoorsnede model
- 2 Vooraanzicht modelopstelling
- 3 Zeefkrommen filter- en inwasmateriaal
- 4 Gaten voor proef P0501
- 5 Gaten na proef P0501
- 6 Gaten na proef P1001
- 7 Overzicht en gat 1 na proef P1501
- 8 Gat 2 en 3 na proef P1501
- 9 Overzicht en gat 1 voor proef P2001
- 10 Gat 2 en 3 voor proef P2001
- 11 Overzicht en gat 1 na proef P2001
- 12 Gat 2 en 3 na proef P2001
- 13 Golfoverschrijdingskromme en energiedichtheidspectrum; Reststerkteproef

Lijst van symbolen

b	= filterlaagdikte (m)
B_o	= ondermijningsdiameter van de toplaag (m)
B_{o1000}	= ondermijningsdiameter na 1000 golven (m)
B_g	= gatgrootte in de toplaag (m)
d_g	= plaats van de onderzijde van het gat in de toplaag, langs het talud gemeten, ten opzichte van de stilwaterlijn (onder water: negatief) (m)
D	= gemiddelde dikte van steenbekleding/toplaag (m)
D_o	= maximale erosiediepte van het filter (m)
D_{15}	= korrelgrootte van het filter met 15 gewichtsprocent een onderschrijding (m)
D_{50}	= korrelgrootte van het filter met 50 gewichtsprocent een onderschrijding (m)
H_g	= significante golfhoogte van de inkomende golven bij de teen van het talud (m)
N	= aantal golven (-)
s_{op}	= golfsteilheid = $H_s/(1,56T_p^2)$ (-)
t_r	= reststerkte (uur of seconde)
T_p	= golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
x	= horizontale afstand (m)
y	= laterale afstand (m) in goot t.o.v. gootwand aan de halzijde (west)
Y	= erosiediepte van de steenslag in gaten in de toplaag (m)
z	= hoogte boven gootbodem of stijghoogte t.o.v. stilwater (m)
z_g	= niveau van de onderzijde van het gat in de toplaag, verticaal gemeten, ten opzichte van de stilwaterlijn (onder water: negatief) (m)
α	= taludhelling ($^\circ$)
β	= invalshoek van de golven (loodrechte: $\beta = 0^\circ$)
Δ	= relatieve soortelijke massa onder water = $(\rho_s - \rho)/\rho$
ξ_{op}	= brekerparameter = $\tan\alpha/\sqrt{s_{op}}$
ρ_s	= soortelijke massa van steen in de toplaag (kg/m^3)
ρ	= soortelijke massa van water (kg/m^3)

I Inleiding

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

In 2003 is daarom door de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen opgestart. Doel van dit programma is het reduceren van deze kennisleemtes teneinde te komen tot scherpere toetsregels en daarmee sneller en vaker tot definitieve toetsresultaten. In het kader van dit onderzoeksprogramma heeft voorliggend plan betrekking op het deelonderzoek 7.2.2a “Doorgolfproef betonzuilen”. Het totale overzicht van het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen, zoals dat in 2004 is bijgewerkt, is weergegeven in bijlage C.

In het najaar van 2003 zijn proevenseries uitgevoerd in de Deltagoot voor het vaststellen van de stabiliteit van basalt en Basalton (Eysink en Klein Breteler, 2003). Door de golven is toen tijdens een proef één basaltzuil uit de bekleding gelicht. Bij een andere proef is één basaltzuil gedeeltelijk (8,5 cm) omhoog gekomen.

Hoewel het uitgelicht raken van één steen uit een steenzetting gewoonlijk omschreven wordt als schade, kan men zich afvragen in hoeverre er sprake is van ernstige schade die de functie van de waterkering bedreigt. In het verleden is vastgesteld dat als één steen uit de steenzetting verdwenen is, het nog geruime tijd duurt voordat de steenzetting over vele vierkante meters weggeslagen is (Klein Breteler, 1991). Verder komt het ook voor dat er helemaal geen vervolgschade optreedt en de schade beperkt blijft tot die ene steen en wat uitspoelend filtermateriaal.

Het gaat hierbij om de reststerkte van de toplaag, die gedefinieerd is als de tijd vanaf initiële schade totdat de toplaag over vele vierkante meters beschadigd is geraakt en de ondergrond begint uit te spoelen. Kennis hierover is relevant voor de vraag of er al dan niet gerekend mag worden op klemming van de stenen en voor het scherp kunnen vaststellen van een toets- en ontwerpcriterium voor steenzettingen (v.d. Meer en Halter, 2003).

Hoewel ook de reststerkte van de kleilaag van belang is inzake de vraag of het uitlichten van één steen gezien moet worden als een ernstig bedreiging van de waterkerende functie van de dijk, blijft dit aspect in dit onderzoek buiten beschouwing. Het onderzoek beperkt zich tot datgene wat met een geringe inspanning aan inzicht verkregen kon worden met behulp van de reeds aanwezige opstelling met Basalton in de Deltagoot: er wordt geen kwantificering van de reststerkte in een breed toepassingsgebied nagestreefd.

Het onderzoek is uitgevoerd onder leiding van ir. M. Klein Breteler en ir. W.D. Eysink. Het onderzoek werd namens de opdrachtgever begeleid door ir. R. 't Hart van de DWW van RWS.

2 Modelopstelling en proevenprogramma

2.1 Modelopstelling

In 2003 is onderzoek naar de stabiliteit van Basalton uitgevoerd met een dijktalud zonder berm (Eysink en Klein Breteler, 2003). Die steenzetting is in 2004 wederom gebruikt om de stabiliteit van Basalton onder langdurige golfbelasting te onderzoeken. Dat aspect wordt in 2005 gerapporteerd. Gezien het feit dat ook tijdens die proeven in 2004 er geen schade is ontstaan, kon die steenzetting ook weer gebruikt worden voor het huidige onderzoek naar de reststerkte van zuilen.

Een overzicht van de modelopstelling is gegeven in figuur 1 en 2. In de figuren is te zien dat het talud een helling van 1:3,5 had.

De dijk is in 2003 opgebouwd door in lagen zand aan te brengen op een bestaand golfdempend talud en deze per laag te verdichten. Het deel van het talud dat niet door brekende golven wordt belast, is afgewerkt met beton. Dit beton had bij de teen tot een hoogte van 2 m boven de gootbodem een dikte van 15 cm en in de golfoploopzone een dikte van 10 cm.

Om te voorkomen dat de betonlaag aan de teen wordt opgedrukt tijdens het leegpompen van de goot, is een grinddrain met twee drainagebuizen aangebracht en is de teen van de betonplaat opgesloten met hoekijzers. Het deel tussen 2 m en 6 m boven de gootbodem aan de gootzijde is de testsectie waar de te beproeven steenzetting is aangebracht.

In de golfaanvalszone, namelijk tussen 2 m en 6 m boven gootbodem, is het zandtalud bedekt met een 50 cm dikke laag zandcementstabilisatie (zie figuur 1). Dit voorkomt dat er grondmechanische instabiliteit ontstaat tijdens de proeven en het representeert de kleilaag die in de praktijk wordt toegepast.

Op de zandcementstabilisatie is een geotextiel aangebracht met daarop een filterlaag van 12 cm dik bestaande uit gebroken graniet van 22 – 40 mm. De zeefkromme van het filtermateriaal is gegeven in figuur 3. De Basalton is ingewassen met inwasmateriaal bestaande uit gebroken graniet van 5 - 30 mm (zie figuur 3). De Basaltonzetting is alleen nog eens opnieuw ingewassen na het ingolven tijdens het vorige onderzoek en daarna niet meer.

Omdat het vorige onderzoek geëindigd is met een onbeschadigd Basalton talud, is het onderhavige onderzoek ook hiermee uitgevoerd.

De steenzetting is opgebouwd uit Basalton van steunsets, bestaande uit 18 stuks zuilen van 20 cm hoog met horizontale afmetingen variërend van circa 20x25 cm tot circa 30x35 cm, met een grote soortelijke massa. Voor dit onderzoek zijn de grootste zuilen (6 stuks van 30x30 cm tot 30x35 cm) per set weggelaten. Uiteindelijk is toen een Basaltonzetting in model gebouwd met de volgende eigenschappen:

- hoogte: 19,5 – 21,5 cm; gemiddeld circa 20,0 cm
- breedte: circa 20x25 – 25x30 cm; gemiddeld circa 23x26 cm
- soortelijke massa: circa 2827 kg/m³

De Basaltonzuilen zijn door professionele steenzetters aangebracht. Doordat met een beperkter aantal blokvormen moest worden gewerkt heeft dit hier en daar tot wat grotere spleten geleid (zie figuur 4).

De steenzetting is sinds 2003 niet opnieuw met inwasmateriaal ingewassen.

2.2 Meetsysteem

In de goot werden drie golfhoogtemeters gebruikt om de werkelijke golfcondities in de goot te meten en te analyseren. De golfhoogtemeters zijn op een onderlinge afstand in de goot geplaatst die afhankelijk is van de golflengte: op 90,0 m, 97,5 m en 100,0 m van het golfshot.

Om ook te kunnen vaststellen of er op een lager niveau een steen uitgeslagen was, is onderaan de testsectie (bij E in figuur 1, aan de halzijde) een echolood op een van de zijwanden van de goot geplaatst samen met een stalen rooster van betonijzer. Het rooster met een maaswijdte van 10 cm had een hoogte van 40 cm (zie figuur 2.1). Het echolood “keek” vlak voor het rooster langs naar de gootwand aan de overzijde. Als er een steen van het talud tegen het rooster zou rollen, dan kon dit op een display bij de waarnemer worden afgelezen. De werking is voor aanvang van de proeven getest en bleek goed te werken. Controleberekeningen naar het energieverlies door het rooster toonden aan dat het rooster de golven niet zouden beïnvloeden.



Figuur 2.1, Echolood en stalen rooster

Verder is op gezette tijden de waterstand verlaagd om eventuele schade visueel vast te stellen. Bij die gelegenheden zijn ook 20 gemerkte punten op het talud, die in het vorige onderzoek ook zijn gemonitord, nauwkeurig ingemeten. De gemerkte stenen (met een schroef en gele verf) lagen in het meest kritische gebied van het talud verdeeld over vier raaien langs het talud. Raai 1 lag op ca. 1 m van de gootwand aan de bouwhalzijde (linker zijde) en raai 4 op ca. 1 m van de gootwand aan de zijde van de meetcabine. De raaien 2 en

3 lagen hier op gelijke afstanden tussenin. De bovenkant van de raaien waren gemarkeerd met een bout in de beton boven de meetsectie. Deze bout was het vaste punt om de afstand tot de schroef op de stenen te meten en de schroef was het vaste punt voor het plaatsen van de baak voor het waterpassen. Op deze wijze kon op betrouwbare wijze worden nagegaan of er ook vervorming van de steenzetting optrad als gevolg van verplaatsing van het filtermateriaal.

2.3 Locaties van kunstmatige initiële schade

Om inzicht te krijgen in de reststerkte van de constructie nadat er een gat in de bekleding is geslagen, is er handmatig initiële schade aangebracht door op twee plaatsen een Basaltonzuil uit de steenzetting te halen (zie figuur 4).

Gezien het feit dat de interesse vooral uitgaat naar de beginnende schade-ontwikkeling totdat er een gat in de toplaag is van slechts 5 à 10 m², kan er op twee plaatsen initiële schade gemaakt worden door er een zuil uit te halen. Dit biedt de mogelijkheid om de schade-ontwikkeling als functie van het niveau ten opzichte van de stilwaterlijn te zien. De goot is wat te smal om op twee plaatsen op hetzelfde niveau de initiële schade aan te brengen, zodat helaas geen inzicht verkregen wordt in de spreiding van het resultaat.

Vooraf werd verwacht dat tijdens de proeven eerst het filter gaat uitspoelen totdat er een groot oppervlak ondermijnd is, en vervolgens zou dat ondermijnde stuk steenzetting instorten. Aan de hand van de resultaten van het modelonderzoek van de Vroeg (1992) is een schatting gemaakt van de snelheid en de omvang van de erosie van het filter (zie ook hoofdstuk 4). Op basis van deze schattingen is de ideale locatie van de initiële schade gekozen.

De gaten liggen op verschillende waterdiepten en in breedterichting van de goot versprongen ten opzichte van elkaar. Op deze wijze kon de eventuele ontwikkeling van de gaten zolang mogelijk worden gevolgd zonder dat ze elkaar zouden beïnvloeden. De gaten waren op een afstand van ca. 2,5 m langs het talud gemeten onder elkaar aangebracht (zie figuur 2). Het bovenste gat lag op ca. 1,45 m uit de gootwand aan de zijde van de meetcabine op een niveau van 4,28 m boven de gootbodem (SWL-0,52 m) en de ander op ca. 3,45 m van de gootwand aan de meetcabinezijde op een niveau van 3,58 m boven de gootbodem (SWL-1,22 m). Het bovenste gat zat aan de zijde van de stenen waarin in het vorige onderzoek drukopnemers hadden gezeten. Om te voorkomen dat deze stenen uit het talud werden geslagen, zijn ze vastgezet met strips (zie figuur 4). Daar waar deze strips de ontwikkeling van schade zou kunnen beïnvloeden, zijn de strips verwijderd en de stenen met bussen voor de drukopnemers verzwaard met lood.

Toen de schadeontwikkeling rond deze gaten na 1,5 uur golven bleek mee te vallen, is er op een lager niveau onder het bovenste gat nog een derde Basaltonzuil verwijderd op een locatie 1,82 m uit de gootwand aan de zijde van de meetcabine op een niveau van 3,00 m boven de gootbodem (SWL-1,80 m). Na 3 uur golven zonder relevante schadeontwikkeling rond de gaten is besloten om de gaten te vergroten door een extra Basaltonzuil weg te halen. Bij het bovenste en onderste gat is de aangrenzende steen boven het gat weggehaald en bij het middelste gat de steen eronder (zie figuur 9 en 10).

2.4 Proevenprogramma

Deze serie reststerkteproeven is uitgevoerd met golfcondities gelijk aan die bij basalt (Eysink en Klein Breteler, 2003) geleid heeft tot schade, namelijk proef 6 ($H_s = 1,5$ en $\xi_{op} = 1,9$). De waterstand in de goot is steeds op 4,80 m gehouden.

De proeven zijn uitgevoerd met een Pierson Moskowitz spectrum (zie figuur 13).

De proeven zijn gestart met twee gaten ter grootte van één zuil; één op ca. 0,52 m onder stilwaterniveau (gat 1) en één op ca. 1,22 m onder stilwaterniveau (gat 2), zie figuur 2. Na elke proef is de waterstand verlaagd en is de schade geïnspecteerd.

Stap	Proefnr.	H_s (m)	T_p (s)	Waterstand (m+gootbodem)	aantal golven	Golfduur (h)
1	P501	1,47	7,07	4,80	340	0,5
2	P1001	1,53	6,66	4,79	696	1,0
3	P1501	1,53	6,58	4,79	1068	1,5
4	P2001	1,53	6,62	4,80	1467	2,0
Totaal						5,0

Tabel 2.1 Proevenprogramma reststerkteproef

Toen na proef P1001 bleek dat de schadeontwikkeling rond beide gaten slechts gering was, is er op een lager niveau een derde gat van één zuil bijgemaakt, i.e. op ca. 1,80 m onder stilwaterniveau (gat 3). Toen vervolgens de schade na proef 1501 nog steeds gering was, zijn alle drie de gaten groter gemaakt door per gat een extra zuil te verwijderen (zie figuur 9 en 10). Bij de gaten 1 en 3 is het aangrenzende zuil aan de bovenzijde weggehaald en bij gat 2 het aangrenzende zuil aan de onderzijde.

3 Resultaten

De metingen aan de gemerkte stenen zijn vermeld in de Tabellen 3.1 en 3.2. Met name Tabel 3.1 laat zien dat er tijdens de Reststerkteproef in het algemeen niet veel vervorming van de steenzetting is opgetreden. De laatste kolom geeft de grootste verzakking t.o.v. het begin. Alleen de punten 6, 7 en 8 in raai 2 laten in de laatste stap van de proef (P2001) zakkingen zien van 7 mm tot 10 mm. Deze punten liggen in de buurt van gat 2 in het talud. In de overige punten is dit in het algemeen 2 mm of minder.

		vooraf	na P0501	na P1001	na P1501	na P2001	maximaal
		24-08-04	25-08-04	25-08-04	26-08-04	27-08-04	verschil
Raai	Steen	m	m	m	m	m	mm
1	1	4.004	4.004	4.005	4.004	4.002	-2
	2	3.782	3.781	3.782	3.781	3.779	-3
	3	3.554	3.554	3.553	3.553	3.551	-3
	4	3.381	3.380	3.381	3.381	3.380	-1
	5	3.229	3.228	3.229	3.228	3.227	-2
2	6	3.963	3.962	3.963	3.961	3.956	-7
	7	3.759	3.761	3.761	3.759	3.749	-10
	8	3.542	3.541	3.542	3.541	3.533	-9
	9	3.414	3.413	3.414	3.413	3.412	-2
	10	3.235	3.234	3.236	3.234	3.233	-2
3	11	3.925	3.925	3.926	3.925	3.924	-1
	12	3.774	3.774	3.775	3.774	3.773	-1
	13	3.558	3.558	3.558	3.557	3.556	-2
	14	3.368	3.368	3.368	3.368	3.367	-1
	15	3.165	3.164	3.165	3.165	3.164	-1
4	16	3.976	3.976	3.977	3.976	3.975	-1
	17	3.759	3.759	3.759	3.758	3.758	-1
	18	3.553	3.552	3.553	3.552	3.551	-2
	19	3.366	3.366	3.366	3.366	3.365	-1
	20	3.166	3.165	3.165	3.165	3.165	-1

Tabel 3.1 Waterpassingen van gemerkte Basaltonstenen op het talud tijdens reststerkteproef

In tabel 3.2 is te zien dat de verschuiving van de zuilen (langs het talud) zeer gering was (slechts 0 à 2 mm).

Resultaat proef P0501

Visuele inspectie na proef P0501 liet zien dat er geen belangrijke uitspoeling bij de gaten had plaatsgevonden (zie figuur 5). De gaten waren half gevuld met inwasmateriaal en de spleten rond het gat waren in het algemeen redelijk gevuld. De steenzetting was nog niet ondermijnd geraakt, behalve bij het echolood (onderaan de testsectie, buiten het interessegebied).

		vooraf	na P0501	na P1001	na P1501	na P2001	maximaal
		24-08-04	25-08-04	25-08-04	26-08-04	27-08-04	verschil
Raai	Steen	m	m	m	m	m	mm
1	1	7.304	7.304	7.304	7.304	7.304	0
	2	8.100	8.100	8.100	8.100	8.100	0
	3	8.870	8.870	8.870	8.870	8.869	-1
	4	9.527	9.527	9.526	9.527	9.528	-1
	5	10.102	10.101	10.101	10.101	10.101	-1
2	6	7.430	7.430	7.430	7.431	7.432	2
	7	8.160	8.159	8.159	8.159	8.162	2
	8	8.903	8.903	8.904	8.903	8.904	0
	9	9.394	9.394	9.394	9.394	9.394	0
	10	10.076	10.075	10.075	10.076	10.076	-1
3	11	7.521	7.521	7.521	7.522	7.522	0
	12	8.083	8.083	8.083	8.084	8.083	0
	13	8.852	8.852	8.853	8.852	8.853	0
	14	9.548	9.548	9.548	9.548	9.548	0
	15	10.301	10.301	10.300	10.300	10.300	-1
4	16	7.324	7.325	7.325	7.325	7.325	1
	17	8.090	8.089	8.089	8.089	8.090	-1
	18	8.816	8.815	8.815	8.815	8.816	-1
	19	9.490	9.490	9.490	9.490	9.491	0
	20	10.273	10.273	10.273	10.272	10.273	-1

Tabel 3.2 Afstand gemerkte Basaltonstenen langs het talud tot een vast punt tijdens reststerkteproef

Resultaat proef P1001

Na proef P1001 waren de spleten langs de wand bij de bouwhal (links) bij het echolood over een oppervlak van ca. 1-1,5 m² tot op het filterdoek uitgespoeld. Daardoor waren een aantal zuilen volledig ondermijnd en werden niet meer ondersteund door het filter (hingen in de lucht). In figuur 3.1 is te zien dat de duimstok tot op het geotextiel in de bekleding verdwijnt. Verder is te zien dat de uitspoeling vrij lokaal is, want op de voorgrond zijn de spleten nog goed gevuld. Ook ter plaatse van de grote uitspoeling zijn niet alle spleten volledig leeg. Hier en daar zitten er nog steentjes goed geklemd tussen de zuilen. Er is verder ook geen verzakking van het taludoppervlak ontstaan.

Dit deel van het talud is wat minder relevant voor de huidige proeven, omdat de grootste belasting veel hoger op het talud plaatsvindt. Desondanks zijn deze constateringingen wel van belang voor de praktijk. Het komt namelijk voor dat op een dijktalud bijzondere constructies worden geplaatst, zoals masten en afrastering. Men kan dus verwachten dat op die lokaties het inwasmateriaal uitspoelt en de stabiliteit van de toplaag lager is dan elders.

De rest van het talud was nog onbeschadigd en ter plaatse van de kunstmatige gaten was er nog geen erosie opgetreden (zie figuur 6).



Figuur 3.1, uitspoeling van inwasmateriaal en filtermateriaal bij echolood

Resultaat proef P1501

Na proef P1501 met drie gaten werd de volgende schade waargenomen (zie figuur 7 en 8):

- De spleten rondom gat 1 (boven) waren half gevuld. Het gat was gemiddeld meer dan half gevuld met de kleinste diepte aan de onderzijde en er was geen zichtbare uitspoeling van filtermateriaal boven het gat.
- Aan de bovenzijde van gat 2 waren de spleten hier en daar tot onder de steen uitgespoeld. Het gat zelf was voor circa 25 – 50 % gevuld met inwasmateriaal.
- De spleten rondom gat 3 waren goed gevuld en het gat zelf was gemiddeld voor circa 75 % opgevuld met inwasmateriaal. Er was geen enkel teken van uitspoeling van filtermateriaal.
- Het uitspoelen van filtermateriaal bij het echolood had zich op het oog nog iets uitgebreid.

Resultaat proef P2001

Na het testen van de Basaltonbekleding met de drie verruimde gaten gedurende twee uur in de laatste fase van de reststerkteproef (proef P2001) bleek de volgende schade (zie figuur 11 en 12):

- Het inwas- en filtermateriaal lag aan de onderzijde van gat 1 circa 6 tot 9 cm onder de bovenkant van de stenen. Halverwege het verruimde gat lag het 13 tot 15 cm onder de bovenkant van de stenen. Aan de bovenzijde van het gat was het filter 24,5 tot 27 cm onder de bovenkant van de stenen uitgespoeld, dus 4,5 tot 7 cm onder de onderkant van de stenen. Rond de bovenzijde van het gat was filtermateriaal onder de aangrenzende Basaltonzuilen weggespoeld. In zijdelingse richting waren de zuilen tot een diepte van 10 tot 14 cm onderspoeld. Naar boven toe liep dit geleidelijk op tot 76 cm recht boven het gat in de steenzetting. In die richting waren dus circa 2,5 zuilen onderspoeld en

hingen geheel of gedeeltelijk vrij in de lucht ingeklemd tussen de overige zuilen van de steenzetting. Op het oog was er geen zichtbare verzakking te zien.

- In het tweede gat lag het inwasmateriaal circa 11 tot 16 cm onder de bovenkant van de Basaltonzuilen; overal in het gat lag het dus boven de onderzijde van de stenen. Er was geen teken van uitspoeling van filtermateriaal onder de stenen.
- In het onderste gat lag het inwasmateriaal 6 tot 11 cm onder de bovenkant van de stenen, dus ruim boven de onderkant. Ook hier was geen sprake van uitspoeling van filtermateriaal uit het gat of vanonder aangrenzende stenen.
- In de hoek van de steenbekleding bij het echolood was de uitspoeling van filtermateriaal nog wat uitgebreid. In een strook van circa 1,75 m breed en 2 m lang was het filtermateriaal grotendeels geheel weg tot op het filterdoek (32 cm onder de bovenkant van de stenen), terwijl er aan de andere zijde van de goot geen sprake was van zichtbare schade of uitspoeling. Deze uitspoeling is duidelijk het gevolg van de versturende werking van het echolood. Dit object verstoort de stroming onder de golven en zorgt voor extra turbulentie, die kennelijk extra uitspoeling veroorzaakt.

Tijdens de proeven is geconstateerd dat er veel inwasmateriaal over het talud heen en weer scharrelt. Op plaatsen waar het inwasmateriaal tijdens de ene golf uitspoelt komt het tijdens een andere golf weer terug in die spleet. Dit dynamische proces kan ertoe bijgedragen hebben dat het inwasmateriaal zich in de gaten is gaan afzetten, waarbij het soms uitspoelt en later er weer in terechtkomt. Hierdoor zal het uitspoelen van het filter sterk gehinderd zijn. Pas als het gat is vergroot, zijn de hydraulische krachten van de golven onderin het gat zo groot dat de erosie de overhand begint te krijgen.

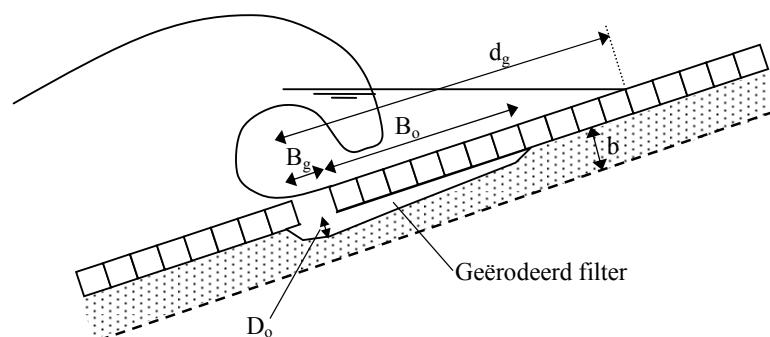
4 Analyse van de resultaten

4.1 Verwachting op basis van eerder onderzoek

Op grond van ervaringen uit het verleden werd verwacht dat een gat in de toplaag tot gevolg zou hebben dat het filter gaat uitspoelen en er een ondermijning van de toplaag zou plaatsvinden (zie figuur 4.1). Uiteindelijk is dat alleen gebeurt bij gat 1, maar pas na langdurige golfaanval en nadat het gat kunstmatig was vergroot.

In het verleden is een aantal malen onderzoek verricht naar de reststerkte van steenzettingen:

- Klein Breteler (1991). In deze oriënterende bureaustudie is de kennis van dat moment gebundeld. Het betreft enkele praktijkschades en de resultaten van enkele Deltagootproeven. Dit onderzoek leidde tot de conclusie dat een goed geklemde steenzetting eerst ondermijnd wordt (uitspoeling van filter door het gat in de toplaag) waarna het ondermijnde oppervlak instort onder het geweld van de golfklappen. Op basis van de beperkte informatie is geconcludeerd dat het instorten optreedt als een oppervlak met diameter van ca 3 m is ondermijnd.
- De Vroeg (1992). Na de oriënterende bureaustudie is er een kleinschalig modelonderzoek uitgevoerd in de Scheldebak van WL. In dit onderzoek is de toplaag weergegeven als een doorzichtige perspex plaat met gaatjes, zodat de toplaagdoorlatendheid overeenkwam met een steenzetting. In de toplaag waren gaten met verschillende afmetingen en verschillende hoogte t.o.v. de stilwaterlijn aangebracht. Vervolgens zijn proeven uitgevoerd met loodrecht invallende golven en scheef invallende golven. Dit heeft geleid tot formules waarmee de ondermijning als functie van de tijd kan worden berekend, gegeven de geometrie en de golfcondities.



Figuur 4.1, schematische weergave van de ondermijning van de toplaag als gevolg van uitspoeling van het filter

Het modelonderzoek van de Vroeg (1992) heeft geleid tot de volgende formules waarmee de ondermijning kan worden gekwantificeerd:

- Ongeveer loodrecht invallende golven ($\beta < 20^\circ$):

- Als $H_s/(B_g\sqrt{s_{op}}) > 3$:

$$\frac{B_o}{B_g} = 0,49N^{0,14} + (0,16 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot N) \cdot \left(\frac{H_s}{B_g\sqrt{s_{op}}} - 3 \right) \cdot \exp \left(-0,08\sqrt{N} \cdot \left(\frac{d_g\sqrt{s_{op}}}{H_s} + 0,39 \right)^2 \right) \quad (4.1)$$

- Als $H_s/(B_g\sqrt{s_{op}}) \leq 3$:

$$\frac{B_o}{B_g} = 0,28N^{0,14} \cdot \sqrt{\frac{H_s}{B_g\sqrt{s_{op}}}} \quad (4.2)$$

- Scheef invallende golven ($\beta \geq 20^\circ$):

- Als $H_s/(B_g\sqrt{s_{op}}) > 3$:

$$\frac{B_o}{B_g} = 0,49N^{0,14} + (0,28 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot N) \cdot \left(\frac{H_s}{B_g\sqrt{s_{op}}} - 3 \right) \cdot \exp \left(-22 \cdot \left(\frac{d_g\sqrt{s_{op}}}{H_s} + 0,39 \right)^2 \right) \quad (4.3)$$

- Als $H_s/(B_g\sqrt{s_{op}}) \leq 3$:

$$\frac{B_o}{B_g} = 0,28N^{0,14} \cdot \sqrt{\frac{H_s}{B_g\sqrt{s_{op}}}} \quad (4.4)$$

Met:

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

T_p = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

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

β = invalshoek van de golven (loodrechte: $\beta = 0^\circ$)

N = aantal golven (-)

B_o = ondermijningsdiameter van de toplaag (zie figuur 4.1) (m)

B_g = gatgrootte in de toplaag (m)

D_o = maximale erosiediepte van het filter (m)

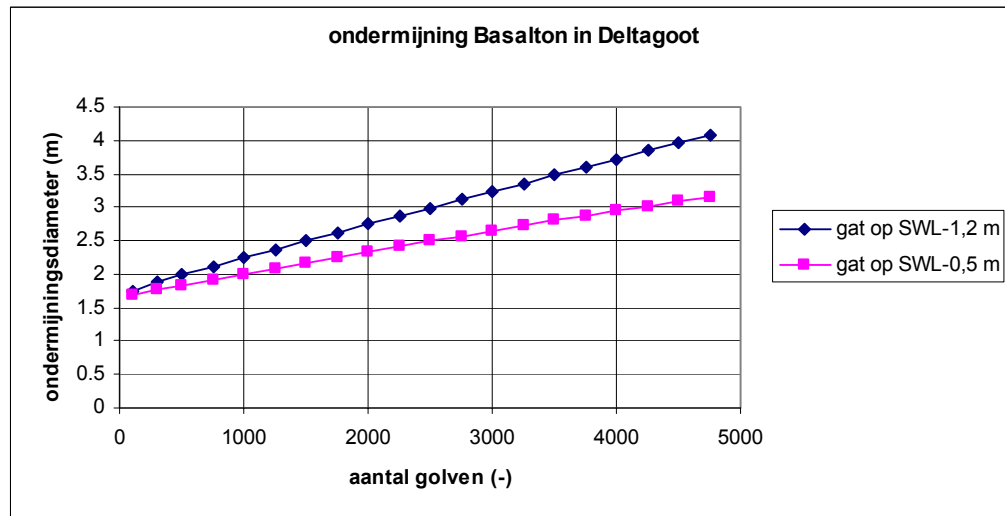
d_g = plaats van de onderzijde van het gat in de toplaag, langs het talud gemeten, ten opzichte van de stilwaterlijn (onder water: negatief) (m)

b = dikte van het filter (m)

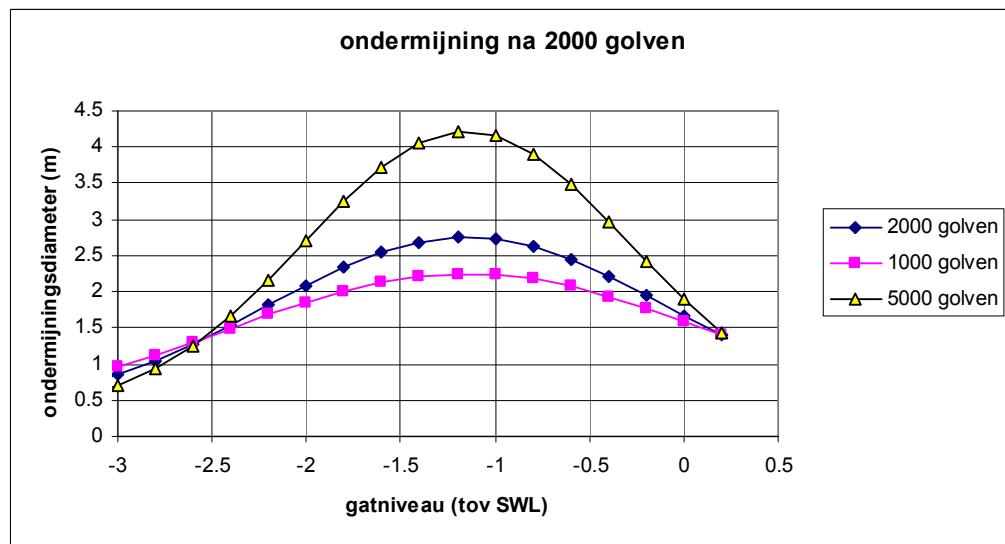
De erosiediepte kan volgens de Vroeg (1992) berekend worden met: $D_o = 0,135 \cdot (B_g + B_o)$. Het proces van ondermijning verloopt volgens deze formules bij scheve golfaanval sneller dan bij loodrechte golfaanval.

Het toepassen van deze formules op de situatie van het huidige modelonderzoek leidt tot resultaten die zijn weergegeven in figuur 4.2 en 4.3. In figuur 4.2 is de grootte van de ondermijning te zien als functie van het aantal golven en de locatie van het gat in de steenzetting. Gezien het feit dat de gemiddelde golfperiode ongeveer 6 s was, komen 1000 golven overeen met 1,7 uur en 2000 golven met 3,3 uur.

De invloed van de locatie van het gat t.o.v. de stilwaterlijn is nader weergegeven in figuur 4.3. Volgens de formule gaat de ondermijning van de steenzetting op een diepte van 1,2 m onder de waterlijn het snelst.



Figuur 4.2, grootte van de ondermijning als functie van de belastingduur

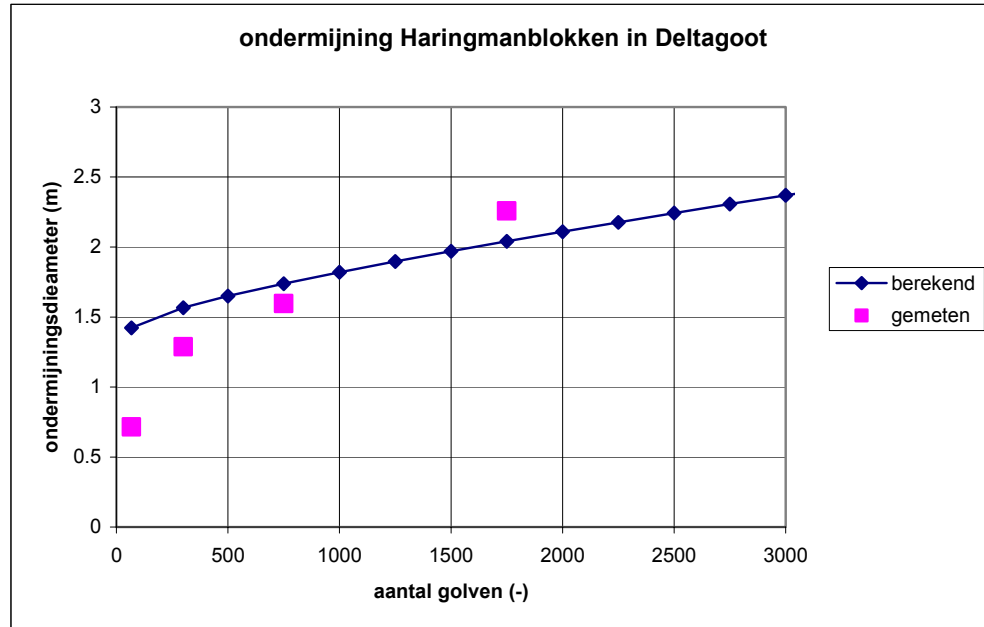


Figuur 4.3, grootte van de ondermijning als functie van de locatie van het gat t.o.v. de stilwaterlijn

Door Klein Breteler (1991) is een oud modelonderzoek uit 1984 met Haringmanblokken van $50 \times 50 \text{ cm}^2$ en een dikte van 20 cm beschreven. Het filter bestond uit een laag mijnsteen met daarop een uitvulling van 4 cm dik met $D_{f15} = 9 \text{ mm}$. Bij een golfhoogte $H_s = 1,43 \text{ m}$ ($\xi_{op} = 1,53$) was al na vijf minuten ($N \approx 70$) een ondermijning van 70 cm ontstaan, die daarna steeds verder uitgroeide. In figuur 4.4 is het verloop van de ondermijning als functie van het aantal golven gegeven en is tevens het verloop volgens de formules van de Vroeg getekend. Het blijkt dat de erosie in het begin iets minder snel gaat, maar later langer blijft toenemen. De orde van grootte van de ondermijning wordt door de formules wel goed voorspeld.

Ondanks het feit dat het modelonderzoek in de Deltagoot uit 1984 qua orde van grootte door de formules goed wordt voorspeld, blijken de huidige proeven een totaal ander beeld op te

leveren. Totaal 3 uur golven met gaten in de steenzetting met diameter $B_g \approx 0,25$ m leverde geen uitspoeling van het filter op. Nadat het gat vergroot was tot $B_g \approx 0,5$ m ontstond er enige uitspoeling ter plaatse van gat 1 op 0,5 m onder de waterlijn. Na twee uur golven was deze ondermijning gevorderd tot $B_o = 0,76$ m (langs het talud gemeten).



Figuur 4.4, gemeten en berekende ondermijning (Klein Breteler 1991)

4.2 Analyse van de huidige proefresultaten

De resultaten van de huidige serie proeven is beschreven in hoofdstuk 3. Het valt daarbij direct op dat de verwachte erosie en ondermijning nauwelijks is opgetreden.

In figuur 4.2 is te zien dat de ondermijning volgens de formules veel sneller gaat dan is gemeten en uit figuur 4.3 blijkt dat gat 2 een grotere ondermijning had moeten geven dan gat 1, terwijl dat tijdens de proef 2001 net andersom was.

Het grote verschil tussen de resultaten van het huidige onderzoek en de formule van de Vroeg (1992) doet vermoeden dat de huidige proeven zijn uitgevoerd buiten het geldigheidsgebied van die proeven. Om dat nader te inventariseren, zijn alle relevante eigenschappen van de constructie en de golfcondities van de diverse onderzoeken samengebracht in tabel 1 (zie bijlage A). In die tabel zijn tevens een aantal dimensieloze grootheden weergegeven, waaruit blijkt dat H_s/D_{f50} tijdens de proeven op Haringmanblokken bijzonder groot was, net als B_o/D_g . Verder is in het huidige onderzoek de verhouding D_g/D_{f50} juist bijzonder klein.

Hieruit blijkt dat de huidige proeven, maar ook die met de Haringmanblokken, op bepaalde aspecten buiten de range liggen van de proeven van de Vroeg (1992).

Vanwege de geringe erosie uit de gaten in de bekleding is het ook zinvol om te kijken naar de resultaten van het onderzoek naar erosie van steenslag en zand uit gaten in de toplaag, dat in 1987 is uitgevoerd. Dat onderzoek mondde uit in verschillende formules waarmee de

erosiediepte in de gaten kan worden berekend. De voor het huidige onderzoek meeste relevante formule betreft die voor grote gaten ($D_g > 0,1$ m) (Bezuijen e.a., 1990, blz. 122):

$$\frac{Y}{B_g} = 0,23 \left(\frac{H_s}{D_{f50}} \right)^{1/3} \quad (4.5)$$

Met:

- Y = erosiediepte van de steenslag in gaten in de toplaag (m)
- B_g = breedte van het gat (m)
- D_{f50} = korrelgrootte van de gatvulling (m)

Deze formule is geldig zolang $Y < D$.

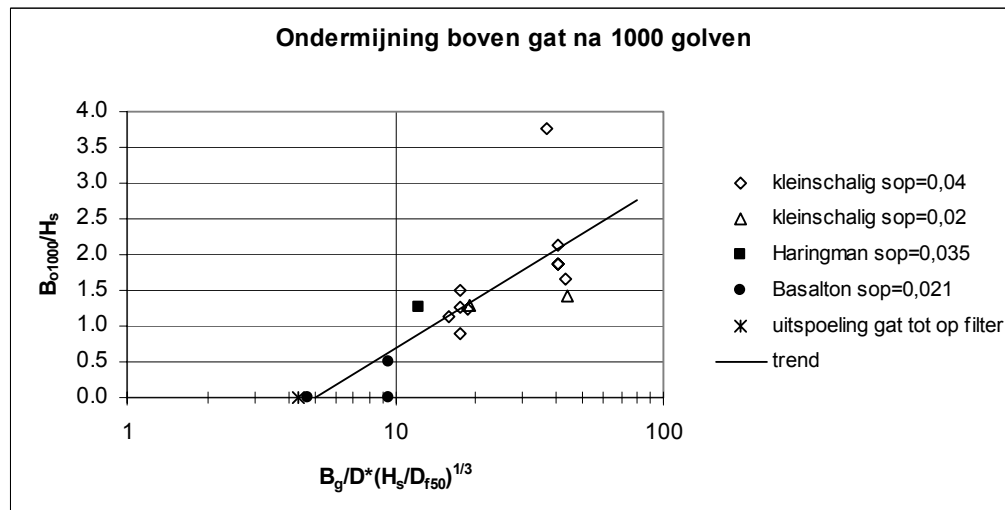
Deze formule geeft een veel eenvoudiger relatie voor de erosie dan de formules van de Vroeg (1992). De duur van de belasting en de diepte van het gat onder water ontbreken echter. Het voordeel van deze formule is verder dat ook de korrelgrootte in de formule voorkomt.

De formule drukt ook uit hoe groot het ‘erosievermogen’ van de golven is ten opzichte van de gatgeometrie. In feite geldt dat als $Y < D$, de erosie niet tot in het filter zal doordringen en dan zal er dus ook geen ondermijning optreden. Als echter $Y \gg D$, dan is het erosievermogen zo groot dat er ook een aanzienlijke ondermijning te verwachten is.

Voortbordurend op deze gedachtegang wordt aangenomen dat de volgende parameter belangrijk is voor het beschrijven van de grootte van de ondermijning:

$$\frac{B_g}{D} \left(\frac{H_s}{D_{f50}} \right)^{1/3} \quad (4.6)$$

Naarmate deze parameter groter is, is er een grotere ondermijning te verwachten. Om deze hypothese te controleren zijn de beschikbare metingen voor een belastingduur van 1000 golven in figuur 4.5 uitgezet tegen deze parameter. Op de verticale as is gekozen voor de dimensieloze ondermijning B_{o1000}/H_s .



Figuur 4.5, ondermijning na 1000 golven (sop = golfsteilheid) bij loodrechte golfaanval

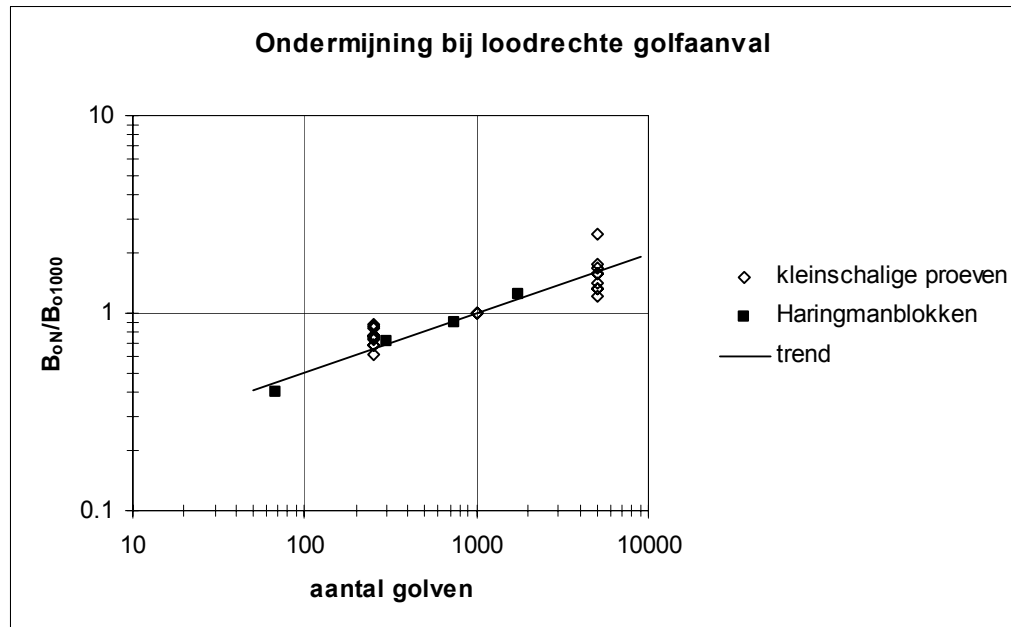
Uit de figuur blijkt dat vrijwel alle metingen nu redelijk dicht bij een duidelijke trend liggen, op één uitschieter na. In deze figuur is verder met een sterretje aangegeven wanneer volgens formule (4.5) de erosiediepte gelijk is aan de toplaagdikte. Bij een grotere belasting kan men verwachten dat er ondermijning gaat optreden, en bij een kleinere belasting zou er geen ondermijning moeten zijn omdat de verwachte erosiediepte minder dan de toplaagdikte is.

De trend in figuur 4.5 wordt weergegeven door de volgende formule:

$$\frac{B_{o1000}}{H_s} = -1,6 + 2,3 \cdot \log \left(\frac{B_g}{D} \left(\frac{H_s}{D_{f50}} \right)^{1/3} \right) \quad (4.7)$$

De invloed van het aantal golven is te zien in figuur 4.6. In deze figuur is op de verticale as de ondermijning na N golven gedeeld door de ondermijning na 1000 golven weergegeven. Het blijkt dat de invloed van het aantal golven in het kleinschalige onderzoek van de Vroeg (1992) iets kleiner is dan die in het grootschalige onderzoek met Haringmanblokken. Voorlopig wordt de trend vooral ontleend aan de resultaten uit het grootschalige onderzoek:

$$\frac{B_{oN}}{B_{o1000}} = 0,13N^{0,3} \quad (4.8)$$



Figuur 4.6, grootte van de ondermijning als functie van het aantal golven bij loodrechte golfaanval

In de formules van de Vroeg (1992) is een term opgenomen die de invloed van de lokatie van het gat ten opzichte van stilwaterlijn weergeeft. In de meeste gevallen is het gat in de toplaag kleiner dan 1 à 2 m en zal $H_s/(B_g \sqrt{s_{op}}) > 3$, en is dus de laatste term uit formule (4.1) nodig met $N = 1000$:

$$\exp \left(-2,5 \cdot \left(\frac{d_g \sqrt{s_{op}}}{H_s} + 0,39 \right)^2 \right) \quad (4.9)$$

Tijdens de proeven met de Haringmanblokken was $d_g \sqrt{s_{op}}/H_s = -0,20$, zodat deze term toen 0,91 was. Tijdens de huidige proeven was $d_g \sqrt{s_{op}}/H_s = -0,17$ en $-0,41$ zodat dit in formule

(4.9) respectievelijk 0,88 en 1,00 opleverde. Gezien het feit dat formule (4.7) vooral is afgestemd op de proeven uit de Deltagoot, en we formule (4.9) daaraan willen toevoegen, wordt formule (4.9) als volgt genormeerd:

$$\frac{1}{(0,91+0,88+1,00)/3} \exp\left(-2,5 \cdot \left(\frac{d_g \sqrt{s_{op}}}{H_s} + 0,39\right)^2\right) \quad (4.10)$$

Tenslotte kunnen formule (4.7), (4.8) en (4.10) gecombineerd worden:

$$\frac{B_o}{H_s} = 0,14N^{0,3} \left(-1,6 + 2,3 \cdot \log\left(\frac{B_g}{D} \left(\frac{H_s}{D_{f50}}\right)^{1/3}\right) \right) \exp\left(-2,5 \cdot \left(\frac{d_g \sqrt{s_{op}}}{H_s} + 0,39\right)^2\right) \quad (4.11)$$

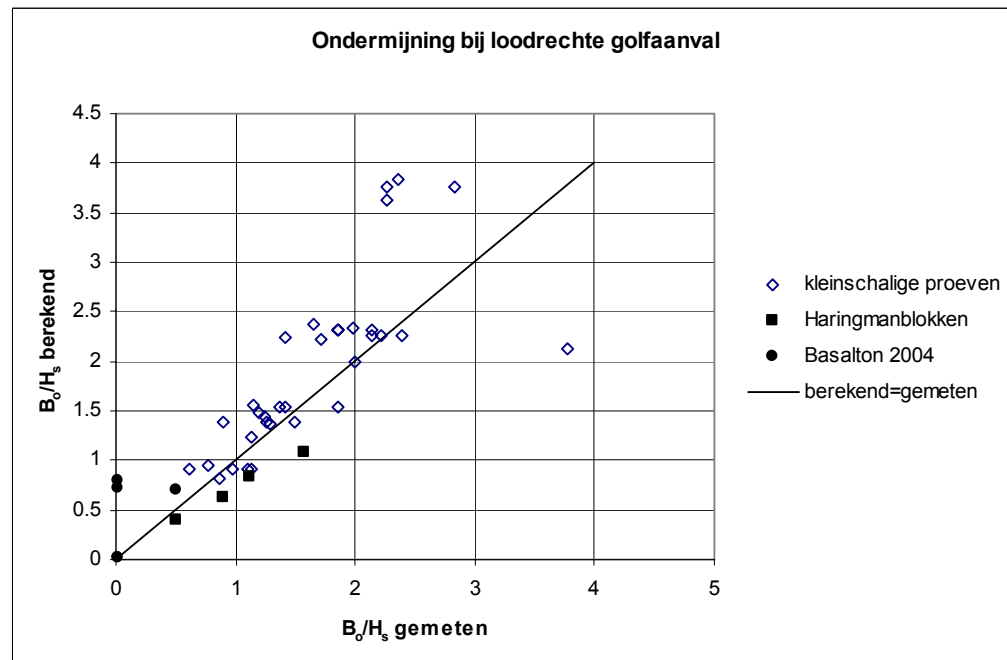
(als $B_o < 0$, dan is er geen ondermijning te verwachten)

Deze gecombineerde formule geeft de invloed van de gatgeometrie ten opzichte van de korrelgrootte van het filter en golfcondities, het aantal golven en de lokatie van het gat ten opzichte van de stilwaterlijn (langs het talud gemeten). De formule is geldig voor loodrechte golfaanval en vervangt formule (4.1) van de Vroeg (1992).

Als d_g (afstand van het gat ten opzichte van stilwaterlijn, langs het talud gemeten) vervangen wordt door $z_g/\tan\alpha$ (met z_g = niveau van de onderzijde van het gat ten opzichte van de stilwaterlijn, verticaal gemeten) wordt de formule (uitsluitend voor loodrechte golfaanval):

$$\frac{B_o}{H_s} = 0,14N^{0,3} \left(-1,6 + 2,3 \cdot \log\left(\frac{B_g}{D} \left(\frac{H_s}{D_{f50}}\right)^{1/3}\right) \right) \exp\left(-2,5 \cdot \left(\frac{z_g}{\xi_{op} H_s} + 0,4\right)^2\right) \quad (4.12)$$

(als $B_o < 0$, dan is er geen ondermijning te verwachten)



Figuur 4.7, verhouding tussen gemeten en met formule (4.12) berekende ondermijning

In figuur 4.7 in zijn de resultaten volgens formule (4.12) vergeleken met de metingen. Uit deze figuur blijkt dat de formule vrij redelijk voldoet voor loodrechte golfaanval.

Tijdens de proeven van de Vroeg (1992) bleek dat scheve golfaanval een snellere erosie veroorzaakte dan loodrechte golfaanval. Het is denkbaar dat dit veroorzaakt wordt doordat bij loodrechte golfaanval een deel van het uitspoelende filtermateriaal later toch weer terug kan komen in het gat, terwijl dat bij scheef invallende golven niet kan.

Door Klein Breteler (1991) is ook gekeken naar het erosieproces van filtermateriaal als de hele steenzetting is verwijderd. Uit die analyse bleek dat de snelheid van het erosieproces afhankelijk is van de taludhelling. De laagste erosiesnelheid wordt verkregen bij een talud van 1:4 à 1:4,5. Een steiler talud of een flauwer talud geeft een beduidend hogere erosiesnelheid. In dit opzicht is het talud van de huidige proeven redelijk gunstig, maar niet optimaal. Desondanks zou het optimum bij een steenzetting met een gat in de top laag bij een iets andere taludhelling kunnen liggen, waarbij het niet uitgesloten is dat een talud van 1:3,5 voor die situatie wel optimaal is.

Uit het bovenstaande blijkt dat het bijzonder gunstige resultaat van deze reststerkteproeven geen universele geldigheid heeft. Belangrijk is het feit dat de golfaanval loodrecht op het talud aankwam, de parameter $B_g/D \cdot (H_s/D_{f50})^{1/3}$ een vrij lage waarde had, de taludhelling 1:3,5 was en de om het gat liggende zuilen goed vast bleven zitten.

Met bovenstaande formule kan ook een formule afgeleid worden voor de reststerkte van de top laag. Hiervoor wordt aangenomen dat de top laag instort als er een ondermijning van 3 m is ontstaan en daarna vrij snel faalt. Verder is uitgegaan van een gat in de top laag op een ongunstige lokatie ($z_g/H_s/\xi_{op} = 0,4$) Dit leidt tot het volgende resultaat (uitsluitend voor loodrechte golfaanval):

$$t_r = 25 \cdot 10^3 T_p H_s^{3,3} \left(-1,6 + 2,3 \cdot \log \left(\frac{B_g H_s^{1/3}}{D D_{f50}^{1/3}} \right) \right)^{3,3}$$

met:

t_r = reststerkte na het ontstaan van een gat in de top laag met breedte van B_g (s)

Bij basalt en Basalton zou men kunnen rekenen met een initiële gatgrootte ter grootte van twee zuilen, dus $B_g \approx 0,5$ m.

De basis voor deze formule, namelijk de aanname dat instorting van de top laag ontstaat als er een ondermijning van 3 m is ontstaan, is nogal zwak. Hierover is vrijwel geen informatie beschikbaar. Gecombineerd met het relatief geringe aantal waarnemingen waar de formule op gebaseerd is, maakt dat deze formule slechts gebruikt kan worden voor het verkrijgen van een ruwe schatting van de orde van grootte van de reststerkte.

5 Conclusies

De aanwezigheid van een steenzetting van Basalton op een talud van 1:3,5 in de Deltagoot gaf de gelegenheid om een korte proevenserie uit te voeren waarbij gekeken is naar de consequenties van initiële schade aan de steenzetting. Het gaat daarbij om de duur tussen het begin van schade (één zuil uit de bekleding), die hier kunstmatig is aangebracht, en het moment dat de steenzetting instort en over een groot oppervlak de ondergrond bloot komt. Deze duur wordt reststerkte genoemd.

Tijdens de eerste en tweede proef met twee kunstmatig gemaakte gaten, elk ter grootte van één Basaltonzuil, werd geen zichtbare uitspoeling rond de gaten waargenomen en werd de functionaliteit van de steenbekleding niet aangetast. Dit beeld geldt ook voor de derde proef met drie aangebrachte gaten. Pas na het testen van het talud met de drie vergrote gaten, elk ter grootte van twee stenen boven elkaar, werd er na twee uur golven uitspoeling van filtermateriaal en ondermijning van aangrenzende stenen bij het bovenste gat waargenomen. De ondermijning liep tot circa een halve zuil opzij tot circa 2,5 zuil naar boven ($B_o = 0,76$ m). De ondermijnde Basaltonzuilen bleven door gewelfwerking op hun plaats geklemd en vertoonden geen zichtbare zakking. Dit gebeurde alleen bij het bovenste gat (SWL-0,52 m). Van bezwijken van de steenzetting was echter nog geen sprake.

De grootste uitspoeling van filtermateriaal (tot op het filterdoek) vond plaats in een klein gebied bij het echolood tegen de gootwand aan de bouwhalzijde. Aan het eind van de totale reststerkteproef had dit gebied zich geleidelijk uitgebreid tot een strook van 1,75 m breed en circa 2 m lang. In dit gebied waren meerdere zuilen ondermijnd en hingen vrij in de lucht. Er was geen sprake van zichtbare verzakking. Deze uitspoeling trad niet op bij de andere zijde van de goot en is dus vermoedelijk een modeffect veroorzaakt door het echolood. Dit deel van het talud is wat minder relevant voor de huidige proeven, omdat de grootste belasting veel hoger op het talud plaatsvindt. Desondanks zijn deze constatering wel van belang voor de praktijk. Het komt namelijk voor dat op een dijktalud bijzondere constructies worden geplaatst, zoals masten en afrastering. Men kan dus verwachten dat op die lokaties het inwasmateriaal uitspoelt en de stabiliteit van de toplaag lager is dan elders.

Op basis van de huidige metingen, en de relevante metingen uit het verleden, is een trend geïdentificeerd in de mate van ondermijning als functie van de geometrie van de constructie en het gat, en de grootte en duur van de golfbelasting bij loodrechte golfaanval. Er is daarbij gebruikgemaakt van een parameter die in de 80-er jaren is bedacht voor het voorspellen van erosie van inwasmateriaal uit gaten in de toplaag (Bezuijen e.a., 1990).

De analyse heeft tot de volgende formule geleid, waarmee de grootte van de ondermijning geschat kan worden (uitsluitend voor loodrechte golfaanval):

$$\frac{B_o}{H_s} = 0,14N^{0,3} \left(-1,6 + 2,3 \cdot \log \left(\frac{B_g}{D} \left(\frac{H_s}{D_{f50}} \right)^{1/3} \right) \right) \exp \left(-2,5 \cdot \left(\frac{z_g}{\xi_{op} H_s} + 0,4 \right)^2 \right)$$

(als $B_o < 0$, dan is er geen ondermijning te verwachten) (5.1)

met:

- B_o = ondermijningsdiameter van de toplaag (zie figuur 4.1) (m)
 H_s = significante golfhoogte bij de teen van het talud (m)
 T_p = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
 ξ_{op} = brekerparameter = $\tan\alpha/\sqrt{(H_s/(1,56T_p^2))}$ (-)
 N = aantal golven (-)
 B_g = gatgrootte in de toplaag (breedte van het gat, haaks op de dijkas, langs het talud gemeten) (m)
 D = dikte van de toplaag (m)
 D_{f50} = korrelgrootte van het filter (m)
 z_g = niveau van de onderzijde van het gat in de toplaag, verticaal gemeten, ten opzichte van de stilwaterlijn (onder water: negatief) (m)

In figuur 4.7 in zijn de resultaten volgens formule (5.1) vergeleken met de metingen. Uit deze figuur blijkt dat de formule vrij redelijk voldoet voor loodrechte golfaanval.

Tijdens de proeven van de Vroeg (1992) bleek dat scheve golfaanval een snellere erosie veroorzaakte dan loodrechte golfaanval. Het is denkbaar dat dit veroorzaakt wordt doordat bij loodrechte golfaanval een deel van het uitspoelende filtermateriaal later toch weer terug kan komen in het gat, terwijl dat bij scheef invallende golven niet kan.

Uit de analyse is gebleken dat het bijzonder gunstige resultaat van de huidige reststerkteproeven geen universele geldigheid heeft. Belangrijk is het feit dat de golfaanval loodrecht op het talud aankwam, de parameter $B_g/D \cdot (H_s/D_{f50})^{1/3}$ een vrij lage waarde had, de taludhelling 1:3,5 was en de om het gat liggende zuilen goed vast bleven zitten.

Met bovenstaande formule kan ook een formule afgeleid worden voor de reststerkte van de toplaag, aannemende dat de toplaag instort als er een ondermijning van 3 m is ontstaan en daarna vrij snel faalt, dat het gat in de toplaag op een ongunstige lokatie zit, en er loodrechte golfaanval is:

$$t_r \approx 25 \cdot 10^3 T_p H_s^{-3,3} \left(-1,6 + 2,3 \cdot \log \left(\frac{B_g H_s^{1/3}}{D D_{f50}^{1/3}} \right) \right)^{-3,3} \quad (5.2)$$

met:

t_r = reststerkte na het ontstaan van een gat in de toplaag met breedte van B_g (s)

Bij basalt en Basalton zou men kunnen rekenen met een initiële gatgrootte ter grootte van twee zuilen, dus $B_g \approx 0,5$ m.

De basis voor deze formule, namelijk de aanname dat instorting van de toplaag ontstaat als er een ondermijning van 3 m is ontstaan, is nogal zwak. Hierover is vrijwel geen informatie beschikbaar. Gecombineerd met het relatief geringe aantal waarnemingen waar de formule op gebaseerd is, maakt dat deze formule slechts gebruikt kan worden voor het verkrijgen van een ruwe schatting van de orde van grootte van de reststerkte.

Referenties

Bezuijen, A. , A.M. Burger en M. Klein Breteler (1990)
Taludbekleding van gezette steen
Samenvatting van onderzoeksresultaten 1980-1988, deel XXIV
DWW, Delft, 1990, ISBN 90-9003232-0

Eysink en Klein Breteler (2003)
Deltagootonderzoek naar stabiliteit van basalt, onderzoeksprogramma kennisleemtes steenbekledingen;
Meetverslag fase 1 en 2
WL | Delft Hydraulics, verslag H4327, December 2003

Klein Breteler (1991)
Reststerkte van dijkbekledingen, oriënterende bureaustudie,
WL | Delft Hydraulics, H195 verslag deel I, juni 1991

Klein Breteler, M., e.a. (1992);
Taludbekledingen van gezette steen, stabiliteit van de toplaag, M1795 / H195 deel XX, band A,
WL / Delft Hydraulics, april 1992.

Meer, M. v.d., en Halter (2003)
Onderzoeksplan betreffende het oplossen van de witte vlekken voor het toetsen van steenbekledingen
Fugro, 28 april 2003

Vroeg, J.H. de (1992)
Reststerkte van dijkbekledingen; deel II: granulair filters
WL | Delft Hydraulics, H195, verslag modelonderzoek in Scheldebak, juli 1992

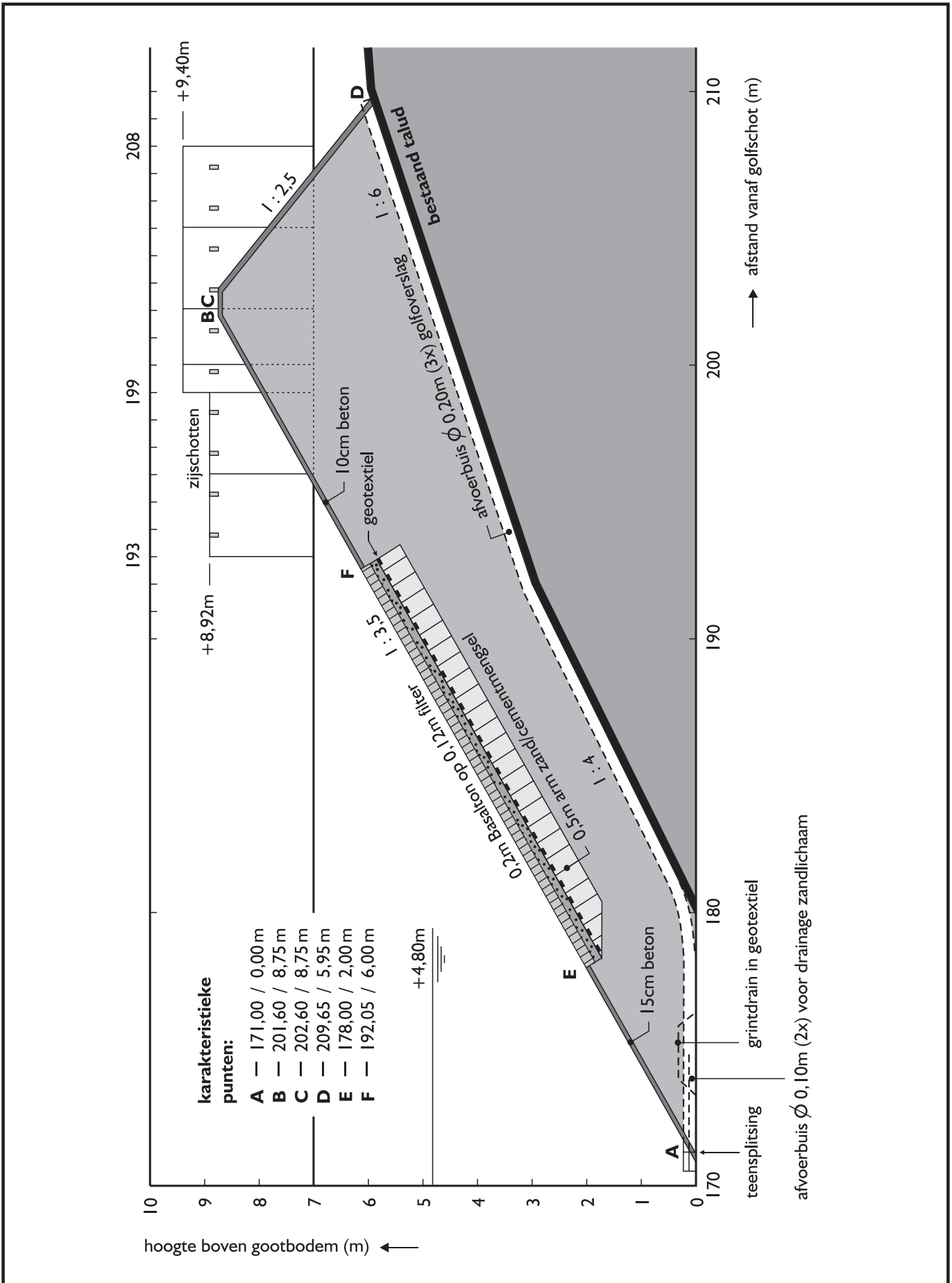
Waal, J.P. de, M. Klein Breteler, en H. den Adel (1995);
Taludbekledingen van gezette steen, golfdruk op het talud,
deel B: verbetering van het analytische model en Steenzet;
WL / Delft Hydraulics, verslag H195, December 1995

A Tabellen

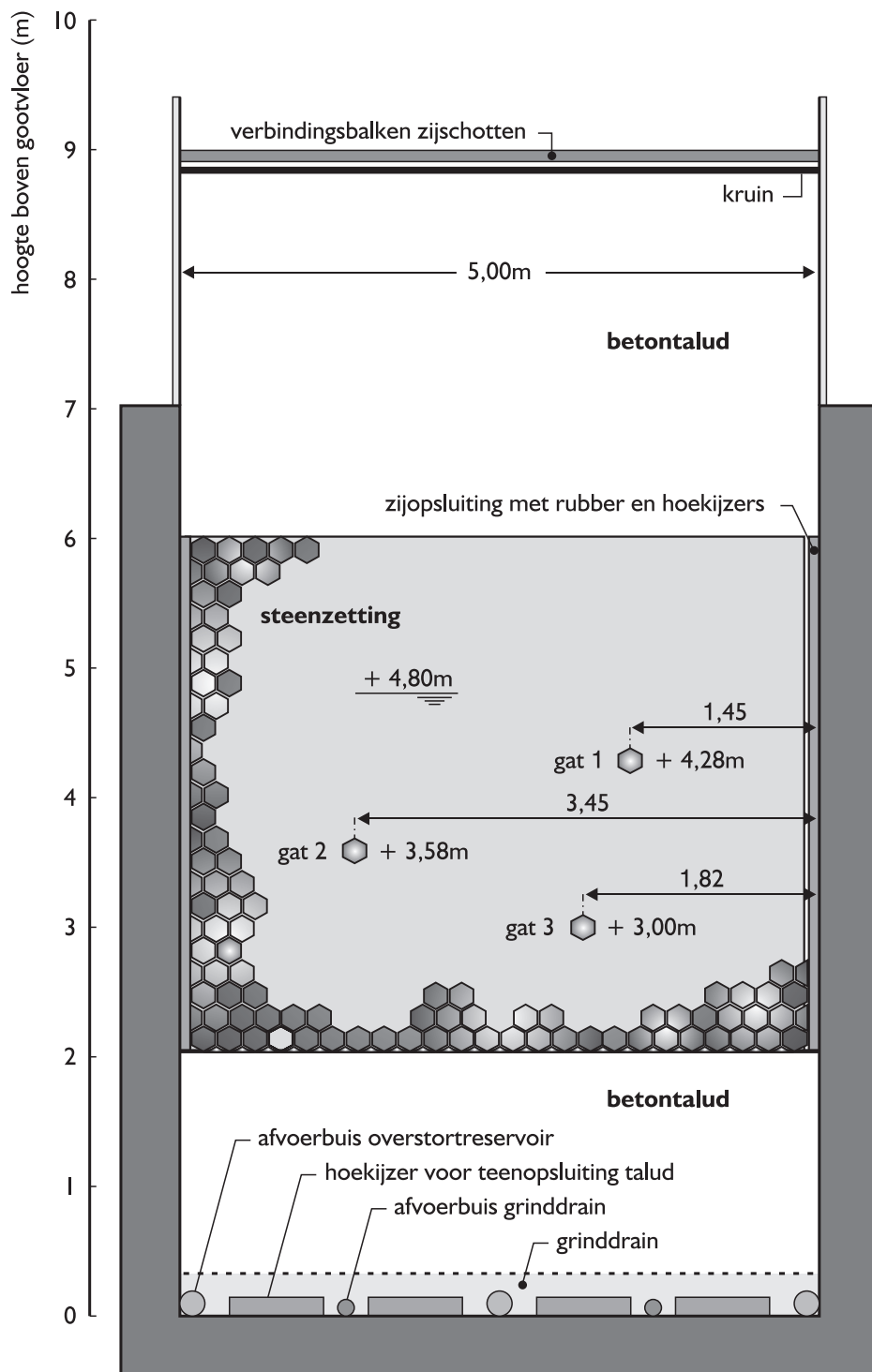
		proef	D (m)	T _p (s)	H _s (m)	B _g (m)	d _g (m)	D _{f50} (m)	s _{op} (-)	B _o (m)	B _g /D _{f50}	H _s /D _{f50}	B _o /D _g	$\frac{B_g}{D} \left(\frac{H_s}{D_{f50}} \right)^{1/3}$	B _o /H _s
de Vroeg (1992)	gat 1	2	0,025	1,55	0,15	0,10	-0.39	0,002	0,040	0,17	41,7	62,5	1,7	15,9	1,1
de Vroeg (1992)	gat 1	3	0,025	1,79	0,20	0,10	-0.39	0,002	0,040	0,25	41,7	83,3	2,5	17,5	1,3
de Vroeg (1992)	gat 1	4	0,025	1,96	0,24	0,10	-0.39	0,002	0,040	0,30	41,7	100,0	3,0	18,6	1,2
de Vroeg (1992)	gat 1	5	0,025	2,83	0,25	0,10	-0.39	0,002	0,020	0,32	41,7	104,2	3,2	18,8	1,3
de Vroeg (1992)	gat 1	6	0,025	1,79	0,20	0,10	-0.39	0,002	0,040	0,30	41,7	83,3	3,0	17,5	1,5
de Vroeg (1992)	gat 1	9	0,025	1,79	0,20	0,10	-0.39	0,002	0,040	0,18	41,7	83,3	1,8	17,5	0,9
de Vroeg (1992)	gat 4	2	0,025	1,55	0,15	0,30	-0.39	0,005	0,040	0,57	57,7	28,8	1,9	36,8	3,8
de Vroeg (1992)	gat 4	3	0,025	1,79	0,20	0,30	-0.39	0,005	0,040	0,43	57,7	38,5	1,4	40,5	2,1
de Vroeg (1992)	gat 4	4	0,025	1,96	0,24	0,30	-0.39	0,005	0,040	0,40	57,7	46,2	1,3	43,0	1,6
de Vroeg (1992)	gat 4	5	0,025	2,83	0,25	0,30	-0.39	0,005	0,020	0,36	57,7	48,1	1,2	43,6	1,4
de Vroeg (1992)	gat 4	6	0,025	1,79	0,20	0,30	-0.39	0,005	0,040	0,37	57,7	38,5	1,2	40,5	1,9
de Vroeg (1992)	gat 4	9	0,025	1,79	0,20	0,30	-0.39	0,005	0,040	0,37	57,7	38,5	1,2	40,5	1,9
Haringmanblokken			0,200	5,13	1,43	0,50	-1.50	0,012	0,035	1,80	41,7	119,2	3,6	12,3	1,3
Basalton (2004)	gat 1	1&2	0,200	6,80	1,50	0,25	-1.70	0,028	0,021	0,00	8,9	53,6	0,0	4,7	0,0
Basalton (2004)	gat 2	1&2	0,200	6,80	1,50	0,25	-4.15	0,028	0,021	0,00	8,9	53,6	0,0	4,7	0,0
Basalton (2004)	gat 1	4	0,200	6,62	1,53	0,50	-1.70	0,028	0,022	0,76	17,9	54,6	1,5	9,5	0,5
Basalton (2004)	gat 2	4	0,200	6,62	1,53	0,50	-4.15	0,028	0,022	0,76	17,9	54,6	0,0	9,5	0,0
Basalton (2004)	gat 3	4	0,200	6,62	1,53	0,50	-6.05	0,028	0,022	0,76	17,9	54,6	0,0	9,5	0,0

Tabel 1, resultaten van modelonderzoek

B **Figuren**



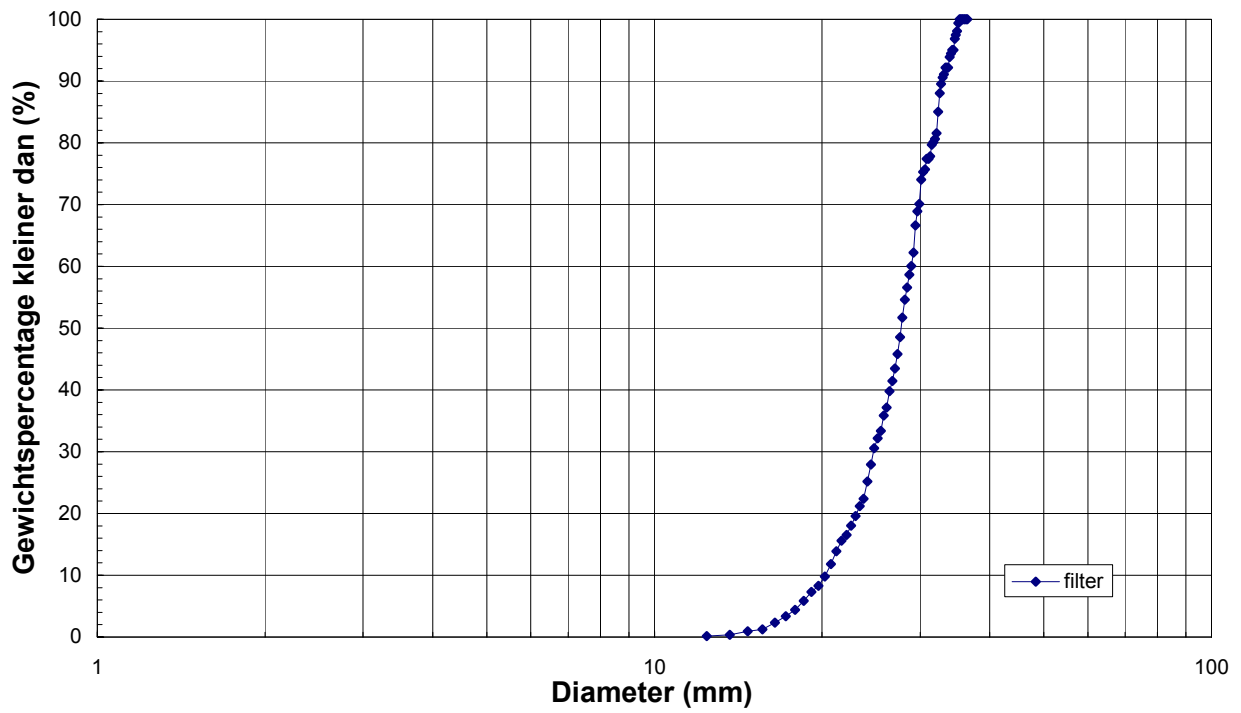
Dwarsdoorsnede		E041014a
	WL Delft Hydraulics	H4327



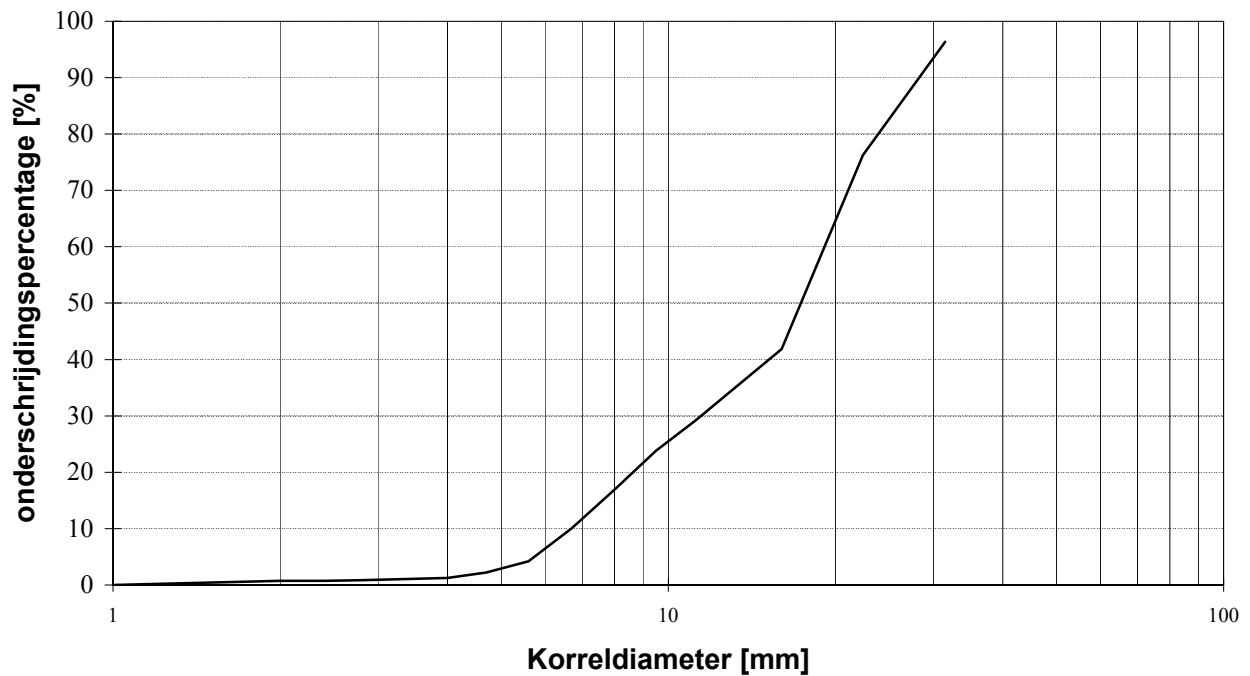
Vooraanzicht

E041014b

Zeefkromme van filter



Zeefkromme van inwasmateriaal



Zeefkromme van filter en inwasmateriaal

Overzicht



Gat 1



Gat 2



Voor proef P0501



Gat 1



Gat 2

Na proef P0501



Gat 1



Gat 2

Na proef P1001



Overzicht



Gat 1

Na proef P1501
Overzicht en gat 1



Gat 2



Gat 3

Na proef P1501
Gat 2 en 3



Overzicht



Gat 1

Voor proef P2001
Overzicht en gat 1



Gat 2



Gat 3

Voor proef P2001
Gat 2 en 3



Overzicht



Gat 1

Na proef P2001
Overzicht en gat 1

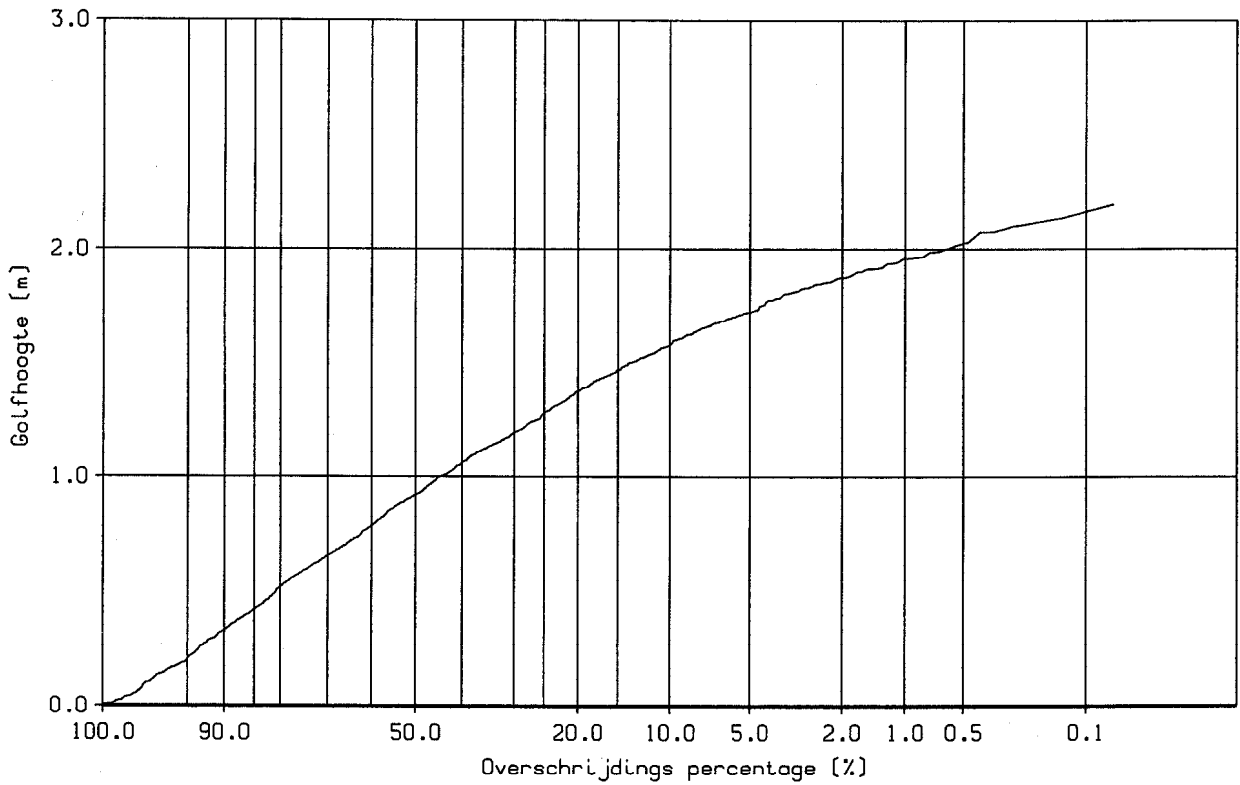


Gat 2

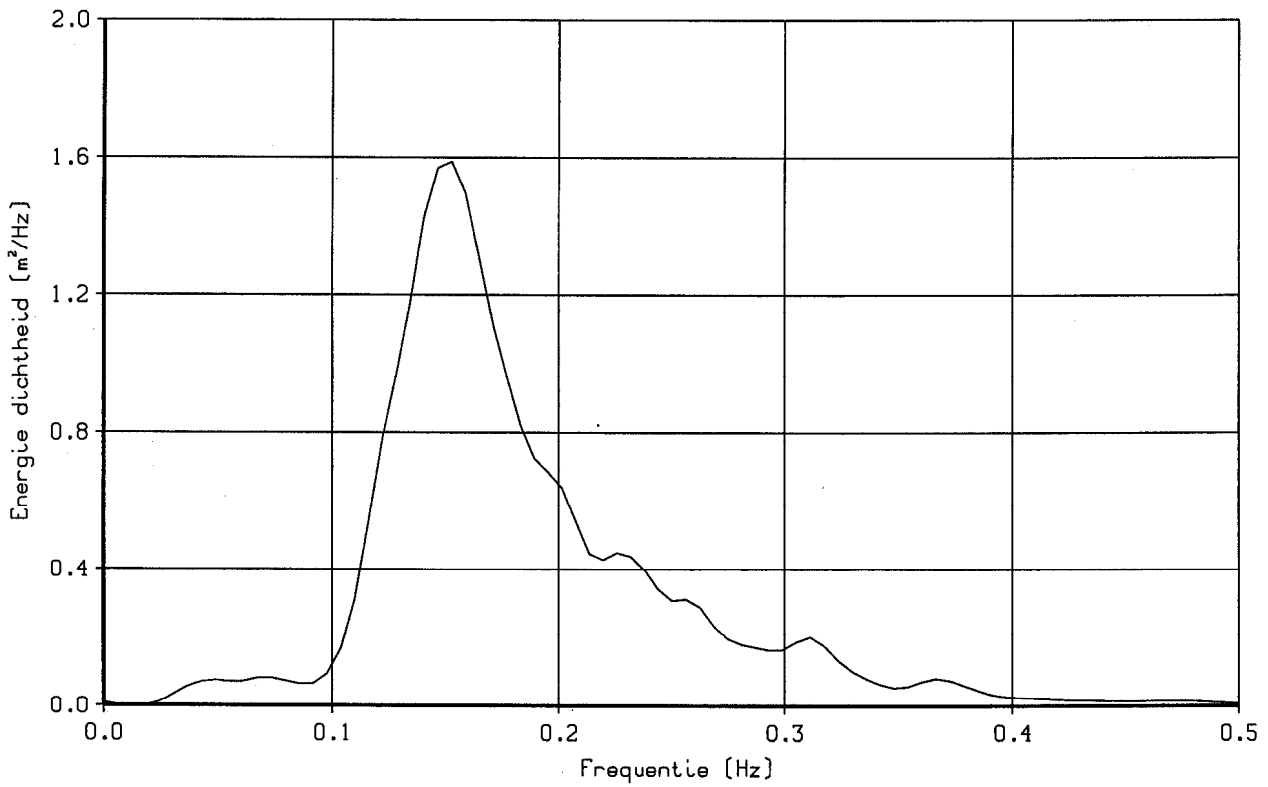


Gat 3

Na proef P2001
Gat 2 en 3



— Inkomend(diepe water)



OVERSCHRIJDINGSKROMME EN
ENERGIE DICHTHEID SPECTRUM

#p2001

Inkomend

WL | delft hydraulics

H4327

FIG. 13

C Overzicht van het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

