

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat,
Directie Zeeland (PBZ)



Analyse van de stabiliteit van basalt

Onderzoeksprogramma
Kennisleemtes Steenbekledingen

rapport

februari 2005

H4422

Ministerie van Verkeer en Waterstaat



Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Dienst Weg- en Waterbouwkunde



WL | delft hydraulics

Opdrachtgever:

RWS, Directie Zeeland, Projectbureau
Zeekeringen

ANALYSE VAN DE STABILITEIT VAN BASALT

Onderzoeksprogramma kennisleemtes steenbekledingen

D.Rudolph, M. Klein Breteler

rapport

februari 2005



OPDRACHTGEVER:	Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Projectbureau Zeeweringen				
TITEL:	Analyse van de stabiliteit van basalt				
SAMENVATTING:	<p>In het kader van het Onderzoeksprogramma kennisleemtes steenbekledingen, in 2003 opgestart door de Dienst Weg- en Waterbouwkunde, heeft voorliggende bureaustudie betrekking op het deelonderzoek 7.2.2 “Stabiliteit van basalt, Analyse meetresultaten Deltagootonderzoek”.</p> <p>Het betreft een analyse van de modelonderzoeken, die in 1983, 1984, 2002, 2003 en 2004 met basalt- en Basaltonbekledingen uitgevoerd zijn. In dit rapport is geanalyseerd waarom de stabiliteit van basalt mogelijk lager is dan die van Basalton. De aandacht werd daarbij gericht op</p> <ul style="list-style-type: none">- het afleiden van de leklengte (belangrijkste constructie beschrijvende parameter) uit stijghoogtemetingen,- het bepalen van de belasting op de constructies bij begin van schade uit drukmetingen (2%-stijghoogteverschillen) en- het bepalen van de sterkte van de bekleding bij begin van schade (klemming). <p>Uit de analyse is gebleken dat de stabiliteit van basalt in de loop van de tijd toeneemt. De zetting van basalt is slechter geklemd dan Basalton, mogelijk door een combinatie van factoren, zoals de aanwezigheid van kleischelpen in het inwasmateriaal in basalt '84, de soms ongelukkige vorm van basaltzuilen, de bewegingen van zuilen in het vlak van het talud en het relatief gladde en harde oppervlak van basalt. Na het herstellen van de lokale schade bereikt ook basalt een hoge stabiliteit. Bij Basalton wordt een zeer grote eindsterkte snel na aanleg bereikt, zonder dat eerst lokale schade ontstaat.</p>				
REFERENTIES:	contract: ZLA-5797 contactpersoon opdrachtgever: Y. Provoost projectbegeleider van DWW: R. 't Hart				
VER	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
1.0	D. Rudolph	06-10-2004	concept	C. Kuiper	W.M.K. Tilmans
2.0	D. Rudolph	dec '04	definitief	C. Kuiper	W.M.K. Tilmans
3.0	D. Rudolph	21-2-05	definitief	B. Hofland	W.M.K. Tilmans
	M. Klein Breteler				
PROJECTNUMMER:	H4422				
TREFWOORDEN:	dijkbekleding, steenzetting, leklengte, stijghoogteverschil, klemming				
AANTAL BLADZIJDEN:	131				
VERTROUWELIJK:	<input type="checkbox"/> JA, tot (datum)		<input checked="" type="checkbox"/> NEE		
STATUS:	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG	<input type="checkbox"/> CONCEPT	<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF		

Inhoud

Lijst van Figuren

Lijst van Tabellen

Lijst van Symbolen

1	Inleiding	1
2	Aanpak en beschikbare modelproeven	3
2.1	Doelstelling en aanpak	3
2.2	Eigenschappen van de onderzochte constructies.....	4
2.3	Selectie van proeven voor analyse van de stijghoogteverschillen.....	7
3	Lokale lek lengte	9
3.1	Methodiek	9
3.2	Analyse van de resultaten.....	11
3.3	Conclusie t.a.v. de gemeten lek lengte	13
4	Stijghoogteverschil over de toplaag	15
4.1	Inleiding.....	15
4.2	Vergelijking met empirische formules voor $\phi_{w2\%}$	16
4.3	Relatie stijghoogteverschillen tot de sterkte van de bekleding	18
4.4	Conclusie ten aanzien van de stijghoogteverschillen.....	19
5	Klemming	21
5.1	Inleiding.....	21
5.2	Bepaling van de klemming	22
5.3	Conclusie ten aanzien van de klemming	23
6	Samenvatting en conclusies	25
6.1	Algemene aspecten	25
6.2	Lek lengte, 2%-stijghoogteverschillen en klemming.....	26
6.3	Conclusies.....	26

Referenties

Bijlagen

- A** **Figuren**
- B** **Tabellen**
- C** **Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen**
- D** **Lokale lek lengte**
- E** **Stijghoogteverschil over de toplaag**
- F** **Klemming**
- G** **Vergelijking met proeven op weinig geïnstrumenteerde zuilen**

Lijst van Figuren (in hoofdtekst)

- Figuur 1 Schematische weergave van drukopnemers en definitie van gebruikte parameters voor het bepalen van de lokale lek lengte uit stijghoogtemetingen
- Figuur 2 Verband tussen golfsteilheid en dimensieloze stijghoogteverschil $\phi_{w2\%}/H_s$
- Figuur 3 Vergelijking tussen gemeten en berekende dimensieloze stijghoogteverschillen t.o.v. de golfsteilheid
- Figuur 4 Instabiele steen

Lijst van Figuren (bijlage A)

- Figuur A.1 Dwarsdoorsnede proeven met basalt uit 1984 [Burger (1985)]
- Figuur A.2 Dwarsdoorsnede proeven met basalt en Basalton uit 2003 [Eysink & Klein Breteler (2003)]
- Figuur A.3 Detail dwarsdoorsnede proeven met basalt en Basalton uit 2003 [Eysink & Klein Breteler (2003)]
- Figuur A.4 Dwarsdoorsnede proeven westelijke havendam Urk [Klein Breteler (2002)]
- Figuur A.5 Detail dwarsdoorsnede proeven westelijke havendam Urk [Klein Breteler (2002)]
- Figuur A.6 Dwarsdoorsnede proeven westelijke havendam Ketelhaven [Klein Breteler (2002)]
- Figuur A.7 Detail dwarsdoorsnede proeven westelijke havendam Ketelhaven [Klein Breteler (2002)]
- Figuur A.8 Bepalen van het open oppervlak door foto analyse, boven: basalt (2003), beneden: Basalton (2003)
- Figuur A.9 Dwarsdoorsnede proeven met Basalton uit 1983 [v.d. Weide en Visser (1983)]
- Figuur A.10 Dwarsdoorsnede proeven met Basalton uit 2004 [Kuiper, Klein Breteler, Booster en Eysink (2004)]
- Figuur A.11 Overschrijdingspercentages stijghoogteverschillen (gefilterd signaal), proef p05, DRO03-DRO27 t/m DRO08-DRO28b
- Figuur A.12 Overschrijdingspercentages stijghoogteverschillen (gefilterd signaal), proef p05, DRO09-DRO29 t/m DRO14-DRO30b
- Figuur A.13 Overschrijdingspercentages stijghoogteverschillen (gefilterd signaal), proef p05, DRO15-DRO31 t/m DRO20-DRO32b

Lijst van Tabellen (in hoofdtekst)

- Tabel 1 Samenvatting belangrijke constructie-eigenschappen en resultaat ANAMOS 2.21 berekeningen
- Tabel 2 Overzicht gemeten lek lengten gebaseerd op stijghoogtemetingen, en berekend met ANAMOS
- Tabel 3 Berekende doorlatendheden en lek lengten volgens formules Klein Breteler (2002)
- Tabel 4 Beoordeling sterkte van de bekleding bij begin van schade (* = 25% verhoogde waarde t.o.v. de meting vanwege onderschatting, zie tekst)

Lijst van Tabellen (bijlage B)

- Tabel B.1 Overzicht geanalyseerde proeven: basalt 1984
- Tabel B.2 Overzicht geanalyseerde proeven: basalt 2003
- Tabel B.3 Overzicht geanalyseerde proeven: Basalton 2003
- Tabel B.4 Samenvatting belangrijke constructie-eigenschappen en resultaat ANAMOS 2.21 berekeningen

Lijst van symbolen

Symbol	Eenheid	Betekenis
a	s/m	laminaire weerstandscoefficiënt van het filter
A	m ²	zuiloppervlak
b	m	filterlaagdikte
b	s ² /m ²	turbulente weerstandscoefficiënt van het filter
B	m	breedte van een blok
c _w	m/s	voortplantingssnelheid van drukgolven in water
d _{inw}	mm	korrelgrootte inwasmateriaal
D	m	dikte toplaag
D ₁₅	mm	karakteristieke korreldiameter
F	-	stabiliteitsparameter ($F = H_s / (\Delta D) \cdot \xi_{op}^{2/3}$)
g	m/s ²	versnelling van de zwaartekracht
h	m	waterdiepte
H _s	m	significante golfhoogte aan de teen van het talud
i	-	verhang in het filter = $\partial\phi/\partial x$
i'	-	verhang over de toplaag = ϕ'/D
k	mm/s	doorlatendheid filter
k'	mm/s	doorlatendheid toplaag
L	m	lengte van een blok langs het talud
L _{op}	m	golflengte op basis van de piekperiode ($= gT_p^2/(2\pi)$), teruggerekend naar diepwater
n	-	porositeit
n _{inw}	-	porositeit inwasmateriaal
p	[N/m ²]	druk
q	m/s	specifiek debiet door de toplaag
q'	m ³ /s/m	gemiddelde debiet door de toplaag per meter dijk lengte
t ₀	s	duur van de overbelaste situatie
t _{φ > 50%}	s	tijdsduur waarin het stijghoogteverschil groter is dan 50% van het maximum in die golf
T _p	s	golfperiode bij de piek van het spectrum
s _{op}	-	golfsteilheid op diep water op basis van de piekperiode ($= H_s/L_{op}$)
x	m	coördinaat langs het talud omhoog
y	m	Afstand langs het talud omhoog
z	m	referentieniveau, hier stilwaterlijn
α	-	taludhelling

Symbol	Eenheid	Betekenis
Δ	-	relatieve dichtheid (= $(\rho_s - \rho_w) / \rho_w$)
Δi	-	Verhang gradiënt in het filter = $\partial^2 \phi / \partial x^2$
ε	-	relatieve blokbeweging
ϕ	m	stijghoogte in het filter
ϕ'	m	stijghoogte op de topklaag
ϕ_{\max}	m	maximale stijghoogte tijdens een golfklap, ten opzichte van de stilwaterlijn
$\phi_{w2\%}$	m	stijghoogteverschil met overschrijdingspercentage van 2%
ϕ_{toe}	m	stijghoogteverschil dat overeenkomt met de invloed van de toestroming naar een bewegende zuil
ϕ_{traag}	m	stijghoogteverschil dat overeenkomt met de invloed van de traagheid van een bewegend blok
Γ_{klem}	-	klemfactor
Λ	m	lek lengte
ρ_s	kg/m ³	dichtheid van blokken/zuilen
ρ_w	kg/m ³	dichtheid van water
Ω	%	open zuiloppervlak
ξ_{op}	-	brekerparameter op basis van piekperiode

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 verslag betrekking op het deelonderzoek 7.2.2 “Stabiliteit van basalt, Analyse meetresultaten Deltagootonderzoek”. Het totale overzicht van het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen, zoals dat begin 2004 is bijgewerkt, is weergegeven in bijlage C.

In 2002 is een modelonderzoek in de Deltagoot uitgevoerd naar de stabiliteit van steenzettingen op twee havendammen (Urk en Ketelhaven in 2002). Tijdens dat onderzoek ging de primaire belangstelling uit naar de stabiliteit van de steenzettingen op de kruin en het binnentalud. Het buitentalud was voor het belangrijkste deel bekleed met relatief zware basalt, omdat dit deel van de constructie stabiel moest blijven tijdens alle proeven. Reeds bij een relatief lage golfbelasting bleek de basalt echter toch schade te geven.

Dit opmerkelijke resultaat heeft ertoe geleid dat in 2003 is besloten de stabiliteit van basalt nader te onderzoeken door middel van het uitvoeren en analyseren van twee nieuwe proevenseries in de Deltagoot en de heranalyse van oude proevenseries.

In deze analyse is gebruik gemaakt van de resultaten van de volgende modelonderzoeken in de Deltagoot:

- Modelonderzoek uit 1983: Basalton van 15 cm dikte met een talud van 1:3 (v.d. Weide en Visser 1983)
- Modelonderzoek uit 1984: basalt van 30 cm dikte op puin met een talud van 1:3,5 (Provo-onderzoek, Burger 1985)
- Modelonderzoek uit 2002 (Klein Breteler 2002) met lage havendammen:
 - basalt van 20 cm dikte op steenslag met een talud van 1: 2,85
 - basalt van 20 cm dikte op steenslag met een talud van 1: 3,0
- Modelonderzoek uit 2003 (Eysink en Klein Breteler 2003)
 - basalt van 20 cm dikte op steenslag met een talud van 1: 3,5
 - Basalton van 20 cm dikte op steenslag met een talud van 1: 3,5
- Modelonderzoek uit 2004 (Kuiper, Klein Breteler, Booster en Eysink 2004) met een lage havendam met talud van 1:3 en Basalton van 20 cm

De doelstelling van dit project is te kunnen achterhalen waarom de stabiliteit van basaltbekledingen mogelijk lager is dan die van Basalton-bekledingen.

In dit rapport zijn de resultaten van de analyse samengevat. De hoofdtekst besteedt vooral aandacht aan de opzet van het onderzoek en de resultaten en conclusies. Details omtrent de analyse zijn vermeld in de bijlagen.

In hoofdstuk 2 wordt de aanpak uitgelegd en de belangrijkste eigenschappen van de onderzochte constructies gepresenteerd. Tijdens het onderzoek van de havendammen (2002 en 2004) zijn er geen drukken gemeten. Daarom wordt de gedetailleerde analyse van hoofdstuk 3 tot en met 5 alleen uitgevoerd aan de hand van de metingen tijdens het onderzoek van 1984 en van 2003. Ook de gemeten bezwijkgolfhooften van het onderzoek op de havendammen zijn nauwelijks in het onderzoek betrokken, omdat de belastingsituatie op een lage havendam afwijkt van die op een dijktalud.

De resultaten van het weinig geïnstrumenteerde talud van 1983 konden helaas niet gebruikt worden, omdat na afloop van dat onderzoek bleek dat de steenzetting opgespannen lag tussen de gootwanden, waardoor de stabiliteit veel hoger was dan normaal.

Hoofdstuk 3 bevat de berekening en analyse van lokale lek lengten. Hoofdstuk 4 beslaat het bepalen van extreme stijghoogteverschillen (bijvoorbeeld $\phi_{w2\%}$). Daarop gebaseerd is in hoofdstuk 5 de klemming bepaald. Tenslotte zijn conclusies getrokken en aanbevelingen gegeven (hoofdstuk 6).

De details t.a.v. de analyse van lek lengten, drukmetingen, stijghoogteverschillen en de klemming van geïnstrumenteerde proeven zijn te vinden in respectievelijk Bijlage D t/m Bijlage F. Bijlage G bevat een beschrijving van de proeven op een weinig geïnstrumenteerd Basaltontalud uit 1983 en de havendammen uit 2002 en 2004.

2 Aanpak en beschikbare modelproeven

2.1 Doelstelling en aanpak

Zoals in de inleiding reeds beschreven is, gaat het in dit onderzoek om de mogelijke verschillen in stabiliteit tussen steenzettingen met basalt en met Basalton. Dit verschil in stabiliteit kan bijvoorbeeld uitgedrukt worden als een verhouding tussen de kleinste golfhoogte die nog tot schade lijdt op basalt t.o.v. Basalton, als alle overige eigenschappen van de golven en de constructie gelijk zijn.

Het doel van het onderzoek is aan te geven hoe groot deze verschillen zijn en de oorzaken van deze verschillen te achterhalen. Verder is het doel om, waar mogelijk, aan te geven of er bepaalde omstandigheden zijn waarbij de verschillen voornamelijk optreden.

De belangrijkste middelen die ons ter beschikking staan om dit doel te bereiken zijn de modelproeven die in het verleden uitgevoerd zijn in de Deltagoot. Ervaringen uit het prototype zijn doorgaans moeilijk bruikbaar omdat de omstandigheden waarbij schade, of juist geen schade, is opgetreden vaak niet nauwkeurig bekend zijn.

In deze analyse is de aandacht geconcentreerd op de volgende uitkomsten van de modelproeven:

- De golfcondities waarbij er al dan niet schade is ontstaan, gegeven de geometrie en overige eigenschappen van de constructie.
- De eventueel gemeten stijghoogteverschillen over de toplaag, die met name verantwoordelijk geacht worden voor het ontstaan van schade (dit is de primaire kracht die stenen uit de zetting drukt tijdens golfaanval).

Aan de hand van de golfcondities waarbij er al dan niet schade is ontstaan, lijkt het eenvoudig om het verschil in stabiliteit tussen basalt en Basalton aan te tonen. Een belangrijk probleem vormt echter de vergelijkbaarheid ten aanzien van de andere eigenschappen. Het gaat daarbij niet alleen om eenvoudig te bepalen verschillen, zoals de toplaagdikte en de taludhelling, maar ook om verschillen in doorlatendheid van toplaag en filter. Die laatste zijn tijdens het onderzoek helaas niet gemeten, maar de onderlinge verhouding kan wel afgeleid worden uit de gemeten stijghoogte op het talud en in het filter. Deze verhouding komt tot uiting in de leklengte. In hoofdstuk 3 is dit nader uitgewerkt.

Hoofdstuk 3 resulteert in een 'gemeten' leklengte, vastgesteld aan de hand van de gemeten stijghoogte op de toplaag en in het filter, die het mogelijk maakt een betere vergelijking tussen de verschillende constructies te maken. Deze gemeten leklengte is ook vergeleken met de met ANAMOS berekende waarde, en met een nieuwe formule voor de doorlatendheid van de toplaag (Klein Breteler 2002).

De primaire belasting die leidt tot schade aan de steenzetting is het stijghoogteverschil over de toplaag. Dit levert een opwaartse kracht die, als die groot genoeg is, een steen uit de zetting kan lichten, of een deel van de steenzetting kan doen opbarsten.

Naast deze primaire belasting is er een sterkte die bestaat uit het eigen gewicht van de stenen in combinatie met interactiekrachten (klemming) tussen de stenen onderling. De stabiliteit wordt bepaald door de belasting en de sterkte. Het is de verwachting dat het verschil tussen basalt en Basalton vrijwel uitsluitend het gevolg is van het verschil in sterkte. Mogelijke verschillen in de belasting (stijghoogteverschil over de toplaag) zullen een gevolg zijn van verschillen in leklengte en overige constructie-eigenschappen.

De analyse van de stijghoogteverschillen zijn daarom niet alleen gericht op het aantonen van belastingverschillen, maar vooral ook gericht op het aantonen van sterkteverschillen. Het gaat daarbij om het stijghoogteverschil dat nog net geen schade, of net wel schade, oplevert. De belasting is in dat geval in evenwicht met de sterkte. Gezien het feit dat het direct meten van de sterkte niet mogelijk is, terwijl de stijghoogteverschillen wel zijn gemeten, is dit een methode om indirect de sterkte te kwantificeren.

Als nevenresultaat is ook de relatie tussen de golfcondities en de grootte van de stijghoogteverschillen gegeven.

In hoofdstuk 4 komen deze stijghoogteverschillen aan bod, waarbij de aandacht vooral geconcentreerd is geweest op stijghoogteverschillen die door 2% van de golven overschreden worden ($\phi_{w2\%}$). Daarbij wordt ook het stijghoogteverloop op het talud beoordeeld.

De sterkte van de steenzetting bestaat uit twee componenten:

- Het eigen gewicht onder water: ΔD
- De klemming, ofwel de interactiekrachten tussen de stenen onderling

Het verschil in eigen gewicht tussen basalt en Basalton is eenvoudig kwantificeerbaar.

De grootte van de klemming van een steenzetting kan afgeleid worden uit het stijghoogteverschil dat net schade veroorzaakt. Daarbij moet echter rekening gehouden worden met het feit dat de stijghoogteverschillen waarschijnlijk bepaald zijn ter plaatse van een deel van de steenzetting dat niet of weinig bewogen heeft, terwijl de schade is ontstaan op een plaats waar de stenen kennelijk wel bewogen hebben. De beweging van stenen heeft ook invloed op het stijghoogteverschil. Naarmate een steen sneller beweegt, neemt het stijghoogteverschil en daarmee de aandrijvende kracht voor de beweging af. Deze problematiek wordt behandeld in hoofdstuk 5, die uiteindelijk leidt tot een schatting van de klemming van basalt en Basalton. De klemming wordt uitgedrukt in de vorm van een vergrotingsfactor op het eigen gewicht: Γ_{klem} . Voor het bepalen van de klemming wordt ook gebruik gemaakt van de gemeten leklengte uit hoofdstuk 3.

Deze aanpak van de analyse is vergelijkbaar met die van de Deltagootproeven uit 1997 en 1998 (gerapporteerd in Klein Breteler 2000). Alleen voor het bepalen van de leklengte is nu een iets afwijkende procedure gevolgd, zodat meer gedetailleerde informatie verkregen kon worden.

2.2 Eigenschappen van de onderzochte constructies

In het verleden zijn een aantal modelproeven in de Deltagoot met basalt en Basalton uitgevoerd, namelijk:

- Proeven uit 1983: Basalton van 15 cm dikte met een talud van 1:3 (v.d. Weide en Visser 1983)
- Proeven uit 1984: basalt van 30 cm dikte op puin met een talud van 1:3,5 (Provoonderzoek, Burger 1985)

- Proeven uit 2002 (Klein Breteler 2002) op een lage havendam:
 - basalt van 20 cm dikte op steenslag met een talud van 1: 2,85
 - basalt van 20 cm dikte op steenslag met een talud van 1: 3,0
- Proeven uit 2003 (Eysink en Klein Breteler 2003)
 - basalt van 20 cm dikte op steenslag met een talud van 1: 3,5
 - Basalton van 20 cm dikte op steenslag met een talud van 1: 3,5
- Modelonderzoek uit 2004 (Kuiper, Klein Breteler, Booster en Eysink 2004) met een lage havendam met talud van 1:3 en Basalton van 20 cm

De proeven uit 1984 en 2003 zijn uitgevoerd met drukopnemers op de bekleding en in het filter. De proefopstellingen uit 2002 en 2004 waren niet geïnstrumenteerd. Het aantal instrumenten in de opstelling van 1983 was te laag om een zinnige analyse mee te kunnen uitvoeren.

Daarom zal de kwantitatieve analyse vooral gericht zijn op de basalt uit 1984, de basalt uit 2003 en de Basalton uit 2003.

Dwarsdoorsneden van deze constructies zijn gegeven in bijlage A.

- Proeven met Basalton uit 1983: Figuur A.9
- Proeven met basalt uit 1984: Figuur A.1
- Proeven met basalt en Basalton uit 2003: Figuur A.2 en Figuur A.3
- Proeven havendam Urk uit 2002: Figuur A.4 en Figuur A.5
- Proeven havendam Ketelhaven uit 2002: Figuur A.6 en Figuur A.6
- Proeven havendam van Basalton uit 2004: Figuur A.10

Gedetailleerde beschrijvingen van de modelproeven zijn in vd Weide en Visser (1983), Burger (1985), Klein Breteler (2002), Eysink & Klein Breteler (2003) en Kuiper, Klein Breteler, Booster en Eysink (2004) te vinden. Een overzicht van de proefcondities van alle proeven zijn gegeven in Tabel B.1 t/m Tabel B.3.

In deze tabellen zijn de volgende eigenschappen van de golfbelasting gegeven:

- de significante golfhoogte H_s aan de teen van het talud (m),
- de golfperiode T_p bij de piek van het spectrum (s),
- de golfsteilheid $s_{op} = H_s/L_{op}$ op diep water (-), waarin H_s (m) de significante golfhoogte aan de teen van het talud is, $L_{op} = gT_p^2/(2\pi)$ (m) de golflengte op basis van de piekperiode, teruggerekend naar diepwater, en g (m/s^2) de versnelling van de zwaartekracht
- de brekerparameter $\xi_{op} = \tan\alpha/\sqrt{s_{op}}$ (-), waarin $\tan\alpha$ (-) de helling van het talud is.
- stabiliteitparameter $F = H_s/(\Delta D) \cdot \xi_{op}^{2/3}$, met $\Delta = \rho_s/\rho_w - 1 =$ relatieve soortelijke massa van de toplaag (-), en $D =$ dikte van de toplaag (m).

De belangrijkste constructieparameters zijn in Tabel 1 (en Tabel B.4) samengevat. De eigenschappen van het inwasmateriaal en filter tijdens de proeven van 1984 zijn helaas niet gerapporteerd en daarom niet bekend. De korrelgrootten zijn aan de hand van foto's geschat. De laagdikte van het filter is geschat op basis van de tekening van een langsdoorsnede en is ook vergeleken met de opbouw van de modelopstellingen van de andere proevenseries in dit modelonderzoek. Ervan uitgaande dat de totale dikte van de constructie (filter + toplaag) niet veel groter zal zijn dan de andere in 1984 onderzochte constructies, is geconcludeerd dat de totale dikte van de 30 cm dikke toplaag en filter tezamen ongeveer 37 cm was. Met

een gemiddelde dikte van de toplaag van 30 cm zal de de gemiddelde filterlaagdikte dus ongeveer 7 cm zijn.

De basalt uit 2003 was een speciaal geselecteerde partij met relatief kleine kopafmetingen. Door 21 stuks te meten is vastgesteld dat 20% groter is dan ongeveer 23x23 cm en dat 25% kleiner is dan ongeveer 16x16 cm. De gemiddelde maat was ongeveer 19x20 cm.

Ook de Basalton uit 2003 en 2004 was speciaal geselecteerd: de grootste zuilen waren weggelaten. De kopafmetingen waren 20x25 tot 25x30 cm, met een gemiddelde van ongeveer 23 x 26 cm.

parameter	eenheid	Basalton (1983)	basalt (1984)	basalt (2003)	Basalton (2003)	Urk (2002)	Ketelhaven (2002)	Havendam (2004)
TALUD								
taludhelling	$\tan \alpha$ [-]	1:3,0	1:3,5	1:3,5	1:3,5	1:2,85	1:3,0	1:3,0
ZUILEN								
zuiloppervlak	A [m ²]	0,06	0,06	0,04	0,06	0,04	0,04	0,06
open oppervlak	Ω [%]	12 à 15*	12 à 15*	15	15	15*	15*	15*
gem. dikte	D [m]	0,15	0,30	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
soort. massa	ρ_s : kg/m ³	2200	2996	2955	2827	2955	2955	2827
ΔD	ΔD [m]	0,210	0,599	0,399	0,365	0,399	0,399	0,365
INWASMATERIAAL								
korrelgrootte	d_{inw} [mm]	?	6 - 22, 16-32**	5 - 30	5 - 30	10 - 40	10 - 40	18 - 40
korreldiameter	D_{15} [mm]	10*	4*	8	8	10	10	22
porositeit	n_{inw} [-]	0,60*	0,60*	0,60*	0,60*	0,60*	0,60*	0,60*
FILTER								
laagdikte	b [m]	0,15	0,07*	0,12	0,12	0,20	0,20	0,10
korreldiameter	D_{f15} [mm]	25*	20*	22	22	22	22	22
porositeit	n_f [-]	0,40*	0,40*	0,40*	0,40*	0,40*	0,40*	0,40*
RESULTATEN ANAMOS 2.21 (met inwasmateriaal)								
doorlatend- heid toplaag	$k^?$ [mm/s]	19	14	20	20	22	22	28
doorlatend- heid filter	k [mm/s]	239	212	223	223	223	223	223
leklengte	Λ [m]	0,54	0,56	0,52	0,52	0,64	0,64	0,40

* ... schatting (niet gemeten en/of niet gerapporteerd);

** ... inwassing uit kleischelpen en gebroken grind;

Tabel 1 Samenvatting belangrijke constructie-eigenschappen en resultaat ANAMOS 2.21 berekeningen

Het open oppervlak van de proeven uit 2003 werd berekend met behulp van een foto-analyse (zie Figuur A.8). Hieruit bleek dat het open oppervlak bij basalt en bij Basalton ongeveer 15% was. Dit is een vrij hoog percentage, hetgeen verklaard kan worden aan de hand van het feit dat hier gebruik gemaakt is van geselecteerde stenen met wellicht een wat kleinere range aan kopafmetingen. Dit was ook het geval voor de constructies uit 2002 en 2004, die dus waarschijnlijk ook een open oppervlak hadden van ongeveer 15%. Voor de proeven uit 1983 en 1984 hoeft dit niet het geval geweest te zijn, waardoor geschat wordt dat het open oppervlak 12 à 15% was.

De doorlatendheid van het filter en de toplaag en de lek lengte is in Tabel 1 gegeven op basis van berekeningen met ANAMOS, versie 2.21 (september 1999).

Doorlatendheden en lek lengten zijn sterk afhankelijk van de porositeit van filter en inwasmateriaal, die niet zijn gemeten. De schattingen (zie tabel) zijn op ervaringen gebaseerd. Bovendien is het tijdens een proef mogelijk dat de vulling van de voegen met inwasmateriaal verandert. Als inwasmateriaal eruit spoelt leidt dat tot een kleinere lek lengte.

Tijdens de volgende proeven is schade ontstaan:

- basalt 1984
 - proef 22: één zuil eruit
 - proef 23: één zuil eruit
- basalt 2002 (Urk)
 - proef 1: twee zuilen enkele centimeters omhoog
 - proef 2: één zuil eruit
- basalt 2002 (Ketelhaven)
 - proef 14: één zuil 10 cm omhoog, één zuil 3 cm omhoog
 - proef 15: één zuil 10 cm omhoog, één zuil 4 cm omhoog
- basalt 2003
 - proef 6: één zuil 8,5 cm omhoog
 - proef 8A: één zuil eruit
- Basalton 2004
 - Proef 2: één zuil eruit

Tijdens de proeven met Basalton uit 1983 en 2003 is geen schade ontstaan.

De analyse is vooral gericht op de proeven uit 1984 en 2003, omdat de belastingsituatie tijdens de proeven uit 2002 en 2004 op de lage havendammen afweek van een normaal dijktaalud en de sterkte in 1983 is overschat doordat de bekleding tussen de gootwanden geklemd lag.

2.3 Selectie van proeven voor analyse van de stijghoogteverschillen

De analyse van de gemeten stijghoogte in de proeven is bijzonder arbeidsintensief. Daarom is een selectie gemaakt van de proeven en is voor het bepalen van de lek lengte zelfs binnen de geselecteerde proeven de analyse geconcentreerd op enkele geselecteerde golven.

Voor het bepalen van de leklengte is voor elke constructie waarbij stijghoogtes zijn gemeten een proef geselecteerd met een relatief hoge golfbelasting, maar waarbij er geen schade is ontstaan. De gemeten stijghoogte wordt beïnvloed door bewegingen van de toplaag. Voor het bepalen van de leklengte geeft zo'n beweging een verstoring en is dus ongewenst. Naarmate de golven hoger zijn, zijn ook de stijghoogte op het talud en in het filter groter en zijn daardoor nauwkeuriger gemeten.

Binnen de geselecteerde proeven zijn enkele golven geselecteerd die op een dunne steenzetting volgens het rekenmodel Zsteen een grote blokbeweging zouden geven.

Voor het bepalen van de gemeten leklengte zijn gebruikt:

- enkele golven uit proef 21 (uit 1984 met basalt)
- enkele golven uit proef 5 (uit 2003 met basalt)
- enkele golven uit proef 25 (uit 2003 met Basalton)

Voor de analyse van de stijghoogteverschillen is gebruik gemaakt van proeven die zijn uitgevoerd met een kleine brekerparameter ($\xi_{op} \approx 1,3$ à $1,6$), een middelmatige ($\xi_{op} \approx 1,6$ à $1,9$) en een relatief grote brekerparameter ($\xi_{op} \approx 1,9$ à $2,6$). Verder zijn proeven geselecteerd, die met ongeveer gelijke golfcondities op basalt en op Basalton zijn uitgevoerd. Bovendien is er op gelet dat de golfhoogte zo hoog mogelijk is, zodat de stijghoogteverschillen zo groot mogelijk zijn ten behoeve van de nauwkeurigheid en relevantie ten aanzien van stabiliteit.

Deze selectie heeft geleid tot de volgende proeven:

- proeven met basalt uit 2003 (talud 1:3,5):
 - proef 16, 17 en 18 met $\xi_{op} = 1,55$
 - proef 4A, 5 en 6 met $\xi_{op} = 1,83$
 - proef 7A en 8A met $\xi_{op} = 2,51$
- proeven met Basalton uit 2003 (talud 1:3,5):
 - proef 25 en 26 met $\xi_{op} = 1,87$
 - proef 21, 22, 23 en 24 met $\xi_{op} = 2,51$
- proeven met basalt uit 1984 (talud 1:3,5):
 - proef 21 met $\xi_{op} = 1,23$
 - proef 22 en 23 met $\xi_{op} = 1,58$

Tijdens sommige van deze proeven is (enige) schade ontstaan, maar nooit ter plaatse van de drukopnemers. Deze proeven zijn daardoor geschikt voor de analyse van de extreme belastingen.

Voor de vergelijking tussen basalt en Basalton hebben de volgende proefparen van 2003 ongeveer gelijke golfhoogten: 5 en 25, 6 en 26, 7A en 21, 8A en 22/23, waarbij de proefnummers lager dan 20 zijn uitgevoerd met basalt en de proefnummers groter dan 20 met Basalton.

In de bijlagen is voor de geselecteerde proeven respectievelijk ingegaan op de leklengte (Bijlage D), het stijghoogteverschil over de toplaag (Bijlage E) en de klemming (Bijlage F). Hoofdstukken 3 tot en met 5 geven een samenvatting van de analyse en de resultaten.

3 Lokale lek lengte

3.1 Methodiek

Bij het gebruik van de verschillende modelonderzoeken in de Deltagoot voor het onderling vergelijken van de stabiliteit van basalt en Basalton rijst de vraag in hoeverre deze constructies goed vergelijkbaar zijn. Het gaat daarbij om een groot aantal aspecten, zoals top laagdikte, soortelijke massa van de zuilen, taludhelling, filterlaagdikte en doorlatendheid van top laag (k') en filter (k). Deze laatste twee zijn tijdens de onderzoeken niet gemeten, maar de lek lengte, waarin de onderlinge verhouding k/k' voorkomt, is wel zeer belangrijk voor de grootte van de stabiliteit van steenzettingen. Het is daarom van belang deze lek lengte te bepalen op basis van de beschikbare informatie uit deze onderzoeken.

Verder is de lek lengte ook nodig om in hoofdstuk 5 de klemming te kunnen bepalen aan de hand van de gemeten stijghoogteverschillen over de top laag bij begin van schade.

De lek lengte van de steenzetting kan bepaald worden op basis van de geometrische eigenschappen van de steenzetting en het rekenmodel ANAMOS. De formules in ANAMOS hebben echter een beperkte nauwkeurigheid en bovendien zal de nauwkeurigheid in dit geval nadelig beïnvloed worden omdat sommige essentiële parameters in het onderzoek niet bepaald zijn. Dit betreft de eigenschappen van het filter van het onderzoek uit 1984, het open oppervlak tussen de zuilen tijdens het onderzoek van 1984, 2002 en 2004 en de porositeit van het filter en het inwasmateriaal tijdens alle onderzoeken. Hoewel voor deze parameters er wel een redelijke schatting gemaakt kan worden, wordt de nauwkeurigheid van het rekenresultaat hier nadelig door beïnvloed.

De berekende lek lengte op basis van de gemeten en geschatte waarden is weergegeven in Tabel 1.

Daarnaast kan de lek lengte ook bepaald worden uit de gemeten stijghoogte op het talud en in het filter tijdens de golfbelasting. Bij deze methode is een grotere nauwkeurigheid te bereiken dan met ANAMOS, vooral als er veel drukopnemers op de top laag en in het filter aanwezig waren. In dit hoofdstuk worden de resultaten van zo'n analyse samengevat. In bijlage D zijn alle details opgenomen.

De lek lengte is de bepalende parameter ten aanzien van de grootte van de stijghoogteverschillen (belasting) over de top laag. Een grote lek lengte geeft bij golfbelasting een groot stijghoogteverschil. Daarom is deze parameter van groot belang voor de stabiliteit van een steenzetting. De lek lengte is als volgt gedefinieerd:

$$\Lambda = \sqrt{\frac{bkD}{k'}} \quad (3.1)$$

met

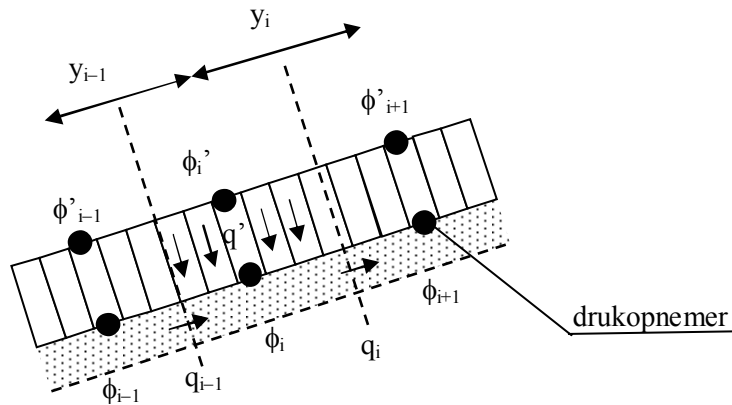
Λ = lek lengte [m]

b = filterlaagdikte [m]

D = dikte van de toplaag [m]
 k = doorlatendheid filter [m/s]
 k' = doorlatendheid toplaag [m/s]

Hierbij is uitgegaan van de gelineariseerde doorlatendheid van de toplaag en het filter.

De lek lengte kan uit de metingen verkregen worden door de massabalans voor het gebied tussen de stippellijnen in Figuur 1 te beschouwen.



Figuur 1 Schematische weergave van drukopnemers en definitie van gebruikte parameters voor het bepalen van de lokale lek lengte uit stijghoogtemetingen

Door te stellen dat het debiet door de toplaag (q') en door het filter (q_{i-1} , q_i) evenwijdig aan het talud (door de stippelijne haaks op het talud) in evenwicht zijn, is het mogelijk te volgende formule af te leiden:

$$\Lambda = \sqrt{\frac{bkD}{k'}} = \sqrt{\frac{\overline{\phi' - \phi}}{\left(\frac{\phi_i - \phi_{i+1}}{y_i} - \frac{\phi_{i-1} - \phi_i}{y_{i-1}}\right)} \frac{y_{i-1} + y_i}{2}} \quad (3.2)$$

met:

$\overline{\phi' - \phi}$ = gemiddeld stijghoogteverschil over de toplaag tussen de stippellijnen (m)
 y_i, y_{i-1} = onderlinge afstand tussen de drukopnemers (m)
 ϕ = stijghoogte in het filter (m)
 ϕ' = stijghoogte op de toplaag (m)

Formule (3.2) bestaat uit drie uitdrukkingen onder het wortelteken:

- een term voor het gemiddeld stijghoogteverschil tussen toplaag en filter (teller: $\overline{\phi' - \phi}$)
- een term voor de verandering in het stijghoogtegradiënt in het filter (noemer: $\partial^2\phi/\partial x^2$)
- een term voor de gemiddelde drukopnemer afstand $(y_{i-1} + y_i)/2$

Deze formule voor de lek lengte leidt tot twee voorwaarden die voor het analyseren van metingen belangrijk zijn:

- De term in de noemer mag nooit nul worden. Dat betekent dat er altijd een verandering in de stijghoogtegradiënt in het filter moet optreden. Drie op elkaar volgende stijghoogtemetingen in het filter mogen dus nooit op één lijn liggen.
- De term onder het wortelteken mag niet kleiner dan nul zijn:
 - Als de stijghoogte op de top laag groter is dan de stijghoogte in het filter ($\phi' > \phi$) moet ook de verandering in het stijghoogtegradiënt in het filter positief zijn (meer uitstroom dan instroom).
 - Als de stijghoogte op de top laag kleiner is dan de stijghoogte in het filter ($\phi' < \phi$) moet ook de verandering in de stijghoogtegradiënt in het filter negatief zijn (meer instroom dan uitstroom).

Bij het analyseren van de metingen is gebleken dat niet altijd aan deze voorwaarden voldaan wordt (zie bijlage D). Er is daarom ten eerste gewerkt met Λ^2 , zodat niet de wortel uit een negatief getal getrokken hoeft te worden. Verder is er een selectie gemaakt van de berekende waarden teneinde met de meest realistische waarden van Λ^2 verder te werken. De selectiecriteria zijn gebaseerd op de verwachting dat er wel realistische Λ^2 waarden kunnen worden berekend als er grote stijghoogtegradiënten in het filter en over de top laag zijn gemeten. Daarvoor zijn de volgende criteria aangehouden:

1. Het gemiddelde stijghoogteverschil over de top laag is groter dan nul (kracht naar boven gericht).
2. Het stijghoogteverschil over de top laag is groter dan het gemiddelde van alle stijghoogteverschillen over de top laag (van de geselecteerde tijdstippen).
3. De verandering van de gradiënt in het filter, $\partial^2\phi/\partial x^2$ (tweede afgeleide van de stijghoogte in het filter), is kleiner dan nul (in combinatie met conditie 1 leidt deze conditie tot positieve Λ^2 waarden).
4. De verandering van de gradiënt in het filter $\partial^2\phi/\partial x^2$ is groter dan het gemiddelde van alle $\partial^2\phi/\partial x^2$ -waarden (van de geselecteerde tijdstippen), waarbij de absolute waarden zijn beschouwd.

Op basis van deze selectiecriteria was het mogelijk om betrouwbare data te verkrijgen waarmee de gemiddelde lek lengte bepaald kon worden.

3.2 Analyse van de resultaten

De analyse van de gemeten stijghoogte op het talud en in het filter met de methodiek zoals boven beschreven, heeft de volgende resultaten opgeleverd:

modelproef	gemeten Λ		berekend
	gemiddelde [m]	90%- betrouwbaarheidsinterval	Λ_{anamos} [m]
basalt (1984)	0,66	$0,46 < \Lambda < 0,86$	0,56
basalt (2003)	0,44	$0,36 < \Lambda < 0,52$	0,52
Basalton (2003)	0,54	$0,47 < \Lambda < 0,61$	0,52

Tabel 2 Overzicht gemeten lek lengten gebaseerd op stijghoogtemetingen, en berekend met ANAMOS

In Tabel 2 zijn ook de lek lengten weergegeven, die met ANAMOS werden berekend op basis van Tabel 1.

Bij de modelproeven uit 1984 is de berekende lek lengte met ANAMOS rond 20% kleiner dan de gemeten lek lengte, maar ligt nog wel ruim binnen het 90%-betrouwbaarheidsinterval. Bij basalt uit 2003 is de lek lengte volgens ANAMOS juist groter dan uit de stijghoogtemetingen. De waarde ligt zelfs op de rand van het 90%-betrouwbaarheidsinterval. Bij Basalt uit 2003 is de met ANAMOS berekende waarde nagenoeg gelijk aan de gemeten waarde.

Uitgaand van de definitie van de lek lengte zijn de oorzaken van deze verschillen onderzocht. De lek lengte is gedefinieerd als:

$$\Lambda = \sqrt{b \cdot D \cdot \frac{k}{k'}} \quad (3.3)$$

Omdat de dikte van de filterlaag (b) en de dikte van de toplaag (D) goed bekend zijn, worden hier vooral de doorlatendheden bekeken. Doorgaans zijn de doorlatendheidsformules voor filter en toplaag niet erg nauwkeurig. Afwijkingen van een factor 2 zijn geen uitzondering. Bovendien zijn niet alle van belang zijnde invoerparameters tijdens het onderzoek nauwkeurig vastgesteld. Tijdens het onderzoek met basalt in 1984 is zelfs de korrelgrootte van het filter niet gemeten. Verder is in alle onderzoeken de porositeit en vullingsgraad van het inwasmateriaal onbekend. Waarschijnlijk variëren deze waarden zelfs van proef tot proef, en mogelijk zelfs van golf tot golf. Er is visueel vastgesteld dat tijdens een grote golf veel inwasmateriaal uitspoelt, dat tijdens de volgende golven weer in de spleten gevangen wordt.

In tabel 1 zijn de doorlatendheden berekend middels de formules die in ANAMOS 2.21 geïmplementeerd zijn. Als alternatief kunnen de nieuwe formules voor de doorlatendheid van de toplaag uit Klein Breteler (2002) gebruikt worden. Bovendien kan het variëren van de invoergrootheden een indruk geven van de range waarbinnen de doorlatendheid waarschijnlijk ligt. De resultaten zijn gegeven in Tabel 3.

Uit deze tabel blijkt dat de lek lengte van basalt uit 2003, berekend met de formules van Klein Breteler (2002) ($\Lambda = 0,41$), nu wel vrij goed overeenkomt met de gemeten lek lengte ($\Lambda = 0,44$). De grote onzekerheid omtrent de eigenschappen van de steenzetting uit 1984 leidt tot zo'n grote onzekerheid omtrent de lek lengte, dat de range zich maar liefst uitstrekt van 0,22 tot 1,6 m. Hiermee wordt duidelijk dat het berekenen van de lek lengte op basis van zulke gebrekkige informatie omtrent de eigenschappen nauwelijks zinvol is. Wel moet opgemerkt worden dat de range berekend is door alle invoervariabelen zodanig te kiezen dat een zo breed mogelijke range verkregen wordt. Het is uiteraard onwaarschijnlijk dat alle eigenschappen zo afwijken van de verwachtingswaarden.

Er kan geconcludeerd worden dat de range waarbinnen de lek lengte zou moeten liggen volgens de metingen volledig binnen de range valt waar deze volgens de berekeningen binnen zou moeten liggen. In die zin ondersteunen de berekeningen de waarde van de lek lengte die bepaald is uit de metingen.

parameter	eenheid	basalt (1984)	basalt (2003)	Basalton (2003)
ZUILEN				
zuiloppervlak	A [m ²]	0,06	0,04	0,06
open oppervlak	Ω [%]	12 à 15	14 à 16	14 à 16
gemiddelde dikte	D [m]	0,30	0,20	0,20
INWASMATERIAAL				
karakteristieke korreldiameter	D ₁₅ [mm]	3 à 15	5 à 10	5 à 10
porositeit	n _{inw} [-]	0,3 à 0,6	0,5 à 0,6	0,5 à 0,6
vullingsgraad	[%]	30 à 70	30 à 70	30 à 70
FILTER				
laagdikte	b [m]	0,06 à 0,10	0,10 à 0,15	0,10 à 0,15
karakteristieke korreldiameter	D _{f15} [mm]	15 à 25	20 à 25	20 à 25
porositeit	n _f [-]	0,35 à 0,40	0,35 à 0,40	0,35 à 0,40
RESULTATEN VOLGENS FORMULES KLEIN BRETELER (2002)				
doorlatendheid toplaag	k' [mm/s]	19	32	32
k' range		3 à 73	20 à 65	20 à 65
doorlatendheid filter	k [mm/s]	221	223	223
k range		154 à 239	182 à 239	182 à 239
lek lengte	Λ [m]	0,48	0,41	0,41
Λ range		0,22 à 1,6	0,27 à 0,61	0,27 à 0,60

Tabel 3 Berekende doorlatendheden en lek lengten volgens formules Klein Breteler (2002)

3.3 Conclusie t.a.v. de gemeten lek lengte

Gezien het feit dat de lek lengte een zeer belangrijke parameter is voor een steenzetting en bepalend is voor de grootte van het stijghoogteverschil tijdens golfaanval, is in bijlage D op verschillende manieren de lek lengte van de onderzochte correcties bepaald. De meest betrouwbare methode is die waarbij de gemeten stijghoogte op de toplaag en in het filter gebruikt worden om een gemeten lek lengte te bepalen. Uit de zo verkregen resultaten blijkt dat de lek lengte van basalt uit 1984 het grootst is ($\Lambda = 0,66$ m), gevolgd door Basalton uit 2003 ($\Lambda = 0,54$ m). De basalt uit 2003 heeft de kleinste lek lengte ($\Lambda = 0,44$ m). Omdat de methode toch een beperkte nauwkeurigheid heeft, is ook een 90% betrouwbaarheidsinterval bepaald. Deze intervallen blijken duidelijk te overlappen:

- Basalt uit 1984: $0,46 < \Lambda < 0,86$ m
- Basalton uit 2003: $0,47 < \Lambda < 0,61$ m

- Basalt uit 2003: $0,36 < \Lambda < 0,52$ m

Het betrouwbaarheidsinterval van de basalt uit 1984 is wat breder dan de andere twee, omdat bij die proeven de drukopnemers wat verder uit elkaar zaten en er wat minder in de modelopstelling waren aangebracht. Dat heeft een nadelige invloed op de nauwkeurigheid.

Vanwege het feit dat de lek lengtes iets verschillen, is het ook te verwachten dat de stijghoogteverschillen bij een bepaalde golfonditie niet gelijk zijn. Ten opzichte van de Basalton uit 2003 zal volgens ANAMOS de basalt uit 1984 ongeveer 5 à 10% hogere stijghoogteverschillen te verwerken krijgen, en de basalt uit 2003 ongeveer 5 à 10% lagere. De verschillen zijn derhalve niet bijzonder groot.

Deze gemeten lek lengtes zijn vervolgens gebruikt voor het bepalen van de klemfactor in hoofdstuk 5 aan de hand van de gemeten stijghoogteverschillen over de toplaag bij begin van schade.

4 Stijghoogteverschil over de toplaag

4.1 Inleiding

Het stijghoogteverschil tussen toplaag en filter is bepalend voor de resulterende kracht op een steen van de toplaag. Het stijghoogteverschil is daarom een maat voor de effectieve belasting van een constructie. Stijghoogteverschillen zijn enerzijds afhankelijk van de golfbelasting maar worden anderzijds ook beïnvloed door de eigenschappen van de constructie (leklengte). In dit hoofdstuk is beschreven in hoeverre de gemeten stijghoogteverschillen van de proeven met basalt (1984), basalt (2003) en Basalton (2003) ten opzicht van de golfbelasting en de belangrijkste constructie-eigenschappen verschillen. Voor deze analyse zijn alle proeven gebruikt, zie Tabel B.1 en B.3.

De stijghoogteverschillen zijn gemeten met drukopnemers op de toplaag en in het filter. Daar waar zowel een drukopnemer aan de bovenzijde als aan de onderzijde is gemonteerd, is het stijghoogteverschil exact bekend. Gezien het feit dat het stijghoogteverloop in het filter doorgaans heel vloeiend verloopt als functie van de locatie, in tegenstelling tot de stijghoogte op de toplaag, kan ook het stijghoogteverschil vrij nauwkeurig vastgesteld worden als alleen een drukopnemer op het talud zit. Er kan dan met een vrij goede nauwkeurigheid geïnterpoleerd worden tussen de aangrenzende drukopnemers onder de toplaag ten behoeve van de druk aan de onderzijde.

Tijdens de analyse is gebleken dat niet alle drukopnemers tijdens de proeven goed gewerkt hebben. Dit levert vooral voor de analyse van proeven uit 1984 een probleem op, want van de 6 drukopnemerparen bleven slechts vier bruikbare paren over. Dit heeft een belangrijk invloed op de nauwkeurigheid waarmee de extreme stijghoogteverschillen kunnen worden bepaald, omdat deze ook net tussen de drukopnemerparen in zullen optreden, waardoor ze niet gemeten worden. Samen met de beperkte bemonsteringsfrequentie van deze proeven is in bijlage E vastgesteld dat hierdoor een onderschatting van het 2%-stijghoogteverschil van orde 20 à 30% is opgetreden.

De bewerking van de drukmetingen is uitvoerig beschreven in bijlage E. In Figuur 2 zijn de resultaten in dimensieloze vorm uitgezet, waarbij de volgende parameters gebruikt zijn:

$\phi_{w2\%}$ = stijghoogteverschil over de toplaag die door 2% van de inkomende golven overschreden wordt (m)

H_s = significante golfhoogte aan de teen van de constructie (m)

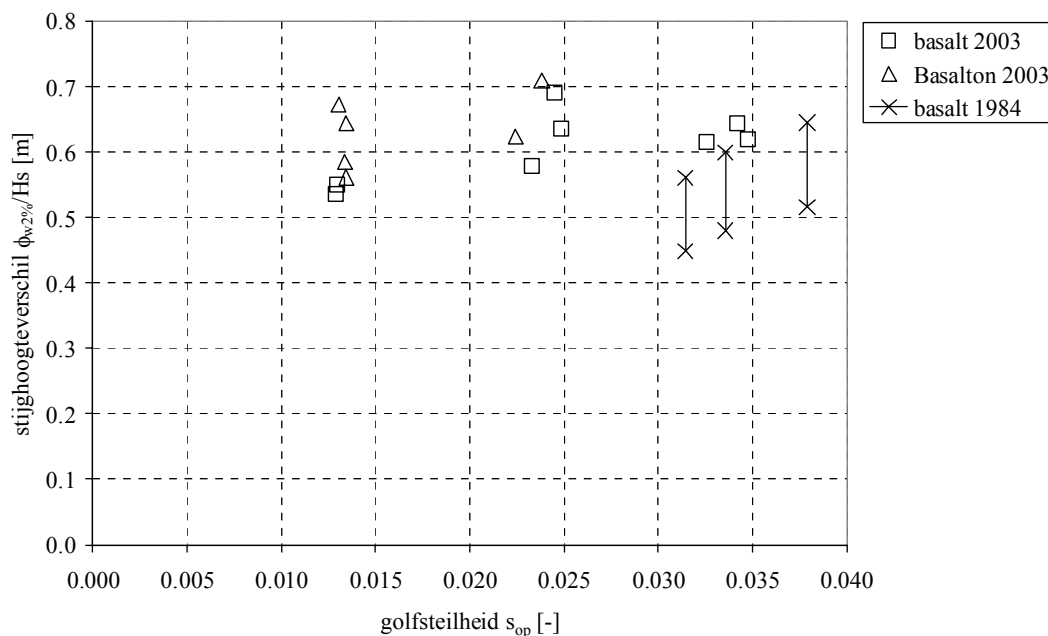
S_{op} = golfsteilheid = $H_s/1,56/T_p^2$ (-)

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

Op de horizontale as is de golfsteilheid weergegeven omdat de huidige rekenmodellen, zoals ANAMOS, een duidelijke afhankelijkheid van de golfsteilheid laten zien, waarbij bij een toename van de golfsteilheid het stijghoogteverschil afneemt. ANAMOS is echter meer geschikt voor relatief dichte steenzettingen (grote leklengte) dan de thans onderzochte relatief open steenzettingen. De vergelijking met de rekenmodellen komt in de volgende paragraaf ter sprake.

De meetpunten van basalt uit 1984 zijn weergegeven met twee kruisjes. Het onderste kruisje is het gemeten stijghoogteverschil, terwijl het bovenste kruisje een indicatie is van de grootte van het werkelijke opgetreden stijghoogteverschil. Hierbij is rekening gehouden met het feit dat door de beperkte instrumentatie de stijghoogteverschillen waarschijnlijk 20 à 30% zijn onderschat door de metingen.

Het stijghoogteverschil bij basalt uit 1984 is duidelijk kleiner dan die bij de bekledingen uit 2003, terwijl de lek lengte duidelijk groter was en dus een groter stijghoogte verschil verwacht werd. Er is echter tijdens dat onderzoek gewerkt met erg weinig drukopnemers, waardoor het stijghoogteverschil onderschat wordt, maar zelfs als de punten 25% hoger worden gelegd (bovenste kruisjes in Figuur 2), is het stijghoogte verschil nog steeds wat aan de kleine kant. De verhouding tussen de stijghoogteverschillen bij basalt uit 2003 en Basalton uit 2003 is wel conform de verwachtingen. De lek lengte van Basalton was iets groter, en de stijghoogteverschillen zijn dat ook.



Figuur 2 Verband tussen golfsteilheid en dimensieloze stijghoogteverschil $\phi_{w2\%}/H_s$

4.2 Vergelijking met empirische formules voor $\phi_{w2\%}$

De gemeten stijghoogteverschillen kunnen vergeleken worden met de berekende waarden met ANAMOS 2.21 en met de relaties uit Klein Breteler (2000). ANAMOS is rond 1990 ontwikkeld en is gebaseerd op regelmatige golven met een vertaling naar onregelmatige golven. De laatstgenoemde empirische relaties werden uit Deltagootproeven uit '97 en '98 met onregelmatige golven afgeleid en zijn alleen geldig voor de bekledingen en omstandigheden die toen onderzocht zijn:

$$\text{als } H_s \cdot T_p > 6 \text{ ms: } \frac{\phi_{w2\%}}{H_s} = 3,3 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{c_w^{3/2} \cdot \left(0,7 + \frac{4 \cdot k}{\sqrt{g \cdot D}} \right)}{g \cdot \sqrt{H_s \cdot T_p}} \quad (4.1)$$

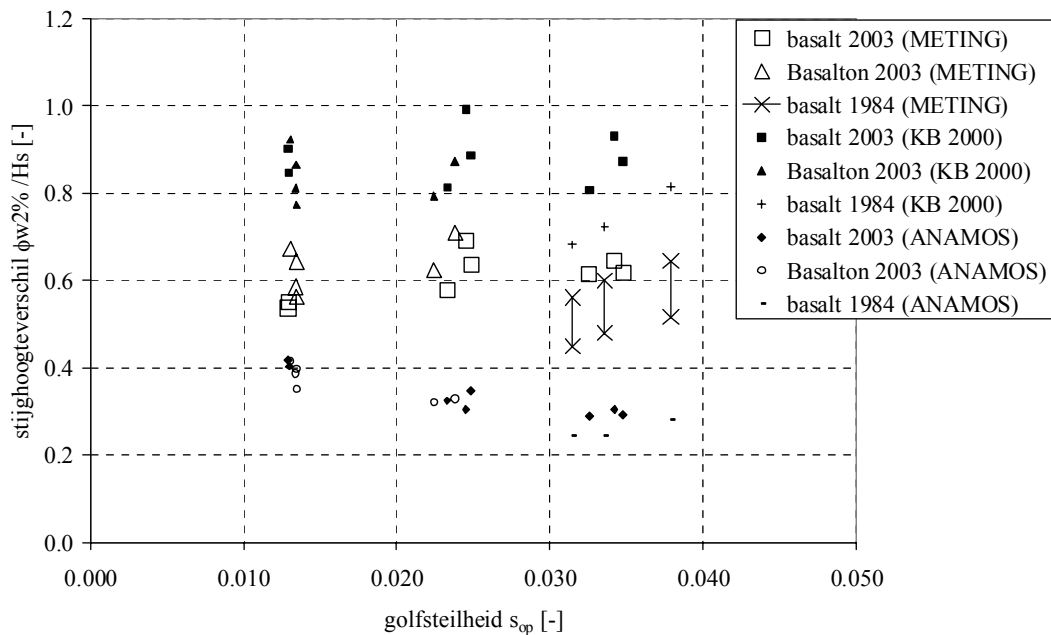
$$\text{als } H_s \cdot T_p \leq 6 \text{ ms: } \frac{\phi_{w2\%}}{H_s} = 0,8 \cdot \left(0,7 + \frac{4 \cdot k}{\sqrt{g \cdot D}} \right) \quad (4.2)$$

- $\phi_{w2\%}$ = stijghoogteverschil met overschrijdingspercentage van 2% [m]
- H_s = significante golfhoogte [m]
- c_w = voortplantingssnelheid van drukgolven in water, $c_w = 1485$ [m/s]
- k = doorlatendheid van het filter [m/s]
- g = versnelling van de zwaartekracht, $g = 9,81$ m/s²
- D = blokdikte [m]
- T_p = piekperiode van golven [s]
- b = filterdikte [m]

Volgens deze formules is het 2%-stijghoogteverschil voor grote golven met $H_s \cdot T_p > 6$ ms evenredig met $(s_{op} \cdot H_s)^{0,25}$ en neemt $\phi_{w2\%}$ dus weinig toe met toenemende golfhoogte. Voor kleine golven, met $H_s \cdot T_p < 6$ ms, is $\phi_{w2\%}$ evenredig met H_s en neemt het sterk toe met toenemende golfhoogte.

Alle proeven, die in deze studie geanalyseerd zijn, zijn met $H_s \cdot T_p > 6$ ms uitgevoerd. De constatering uit Bijlage E, dat het stijghoogteverschil maar weinig afhankelijk is van de golfhoogte, komt dus overeen met deze formules.

In Figuur 3 zijn de gemeten en de berekende stijghoogteverschillen dimensieloos weergegeven.



Figuur 3 Vergelijking tussen gemeten en berekende dimensieloze stijghoogteverschillen t.o.v. de golfsteilheid

De volgens de formules uit Klein Breteler (2000) berekende stijghoogteverschillen zijn bij basalt en Basalton uit 2003 ongeveer 30% groter dan de thans gemeten waarden. Voor de basalt uit 1984 is dit verschil wat kleiner als rekening gehouden wordt met het feit dat de metingen een onderschatting van de werkelijke stijghoogteverschillen geven. Het verschil is dan ongeveer 20%. De formules zijn destijds gebaseerd op metingen met rechthoekige blokken op een relatief fijn filter. Kennelijk zijn er aspecten aan de basalt en Basalton die nog niet in deze empirische formules opgenomen zijn. Anderzijds kan dit een gevolg zijn van een te hoog geschatte doorlatendheid van het filter.

De met behulp van ANAMOS 2.21 berekende stijghoogteverschillen nemen wat af met toenemende golfsteilheid, terwijl dat niet uit de metingen blijkt. Dit verschil in trend is onderzocht door Coeveld en Klein Breteler (2004). Verder wordt duidelijk dat de stijghoogteverschillen, die middels ANAMOS 2.21 berekend werden, veel kleiner zijn dan de gemeten waarden (factor 1,5 tot 2,4). ANAMOS 2.21 onderschat daarom de belastingen op de constructies, zoals al geconcludeerd was door Klein Breteler (2000).

4.3 Relatie stijghoogteverschillen tot de sterkte van de bekleding

De analyse van de stijghoogteverschillen zijn niet alleen gericht op het aantonen van belastingverschillen, maar vooral ook gericht op het aantonen van sterkteverschillen. Het gaat daarbij om het stijghoogteverschil dat nog net geen schade, of net wel schade, oplevert. De belasting is in dat geval in evenwicht met de sterkte. Gezien het feit dat het direct meten van de sterkte niet mogelijk is, terwijl de stijghoogteverschillen wel zijn gemeten, is dit een methode om indirect de sterkte te kwantificeren.

In Klein Breteler (2000) werd een kwalitatieve indeling gebruikt om de sterkte van de bekleding te beschrijven. Uit de onderzoeksresultaten van de Deltagootproeven uit 1997/1998 werden categorieën ontwikkeld voor de verhouding tussen het 2%-stijghoogteverschil tijdens de proef met beginnende schade ten opzichte van het eigen gewicht van de toplaag per m² (ΔD):

- zeer kleine sterkte: $\phi_{w2\%}/(\Delta D) \approx 1,6$
- kleine sterkte: $\phi_{w2\%}/(\Delta D) \approx 1,9$
- gemiddelde sterkte: $\phi_{w2\%}/(\Delta D) \approx 2,4$
- grote tot zeer grote sterkte: $\phi_{w2\%}/(\Delta D) \approx 2,7 - 3,5$

Deze indeling was gebaseerd op metingen met rechthoekige blokken op een relatief fijn filter en kan hier vergeleken worden met de resultaten van de proeven met basalt en Basalton op een iets grover filter.

Tijdens de proeven met basalt in 1984 is de eerste schade ontstaan tijdens proef 22, waarbij een stijghoogteverschil gemeten is van $\phi_{w2\%} = 0,84$ m (zie Tabel 4). Vanwege de verwachte onderschatting t.o.v. werkelijkheid als gevolg van de beperkte nauwkeurigheid, wordt deze waarden verhoogd met 25% en wordt daardoor: $\phi_{w2\%} = 1,05$ m.

proef (type, jaar, nummer)			H_s [m]	ξ_{op} [-]	$\phi_{w2\%}$ [m]	$\phi_{w2\%}/(\Delta D)$ [-]	beoordeling sterkte
basalt	1984	22	1,75	1,51	1,05*	1,7*	(zeer) klein
basalt	2003	6	1,54	1,87	0,89	2,3	gemiddeld
basalt	2003	18	1,70	1,6	1,07	> 2,7	groot/zeer groot
Basalton	2003	25	1,41	1,85	1,00	> 2,7	groot/zeer groot

Tabel 4 Beoordeling sterkte van de bekleding bij begin van schade (* = 25% verhoogde waarde t.o.v. de meting vanwege onderschatting, zie tekst)

Tijdens de proeven met basalt uit 2003 waren de resultaten wat minder eenduidig. Tijdens proef 6 was de eerste (kleine) schade ontstaan bij een stijghoogteverschil van $\phi_{2\%} = 0,89$ m. Even later was er schade ontstaan tijdens proef 8a bij een stijghoogteverschil van slechts $\phi_{2\%} = 0,66$ m. Na reparatie van dit zwakke plekje bleek de bekleding nog bestand te zijn tegen proeven waarbij $\phi_{2\%} = 1,07$ m optrad (proef 18). Voorlopig wordt de eerste schade tijdens proef 6 en het feit dat proef 18 zonder schade is doorstaan gebruikt voor de nadere analyse. Het merkwaardige resultaat tijdens proef 8a, waarbij het stijghoogteverschil nauwelijks groter was dan het eigen gewicht (terwijl dit tijdens eerdere proeven al was doorstaan), wordt voorlopig buiten beschouwing gelaten.

De proeven met Basalton hebben geen schade opgeleverd, terwijl het grootste 2%-stijghoogteverschil $\phi_{2\%} = 1,00$ m is geweest (proef 25).

De proeven met beginnende schade zijn in tabel 4 samengevat. Volgens de bovengenoemde categorieën was de sterkte van basalt uit 1984 klein (proef 22), maar was de basalt uit 2003 eerst gemiddeld van sterkte (proef 6) en later groot tot zeer groot (proef 18). Zeer kleine sterkten zijn bij eerder onderzoek alleen opgetreden bij bekledingen zonder voegvulling en met brede stootvoegen. Dat zou in de richting kunnen wijzen dat lokaal bij de zuilen waar schade opgetreden is, de voegen slecht of nauwelijks gevuld waren. Volgens Eysink & Klein Breteler (2003), echter, waren de spleten ook na de proeven in het algemeen goed gevuld. Daarom lijkt het waarschijnlijker dat er nog meer factoren invloed op het uitlichten van zuilen hadden. Mogelijk is dat een zuil met een toevallig ongelukkige vorm minder sterk geklemd was dan andere zuilen. Na het herstellen van de schade was de klemming kennelijk beter.

Maar het kan ook aan de duur van het stijghoogteverschil liggen. Dat aspect is in deze analyse nog onderbelicht gebleven en zal in het volgende hoofdstuk aan de orde komen. Het is begrijpelijk dat een klein stijghoogteverschil, dat relatief lang aanhoudt, eenzelfde blokbeweging kan veroorzaken als een kortdurend stijghoogteverschil dat zeer groot is.

4.4 Conclusie ten aanzien van de stijghoogteverschillen

De analyse van de stijghoogteverschillen heeft enerzijds geresulteerd in een kwantificering hiervan en anderzijds tot een waarde van het stijghoogteverschil bij begin van schade.

Uit Figuur 2 blijkt dat de golfsteilheid slechts een beperkte invloed heeft en het gemeten dimensieloze stijghoogteverschil tijdens de proeven met basalt uit 1984 gemiddeld $\phi_{2\%}/H_s = 0,48$ was, en tijdens het onderzoek van 2003 voor basalt $\phi_{w2\%}/H_s = 0,62$ en Basalton $\phi_{w2\%}/H_s = 0,63$ m was. Het werkelijke stijghoogteverschil was tijdens de proeven uit 1984 echter 20% à 30% hoger (zie analyse van nauwkeurigheid in Bijlage E, paragraaf 3.1): $\phi_{w2\%}/H_s = 0,5$ à $0,6$.

Het feit dat het stijghoogteverschil van basalt uit 1984 iets lager is dan de andere twee was niet te verwachten op basis van de gemeten lek lengte. De lek lengte van basalt 1984 was immers beduidend groter dan die van basalt 2003 en Basalton 2003, waardoor een groter stijghoogteverschil te verwachten was. Het is denkbaar dat de beperkte instrumentatie aan de lage waarde bijgedragen heeft.

De gemeten stijghoogteverschillen bij basalt 2003 en Basalton 2003 zijn ongeveer gelijk, terwijl er toch een verschil in gemeten lek lengte is, namelijk respectievelijk 0,44 en 0,54 m. Dit verschil is echter zo klein, dat dit bij deze metingen inderdaad tot de geconstateerde kleine verschillen leidt van 5 à 10%.

De volgens de formules uit Klein Breteler (2000) berekende stijghoogteverschillen zijn bij basalt en Basalton uit 2003 ongeveer 30% groter dan de thans gemeten waarden. Voor de basalt uit 1984 is dit verschil wat kleiner als rekening gehouden wordt met het feit dat de metingen een onderschatting van de werkelijke stijghoogteverschillen geven. Het verschil is dan ongeveer 20%. De formules zijn destijds gebaseerd op metingen met rechthoekige blokken op een relatief fijn filter. Kennelijk zijn er aspecten aan de basalt en Basalton die nog niet in deze empirische formules opgenomen zijn.

Het feit dat het stijghoogteverschil in de metingen slechts weinig toeneemt met toenemende golfhoogte is wel in goede overeenstemming met de formules uit Klein Breteler (2000).

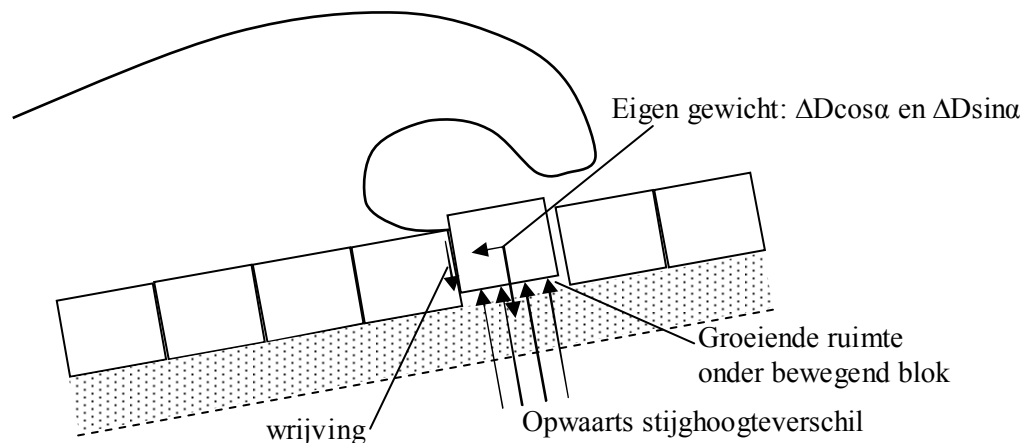
Door het stijghoogteverschil, $\phi_{w2\%}$, dimensieloos te maken met het eigen gewicht van de toplaag, ΔD , en die te beschouwen in relatie tot het al dan niet optreden van schade, kan een uitspraak gedaan worden over de sterkte van de toplaag. Dit was ook al uitgevoerd voor rechthoekige blokken in Klein Breteler (2000). Het blijkt dat de basalt uit 1984 volgens deze analyse een kleine tot zeer kleine sterkte heeft, de basalt uit 2003 een gemiddelde tot (zeer) grote sterkte en de Basalton uit 2003 een grote tot zeer grote sterkte heeft.

5 Klemming

5.1 Inleiding

De stabiliteit van een steenzetting wordt bepaald door een aantal krachten en processen, die enerzijds bijdragen aan de sterkte, en anderzijds de belasting (het stijghoogteverschil over de toplaag) beïnvloeden. Deze worden in deze inleiding kort beschreven.

Een steen uit een steenzetting, die door de golfaanval een opwaarts stijghoogteverschil krijgt dat iets groter is dan het eigen gewicht van de steen (onder water), zal nog niet de neiging hebben te gaan bewegen. De steen zal namelijk ook een interactie ondervinden met de stenen er omheen. Enerzijds bestaat deze interactie uit de wrijving die voortvloeit uit het feit dat de steenzetting op een talud ligt en de steen dus met de gewichtscomponent $\Delta D \sin \alpha$ tegen zijn onderbuurman ligt. Anderzijds is het denkbaar dat de stenen in de rij erboven hun gewichtscomponent evenwijdig aan het talud op de betreffende steen uitoefenen, maar ook kunnen de stenen links en rechts van de betreffende steen (in dezelfde rij) zo stijf tegen de betreffende steen aan liggen dat ook zij wrijvingskrachten uitoefenen. Al deze interactiekrachten die bijdragen aan de sterkte van de betreffende steen, worden klemming genoemd.



Figuur 4 Instabiele steen

Zodra het opwaartse stijghoogteverschil het eigen gewicht en de klemming overschrijdt, zal het blok gaan bewegen. Op dat moment zal niet alleen het blok bewegen, maar zal ook het water in het filter naar het bewegende blok moeten stromen om de steeds groter wordende ruimte onder het bewegende blok te blijven vullen met water (zie figuur 4). Hoe sneller het blok beweegt, hoe sneller ook het water door het filter moet stromen, hetgeen gepaard gaat met een verval in het filter. Dat verval zal leiden tot een verlaging van de druk onder het bewegende blok. Dit proces ervaart men ook als men probeert een blok uit een zetting te trekken met een touw, terwijl de zetting onder water ligt. Dit gaat veel gemakkelijker als er heel langzaam getrokken wordt, terwijl het blok vast gezogen lijkt te liggen op zijn

ondergrond als men het blok er heel snel uit wil trekken. Dit wordt de invloed van de verhinderde toestroming genoemd.

Tenslotte wordt de beweging nog beïnvloed door de traagheid van de steen en het bewegende water.

In bijlage F zijn deze processen gekwantificeerd voor de proef waarbij de schade is ontstaan. Er wordt daarbij uitgegaan van het evenwicht van de volgende krachten:

- het eigen gewicht van een zuil
- de klemming die de zuil ondervindt met de zuilen er omheen
- het stijghoogteverschil over de toplaaag
- de invloed van de verhinderde toestroming, uitgedrukt als een vermindering van het stijghoogteverschil over de toplaaag
- de invloed van de traagheidskrachten

Als de steen omhoog beweegt tijdens de maatgevende golf, is er evenwicht van deze krachten. In dit krachtenevenwicht is het eigen gewicht van de zuil bekend, het stijghoogteverschil over de toplaaag gemeten, en de invloed van verhinderde toestroming en traagheid berekend. Alleen de klemming blijft als onbekende in het evenwicht over en kan derhalve gekwantificeerd worden. Dit is in bijlage F uitgewerkt.

Het is de verwachting dat het verschil in stabiliteit tussen basalt en Basalton vooral bepaald wordt door het verschil in klemming.

5.2 Bepaling van de klemming

Zoals in de vorige paragraaf is vermeld, kan de klemming berekend worden aan de hand van het krachtenevenwicht. Dit krachtenevenwicht kan weergegeven worden in de volgende formule:

Belasting = sterkte

$$\phi_w - \phi_{toe} = \Gamma_{klem} \cdot \Delta \cdot D \cdot \cos \alpha + \phi_{traag} \quad (5.1)$$

ϕ_w = stijghoogteverschil over de toplaaag (m)

ϕ_{toe} = stijghoogteverschil dat overeenkomt met de invloed van de toestroming naar een bewegende zuil (-)

Γ_{klem} = invloed van de klemkracht (-)

Δ = relatieve volumieke massa van de steen (-)

D = dikte van de toplaaag (m)

ϕ_{traag} = stijghoogteverschil dat overeenkomt met de invloed van de traagheid van een bewegend blok (-)

De stijghoogteverschillen ϕ_{traag} en ϕ_{toe} kunnen gekwantificeerd worden met de formules die ook zijn opgenomen in ANAMOS. Deze formules zijn afgeleid voor het geval er één zuil uit de bekleding komt. Het tijdens de proeven vastgestelde bezwijkmechanisme sluit hierop aan.

In de formule is Γ_{klem} de enige onbekende en kan dus berekend worden:

$$\Gamma_{klem} = \frac{\phi_{w2\%} - \phi_{traag} - \phi_{toe}}{\Delta \cdot D \cdot \cos \alpha} \quad (5.2)$$

Voor het berekenen van ϕ_{traag} en ϕ_{toe} is het nodig te weten hoelang de overbelaste situatie aanhield. Het gaat om de tijdsduur in de maatgevende golf dat $\phi_w > \Gamma_{klem} \Delta D \cos \alpha$.

Aan de hand van de stijghoogtemetingen als functie van de tijd is de tijdsduur ($t_{\phi > 50\%}$) afgeleid waarin het stijghoogteverschil groter is dan 50% van het maximum in die golf ($\phi_{x\%}$ = gefilterd integraal stijghoogteverschil over de toplaag met overschrijdingsfrequentie van x%) en de tijdsduur ($t_{\phi > 75\%}$) dat die groter is dan 75% van het maximum. Steeds is gekeken naar het 4 Hz gefilterde signaal. De analyse van de stijghoogteverschillen heeft het volgende opgeleverd:

- Basalt 1984: $t_{\phi > 50\%} \approx 0,38$ s; $t_{\phi > 75\%} \approx 0,24$ s
- Basalt 2003:
 - Bij beginnende schade: $t_{\phi > 50\%} \approx 0,29$ s; $t_{\phi > 75\%} \approx 0,16$ s
 - Extreme belasting zonder schade: $t_{\phi > 50\%} \approx 0,37$ s; $t_{\phi > 75\%} \approx 0,21$ s
- Basalton 2003: Extreme belasting zonder schade: $t_{\phi > 50\%} \approx 0,33$ s; $t_{\phi > 75\%} \approx 0,19$ s

In bijlage F is in detail aangegeven hoe uiteindelijk de grootte van klemming iteratief is bepaald. Het resultaat is als volgt:

- Basalt 1984: $\Gamma_{klem} = 1,2$ à $1,5$
- Basalt 2003:
 - Bij beginnende schade: $\Gamma_{klem} = 1,7$ à $2,1$
 - Na schade herstel, ondergrens: $\Gamma_{klem} \geq 2,0$ à $2,6$
- Basalton 2003: geen schade, dus ondergrens: $\Gamma_{klem} \geq 1,9$ à $2,5$

De breedte van de range van de klemfactoren is ontstaan door enige variatie van de moeilijk in te schatten invoergrootheden, zoals de belastingduur en doorlatendheid van de toplaag.

De berekende toestroming, ϕ_{toe} , heeft ook invloed op het rekenresultaat, terwijl de betrouwbaarheid van de formule beperkt is. Daarom is de invloed van ϕ_{toe} op Γ_{klem} geschat. Dit is gedaan door $\phi_{toe} = 0$ te stellen en vervolgens de waarde van Γ_{klem} opnieuw te berekenen met:

$$\phi_w = \Gamma_{klem} \cdot \Delta D \cos \alpha + \phi_{traag} \quad (5.3)$$

Dit leverde een kleine verhoging van de klemfactor op van ongeveer 0,1 à 0,2.

Verder is ook de klemming van de basalt uit 1984 bepaald met als uitgangspunt het gemeten stijghoogteverschil zonder de correctie voor het feit dat dit een onderschatting is van het werkelijke opgetreden stijghoogteverschil. Als gerekend wordt met $\phi_{w2\%} = 0,84$ m resulteert er een klemming ter grootte van $\Gamma_{klem} = 1,0$ à $1,2$.

5.3 Conclusie ten aanzien van de klemming

Uit deze resultaten blijkt dat de basalt uit 1984 slecht geklemd was. De inwassing was verzorgd met een mengsel van steenslag en kleischelpen. Wellicht heeft dit vreemde mengsel bijgedragen aan een slechte klemming.

Verder blijkt de klemming bij een toevallig slecht zittende zuil in de basalt wat lager te zijn, dan wanneer die zuil na schade er goed in terug gezet is. De klemming neemt dan toe van $\Gamma_{klem} \approx 1,7$ à $2,1$ naar minstens $\Gamma_{klem} > 2,0$ à $2,6$. Dit sluit aan op de ervaring van

dijkbeheerders, die geconstateerd hebben dat basalt pas zijn eindsterkte bereikt nadat er een storm overeen is gegaan.

De klemming van basalt uit 2003 ligt in dezelfde orde van grootte als die van de ondergrens van de Basalton uit 2003. De klemming van de zwakke plek in de basalt uit 2003 ($\Gamma_{\text{klem}} = 1,7 \text{ à } 2,2$) is iets kleiner dan gemeten is bij blokken op hun kant met ingewassen brede voegen, maar van dezelfde orde van grootte als de Basalton op een lage berm (Klein Breteler 2000). De klemming van de Basalton uit 2003 is vergelijkbaar met die van blokken op hun kant met ingewassen brede voegen (Klein Breteler 2000).

6 Samenvatting en conclusies

In de voorgaande hoofdstukken is in detail gekeken naar de resultaten van de 3 beschikbare modelonderzoeken met basalt en Basalton die goed geïnstrumenteerd waren. Daarbij zijn niet alleen de golfcondities ten opzichte van eigenschappen van de steenzettingen beschouwd, maar zijn ook de gemeten stijghoogten op en onder de steenzetting uitgewerkt. In bijlage G zijn daarnaast ook nog de onderzoeksresultaten van de vier weinig geïnstrumenteerde modellen geanalyseerd.

Al deze resultaten tezamen geven conclusies die onderstaand zijn samengevat.

6.1 Algemene aspecten

Enkele relevante aspecten van de onderzochte constructies zijn:

- Basalton '83:
 - De zetting was ingewassen met metaalslakken en was tijdens het onderzoek opgespannen geraakt tussen de gootwanden. Daardoor zijn de resultaten niet bruikbaar.
- Basalt '84:
 - Zetting is ingewassen met een mengsel van gebroken grind en kleischelpen.
 - Er is weinig specifieke informatie over de inwassing en het filter, waardoor het moeilijk was om de leklengte met Anamos te berekenen of te schatten.
- Basalt '02 en Basalton '04:
 - De zuilen lagen op het buitentalud van een lage havendam met de kruin in de buurt van de waterlijn.
 - Zetting was na het inwassen niet getrild en ook is er niet ingegolfd.
 - Na reparatie van initiële schades is geen schade meer opgetreden.
- Basalton '03:
 - Vrijwel geen beweging langs het talud (geen comprimering).
 - Geen schade opgetreden.
 - De zuilen zijn een beetje taps, waardoor het inwasmateriaal zich wellicht beter vastzet in de spleten. Bovendien is beton veel zachter dan basalt, waardoor de inwasmateriaalkorrels een beetje in de beton kunnen invreten, waardoor ze beter vast blijven zitten.
- Basalt '03:
 - De basalt is onder invloed van de golfbelasting langs het talud in elkaar geschoven (gecomprimeerd in het vlak van het talud).
 - Na twee reparaties van initiële schade is geen schade meer opgetreden.
- Basalt algemeen:
 - Basalt is zeer hard en relatief glad, waardoor de interactie tussen de zuilen minder kan zijn dan Basalton.
 - Sommige basaltzuilen hebben een afwijkende vorm. Vooral als het vlak op het talud niet haaks maar scheef is, kan een zuil er gemakkelijker uitgelicht worden.

6.2 Leklengte, 2%-stijghoogteverschillen en klemming

De analyse van de gemeten stijghoogteverschillen over de zetting en in het filter heeft het volgende opgeleverd:

- Leklengte:
 - De gemeten leklengte (Λ) van basalt '84 was groter dan die van basalt '03 en Basalton '03, waarschijnlijk als gevolg van de kleischelpen in het inwasmateriaal.
 - De leklengte van Basalton '03 was wat groter dan van basalt '03, namelijk respectievelijk 0,54 en 0,44 m, waardoor verwacht kan worden dat de stijghoogteverschillen over de Basalton ca 5 à 10% groter zijn dan over de basalt.
- Stijghoogteverschil:
 - De onderlinge afstand tussen de drukopnemers was voor basalt '84 zo groot, dat verwacht kan worden dat de stijghoogteverschillen ongeveer 20 à 30% onderschat worden. In de verdere analyse is hiermee rekening gehouden, door ook te rekenen met een 25% vergrote waarde van het stijghoogteverschil.
 - De stijghoogteverschillen, die door Klein Breteler (2002) zijn gerapporteerd m.b.t. rechthoekige blokken op hun kant met brede spleten en zijn beduidend groter dan bij de thans onderzochte basalt en Basalton.
- Klemming:
 - De minst geklemde zuil van Basalt '84 had een verrassend lage klemming. Wellicht hebben de kleischelpen bijgedragen aan een slechte klemming, bijvoorbeeld doordat het gebroken grind in de weg zit. Als het grind geen brug kan vormen tussen de zuilen, zal de klemming slecht zijn.
 - De minst geklemde zuil van basalt '03 had, ondanks zijn minder optimale vorm, toch nog een vrij goede klemming.
 - Na reparatie van de 2 losgekomen zuilen van basalt '03 was de klemming goed tot zeer goed.
 - De minst geklemde zuil van Basalton '03 was zeer goed geklemd, en veel beter dan die van basalt '84 en '03. Wellicht hebben de bewegingen van de basaltzuilen langs het talud (comprimeren) ertoe geleid dat sommige zuilen minder geklemd zijn komen te liggen. De soms ongelukkige vorm van de basalt, tegenover de lichte tapsheid van Basalton, zou kunnen bijdragen aan de geconstateerde verschillen.

6.3 Conclusies

Op basis van vier modelonderzoeken in de Deltagoot met basalt en één met Basalton is een analyse gemaakt van de stabiliteit van basalt ten opzichte van Basalton. Daarbij is uitvoerig gebruik gemaakt van de gemeten drukken op de zetting en in het filter tijdens twee modelonderzoeken met basalt en één met Basalton.

Dit heeft geleid tot de volgende resultaten:

1. De gemeten leklengte van de steenzetting van basalt uit '84 (Burger 1985) was groter dan die van basalt '03 en Basalton '03 (Eysink en Klein Breteler 2003), waarschijnlijk als gevolg van de kleischelpen in het inwasmateriaal van de basalt uit '84.

2. De gemeten stijghoogteverschillen bij Basalton 2003 zijn iets groter dan die bij basalt 2003, hetgeen precies in overeenstemming is met de verhouding in gemeten lek lengten.
3. De volgens de formules uit Klein Breteler (2000) berekende stijghoogteverschillen zijn bij basalt en Basalton uit 2003 ongeveer 30% groter dan de thans gemeten waarden. Rekening houdend met het feit dat voor de basalt uit 1984 de stijghoogteverschillen flink zijn onderschat door de gebrekkige instrumentatie, was dit voor de basalt uit '84 ongeveer 20%. De formules zijn destijds gebaseerd op metingen met rechthoekige blokken op een relatief fijn filter. Kennelijk zijn er aspecten aan de basalt en Basalton die nog niet in deze empirische formules opgenomen zijn. Het feit dat het stijghoogteverschil in de metingen slechts weinig toeneemt met toenemende golfhoogte is wel in goede overeenstemming met de formules uit Klein Breteler (2000).
4. Door het stijghoogteverschil, $\phi_{w2\%}$, dimensieloos te maken met het eigen gewicht van de toplaag, ΔD , en die te beschouwen in relatie tot het al dan niet optreden van schade, kan een uitspraak gedaan worden over de sterkte van de toplaag. Dit was ook al gedaan voor rechthoekige blokken in Klein Breteler (2000). Het blijkt dat de basalt uit 1984 volgens deze analyse een zeer kleine sterkte heeft, de basalt uit 2003 een gemiddelde tot (zeer) grote sterkte en de Basalton uit 2003 een grote tot zeer grote sterkte heeft.
5. Op basis van het gemeten stijghoogteverschil bij schade, of het grootste stijghoogteverschil dat nog geen schade geeft, is de grootte van de klemming (interactie tussen de zuilen) bepaald:
 - a) Basalt 1984: $\Gamma_{klem} = 1,2 \text{ à } 1,5$
 - b) Basalt 2003:
 - Bij beginnende schade: $\Gamma_{klem} = 1,7 \text{ à } 2,1$
 - Na schade herstel, ondergrens: $\Gamma_{klem} \geq 2,0 \text{ à } 2,6$
 - c) Basalton 2003: geen schade, dus ondergrens: $\Gamma_{klem} \geq 1,9 \text{ à } 2,5$

De breedte van de range van de klemfactoren is ontstaan door enige variatie van de moeilijk in te schatten invoergrootheden, zoals de belastingduur en doorlatendheid van de toplaag.

Hieruit blijkt het volgende:

- De minst geklemde zuil van basalt '84 was slecht geklemd, vergelijkbaar met plat geplaatste rechthoekige betonblokken. Wellicht hebben de kleischelpen in het inwasmateriaal bijgedragen aan een slechte klemming.
- De minst geklemde zuil van basalt '03 had, ondanks zijn minder optimale vorm, toch nog een vrij goede klemming.
- Na reparatie van de 2 losgekomen zuilen van basalt '03 was de klemming goed tot zeer goed.
- De minst geklemde zuil van Basalton '03 was zeer goed geklemd, en veel beter dan die van basalt '84 en '03. Door Klein Breteler en Eysink (2003) is geconstateerd dat de basalt in het vlak van het talud naar beneden schuift en dus comprimeert, terwijl dit bij Basalton niet gebeurt. Wellicht hebben deze bewegingen van de basaltzuilen langs het talud (comprimeren) ertoe geleid dat sommige zuilen minder geklemd zijn komen te liggen. De soms ongelukkige vorm van de basalt, tegenover de lichte tapsheid van Basalton, zou kunnen bijdragen aan de geconstateerde verschillen.

6. De steenzettingen van basalt uit 2002, die aangelegd was op een lage havendam met kruin gelijk aan de waterstand (Klein Breteler 2002), liet al initiële schade zien bij een belasting die kleiner was dan die op de basalt uit 1984. Deze bekledingen hadden waarschijnlijk een geringere klemming omdat er minder zorg is besteed aan het inwassen (er is bijvoorbeeld niet getrilt) en door het geringe afstand tussen de belaste zone en de kruin. Na herstellen van de schade werd bij oplopende golfbelasting geen schade meer gevonden. Dit impliceert een grotere stabiliteit na het herstellen. De stabiliteit van de Basalton op een lage havendam (2004) was beduidend groter dan die van basalt.

Op basis van deze resultaten van de analyse kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- De zetting van basalt is slechter geklemd dan Basalton, mogelijk door een combinatie van factoren, zoals de aanwezigheid van kleischelpen in het inwasmateriaal in basalt '84, de soms ongelukkige vorm van basaltzuilen, de bewegingen van zuilen in het vlak van het talud en het relatief gladde en harde oppervlak van basalt.
- De klemming van de basalt neemt in de loop der tijd sterk toe, zeker als de slechtste locaties gerepareerd worden. De basalt uit 2002 was niet aangetrild en niet ingegolfd, hetgeen waarschijnlijk bijgedragen heeft aan het ontstaan van schade bij een relatief lage golfbelasting.
- Het relatief stroeve oppervlak van Basalton en mogelijk ook de tapsheid van de zuilen, dragen bij aan het relatief snel ontwikkelen van een zeer goede klemming.

Dit betekent dat basalt in het begin hier en daar schade zou kunnen ondervinden, maar op den duur, nadat de slechtste plekken zijn gerepareerd, ontstaat een goed geklemd zetting met hoge stabiliteit. Dit betekent dat de definitieve sterkte van basalt pas benaderd wordt nadat een zware golfbelasting op de zetting is opgetreden.

Hierdoor is basalt wellicht geschikter om toe te passen in het onderste deel van het talud, waar vaak stormen optreden en initiële schade geen grote consequenties hoeft te hebben. Het is wellicht minder geschikt om toe te passen de buurt van het stormvloedpeil, omdat het dan slechts zeer zelden belast wordt en het dan om zo'n extreme belasting gaat dat schade ernstige gevolgen kan hebben.

Bij Basalton wordt de eindsterkte al snel na aanleg bereikt, zonder dat veel lokale schade ontstaat.

Referenties

Burger A. (1985)

Sterkte Oosterschelde dijken onder geconcentreerde golfaanval;
Onderzoek naar de stabiliteit van enkele veel voorkomende taludverdedigingen onder langdurige golfaanval bij een vaste waterstand
WL | Delft Hydraulics, verslag Deltagootonderzoek M2036, maart 1985

Coeveld, M. (2003)

Onderzoeksprogramma kennisleemtes steenbekledingen; Software-ontwikkeling en toepassing voor kwantificering van golfklappen
WL | Delft Hydraulics, verslag H4328, december 2003

Eysink en Klein Breteler (2003)

Onderzoeksprogramma kennisleemtes steenbekledingen; Deltagootonderzoek naar stabiliteit van basalt
WL | Delft Hydraulics, meetverslag H4327, december 2003

Klein Breteler (1992)

Taludbekledingen van gezette steen
Stabiliteit van de toplaag
WL | Delft Hydraulics, H1795, deel xxa, april 1992

Klein Breteler M. (2000)

Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen
Analyse van resultaten van Deltagootproeven
WL | Delft Hydraulics, verslag H3272, mei 2000

Klein Breteler M. (2002)

Stabiliteit van westelijke havendam van Urk en Ketelhaven
Deltagootproeven op kruin en binnentalud
WL | Delft Hydraulics, verslag H4083, juli 2002

Klein Breteler M. en Coeveld, M. (2004)

Onderzoeksprogramma kennisleemtes steenbekledingen;
Kwantificering golfbelasting op steenbekledingen
WL | Delft Hydraulics, conceptverslag H 4419, oktober 2004

Kuiper, C., M. Klein Breteler, L. Booster en W. Eysink (2004)

Stabiliteit van gezette steenbekledingen op havendammen,
afleiding van een verfijnde toetsmethode
WL | Delft Hydraulics, conceptverslag H4432, november 2004

Weide, J. v.d. en P.J. Visser (1983)

Basalton, stabiliteit onder golfaanval
WL | Delft Hydraulics, verslag M1900, februari 1983