

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
Zeeweringen

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	karacteristieke 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 toplaag
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	leklengte
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 bezwijkgolfhogten 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 topplagdikte, soortelijke massa van de zuilen, taludhelling, filterlaagdikte en doorlatendheid van topplag (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 topplag 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 topplag 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 topplag. 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

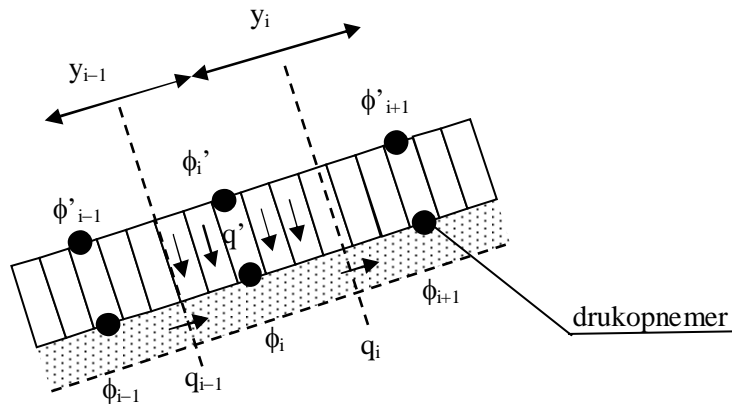
Λ = lek lengte [m]

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 stippelijnen 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 stippelijnen 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 stippelijnen (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 Basalton 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.

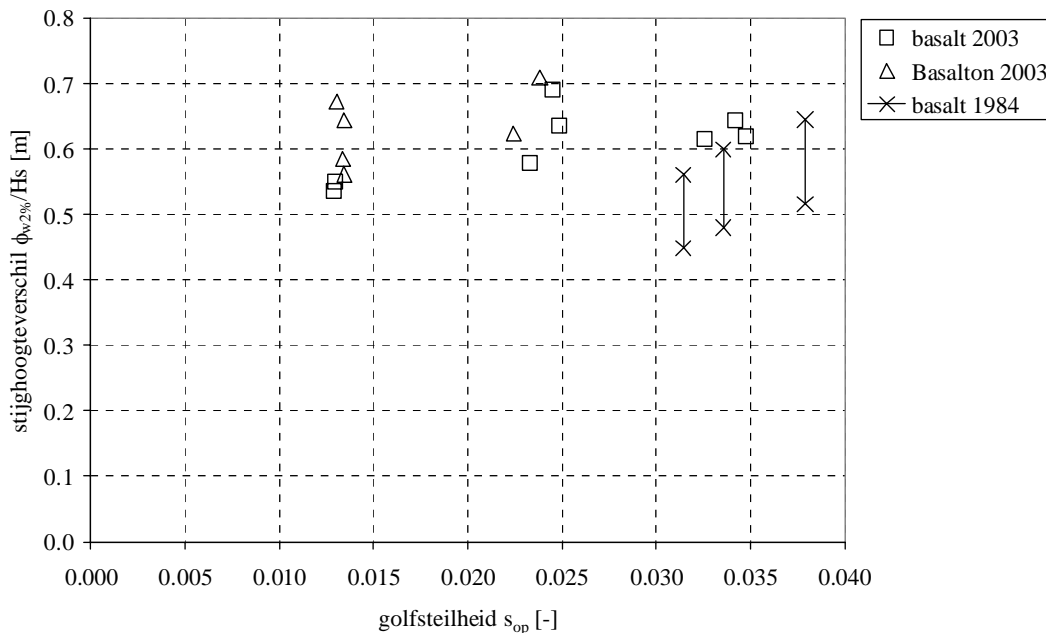
De bewerking van de drukmetingen is uitvoerig beschreven in bijlage E. In Figuur 2 zijn de resultaten in dimensieloze vorm uitgezet, waarbij de volgende parameters gebruikt zijn:

- $\phi_{w2\%}$ = 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:

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

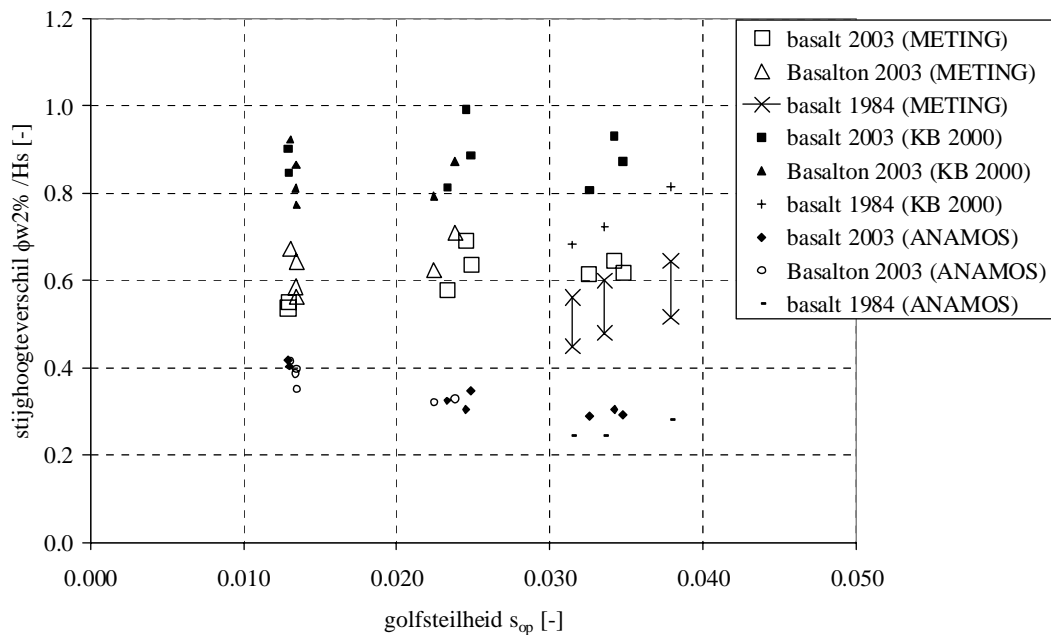
$$\text{als } H_s \cdot T_p \leq 6 \text{ ms: } \frac{\phi_{w2\%}}{H_s} = 0,8 \cdot \left(0,7 + \frac{4 \cdot k}{\sqrt{g \cdot D}} \right) \quad (4.2)$$

- $\phi_{w2\%}$ = 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, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- 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 ingeschatte 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).

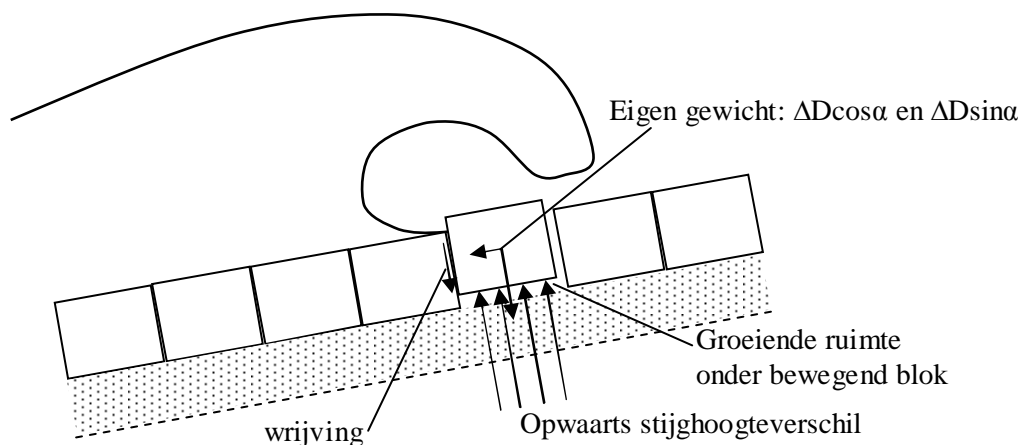
Door het stijghoogteverschil, $\phi_{w2\%}$, dimensieloos te maken met het eigen gewicht van de toplaag, ΔD , en die te beschouwen in relatie tot het al dan niet optreden van schade, kan een uitspraak gedaan worden over de sterkte van de toplaag. Dit was ook al uitgevoerd voor rechthoekige blokken in 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 te 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 toplaag
- de invloed van de verhinderde toestroming, uitgedrukt als een vermindering van het stijghoogteverschil over de toplaag
- 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 toplaag 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 toplaag (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 toplaag (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:

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

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

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)

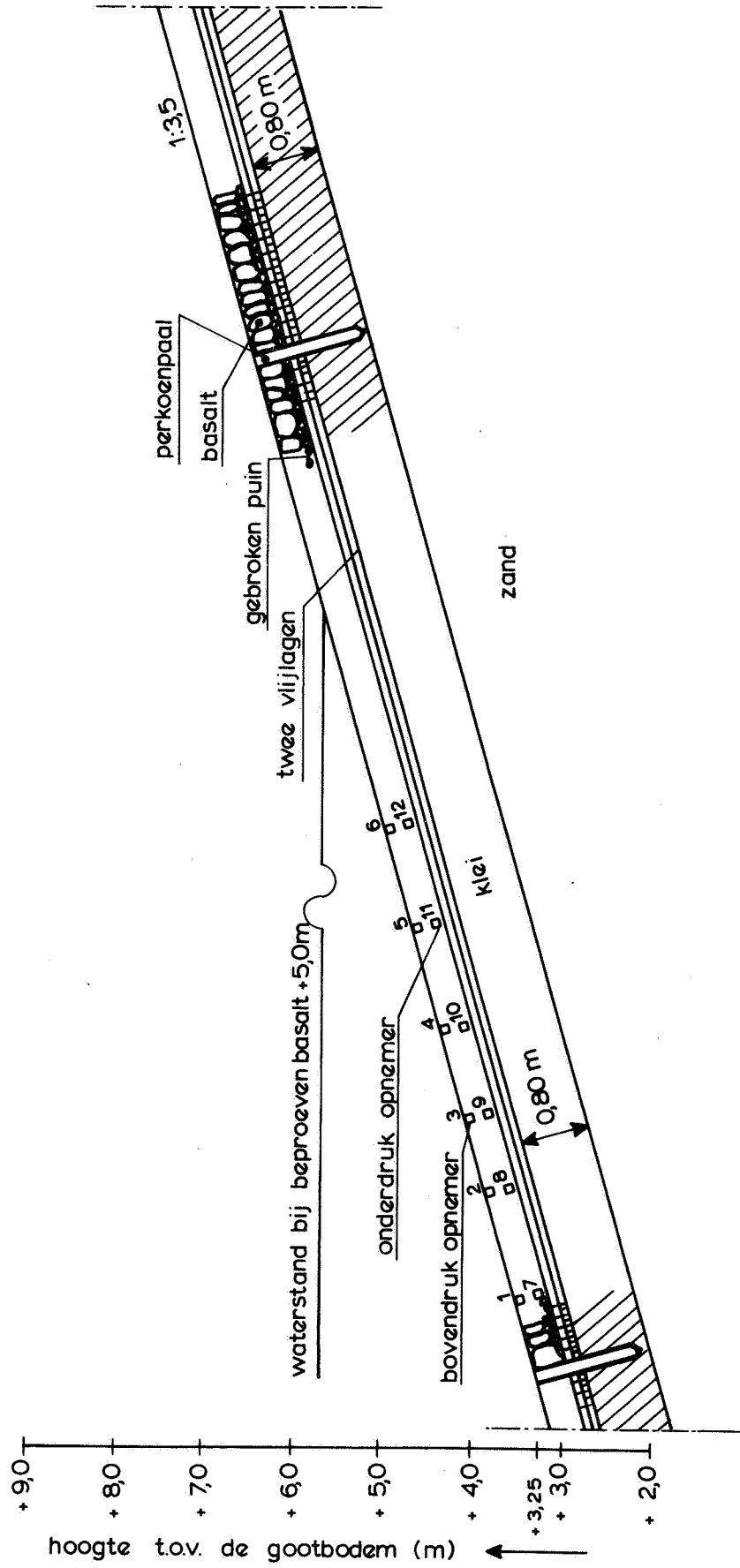
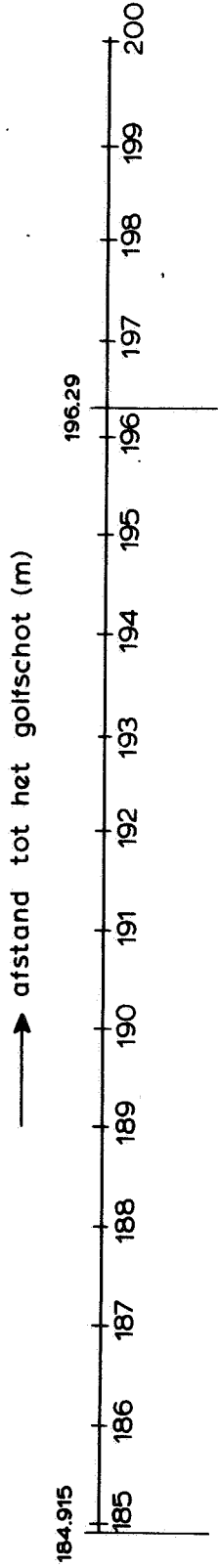
Stabiliteit van gezette steenbekledingen op havendammen,
afleiding van een verfijnde toetsmethode
WL | Delft Hydraulics, conceptverslag H4432, november 2004

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

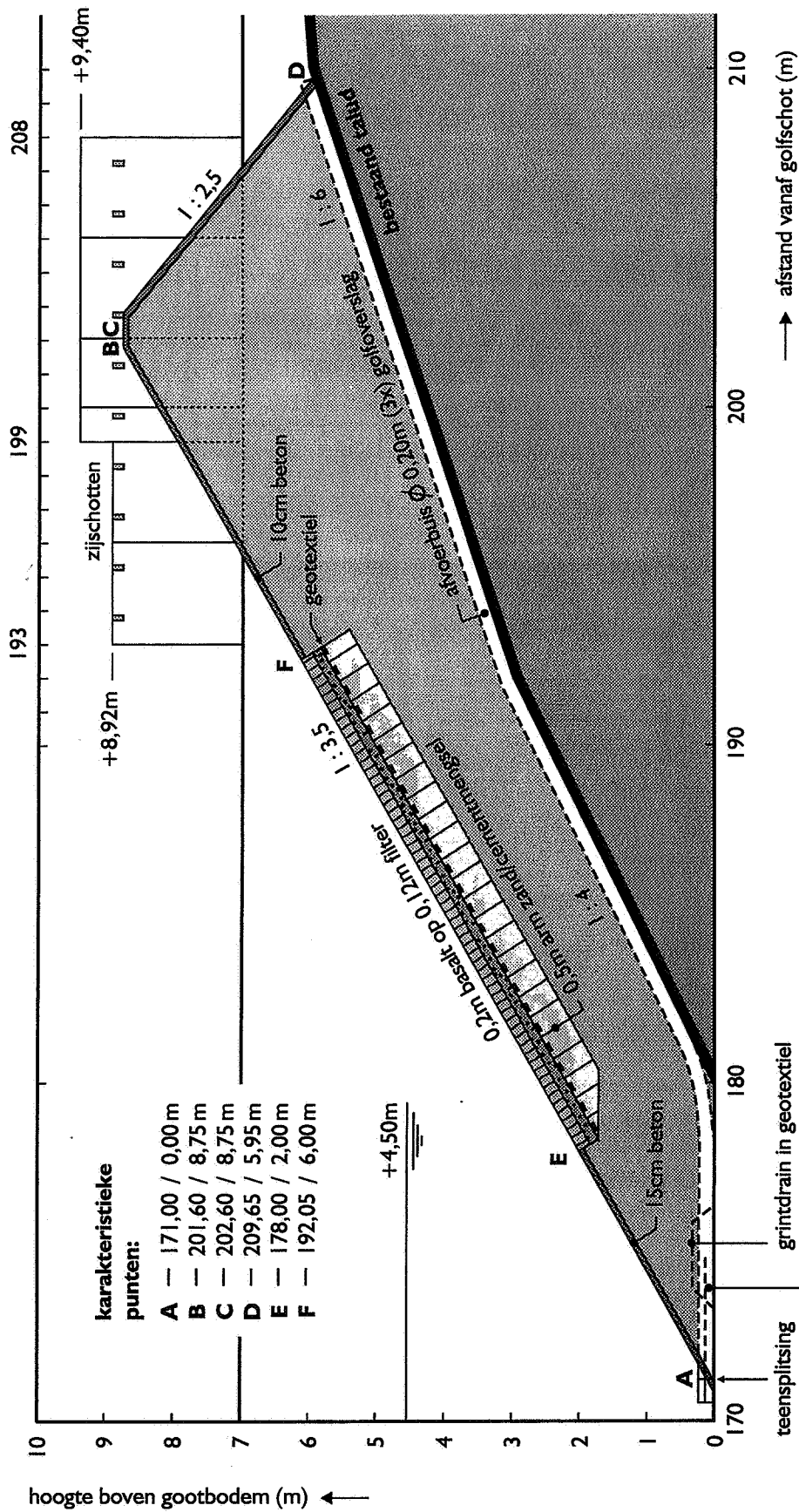
Basalton, stabiliteit onder golfaanval
WL | Delft Hydraulics, verslag M1900, februari 1983

Bijlage A:

Figuren



Dwarsdoorsnede proeven met basalt uit 1984 [Burger (1985)]



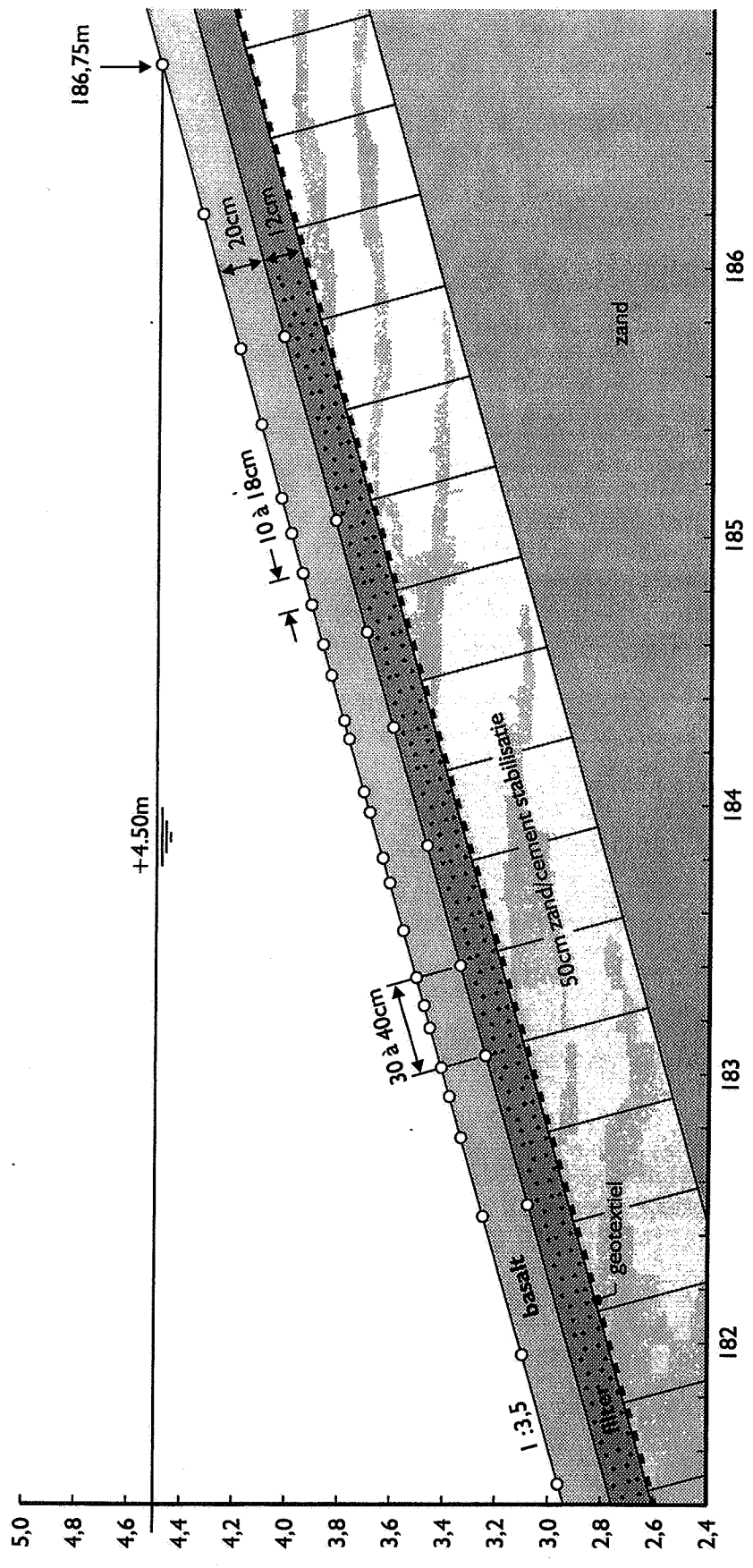
Dwarsdoorsnede proeven met basalt en Basalton uit 2003

[Eysink & Klein Breteler (2003)]

WL | Delft Hydraulics

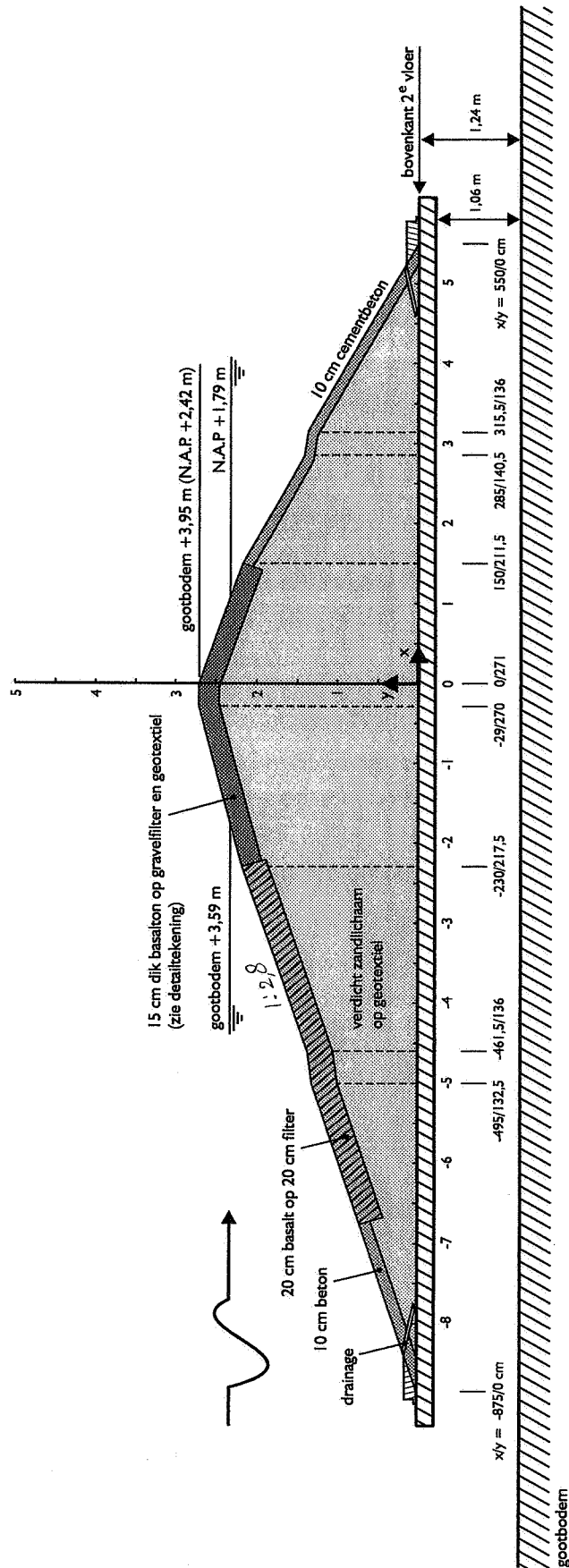
H 4422

Fig. A.2

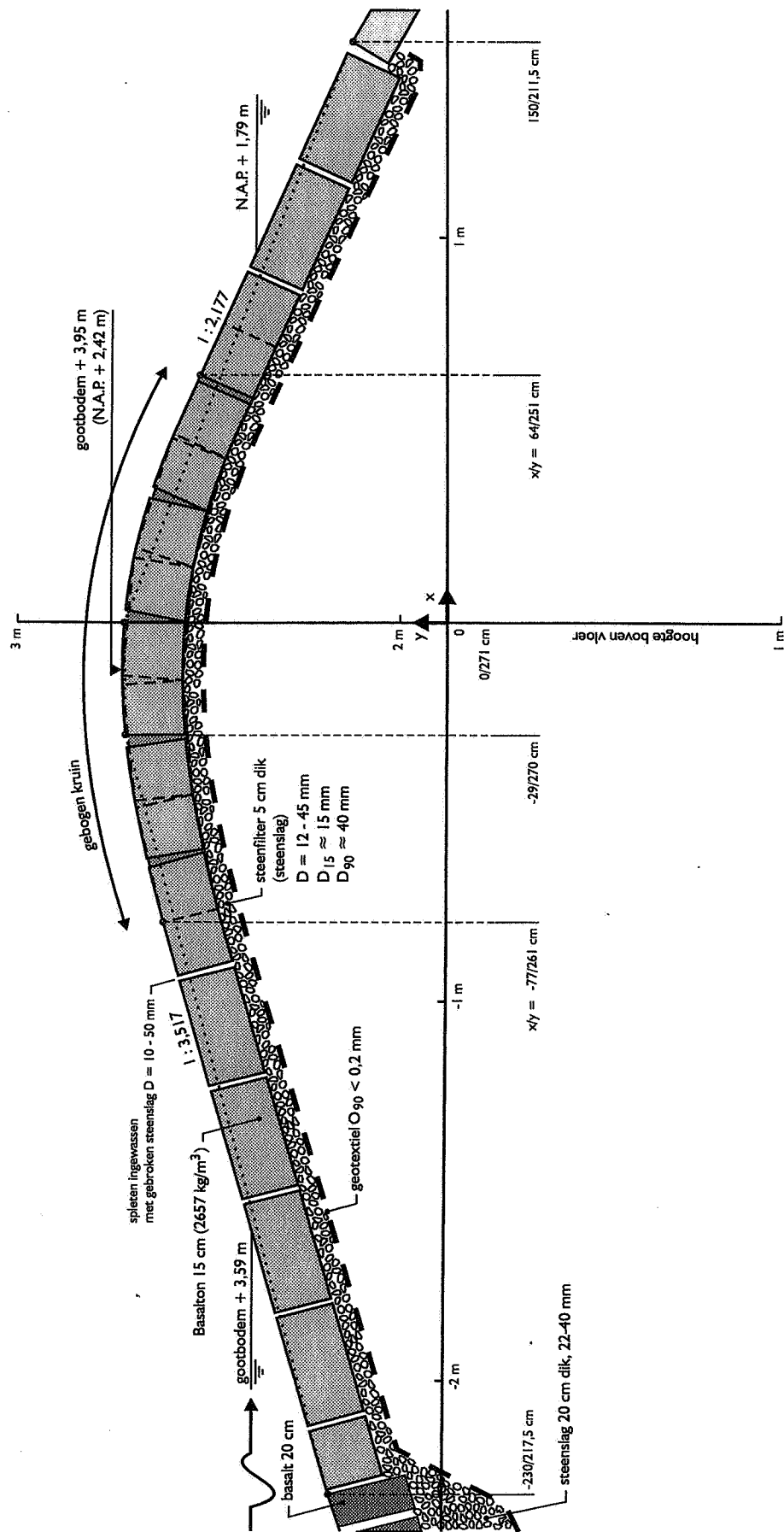


Detail dwarsdoorsnede proeven met basalt en Basalton uit 2003

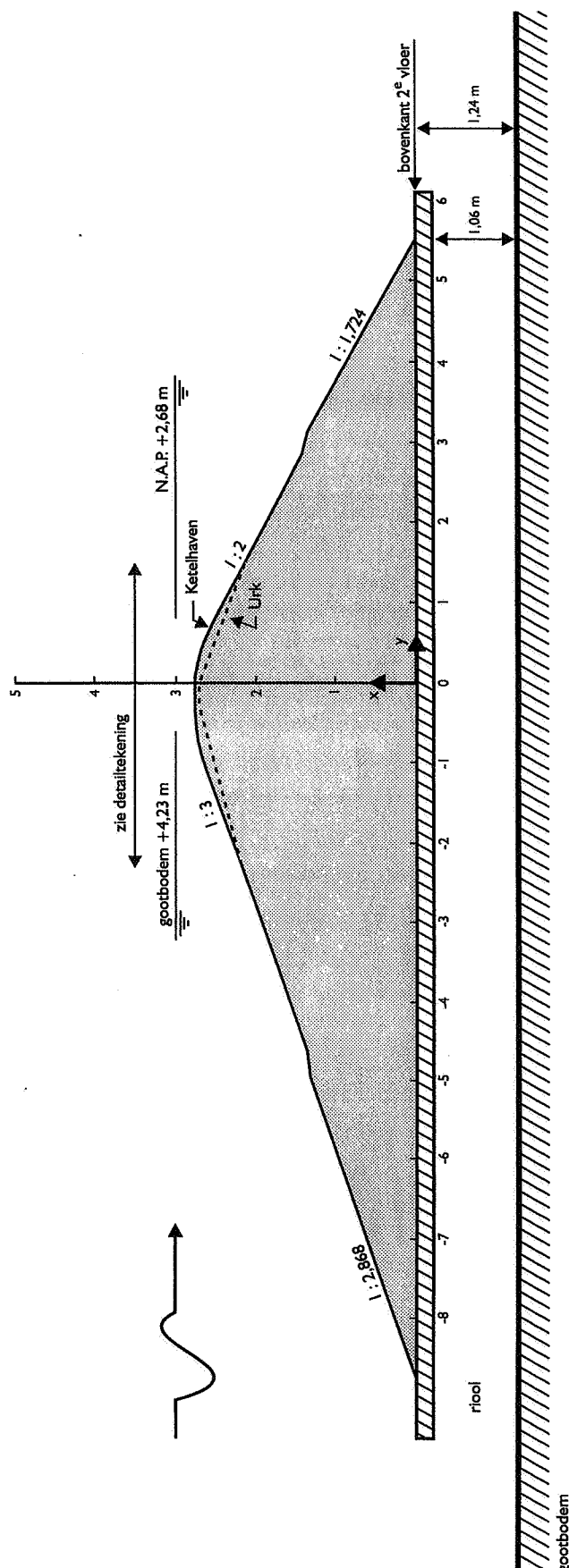
[Eysink & Klein Breteler (2003)]



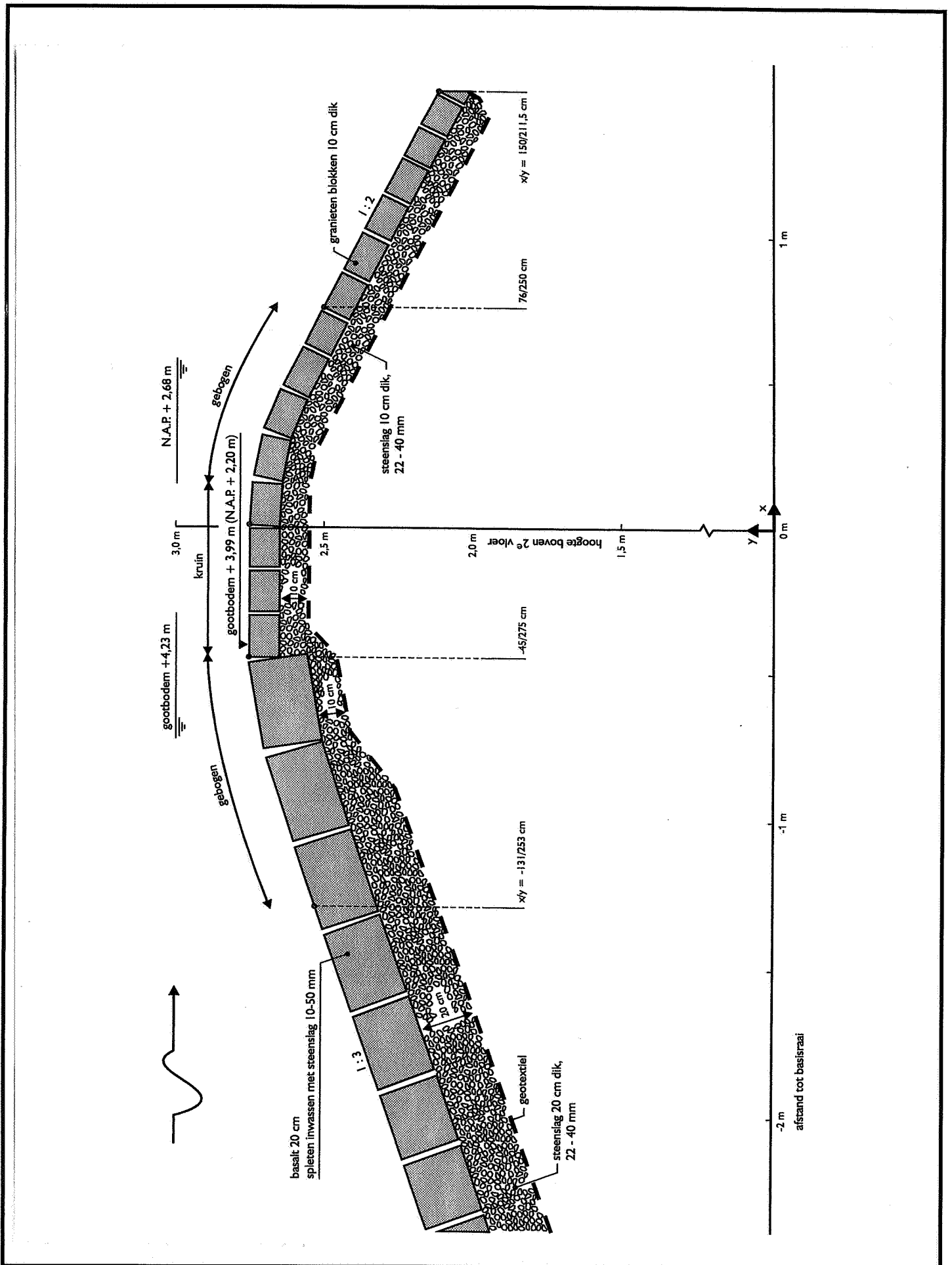
Dwarsdoorsnede proeven westelijke havendam Urk [Klein Breteler (2002)]



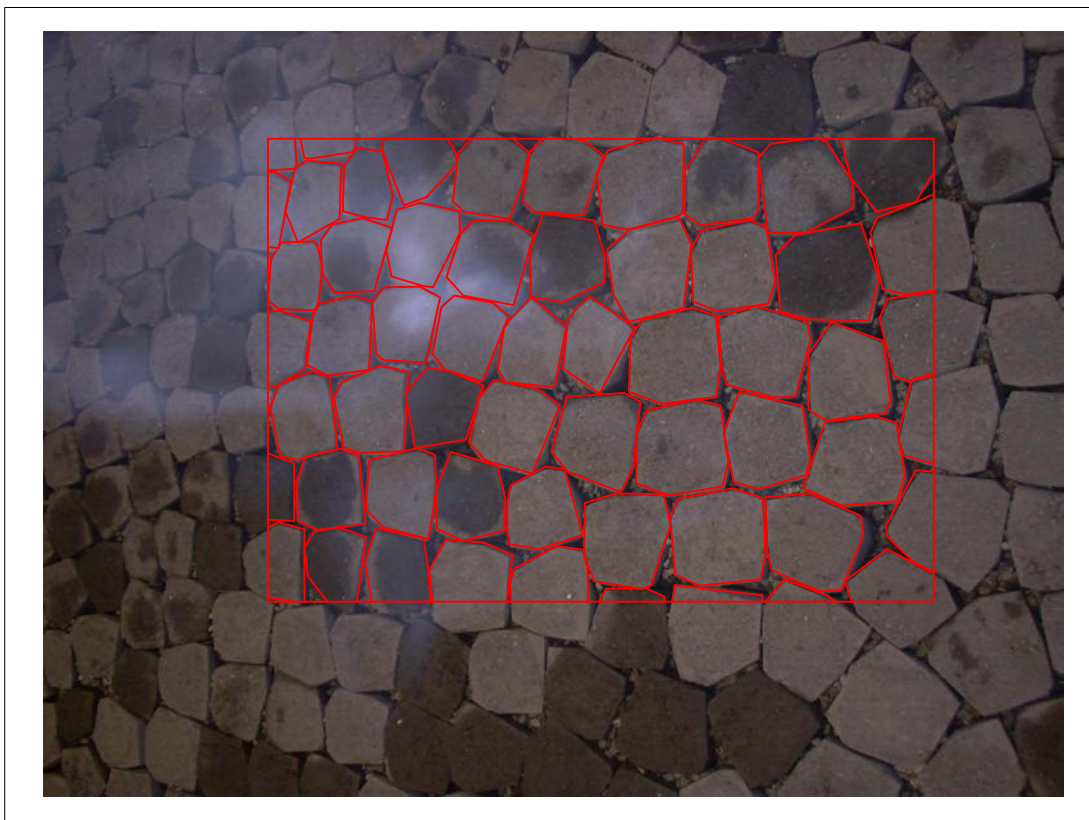
Detail dwarsdoorsnede proeven westelijke havendam Urk [Klein Breteler (2002)]



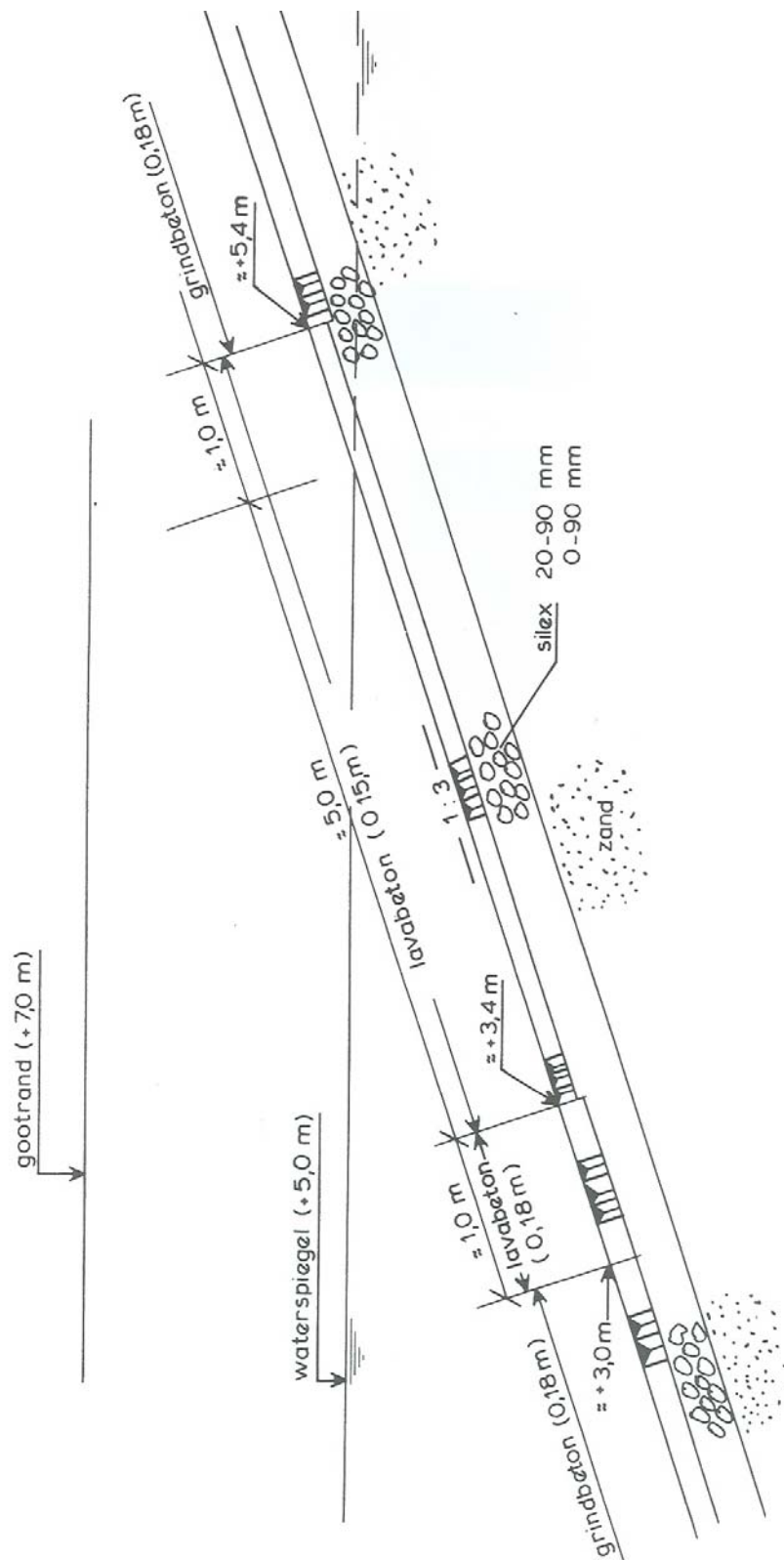
Dwarsdoorsnede proeven westelijke havendam Ketelhaven [Klein Breteler (2002)]



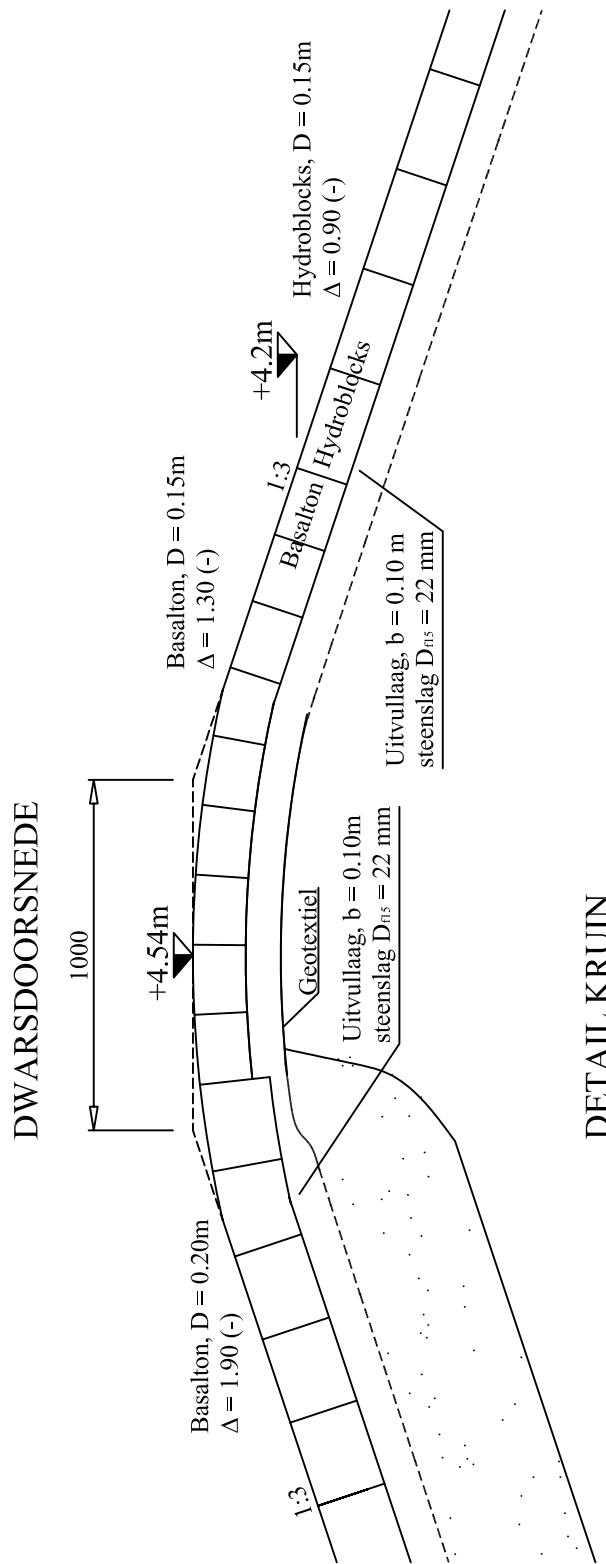
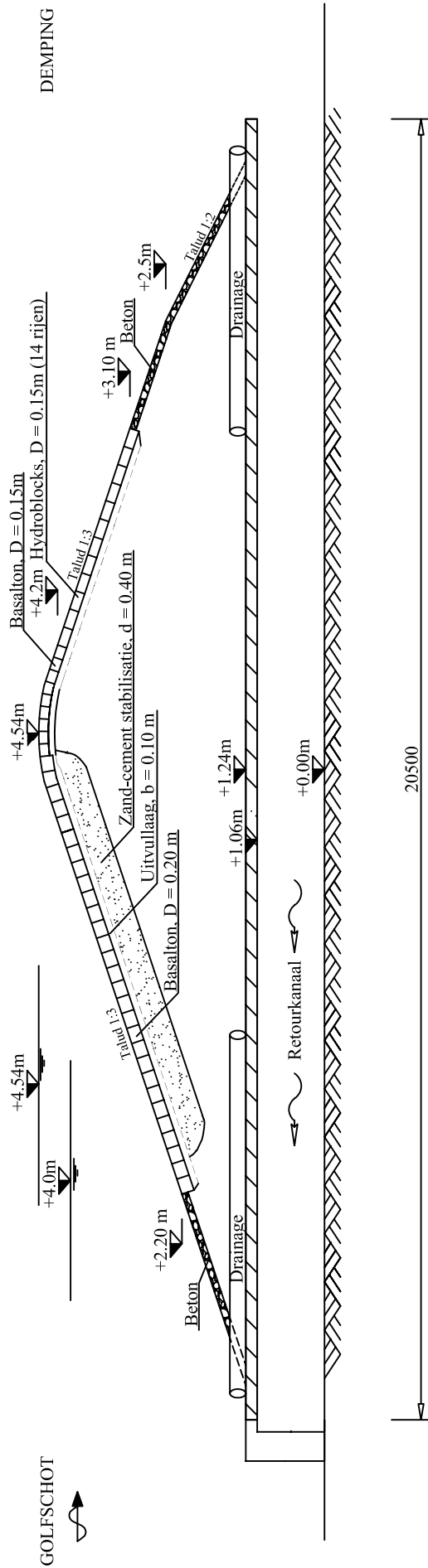
Detail dwarsdoorsnede proeven westelijke havendam Ketelhaven [Klein Breteler (2002)]



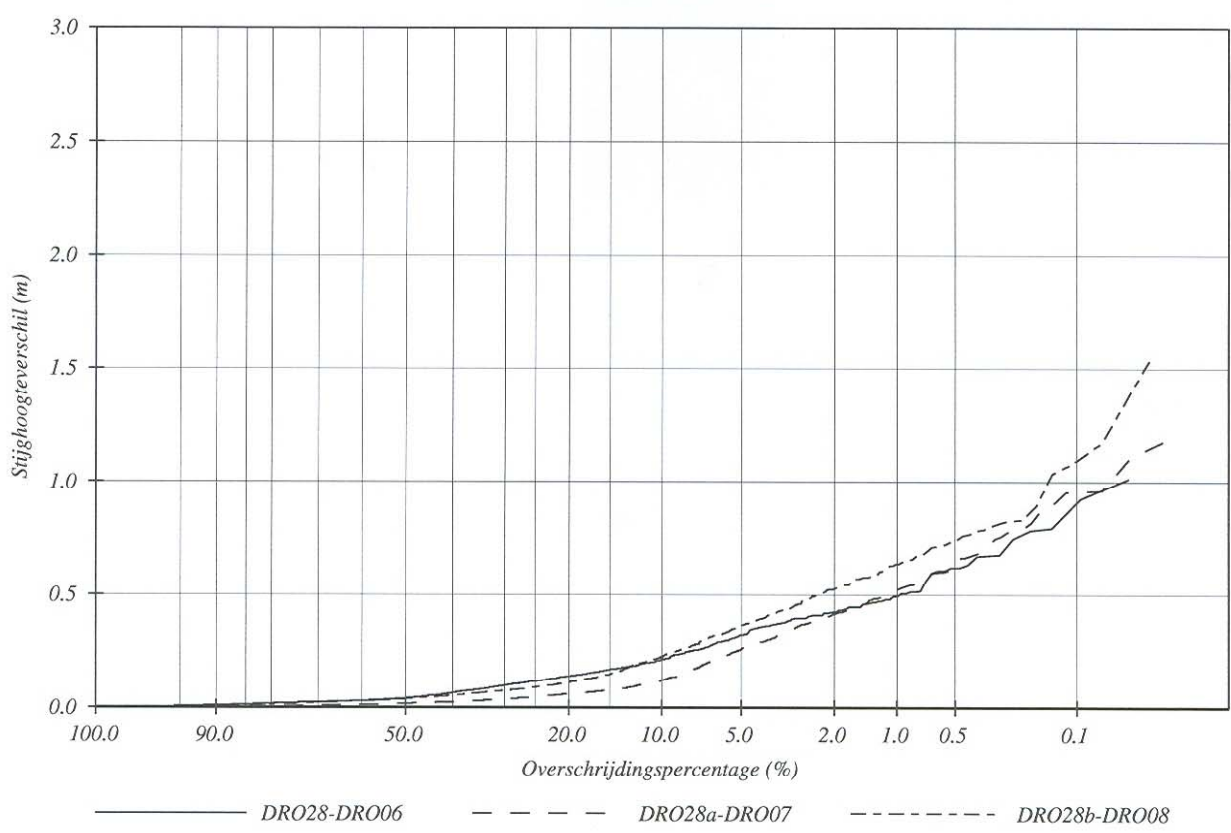
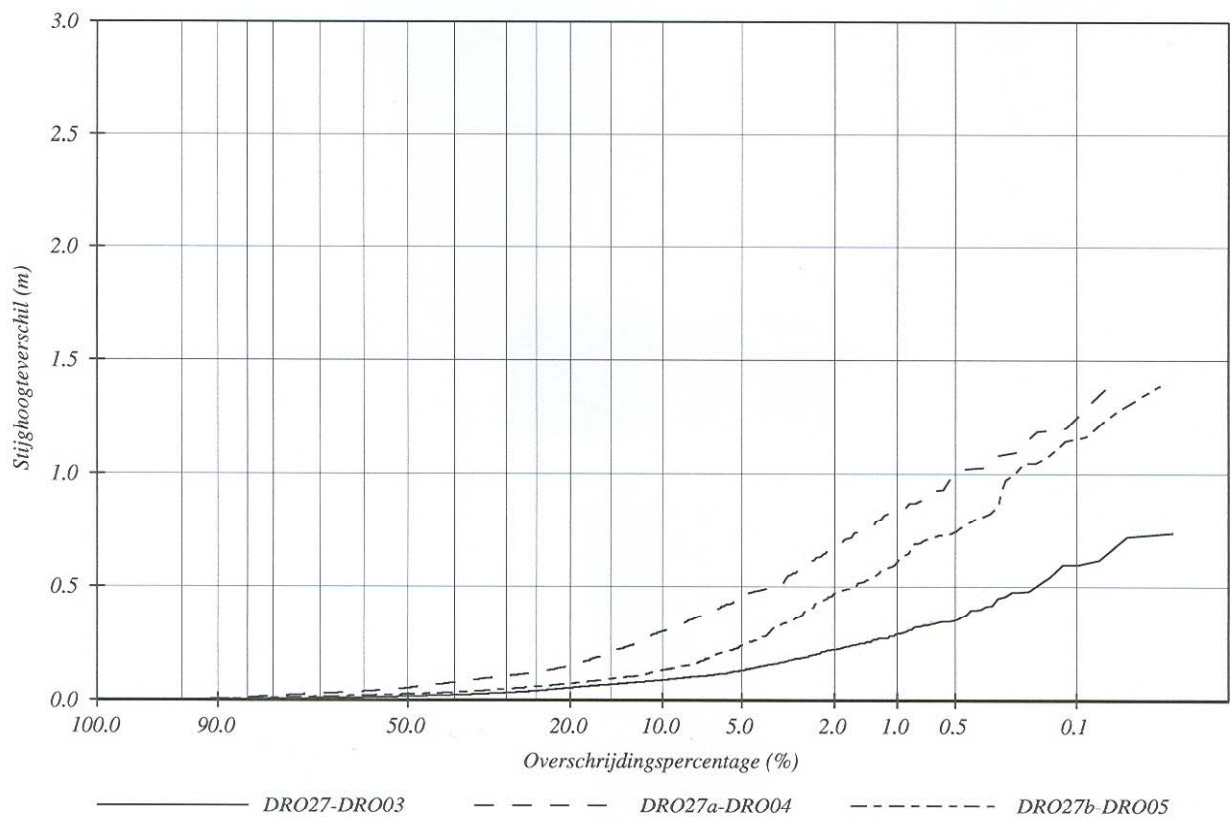
Bepalen van het open oppervlak door foto analyse
boven: basalt (2003); beneden: Basalton (2003)



Dwarsdoorsnede van proeven met Basalt uit '83
(vd Weide en Visser, 1983)

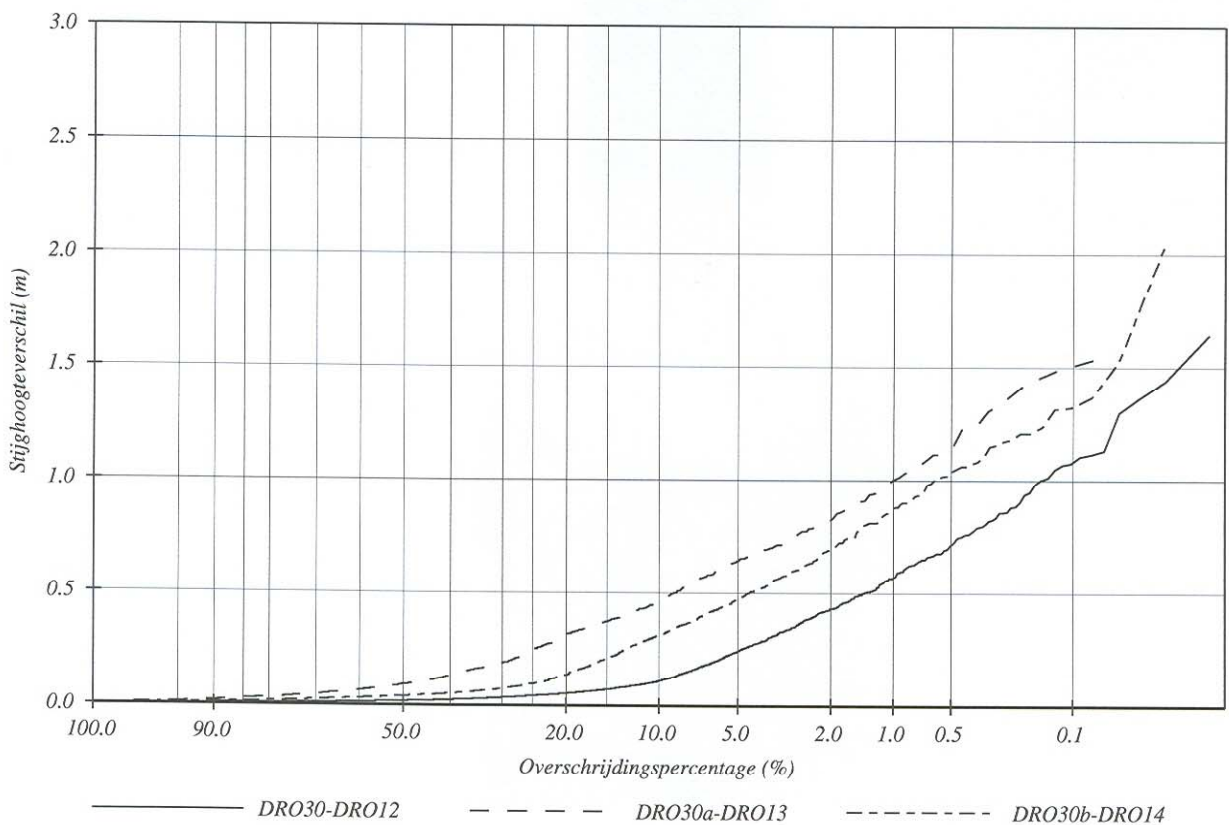
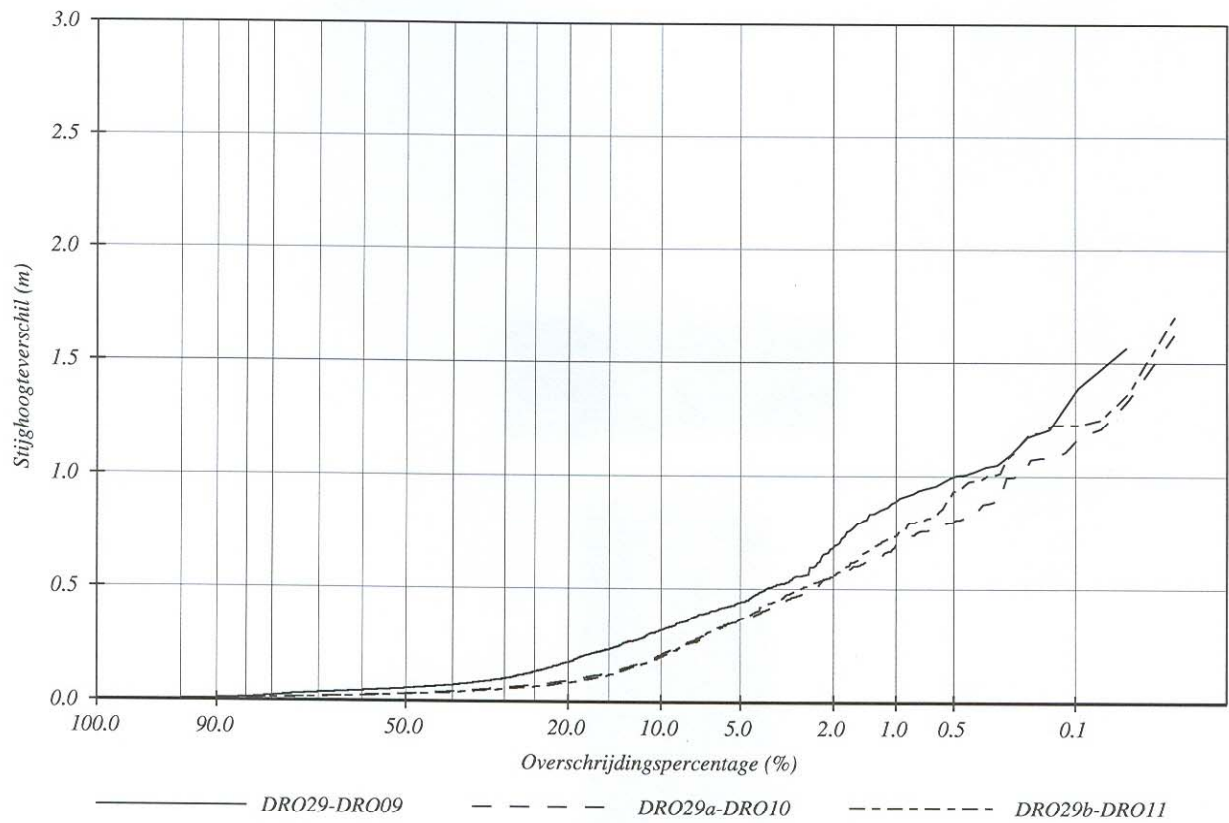


Dwarsdoorsnede van de proeven met basalton uit 2004



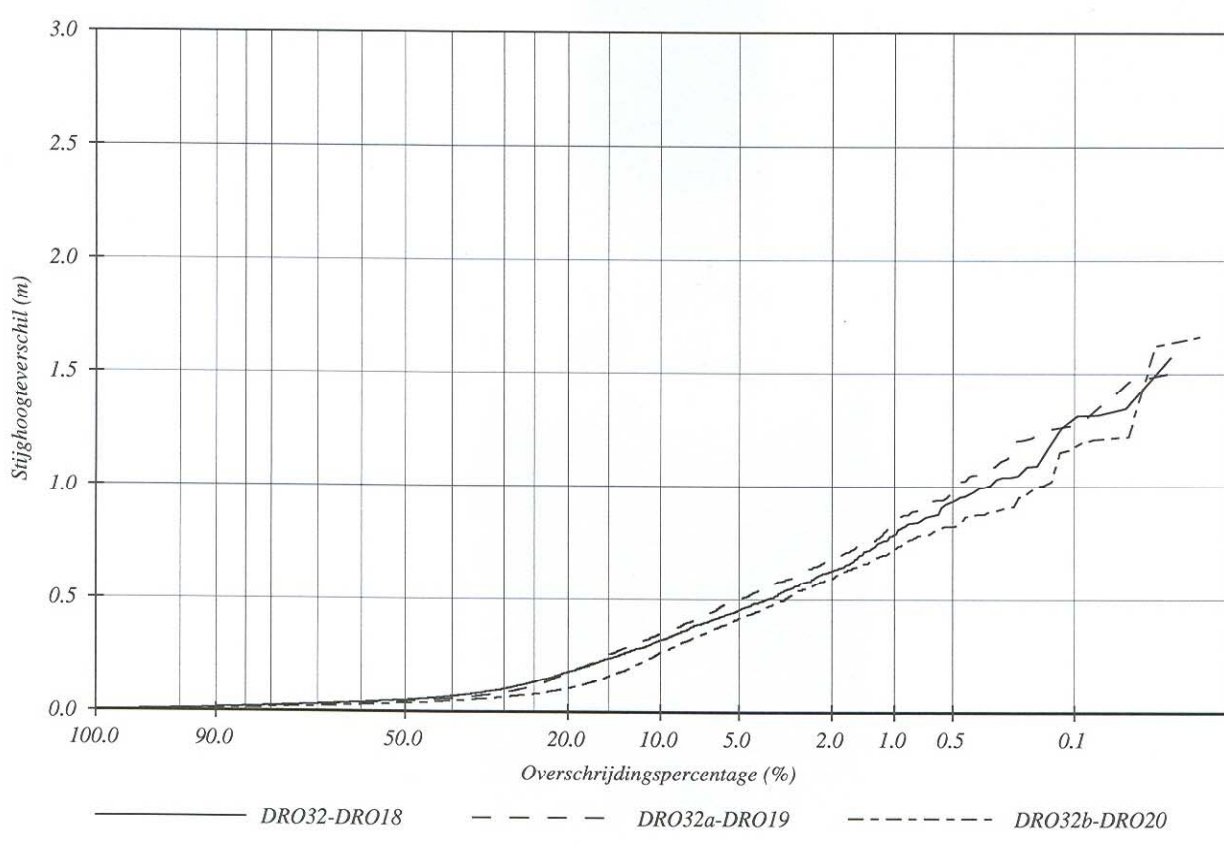
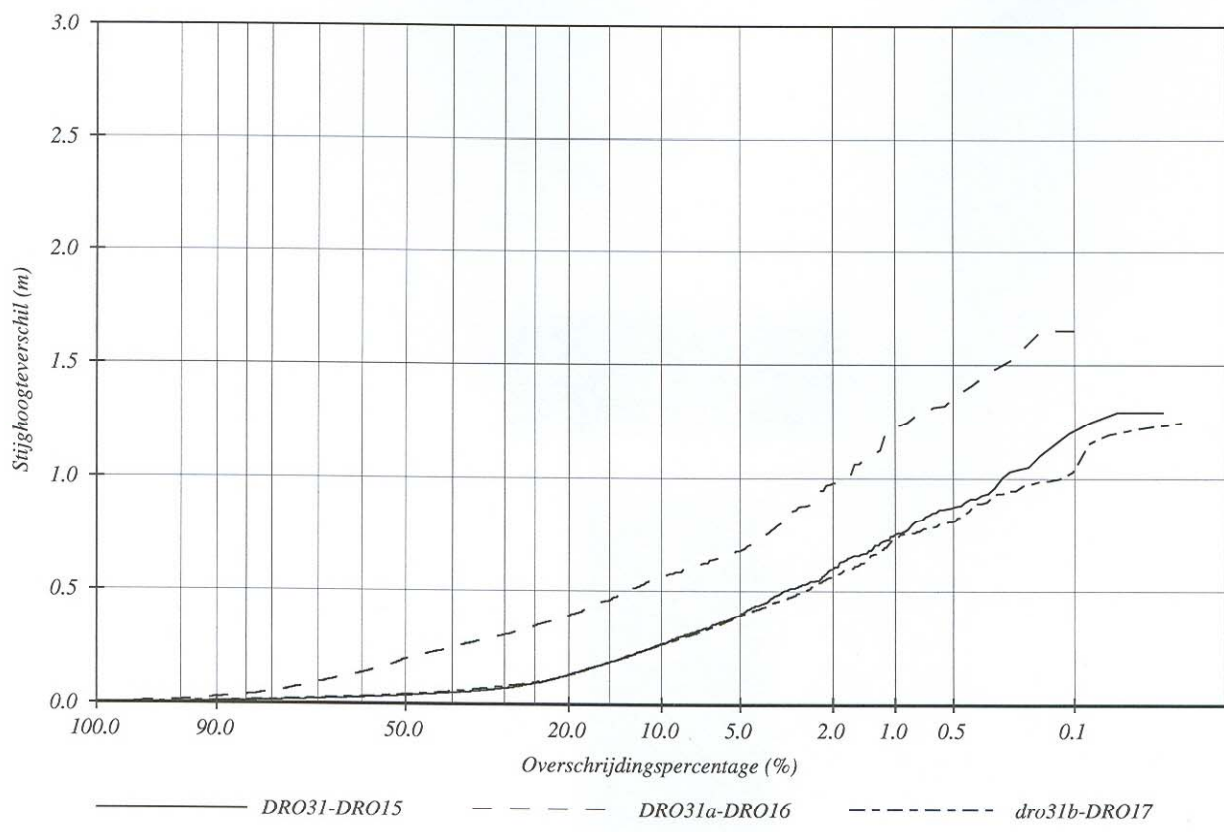
Overschrijdingspercentages stijghoogteverschillen
(gefilterd signaal)

p005



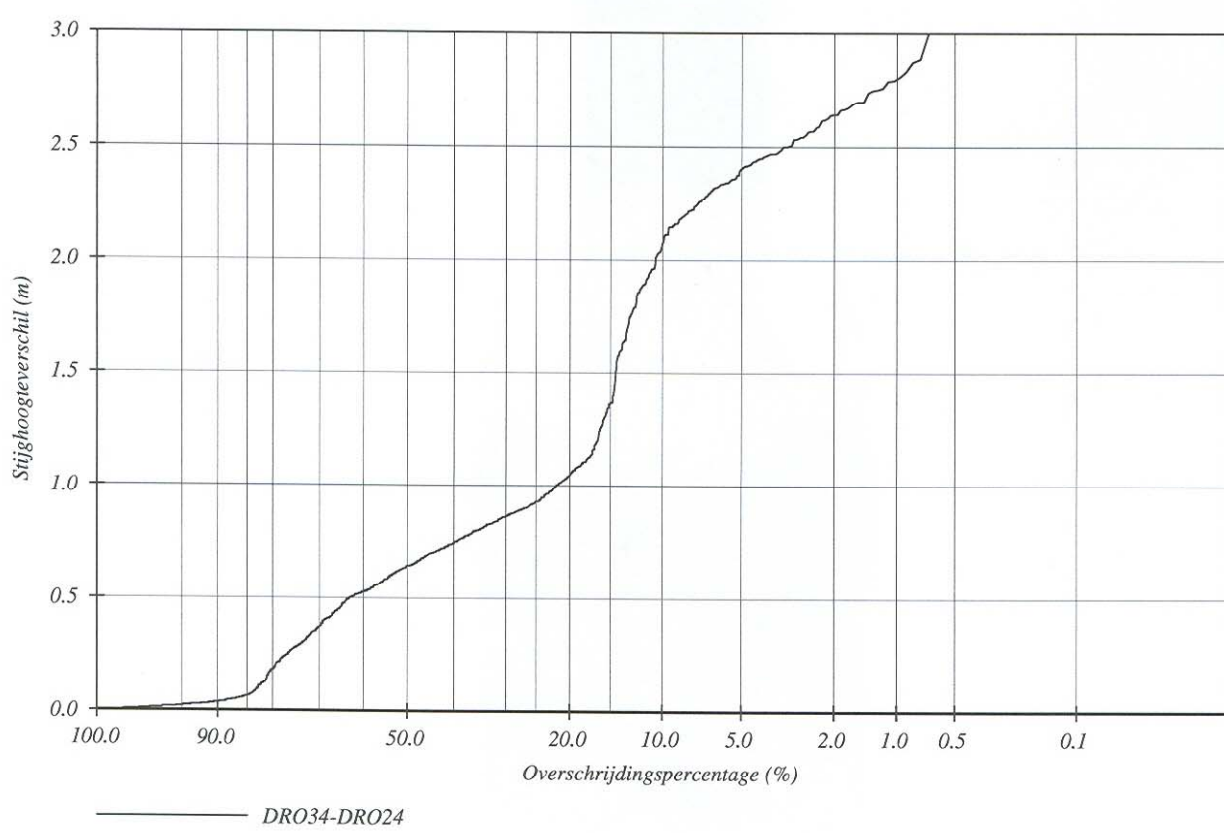
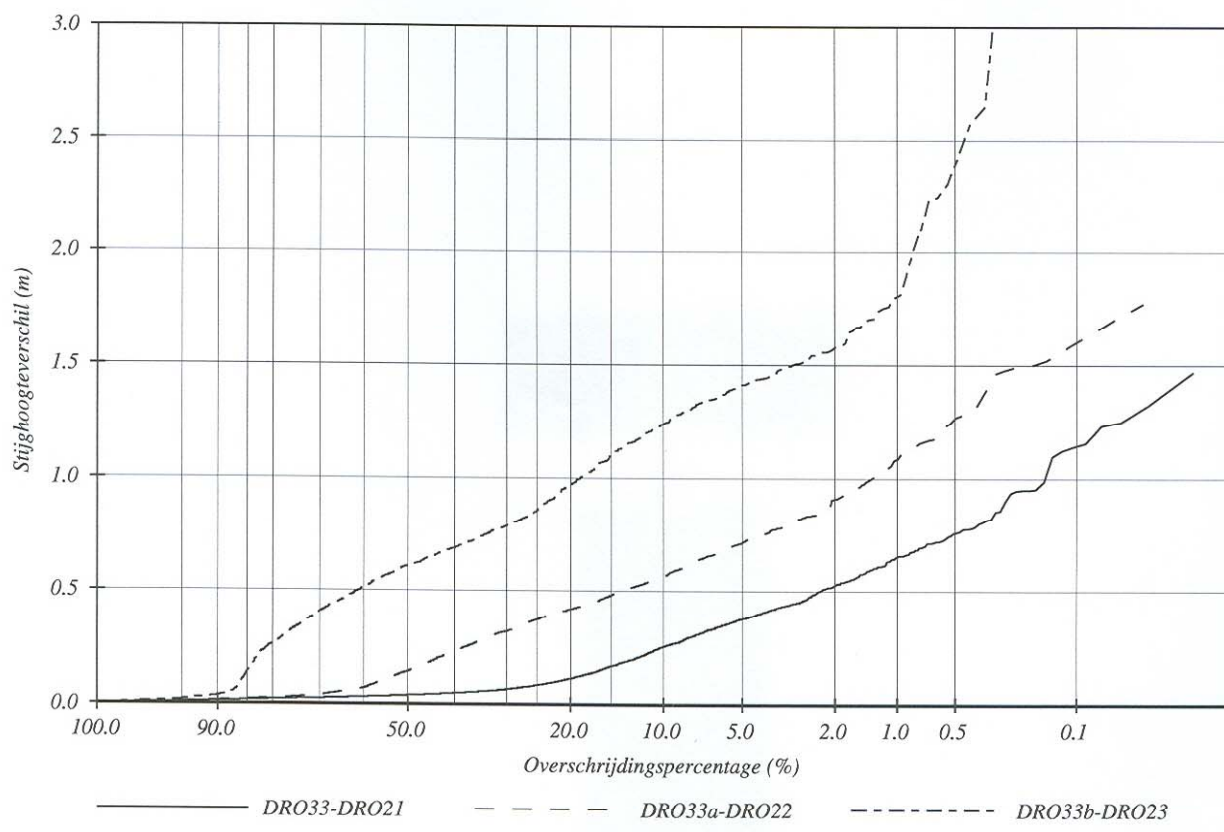
Overschrijdingspercentages stijghoogteverschillen
(gefilterd signaal)

p005



Overschrijdingspercentages stijghoogteverschillen
(gefilterd signaal)

p005



Overschrijdingspercentages stijghoogteverschillen
(gefilterd signaal)

p005

Bijlage B:

Tabellen

	jaar	proef	talud 1:	h [m]	H _s [m]	T _p [s]	ξ _{op} [-]	s _{op} [-]	F [-]
basalt	1984	21	3,5	5,00	1,55	5,12	1,47	0,038	3,3
basalt	1984	22	3,5	5,00	1,75	5,78	1,56	0,034	3,9
basalt	1984	23	3,5	5,00	1,85	6,14	1,61	0,031	4,2

Tabel B.1 Overzicht geanalyseerde proeven: basalt 1984

toplaag	jaar	proef	talud 1:	h [m]	H _s [m]	T _p [s]	ξ _{op} [-]	s _{op} [-]	F [-]
basalt	2002	1	2,8	3,60	0,76	4,27	2,19	0,027	3,3
basalt	2002	2	2,8	3,60	0,90	4,54	2,13	0,028	3,8
basalt	2002	3	2,8	3,60	0,91	4,80	2,24	0,025	4,0
basalt	2002	4	2,8	3,60	0,95	4,96	2,26	0,025	4,2
basalt	2002	5	2,8	3,60	1,09	5,29	2,27	0,025	4,8
basalt	2002	11	3,0	4,23	0,46	3,54	2,17	0,023	2,0
basalt	2002	12	3,0	4,23	0,58	3,81	2,09	0,025	2,4
basalt	2002	13	3,0	4,23	0,66	4,04	2,07	0,026	2,7
basalt	2002	14	3,0	4,23	0,70	4,17	2,08	0,026	2,9
basalt	2002	15	3,0	4,23	0,80	4,60	2,14	0,024	3,4
basalt	2002	16	3,0	4,23	1,01	4,82	2,00	0,028	4,1

Tabel B.2 Overzicht geanalyseerde proeven: basalt 2002: proef 1 tot en met 5: Urk; proef 11 tot en met 16: Ketelhaven

toplaag	jaar	proef	talud 1:	h [m]	H _s [m]	T _p [s]	ξ _{op} [-]	s _{op} [-]	F [-]
basalt	2003	4a	3,5	4,32	1,20	5,60	1,82	0,025	4,6
basalt	2003	5	3,5	4,58	1,40	6,01	1,81	0,025	5,3
basalt	2003	6	3,5	4,78	1,54	6,51	1,87	0,023	6,0
basalt	2003	7a	3,5	4,72	1,10	7,39	2,52	0,013	5,2
basalt	2003	8a	3,5	4,85	1,20	7,70	2,51	0,013	5,7
basalt	2003	16	3,5	4,39	1,46	5,23	1,54	0,034	5,0
basalt	2003	17	3,5	4,49	1,60	5,43	1,53	0,035	5,4
basalt	2003	18	3,5	4,69	1,74	5,85	1,58	0,033	6,0
Basalton	2003	21	3,5	4,68	1,07	7,25	2,51	0,013	5,4
Basalton	2003	22	3,5	4,84	1,18	7,50	2,47	0,013	5,9
Basalton	2003	23	3,5	4,99	1,28	7,83	2,47	0,013	6,4
Basalton	2003	24	3,5	5,10	1,37	8,08	2,46	0,013	6,8
Basalton	2003	25	3,5	4,56	1,41	6,16	1,85	0,024	5,8
Basalton	2003	26	3,5	4,74	1,57	6,70	1,91	0,022	6,6

Tabel B.3 Overzicht geanalyseerde proeven: basalt en Basalton 2003

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 B.4 Samenvatting belangrijke constructie-eigenschappen en resultaat ANAMOS 2.21 berekeningen

Bijlage C:

Planningschema van Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

Bijlage D:

Lokale leklengte

Inhoud van Bijlage D

Lijst van Figuren Lijst van Tabellen

1	Inleiding	1
2	Methodiek voor bepaling lokale lek lengte	2
3	Selectie van stijghoogtemetingen	6
4	Bepaling van de lek lengte.....	7
	4.1 Lek lengte van basalt uit 1984.....	7
	4.2 Lek lengte van basalt uit 2003.....	12
	4.3 Lek lengte van Basalton uit 2003	15
5	Analyse	19
6	Conclusie.....	21

Tabellen

Lijst van Figuren

- Figuur D.1 Schematisatie belangrijke parameters voor het bepalen van de lokale lek lengte uit stijghoogtemetingen
- Figuur D.2 Schematische schets van golfklap (dunne lijn) en front (dikke lijn) met de globale maten (Klein Breteler en Coeveld 2004)
- Figuur D.3 Gemeten stijghoogten modelproef DG21, tijdstip $t=1074,80s$
- Figuur D.4 Gemiddeld stijghoogteverschil berekend voor proef nr. 21 uit jaar 1984, tijdstip $t=292,84s$
- Figuur D.5 Gemiddeld stijghoogteverschil berekend voor proef nr. 21 uit jaar 1984, tijdstip $t = 399,48 s$
- Figuur D.6 Voorbeelden verloop Λ^2 waarden ten opzicht van de tijd
- Figuur D.7 Bereik voor selectie van gemiddelde stijghoogteverschillen en verhanggradiënten in het filter voor het bepalen van de lek lengte voor proef 21 uit 1984
- Figuur D.8 Gemeten stijghoogten modelproef 05, tijdstip $t=674,55s$
- Figuur D.9 Gemiddeld stijghoogteverschil berekend voor proef nr. 05 uit jaar 2003, tijdstip $t=674,55s$
- Figuur D.10 Verloop Λ^2 bij tijdstip $t=674,55s$ (proef uit 2003, basalt)
- Figuur D.11 Verloop gradiënt van het verhang in filter ($\Delta i = \partial^2 \phi / \partial x^2$) bij tijdstip $t = 674,55 s$ (proef uit 2003, basalt)
- Figuur D.12 Gemeten stijghoogten modelproef 25, Basalton, tijdstip $t=3649,37s$
- Figuur D.13 Ontwikkeling van het stijghoogteverschil en de gradiënt van het verhang in filter ($\Delta i = \partial^2 \phi / \partial x^2$) bij drukopnemerpaar [6-28] met de tijd

Lijst van Tabellen

- Tabel D.1 Overzicht gemeten lek lengten gebaseerd op stijghoogtemetingen, en berekend met ANAMOS
- Tabel D.2 Berekende doorlatendheden en lek lengten volgens formules Klein Breteler (2002)
- Tabel D.3 Geselecteerde tijdstippen met grote blokbewegingen voor de lek lengteanalyse
- Tabel D.4 Berekeningen belangrijke parameters voor de lek lengte, voorbeeld modelproef DG21, tijdstip $t = 1074,80s$
- Tabel D.5 Uit stijghoogtemetingen berekende Λ^2 waarden van de basaltproeven uit 1984 (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap)

- Tabel D.6 Geselecteerde uit stijghoogtemetingen berekende Λ^2 waarden van de basaltproeven uit 1984 die gebruikt zijn voor de statistische analyse van de lek lengte (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap; lege cellen = voldoet niet aan criteria)
- Tabel D.7 Uit stijghoogtemetingen berekende Λ^2 waarden van de basaltproeven uit 2003 (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap)
- Tabel D.8 Geselecteerde uit stijghoogtemetingen berekende Λ^2 waarden van de basaltproeven uit 2003 die gebruikt zijn voor de statistische analyse van de lek lengte (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap; lege cellen = voldoet niet aan criteria)
- Tabel D.9 Selectie van golven voor de lek lengteanalyse van Basalton 2003 (proef 25)
- Tabel D.10 Uit stijghoogtemetingen berekende Λ^2 waarden van de Basaltonproeven uit 2003 (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap), initiële selectie gebaseerd op momenten met grote blokbewegingen (volgens Zsteen)
- Tabel D.11 Geselecteerde uit stijghoogtemetingen berekende Λ^2 waarden van de Basaltonproeven uit 2003 die gebruikt zijn voor de statistische analyse van de lek lengte (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap), initiële selectie gebaseerd op momenten met grote blokbewegingen (volgens Zsteen; lege cellen = voldoet niet aan criteria)
- Tabel D.12 Uit stijghoogtemetingen berekende Λ^2 waarden van de Basaltonproeven uit 2003 (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap), selectie van golven met grote stijghoogteverschillen (maar met een lagere overschrijdingskans dan bij de initiële selectie)
- Tabel D.13 Geselecteerde uit stijghoogtemetingen berekende Λ^2 waarden van de Basaltonproeven uit 2003 die gebruikt zijn voor de statistische analyse van de lek lengte (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap; lege cellen = voldoet niet aan criteria) , selectie van golven met grote stijghoogteverschillen (maar met een lagere overschrijdingskans dan bij de initiële selectie)
- Tabel D.14 Overzichtgemeten lek lengten gebaseerd op stijghoogtemetingen, en berekend met ANAMOS
- Tabel D. 15 Berekende doorlatendheden en lek lengten volgens formules Klein Breteler (2002)

I Inleiding

De lek lengte is de bepalende parameter ten aanzien van de grootte van de stijghoogteverschillen (belasting) over de toplaag. Een grote lek lengte geeft bij golfbelasting een groot stijghoogteverschil. Daarom is deze parameter van groot belang voor de stabiliteit van een steenzetting en is de waarde van deze parameter voor de geselecteerde steenzettingen onderzocht. 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.

Omdat in werkelijkheid er sprake is van een niet-gelineaire doorlatendheid, zal de gelineariseerde waarde van de doorlatendheid afhankelijk zijn van het verhang:

$$i = a \cdot q + b \cdot q^2 \Rightarrow q = -\frac{a}{2b} + \sqrt{\frac{i}{b} + \frac{a^2}{4 \cdot b^2}} \quad (3.2)$$

met:

i = verhang over het filter [-]

a = laminaire weerstandscoefficient van het filter [s/m]

b = turbulente weerstandscoefficient van het filter [s²/m²]

q = specifiek debiet door de toplaag [m/s]

De gelineariseerde doorlatendheid k , bij een verhang i , is:

$$k = \frac{q}{i} = -\frac{a}{2 \cdot b \cdot i} + \sqrt{\frac{1}{b \cdot i} + \frac{a^2}{4 \cdot b^2 \cdot i^2}} \quad (3.3)$$

De van plaats tot plaats variërende verhangen in filter en door de toplaag zorgen daardoor voor een van plaats tot plaats variërende gelineariseerde doorlatendheid en lek lengte. In dit hoofdstuk wordt de lokale lek lengte bepaald uit de gemeten stijghoogten op de toplaag en in het filter.

2 Methodiek voor bepaling lokale lek lengte

Methodiek

De lek lengte volgt uit de massabalans voor het gebied tussen de stippellijnen (Figuur D.1). Daar geldt dat het debiet door de top laag gelijk moet zijn aan de verandering van het debiet door het filter:

$$q' = q_i - q_{i-1} \quad (3.4)$$

met

q' = gemiddelde debiet door de top laag tussen de stippellijnen, per meter dijk lengte ($\text{m}^2/\text{s}/\text{m}$)

q = debiet door de filter laag, per meter dijk lengte ($\text{m}^2/\text{s}/\text{m}$)

Het debiet door de top laag is:

$$q' = k' i' \frac{y_{i-1} + y_i}{2} = k' \frac{\phi' - \phi}{D} \frac{y_{i-1} + y_i}{2} \quad (3.5)$$

met:

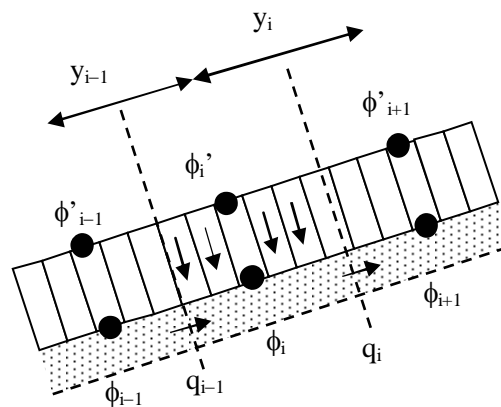
$\phi' - \phi$ = gemiddeld stijghoogteverschil over de top laag tussen de stippellijnen (m)

k' = doorlatendheid van de top laag (geïntegreerd) (m/s)

i' = verhang over de top laag (-)

D = dikte van de top laag (m)

y_i = afstand tussen de drukopnemers i en $i+1$ (m)



Figuur D.1 Schematisatie belangrijke parameters voor het bepalen van de lokale lek lengte uit stijghoogtemetingen

Het gemiddeld stijghoogteverschil over de top laag is:

$$\overline{\phi' - \phi} = \frac{y_{i-1} \left(\frac{3}{4}(\phi'_i - \phi_i) + \frac{1}{4}(\phi'_{i-1} - \phi_{i-1}) \right) + y_i \left(\frac{3}{4}(\phi'_i - \phi_i) + \frac{1}{4}(\phi'_{i+1} - \phi_{i+1}) \right)}{y_{i-1} + y_i} \quad (3.6)$$

De uitdrukkingen

$$\left(\frac{3}{4} \cdot (\phi'_i - \phi_i) + \frac{1}{4} \cdot (\phi'_{i-1} - \phi_{i-1}) \right) \text{ en } \left(\frac{3}{4} \cdot (\phi'_i - \phi_i) + \frac{1}{4} \cdot (\phi'_{i+1} - \phi_{i+1}) \right)$$

staan voor de gemiddelde waarden voor de stijghoogteverschillen tussen respectievelijk de linker stippellijn in Figuur D.1 en de middelste drukopnemer, en tussen de middelste drukopnemer en de rechter stippellijn.

Voor het debiet in het filter geldt:

$$q_i = bk \frac{\phi_i - \phi_{i+1}}{y_i} = bki \quad (3.7)$$

met:

- b = dikte van de filter laag (m)
- k = doorlatendheid van het filter (geïntegreerd) (m/s)
- i = verhang in het filter (-)

Combineren van bovenstaande formules levert het volgende op:

$$q' = k' \frac{\overline{\phi' - \phi}}{D} \frac{y_{i-1} + y_i}{2} = q_i - q_{i-1} = bk \left(\frac{\phi_i - \phi_{i+1}}{y_i} - \frac{\phi_{i-1} - \phi_i}{y_{i-1}} \right) = bk \Delta i \quad \Rightarrow$$

$$\frac{bkD}{k'} = \frac{\overline{\phi' - \phi}}{\left(\frac{\phi_i - \phi_{i+1}}{y_i} - \frac{\phi_{i-1} - \phi_i}{y_{i-1}} \right)} \frac{y_{i-1} + y_i}{2} \quad (3.8)$$

$$\Lambda = \sqrt{\frac{bkD}{k'}} = \sqrt{\frac{\overline{\phi' - \phi}}{\left(\frac{\phi_i - \phi_{i+1}}{y_i} - \frac{\phi_{i-1} - \phi_i}{y_{i-1}} \right)} \frac{y_{i-1} + y_i}{2}} \quad (3.9)$$

met:

- Λ = leklengte (m)
- Δi = verandering van het verhang in het filter (verhanggradiënt = $\Delta i = \partial^2 \phi / \partial x^2$) (-)

Formule (3.9) bestaat in principe 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)
- een term voor de gemiddelde drukopnemer afstand ($y_{i-1} + y_i$)

Deze formule voor de leklengte 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 toplaag 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 toplaag 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 hoofdstukken 4 t/m 4.3). Om niet met irreële getallen te werken werd gekozen om in de analyse de Λ^2 -waarden te beschouwen. Dit komt ook overeen met de fysica achter het model (zie formule 3.8).

Nauwkeurigheid

Bovenstaande criteria zijn nodig omdat de metingen met een beperkte nauwkeurigheid, beperkte aantal drukopnemers (ruimtelijke resolutie) en beperkte bemonsteringsfrequentie zijn gemeten. Deze beperkingen leiden tot fouten die doorwerken in de resulterende lek lengte. Onderstaand worden 3 aspecten van de beperkte nauwkeurigheid nader belicht:

1. Nauwkeurigheid van de instrumenten:

De instrumenten worden altijd vóór de proeven nauwkeurig geijkt en na het plaatsen in de bekleding gecontroleerd. Voor elke proef wordt het instrument precies op nul gezet bij de dan aanwezige waterstand, zodat de drukken tijdens de proef gemeten worden t.o.v. de stilwaterlijn. Tijdens de proef is er echter soms wat verloop, waardoor een fout van enkele mm waterkolom ontstaat. Verder is het instrument niet perfect lineair, waardoor ook een fout van enkele mm waterkolom kan ontstaan. Bij grote waterdrukken is er bovendien een bijdrage van de fout in de omrekenfactor van Volt naar meter waterkolom. Deze fout is ongeveer 0,01 % (dus ca 1 mm).

De totale fout is bij elk instrument verschillend en niet constant in de tijd, noch bij elke druk gelijk. Geschat wordt dat de fout kleiner is dan orde 5 mm waterkolom. Erg kleine stijghoogteverschillen over de toplaag en kleine gradiënten in het filter moeten daarom gewantrouwd worden. Om de fout kleiner dan 10% te houden gelden de volgende eisen:

stijghoogteverschil over de toplaag: $\phi' - \phi > 0,07 \text{ m}$

gradiënt in het filter: $i > 0,07/y_i$

Verder is voor het bepalen van de lek lengte ook de verhanggradiënt van belang. Voor het vereenvoudigde geval dat $y_i = y_{i-1} = y$ geldt: $\Delta i = (2\phi_i - \phi_{i-1} - \phi_{i+1})/y$. Aannemende dat de fout in de locatie van de drukopnemers klein is (fout in y is verwaarloosbaar) en dat de afwijkingen in ϕ , ϕ_{i-1} en ϕ_{i+1} onafhankelijk zijn, geldt dat de fout in Δi gelijk is aan $\sqrt{6} \cdot (5 \text{ mm})/y$. Als deze fout kleiner dan 10% moet blijven, resulteert dit in een eis voor de grootte van Δi , namelijk: $\Delta i > 10 \cdot \sqrt{6} \cdot (5 \text{ mm})/y$. De onderlinge afstand tussen de drukopnemers was in 1984 en 2003 gemiddeld respectievelijk 1,1 m en 0,42 m, waarmee de eis ten aanzien van de minimale verhanggradiënt wordt:

voor '84: $\Delta i > 0,1$

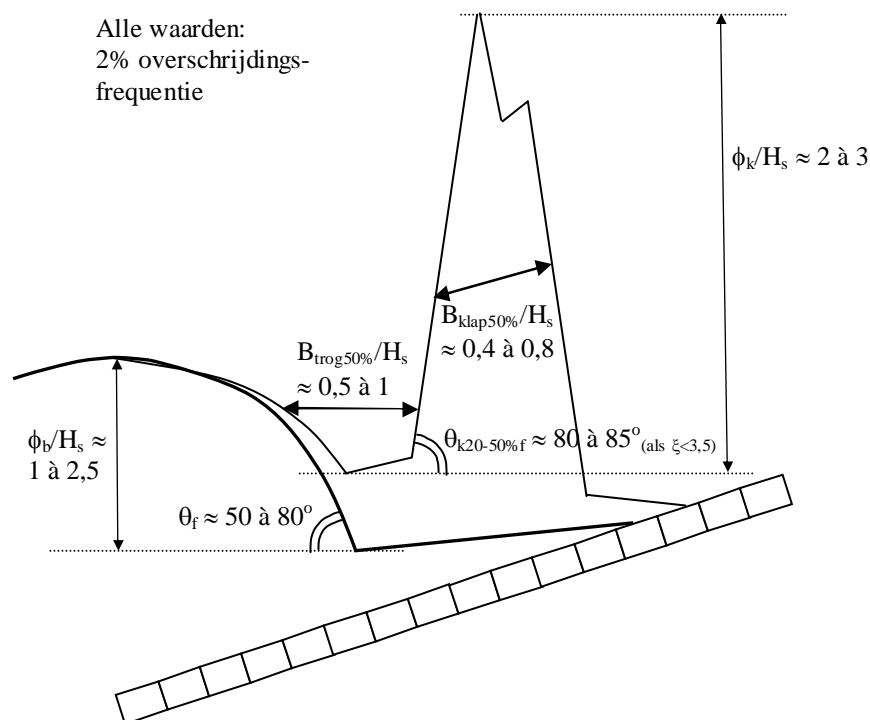
voor '03: $\Delta i > 0,3$

2. Ruimtelijke resolutie:

Een golfklap geeft lokaal een hoge stijghoogte op de toplaag. Om die nauwkeurig te kunnen meten is door Klein Breteler en Coeveld (2004) vastgesteld dat de drukopnemers maximaal $0,13H_s$ uit elkaar mogen zitten. Deze eis is in dit verband echter waarschijnlijk wat te streng, omdat voor het bepalen van de lek lengte slechts de gemiddelde stijghoogte op de toplaag op een bepaald moment nodig is. Gezien de afmetingen van golfklappen (zie Figuur D.2, uit Klein Breteler en Coeveld 2004) kan globaal gesteld worden dat bij een onderlinge afstand kleiner dan $0,3H_s$ de fout kleiner dan 10% is, maar bij $0,7H_s$ een fout van orde 20 tot 50% kan ontstaan. Dit is bepaald door het driehoekige stijghoogteverloop van een golfklap te tekenen en vervolgens drukopnemers met verschillende afstanden op een gunstige of ongunstige locatie te plaatsen en de gemiddelde stijghoogte te vergelijken met de werkelijke.

Er kan zowel een onderschatting als een overschatting van het gemiddelde optreden.

Daarnaast ontstaat een fout omdat er vanuit gegaan wordt dat bij loodrechte golfaanval er geen horizontale stroming in het filter evenwijdig aan de waterlijn plaatsvindt. Tijdens de golfklap ontstaan er echter op de toplaag ook drukgradiënten evenwijdig aan de waterlijn, die ook kunnen doorwerken in het filter. Doordat er slechts drukopnemers op één lijn zijn aangebracht, is deze ruimtelijke informatie niet beschikbaar en is deze invloed dus ook niet in de lek lengteberekening te verdisconteren. Dat leidt tot een fout, die thans helaas moeilijk te kwantificeren is. Het is denkbaar dat tijdens de golfklap hierdoor een fout van orde 20% in de lek lengte ontstaat, die echter vrijwel afwezig zal zijn tijdens het golf front.



Figuur D.2 Schematische schets van golfklap (dunne lijn) en front (dikke lijn) met de globale maten (Klein Breteler en Coeveld 2004)

3. Beperkte bemonsteringsfrequentie:

Door Klein Breteler en Coeveld (2004) is vastgesteld dat golfklappen en de daarbij optredende stijghoogteverschillen flink onderschat kunnen worden als de bemonsteringsfrequentie te laag is. Voor de bepaling van de lek lengte levert dit echter geen fout op, omdat op elk moment verwacht kan worden dat de stijghoogte in het filter zich instantaan heeft ingesteld ten opzichte van de dan heersende stijghoogte op de top laag, resulterend in een bepaalde waarde van de lek lengte. De voor dat moment bepaalde lek lengte zou niet anders zijn als de bemonsteringsfrequentie veel hoger zou zijn geweest.

Al deze fouten tezamen beperken de nauwkeurigheid waarmee de lek lengte bepaald kan worden aanzienlijk, vooral voor de proeven uit 1984. Toen is met relatief grote afstand tussen de drukopnemers gewerkt.

Het feit dat uiteindelijk een gemiddelde lek lengte per modelopstelling wordt bepaald vergroot de nauwkeurigheid echter weer aanmerkelijk omdat de fout door de beperkte ruimtelijke resolutie voor een belangrijk deel weggemiddeld wordt. Maar ook de fout als gevolg van de nauwkeurigheid van de instrumenten neemt af door het middelen, want soms zal de lek lengte bepaald worden met de ene groep drukopnemers (die door meetfouten een overschatting van de lek lengte geven) en dan weer met de andere groep (die leidt tot een onderschatting).

Door de meetfouten en beperkte ruimtelijke resolutie is het niet mogelijk om de lek lengte op een bepaald moment en bepaalde locatie nauwkeurig te bepalen. De nauwkeurigheid van de gemiddelde lek lengte (gemiddeld over de plaats en in de tijd) is wel redelijk goed. Als de lek lengte alleen bepaald wordt als $\phi' - \phi$ en Δi groot zijn, dan zal de nauwkeurigheid van de lek lengte voor de Basalton en basalt uit 2003 naar schatting orde 20% zijn (grenzen van het 90% betrouwbaarheidsinterval) en die van 1984 orde 30%.

3 Selectie van stijghoogtemetingen

Modelproeven uit 1984 en 2003 bevatten tijdreeksen van stijghoogtemetingen van een aantal drukopnemers. Voor deze analyse zijn de ongefilterde signalen gebruikt. Door de bemonsteringsfrequentie (1984: 25Hz; 2003: 100Hz) en de duur van een proef (ca. 1000 golven) zijn er voor elke drukopnemer enkele tienduizenden meetpunten beschikbaar. De lek lengte is hier echter bepaald voor een beperkt aantal geselecteerde golven uit enkele proeven. Vooral de golven die de steenzetting zwaar belasten zijn interessant. Zij onderscheiden zich van andere golven omdat de zetting bij deze golven een relatief grote blokbeweging zal geven.

Teneinde de interessante golven te kunnen selecteren, die in staat zijn een aanzienlijke blokbeweging te geven, zijn er berekeningen gemaakt met het rekenmodel Zsteen (versie 1.9) met een fictieve steenzetting met vrij dunne top laag (niet gelijk aan de constructies in de Deltagoot). Voor dit doel zijn de in de Deltagoot beproefde constructies niet geschikt, omdat die een te dikke top laag hebben en daardoor te weinig blokbeweging geven.

Op basis van de rekenresultaten zijn per proef 3 golven (met 5 tijdstippen rond om het moment van grote blokbeweging) geselecteerd die grote blokbeweging gaven en daarvoor is de lokale lek lengte bepaald.

Tabel D.3 geeft een overzicht over de gekozen tijdstippen. Als voorbeeld zijn de 5 tijdstippen voor de eerste golf van proef 21 uit 1984 gegeven: $t = 292,76s$; $t = 292,80s$; $t = 292,84s$; $t = 292,88s$ en $t = 292,92s$.

Tijdens de zware belasting van de hier geselecteerde golven is het mogelijk dat de zuilen met de drukopnemers bewogen hebben. Dat beïnvloedt het stijghoogteverschil. Door verhinderde toestroming zal het stijghoogteverschil kleiner zijn bij een beweging omhoog en groter bij een beweging omlaag. In deze analyse zou dat een plotselinge (onverklaarbare) verandering van de resulterende lek lengte geven. Tijdens de analyse is hierop gelet en dit bleek niet op te treden.

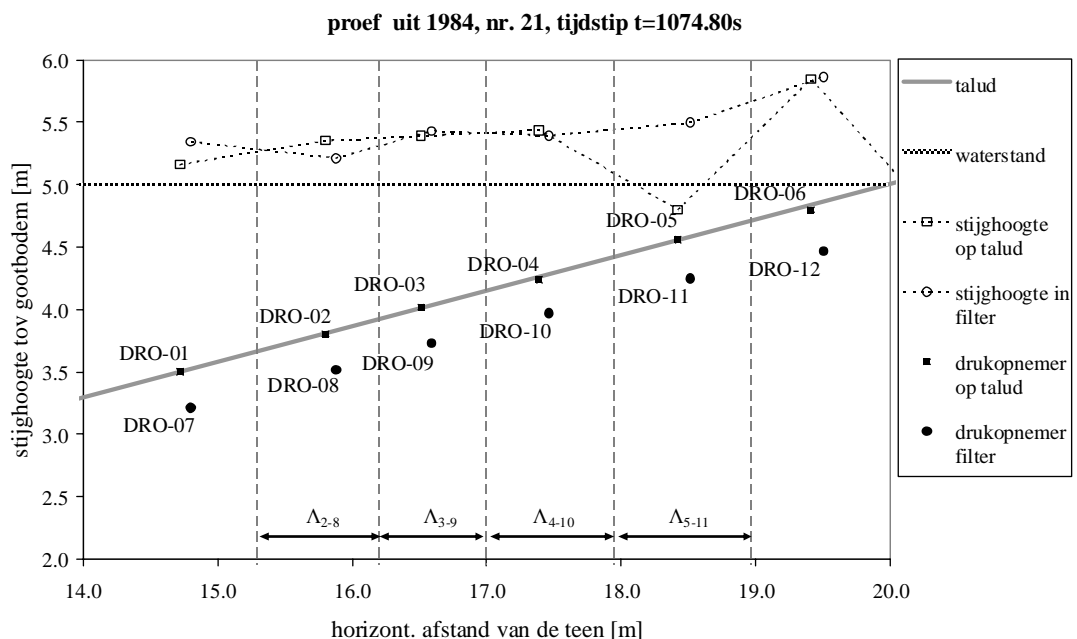
4 Bepaling van de lek lengte

In dit hoofdstuk is de lek lengte bepaald van de drie constructies met behulp van de stijghoogtemetingen op de toplaag en in het filter. Er is daarbij gelet op de kwaliteit van de metingen, zoals weergegeven in tabel E1.

4.1 Lek lengte van basalt uit 1984

In de vorige paragraaf is aangegeven dat de lokale lek lengte tijdens 3 golven in proef 21 van het Deltagootonderzoek uit 1984 is bepaald. Aan de hand van enkele voorbeeldtijdstippen is hier beschreven hoe de metingen uiteindelijk geleid hebben tot een resulterende lek lengte.

Een dwarsdoorsnede van de modelopstelling in 1984 is in Figuur A.1 te zien.



Figuur D.3 Gemeten stijghoogten modelproef DG21, tijdstip $t=1074,80s$

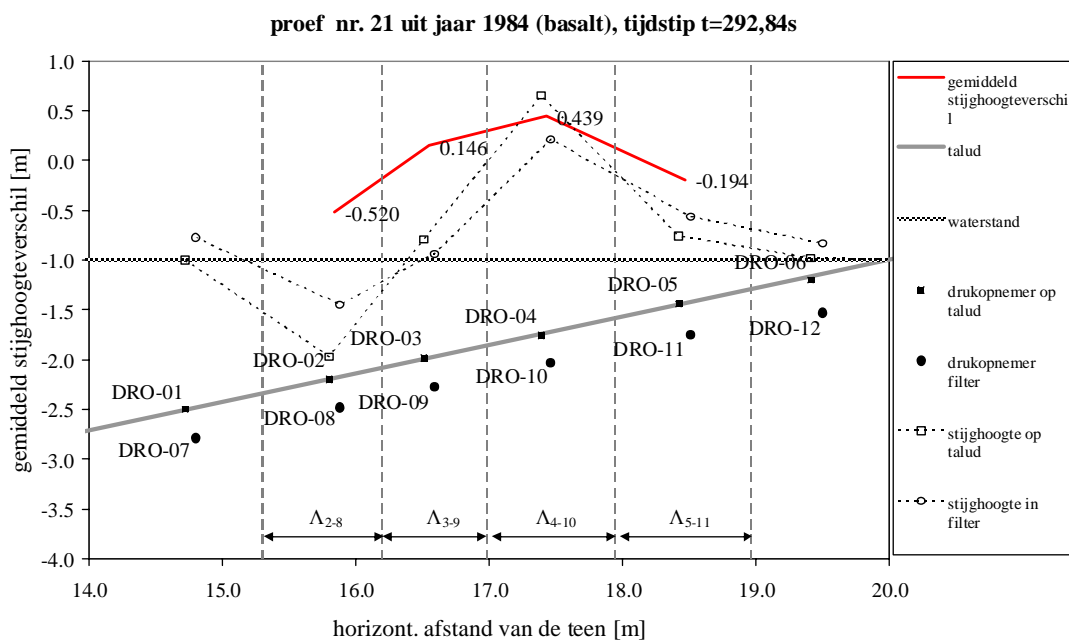
Ter illustratie zijn voor proef 21 de stijghoogtemetingen voor tijdstip $t = 1074,80 s$ weergegeven in Figuur D.3. Van drukopnemer DRO-03 was er geen meting beschikbaar.

Daarom werd de stijghoogte op het talud door lineaire interpolatie tussen DRO-02 en DRO-04 bepaald. Uit Figuur D.3 wordt duidelijk dat met deze geringe instrumentatiedichtheid (verdeling van drukopnemers) de golfrog en de golfklap slechts vrij grof beschreven worden. In dit voorbeeld zijn de stijghoogteverschillen tussen toplaag en filter in het algemeen erg klein (zie verschil tussen stippellijnen).

Een significant verschil treedt alleen bij drukopnemerpaar [DRO-05; DRO-11] op. De stijghoogte in het filter is daar groter dan op de toplaag.

De stijghoogte in het filter wordt nauwelijks beïnvloed door de trog die tussen de golfklap en het front optreedt. Dit beeld is het zelfde als bij constructies met een lange lek lengte. De hoge druk in het filter resulteert waarschijnlijk uit de hoge druk die door de golfklap (tussen drukopnemer 5 en 6) veroorzaakt werd. Door de grote onderlinge afstand tussen de drukopnemers is deze niet gemeten. De gemeten druk verdeling suggereert nu een naar boven gerichte kracht die een blokbeweging kan veroorzaken.

Met de formules uit Hoofdstuk 1 zijn het gemiddelde stijghoogteverschil en de gradiënt van het verhang in filter ($\Delta i = \partial^2 \phi / \partial x^2$) berekend voor proef 21 en tijdstip $t = 1074,80s$ (zie Tabel D.4). De gemiddelde stijghoogteverschillen in de drukopnemerparen 2-8, 3-9 en 4-10 zijn erg klein ($< 0,1m$). Dat betekent dat er nauwelijks water verticaal door de toplaag stroomt. Bij alle drukopnemers werd wel een duidelijke verhanggradiënt in het filter gemeten, hoewel de richting bij drukopnemer 9 ($\Delta i = 0,338$) omgekeerd is vergeleken met de andere locaties.



Figuur D.4 Gemiddeld stijghoogteverschil berekend voor proef nr. 21 uit jaar 1984, tijdstip $t=292,84s$

Deze getallen leiden tot een grote spreiding voor het kwadraat van de lek lengte ($-0.157 m^2$ tot $1,710m^2$, zie voorlaatste regel in Tabel D.4):

- De lek lengte bij drukopnemerpaar 2-8 kan niet worden berekend omdat $(\Lambda_{2,8})^2 < 0$.
- De lek lengte bij drukopnemerpaar 3-9 ($\Lambda_{3,9}$) is ongeveer nul omdat er geen stijghoogteverschil tussen toplaag en filter werd gemeten.

- De lek lengte bij drukopnemerpaar 4-10 (Λ_{4-10}) heeft een realistische waarde.
- De lek lengte bij drukopnemerpaar 5-11 (Λ_{5-11}) heeft een onrealistisch hoge waarde. Dit heeft met een groot stijghoogteverschil bij een laag verhanggradiënt in het filter te maken. Ter plaatse van de golfklap zijn veel meer drukopnemers nodig om een goed beeld van de stijghoogteverschillen en gradiënten te krijgen. Daardoor krijgt de lokale lek lengte hier een onrealistische waarde.

Later in dit Hoofdstuk is uitgelegd welke waarden weggelaten zijn voor het berekenen van de lek lengte.

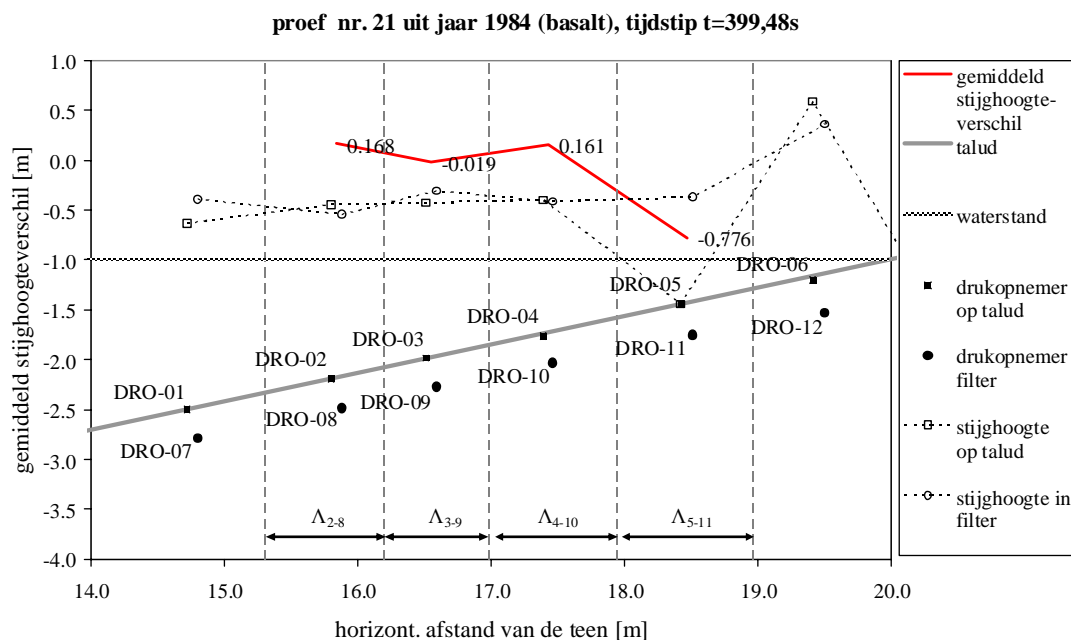
Op dezelfde manier werden alle geselecteerde tijdstippen en golven geanalyseerd. De resultaten voor Λ^2 zijn vermeld in Tabel D.5. De negatieve waarden zijn cursief geschreven. Deze kunnen niet voor het berekenen van de lokale lek lengte worden gebruikt. Λ^2 waarden op de locatie van de trog van de golfklap zijn vet gemarkeerd. Λ^2 waarden op de locatie van de golfklap zijn van een grijze achtergrond voorzien. Bij de golven om $t=399s$ en $t=1074s$ trad de golfklap bij de bovenste drukopnemerpaar op. De stijghoogten, die voor Λ^2 bepalend zijn, traden boven de geïnstrumenteerde testsectie op. Daarom was het niet mogelijk Λ^2 te berekenen. In Tabel D.5 staan de resultaten voor de 3 geselecteerde golven (en 5 tijdstippen per golf) voor proef 21 uit 1984.

Uit de resultaten in Tabel D.5 kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

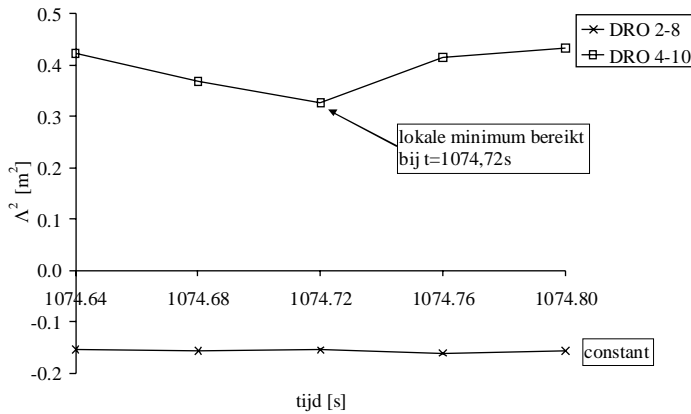
- Ongeveer de helft van de Λ^2 waarden lijken onrealistisch hoog of onrealistisch laag en kunnen niet worden gebruikt om de lokale lek lengte Λ te berekenen.
- De meeste zinvolle Λ^2 waarden werden bij drukopnemerpaar 4+10 bepaald, dus bij de locatie van de golfklap ($t = 292s$) en de zeezijde van het golf front ($t = 399s$, $t=1074s$).
- Per tijdstip en locatie zijn de Λ^2 waarden in het algemeen consistent: Verschillen tussen de 5 tijdstippen zijn heel klein (bijvoorbeeld $1074,64s-1074,80s$) of volgen een bepaalde trend (bijvoorbeeld $292,76s-292,92s$), zie Figuur D.4. Consistente waarden treden ook op als de Λ^2 waarden eigenlijk onrealistisch zijn. Dat zou kunnen betekenen dat de metingen wel goed zijn, maar het gekozen lek lengtemodel niet altijd voldoende is. Men kan daarbij denken aan een horizontale stroming in het filter evenwijdig aan de waterlijn (dijkas).
- Bij drukopnemerpaar 2-8 werden alleen bij de eerste golf ($t=292s$) realistische waarden voor Λ^2 berekend (locatie van de golfklap-trog). Bij de andere geselecteerde golven ($t = 399s$ en $t = 1074s$) zijn deze negatief en daarom onrealistisch. Voor $t = 399s$ en $t = 1074s$ werd een positief stijghoogteverschil gemeten, maar voor de verhanggradiënt in het filter gold $\Delta i < 0$. Dat is volgens het gekozen lek lengtemodel niet mogelijk bij dit stijghoogteverschil over de toplaag (zie ook hoofdstuk 2).
- Bij drukopnemerpaar 3-9 werd voor alle drie geselecteerde golven $\Lambda^2 \approx 0$ bepaald. Dit heeft met een heel laag stijghoogteverschil tussen toplaag en filter op die locatie te maken. De lokale lek lengte kan op deze locatie niet nauwkeurig worden berekend. Gezien de locatie van drukopnemerpaar 3-9 bij $t = 292s$ (onder de gradiënt tussen trog en klap), $t = 399s$ en $t = 1074s$ (voor golf front dus geen stijghoogteverschil) komt dit overeen met de verwachtingen.
- In Figuur D.4 is het verloop van het gemiddeld stijghoogteverschil bij tijdstip $t = 292,84s$ te zien. Significante stijghoogteverschillen treden op de locatie van de

golfrog (drukopnemerpaar 2-8, $\overline{\phi' - \phi} = -0,52\text{m}$) en op de locatie van de golfklap op (drukopnemerpaar 4-10, $\overline{\phi' - \phi} = 0,439\text{m}$). Tussen trog en klap wisselt het stijghoogteverschil van een negatieve naar een positieve waarde. De nuldoorgang is ongeveer bij de helft tussen trog (drukopnemerpaar 2-8) en klap (drukopnemerpaar 4-10), dus bij drukopnemerpaar 3-9. Daarom is op die locatie het gemiddeld stijghoogteverschil kleiner: $\overline{\phi' - \phi} = 0,146\text{m}$.

- Figuur D.5 laat duidelijk zien dat de stijghoogteverschillen voor het golffront vrij laag zijn ($<0.2\text{m}$). Daardoor is op die locaties de nauwkeurigheid waarmee Λ^2 wordt berekend beperkt.
- Bij drukopnemerpaar 4-10 werden veel realistische waarden voor Λ^2 berekend. Bij $t=292\text{s}$ bevinden zich de drukopnemers onder de golfklap, bij $t=399\text{s}$ en bij $t=1074\text{s}$ liggen de drukopnemers onder de golfrog. Afhankelijk van de vorm en precieze locatie van de golfrog kunnen realistische maar ook onrealistische waarden optreden. Een relatief grote bandbreedte van waarden ontstaat, omdat soms heel kleine stijghoogteverschillen tussen toplaag en filter ($<3\text{cm}$) en heel kleine verhanggradiënten in het filter ($\Delta i < 0,1$) worden berekend.
- Bij drukopnemerpaar 5-11 treden zowel realistische waarden ($t = 399\text{s}$, locatie van de trog) als ook onrealistische waarden op ($t = 1074\text{s}$, gedeeltelijk $t = 292\text{s}$). Onrealistisch grote waarden bij $t = 1074\text{s}$ hebben met grote negatieve stijghoogteverschillen (stijghoogte in het filter groter dan in de toplaag) te maken ten opzicht van een lage verhanggradiënt Δi .



Figuur D.5 Gemiddeld stijghoogteverschil berekend voor proef nr. 21 uit jaar 1984, tijdstip $t = 399,48\text{s}$



Figuur D.6 Voorbeelden verloop Λ^2 waarden ten opzicht van de tijd

Voor het bepalen van de gemiddelde lek lengte kunnen niet alle Λ^2 waarden gebruikt worden omdat deze soms onrealistisch zijn. Het is echter te verwachten dat er wel realistische Λ^2 waarden kunnen worden berekend als er grote stijghoogtegradiënten in het filter en over de toplaag zijn gemeten. Daarvoor zijn de volgende criteria aangehouden:

1. Het gemiddelde stijghoogteverschil over de toplaag is groter dan nul (kracht naar boven gericht).
2. Het gemiddelde stijghoogteverschil over de toplaag is groter dan het gemiddelde van alle gemiddelde stijghoogteverschillen over de toplaag (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.

De 4 condities zijn geschetst in Figuur D.7.

Deze selectie leidt tot het uitzonderen van een groot aantal Λ^2 waarden (50 van 60). De Λ^2 waarden die aan de 4 genoemde eisen voldoen zijn in Tabel D.6 weergegeven. Van deze waarden werden de lek lengte berekend en vervolgens het gemiddelde en de standaardafwijking bepaald.

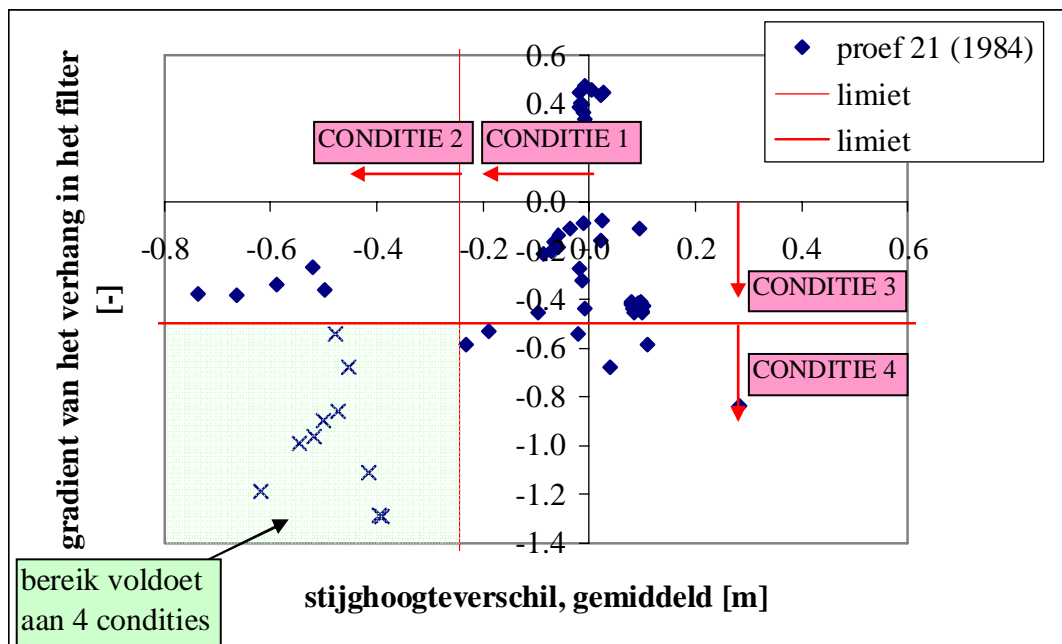
Dankzij deze selectie was het gemiddelde stijghoogteverschil over de toplaag doorgaans 0,4 à 0,6 m, hetgeen iets hoger is dan waar in ANAMOS de linearisatie van de toplaag-doorlatendheid op gebaseerd wordt. In ANAMOS wordt gewerkt met een linearisatie bij $i' = 1$ ($\phi_w = D$). De huidige waarden zijn iets groter en sluiten dus beter aan op de belasting als de toplaag instabiel zou kunnen gaan worden. Door het feit dat de doorlatendheden niet lineair zijn en de lek lengte uitgaat van gelineariseerde doorlatendheden van filter en toplaag, zal de lek lengte bij een klein stijghoogteverschil wat kleiner zijn dan een bij een groot stijghoogteverschil. De huidige metingen laten echter geen relaties zien tussen de grootte van het stijghoogteverschil en de grootte van de lek lengte. Er is wel een daling van de lek lengte (van $\Lambda = 0,75$ naar 0,60 m) als het verhang ($i = \partial\phi/\partial x$) in het filter toeneemt van 0,1 naar 0,6. Gezien het feit dat het gebruikelijk is met een gemiddelde verhang van 0,3 te werken, is verder de gemiddelde lek lengte aangehouden. Bij de metingen van Basalton 2003

is er overigens geen verandering van de lek lengte met het toenemen van het verhang in het filter.

De grootte van het stijghoogteverschil over de toplaag en de verhanggradiënt in het filter zijn zodanig dat ruimschoots voldaan wordt aan de nauwkeurigheidscriteria zoals vermeld in hoofdstuk 2 van deze bijlage.

De statistische analyse leidt tot een gemiddelde waarde $\Lambda = 0,66$ m met een standaardafwijking van $\sigma = 0,12$ m. Het 90%- betrouwbaarheidsinterval is derhalve: $0,46 < \Lambda < 0,86$ m.

De gemiddelde waarde is in de orde grootte van de waarde die met behulp van ANAMOS 2.21 werd berekend, namelijk $\Lambda_{ANAMOS} = 0,56$ m.



Figuur D.7 Bereik voor selectie van gemiddelde stijghoogteverschillen en verhanggradiënten in het filter voor het bepalen van de lek lengte voor proef 21 uit 1984

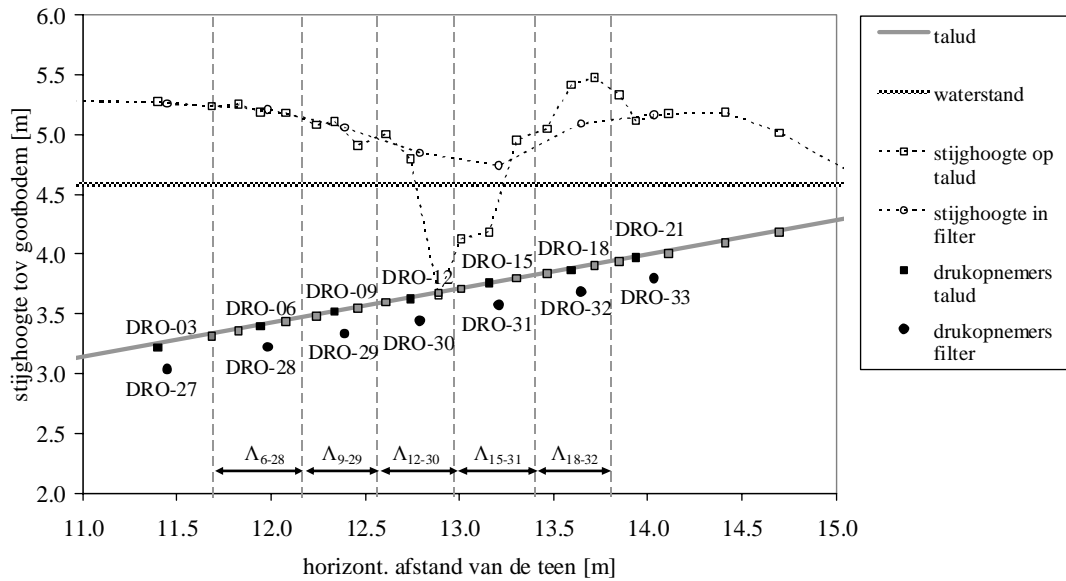
4.2 Lek lengte van basalt uit 2003

Voor de gekozen modelproef uit het onderzoek met basalt uit 2003 zijn 26 drukopnemers op het talud en 7 drukopnemers in het filter beschikbaar. Een dwarsdoorsnede van de modelopstelling in 2003 is in Figuur A.2 te zien. De locaties van de drukopnemers ten opzichte van de teen zijn te vinden in Tabel B.2.

Op globaal dezelfde manier als boven zijn de Λ^2 waarden berekend. De instrumentatiedichtheid en de waterstand zijn samen met een voorbeeld voor stijghoogtemetingen (tijdstip $t = 674,55$ s) in Figuur D.8 weergegeven. Door de dichte instrumentatie werd ook de vorm van de golfklap goed weergegeven. In het filter waren echter minder drukopnemers aangebracht dan op de toplaag, omdat de te verwachten ruimtelijke stijghoogtevariaties in het filter veel kleiner zijn dan op de toplaag. Het is echter niet geoorloofd om voor het berekening van de lek lengte te werken met lineair geïnterpoleerde stijghoogtes in het filter, omdat dat zal leiden tot een verhanggradiënt gelijk aan nul. Daarom is hier gebruik gemaakt van een groepje van 3 drukopnemers op de toplaag

en één in het filter, waar ervoor de proeven uit 1984 steeds één op en één onder de toplaag was gebruikt (zie Figuur D.8: tussen de verticale stippellijnen).

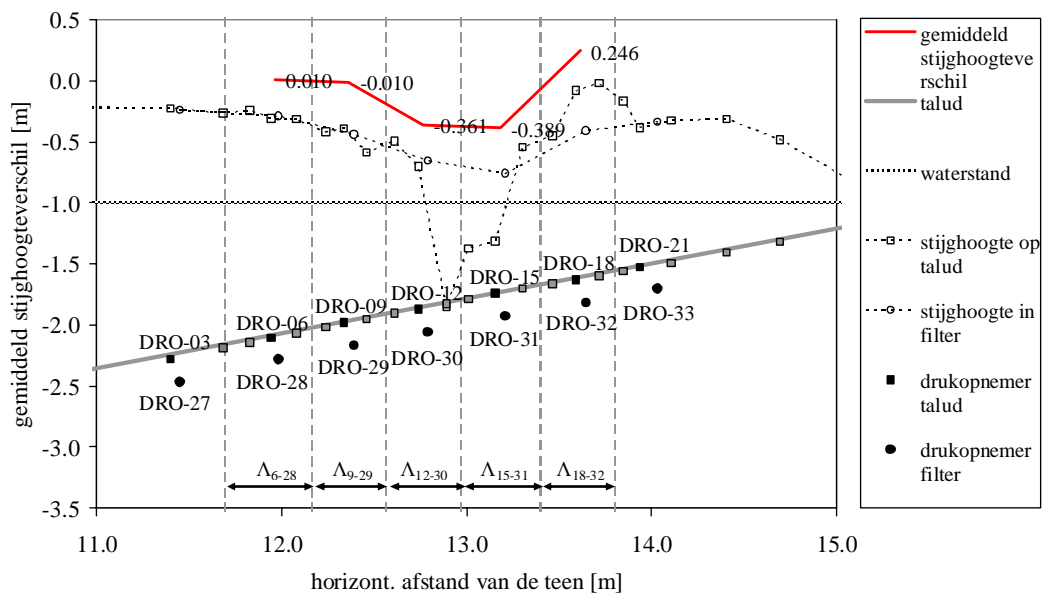
proef nr. 05 uit jaar 2003 (basalt), tijdstip $t = 674,55s$



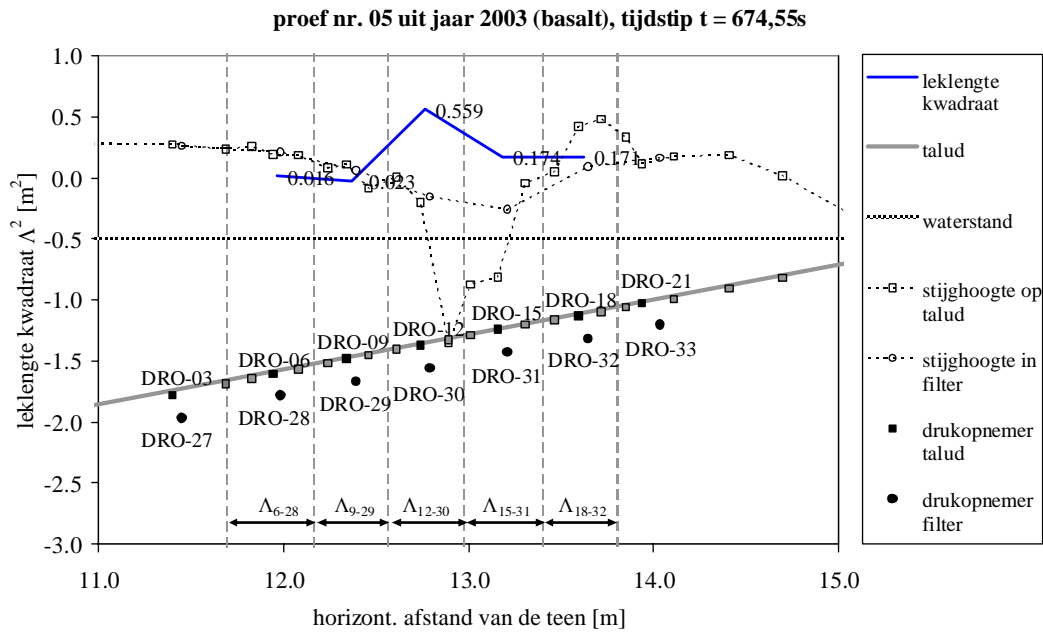
Figuur D.8 Gemeten stijghoogten modelproef 05, tijdstip $t=674,55s$

Tabel D.7 bevat een overzicht van berekende Λ^2 waarden. Negatieve (dus in ieder geval onrealistische) waarden zijn cursief geschreven. De locaties van de golftrug (vet) en de golfklap (grijze achtergrond) verschillen bij de gekozen drie golven minder dan bij de geanalyseerde proef uit 1984.

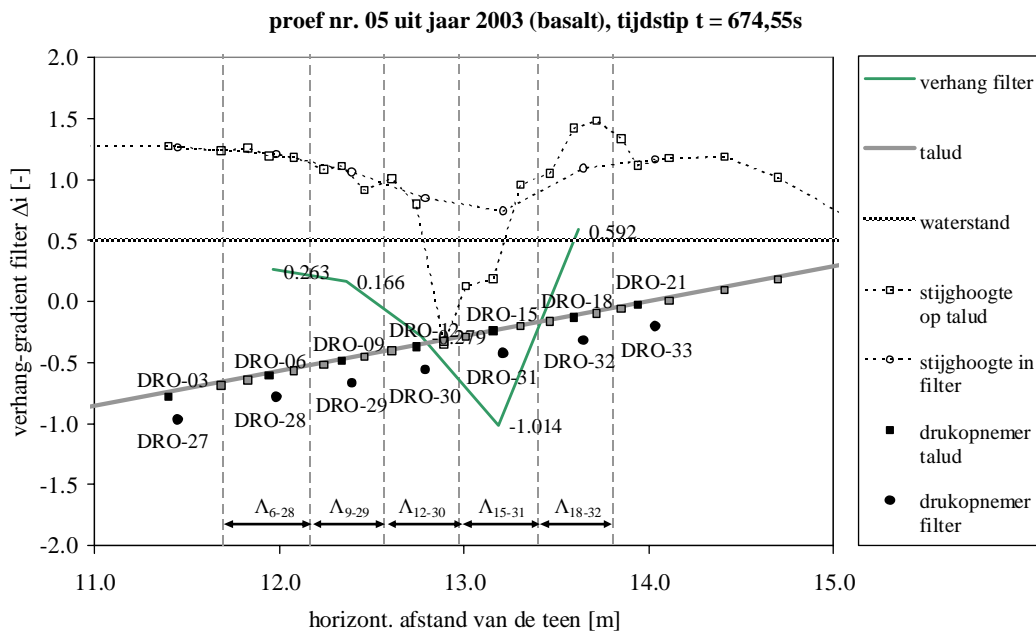
proef nr. 05 uit jaar 2003 (basalt), tijdstip $t = 674,55s$



Figuur D.9 Gemiddeld stijghoogteverschil berekend voor proef nr. 05 uit jaar 2003, tijdstip $t=674,55s$



Figuur D.10 Verloop Λ^2 bij tijdstip t=674,55s (proef uit 2003, basalt)



Figuur D.11 Verloop gradiënt van het verhang in filter ($\Delta i = \partial^2\phi/\partial x^2$) bij tijdstip t = 674,55 s (proef uit 2003, basalt)

De resultaten voor Λ^2 leiden tot de volgende conclusies:

- Meer dan de helft van de berekende Λ^2 waarden lijken zinvol.
- Onrealistische Λ^2 waarden traden voornamelijk bij drukopnemerpaar 6-28 en 9-29 op. Deze drukopnemers waren onder het golf front geïnstalleerd.
- Bij de drukopnemerparen 15+31 en 18+32 (dus onder de golfklap) zijn de Λ^2 waarden geheel realistisch.

- Bij de eerste geselecteerde golf ($t = 674\text{s}$) tonen de stijghoogtemetingen een ideaal (net als in de theorie) verloop van de golftrog en de golfklap. De gemiddelde stijghoogteverschillen zijn in Figuur D.9 weergegeven. Een negatief stijghoogteverschil treedt bij de drukopnemerparen 12-30 en 15-31 op (golftrog). Een positief stijghoogteverschil (druk op talud groter dan in het filter) werd op de locatie van de golfklap (drukopnemerpaar 18-32) berekend. Net als verwacht werden voor de locatie van de golftrog en de golfklap realistische Λ^2 waarden berekend. Echter de spreiding tussen $\Lambda_{12-30}^2 = 0,559\text{m}^2$ $\Lambda_{15-31}^2 = 0,174\text{m}^2$ is vrij groot. Het verloop van Λ^2 is weergegeven in figuur D.10. Een dergelijk verloop treedt bij alle tijdstippen van deze golf op. Dit verschil is te verklaren met de verhanggradiënt in het filter. In Figuur D.11 is de verloop van de verhanggradiënt in het filter, $\Delta i = \partial^2\phi/\partial x^2$, beschouwd. In een ideale situatie zou de verloop van Δi precies het verloop van de golf (front, trog, klap) volgen. In dit geval trad het diepste punt van de golftrog bij drukopnemer 13 (rechts van drukopnemer 12) op. Op de corresponderende locatie in het filter was er geen drukopnemer geïnstalleerd. De trog van de verhanggradiënt lijkt naar rechts verschoven ten opzicht van de verloop van de golf. Deze verschuiving is waarschijnlijk geen echte verschuiving maar heeft met de instrumentatiedichtheid te maken. Als stijghoogten bij extreme punten van een golf (trog, klap) niet worden gemeten heeft dit consequenties voor de spreiding van Λ^2 waarden. Dit wordt bevestigd door de analyse van de tweede en derde golf: de verhanggradiënt in het filter volgt precies de golfvorm. De Λ^2 waarden hebben een heel kleine spreiding (zie Tabel D.7).

Voor de statistische analyse van de lek lengte werden uit Tabel D.7 realistische waarden voor Λ^2 geselecteerd. Dezelfde methode werd toegepast als voor de proeven uit 1984. De waarden die voor de statistische analyse zijn gebruikt zijn weergegeven in Tabel D.8.

De grootte van het stijghoogteverschil over de toplaag en de verhanggradiënt in het filter zijn door deze selectie zodanig dat ruimschoots voldaan wordt aan de nauwkeurigheidscriteria zoals vermeld in hoofdstuk 2 van deze bijlage.

De statistische analyse leidt tot een gemiddelde waarde voor de lek lengte van $\Lambda = 0,44$ m met een standaardafwijking van $\sigma = 0,05$ m. Het 90%- betrouwbaarheidsinterval is derhalve: $0,36 < \Lambda < 0,52$.

Het resultaat van de ANAMOS-berekeningen van de lek lengte is gelijk aan de bovengrens van dit betrouwbaarheidsinterval: $\Lambda_{\text{ANAMOS}} = 0,52$ m.

4.3 Lek lengte van Basalton uit 2003

Inleiding

Bij de proeven met Basalton uit 2003 is een vergelijkbare instrumentatie gebruikt als voor het meten van drukken bij basalt. Een voorbeeld voor het stijghoogteverloop en de locaties van de drukopnemers is in Figuur D.12 weergegeven: golftrog en golfklap zijn in de stijghoogtemetingen bij tijdstip $t = 3649,37$ s duidelijk zichtbaar. De methodiek voor het bepalen van de lek lengte is daarom identiek aan die van basalt uit 2003.

Zoals in Hoofdstuk 3 is beschreven, zijn voor de lek lengteanalyse drie golven geselecteerd die volgens de Zsteen-sommen met een vrij dunne, fictieve, steenzetting tot grote

blokbewegingen leiden. De lek lengteanalyse voor deze initiële selectie werd uitgevoerd zoals beschreven in Hoofdstuk 4.1. Uit de resultaten bleek dat de standaardafwijking voor de gemiddelde lek lengte van Basalton vrij groot was en de resultaten verdiende daarom extra aandacht.

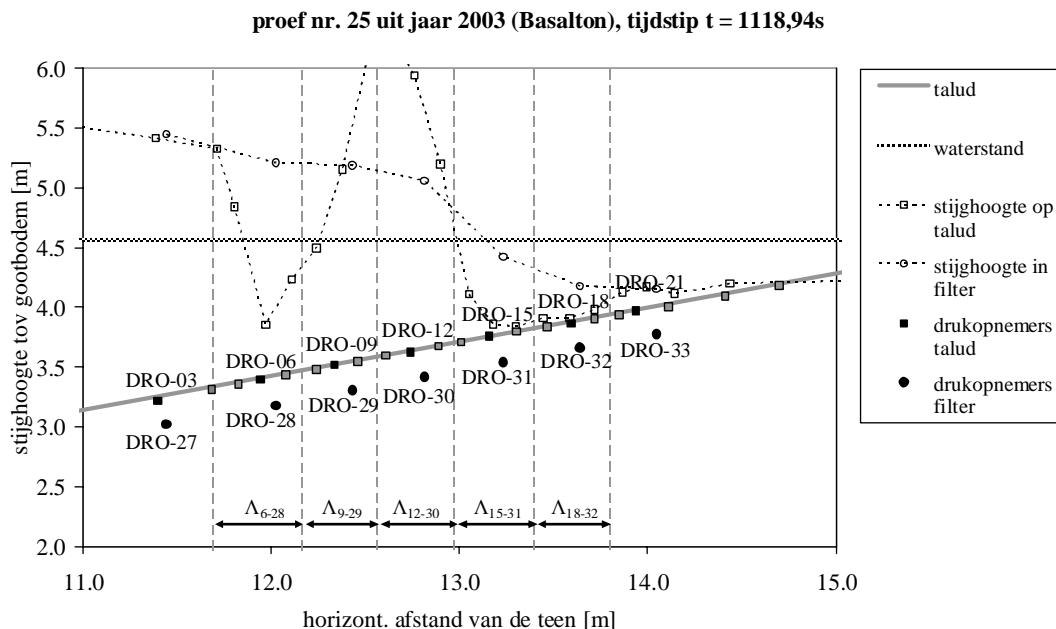
De lokale lek lengten van Basalton die aan de 4 selectiecondities (zie Figuur D.7) voldeden zijn vergeleken met de geselecteerde lokale lek lengten voor basalt uit 1984 en 2003. Daarbij is opgevallen dat bij Basalton uit 2003 slechts enkele lokale lek lengtewaarden in de golf trog aan deze selectiecondities voldeden, terwijl tijdens de geselecteerde proeven voor basalt uit 1984 en 2003 de waarden in golf trog wel steeds voldeden.

Verder bleek bij de analyse van de geselecteerde momenten het stijghoogteverschil steeds erg groot te zijn. Daardoor zou tijdens de proeven in de Deltagoot enige blokbeweging kunnen zijn ontstaan, hetgeen de gemeten drukken verstoort. Zodra de gemeten drukken beïnvloed worden door blokbeweging, is het niet meer mogelijk om de lek lengte met de afgeleide formules te bepalen en leidt het toch toepassen van de formules tot een grote fout in de lek lengte. Dit kan de oorzaak zijn geweest van de grote spreiding in de berekende lek lengte (zie Tabel D.11).

Daarom zijn nieuwe golven geselecteerd met iets minder grote stijghoogteverschillen, waarna de lek lengte weer op dezelfde manier bepaald is.

Tabel D.9 geeft een overzicht over de gekozen golven (5 tijdstippen per golf) en de overschrijdingskansen van de maximale stijghoogteverschillen per golf. De maximale stijghoogteverschillen zijn bij de nieuwe selectie iets lager dan bij de initiële selectie.

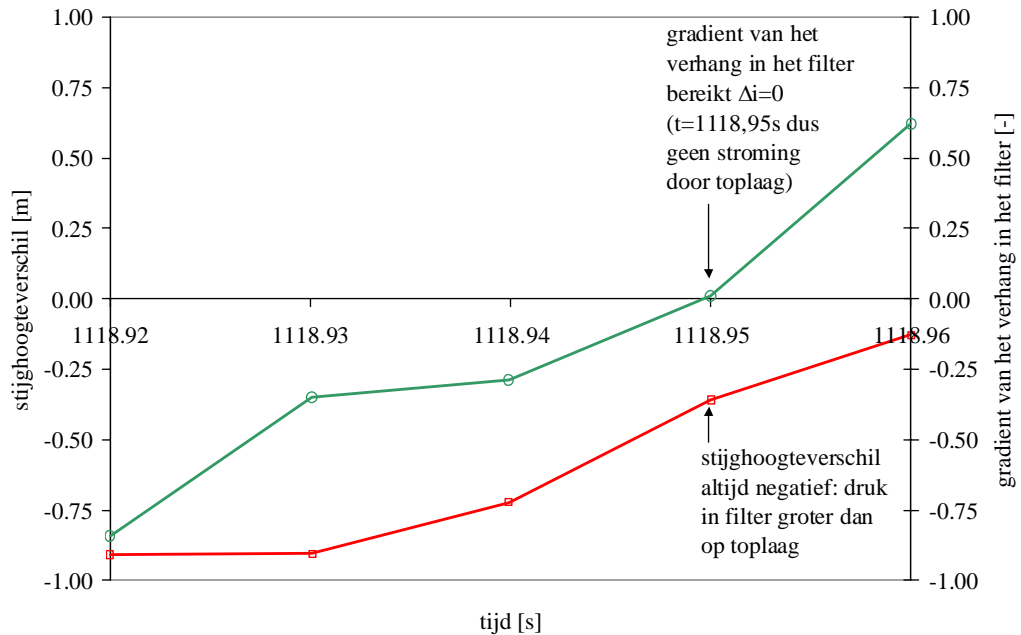
De resultaten van de analyse voor de initiële selectie van golven (gebaseerd op momenten met grote blokbewegingen volgens Zsteen) en de nieuwe selectie van golven zijn in dit hoofdstuk samengevat.



Figuur D.12 Gemeten stijghoogten modelproef 25, Basalton, tijdstip $t=3649,37s$

Initiële selectie van golven

De gemeten stijghoogten zijn gebruikt om met behulp van Formule (3.8) (hoofdstuk 2) de Λ^2 -waarden te berekenen (zie Tabel D.10). De Λ^2 -waarden, die op de locatie van de golftrog optraden zijn vet gedrukt, op de locatie van de golfklap zijn deze van een grijze achtergrond voorzien.



Figuur D.13 Ontwikkeling van het stijghoogteverschil en de gradiënt van het verhang in filter ($\Delta i = \partial^2 \phi / \partial x^2$) bij drukopnemerpaar [6-28] met de tijd

De berekeningen hebben de volgende voorlopige resultaten opgeleverd:

- Kennelijk onrealistische waarden traden voornamelijk bij drukopnemerpaar [6-26] op.
- De spreiding van Λ^2 waarden per locatie en golf is vrij groot. Dit zou kunnen duiden op een beweging van de geïnstrumenteerde blokken, waardoor de drukmetingen zijn verstoord en een fout in de berekende lek lengte ontstaat.
- De meeste realistische waarden traden bij de drukopnemersparen [12-30] en [15-31] op, dus op de locatie van de golfklap.
- Metingen bij drukopnemerpaar [6-28] (golf bij $t = 1118$ s) lijken op het eerste gezicht raar maar als de stijghoogtemetingen met betrekking tot de tijd beschouwd worden kan een verklaring worden gevonden (Figuur D.13). Het gemiddeld stijghoogteverschil tussen toplaag en filter neemt van $-0,9$ m ($t = 1118,92$ s) naar $-0,1$ m ($t = 1118,96$ s) af. De reden hiervoor is dat het golf front verder richting talud beweegt, waardoor de stijghoogte op het talud groter wordt. De verhanggradiënt in het filter ($\partial^2 \phi / \partial y^2$) neemt eveneens af. Eigenlijk wordt verwacht dat de verhanggradiënt in het filter en het gemiddeld stijghoogteverschil op het zelfde tijdstip de waarde nul bereiken (geen verhanggradiënt in het filter als verticaal ook geen stijghoogteverschil optreedt). Uit Figuur D.13 blijkt dat dit bij de beschouwde drukmetingen niet het geval is. Dit lijkt fysisch onmogelijk maar zal een gevolg zijn van de beperkte instrumentatiedichtheid of van 3D-effecten (dwarsstroming).

Dezelfde conclusies volgen ook uit de beschouwing van de resultaten bij drukopnemerpaar [6-28] voor $t = 3649$ s.

De statistische analyse leidt tot een gemiddelde waarde $\Lambda = 0,60$ m met een standaardafwijking van maar liefst $\sigma = 0,16$ m. Deze grote spreiding was aanleiding om de analyse op drie andere golven te richten, waarbij er kleinere stijghoogteverschillen optraden en de kans op beweging van de geïnstrumenteerde blokken kleiner was.

Nieuwe selectie van golven

De nieuwe selectie van golven is uitgevoerd door enkele golven te kiezen met een aanzienlijke blokbeweging volgens de Zsteen berekeningen met een dunne toplaag, maar die in de metingen een kleiner stijghoogteverschil hadden dan de oorspronkelijk geselecteerde golven. Het is te verwachten dat deze golven de constructie in de Deltagoot niet of nauwelijks zouden laten bewegen.

De methodiek voor het bepalen van de lek lengte is verder identiek. De stijghoogten werden gebruikt om met behulp van Formule (3.8) (hoofdstuk 2) de Λ^2 -waarden te berekenen (zie Tabel D.12). De Λ^2 -waarden, die op de locatie van de golfrog optraden zijn vet gedrukt, op de locatie van de golfklap zijn deze van een grijze achtergrond voorzien.

Bij de nieuwe selectie van golven kan een heel duidelijke indeling van lokale lek lengten worden gemaakt (zie Tabel D.12):

- Lokale lek lengten op locaties zeewaarts van de golfrog
Berekende lokale lek lengten zijn heel klein. Dit heeft te maken met heel lage stijghoogteverschillen en verhanggradiënten in het filter tussen toplaag en filter voor een golfrog. Kenmerkende voorbeelden hiervoor zijn de locaties van drukopnemerpaar 9-29 (golf bij 156 s), 6-28 (golf bij 230 s) en 6-28 (golf bij 6-28).
- Lokale lek lengten ter plaatse van de golfrog
De berekende lek lengten op locaties van golfrogen zijn in een realistische range en voldoen in het algemeen aan de 4 selectiecondities voor betrouwbare lokale lek lengten. Kenmerkende voorbeelden zijn hiervoor de locaties van drukopnemerpaar 15-30 (golf bij 156 s), 12-30 (golf bij 230 s) en 12-30 (golf bij 6-28).
- Lokale lek lengten op locaties van de golfklap en achter de golfklap
De berekende lokale lek lengten op de locaties van golfklappen en achter de golfklappen voldoen niet aan de 4 selectiecondities. De spreiding van Λ^2 -waarden is op deze locaties vrij groot. Voor een deel van de locaties en tijdstippen werden onrealistisch grote Λ^2 -waarden en onrealistisch lage Λ^2 -waarden berekend. Kenmerkende voorbeelden zijn drukopnemerpaar 15-31 (tijdstip 366,23 s) en drukopnemerpaar 18-32 (230,68 s). Bij deze tijdstippen werden op deze locaties grote stijghoogteverschillen (golfklappen) gemeten, de stromingen in het filter (verhanggradiënten) waren echter heel klein.

Voor de statistische analyse van de lek lengte werden aan de hand van de selectiecondities (zie Hoofdstuk 4.1) uit Tabel D.12 realistische waarden voor Λ^2 geselecteerd (zie Tabel D.13). Uit deze tabel werden de statistische parameters voor de lek lengte bepaald. De grootte van het stijghoogteverschil over de toplaag en de verhanggradiënt in het filter zijn door deze selectie zodanig dat ruimschoots voldaan wordt aan de nauwkeurigheidscriteria zoals vermeld in hoofdstuk 2 van deze bijlage.

De statistische analyse leidt tot een gemiddelde waarde $\Lambda = 0,54$ m met een standaardafwijking van $\sigma = 0,04$ m. Het 90%- betrouwbaarheidsinterval is derhalve: $0,47 < \Lambda < 0,61$.

Volgens de ANAMOS berekeningen was de lek lengte vergelijkbaar: $\Lambda_{ANAMOS} = 0,52$ m.

5 Analyse

In deze bijlagen zijn de lek lengten bepaald op basis van stijghoogtemetingen. Deze lek lengte worden de gemeten lek lengte genoemd. Daarnaast kan de lek lengte ook bepaald worden met ANAMOS. De resultaten zijn in onderstaande Tabel D.14 weergegeven. Een overzicht van gebruikte invoerwaarden is in Tabel B.4 van Bijlage B gegeven.

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 D.1 Overzicht gemeten lek lengten gebaseerd op stijghoogtemetingen, en berekend met ANAMOS

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 blijkt. De waarde ligt zelfs op te rand van het 90%-betrouwbaarheidsinterval. Bij Basalton uit 2003 is de met ANAMOS berekende waarde nagenoeg gelijk aan de gemeten waarde.

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

$$\Lambda = \sqrt{b \cdot D \cdot \frac{k}{k'}}$$

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 ertijdens een grote golf veel inwasmateriaal uitspoelt, dat tijdens de volgende golven weer in de spleten gevangen wordt.

In tabel 1 van de hoofdtekst 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 D.2.

Uit deze tabel blijkt dat de lek lengte van basalt uit 2003, berekend met de formules van Klein Breteler (2002), nu wel overeenkomt met de gemeten lek lengte. 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 lek lengte die bepaald is uit de metingen.

Uit dit onderzoek bleek dat een relatief hoog percentage aan onrealistische waarden voor de lek lengte optraden. Mogelijke reden voor ogenschijnlijk onrealistische Λ^2 waarden zijn:

- De instrumentatiedichtheid is beperkt. In sommige gevallen leidt het bepalen van gemiddelde waarden voor de beschouwde sectie tot rare getallen. De hoofddimensies van de golfklappen (breedte trog, breedte klap) zijn meestal in de orde van grootte van de afstand tussen twee drukopnemers. Een hogere instrumentatiedichtheid zal tot een betere representatie van de golfklap leiden.
- Het gekozen rekenmodel voor de lek lengte is niet in ieder geval voldoende om alle mogelijk van belang zijnde fysische processen te kunnen beschrijven:
 - Er zou een kleine faseverschuiving tussen de stijghoogte op het talud en in het filter kunnen zijn. Zelfs als dit slechts 0,02s is kan dat merkbare gevolgen hebben.
 - Het resultaat wordt beïnvloed als er blok beweging optreedt. Door een (kleine) blokbeweging moet een extra volume onder de bekleding gevuld worden. Dit effect zit niet in het rekenmodel. Hoewel de beweging van de geïnstrumenteerde zuilen in de Deltagoot tijdens deze proeven waarschijnlijk verwaarloosbaar was, zijn wel precies die tijdstippen geanalyseerd waar blokbewegingen op zouden kunnen treden.
 - Het is geschematiseerd tot een 2 dimensionaal probleem met drukopnemers in één raai op het talud. Juist tijdens de golfklap kunnen 3D verschijnselen optreden met verhangen evenwijdig aan de waterlijn.
- Meetfouten en meetonauwkeurigheden kunnen tot onrealistische Λ^2 waarden leiden.

Ondanks deze aspecten, die de nauwkeurigheid nadelig beïnvloeden, zijn de bepaalde lek lengten realistisch en komen ze grofweg overeen met de berekende waarden. Voor de verdere analyse wordt gewerkt met de gemiddelde waarden van de gemeten lek lengte uit Tabel D.14.

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 D.2 Berekende doorlatendheden en lek lengten volgens formules Klein Breteler (2002)

6 Conclusie

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 deze bijlage 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 leklengtes iets verschillen, is het ook te verwachten dat de stijghoogteverschillen bij een bepaalde golfconditie 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.

Tabellen

materiaal	jaar	proef	bemonsterings- frequentie [Hz]	begin interval [s]	einde interval [s]
basalt	1984	21	25	292,76	292,92
basalt	1984	21	25	399,40	399,56
basalt	1984	21	25	1074,64	1074,80
basalt	2003	05	100	674,54	674,58
basalt	2003	05	100	2678,99	2679,03
basalt	2003	05	100	4190,83	4190,87
Basalton	2003	25	100	1118,92*	1118,96*
Basalton	2003	25	100	3144,71*	3144,75*
Basalton	2003	25	100	3649,35*	3649,39*
Basalton	2003	25	100	156,52**	156,56**
Basalton	2003	25	100	230,66**	230,70**
Basalton	2003	25	100	366,22**	366,26**

* ... initiële selectie van golven, gebaseerd op ZSTEEN sommen (momenten met grote berekende

blokbewegingen)

** ... nieuwe selectie van golven, gebaseerd op minder grote stijghoogteverschillen

Tabel D.3 Geselecteerde tijdstippen met grote blokbewegingen voor de lek lengteanalyse

drukopnemerpaar		1+7	2+8	3+9	4+10	5+11	6+12
horizont. afstand tot teen	X [m]	14.72	15.80	16.51	17.39	18.42	19.41
stijghoogte op toplaag	ϕ'_i [m]	5.161	5.352	5.390	5.437	4.799	5.847
stijghoogte in filter	ϕ_i [m]	5.344	5.212	5.431	5.393	5.497	5.865
stijghoogteverschil	$\phi'_i - \phi_i$ [m]	-0.184	0.140	-0.041	0.044	-0.699	-0.018
gemid. stijghoogteverschil	$\overline{\phi'_i - \phi_i}$ [m]		0.079	-0.009	-0.057	-0.520	
stijghoogtegradient in filter	Δi [-]		-0.414	0.338	-0.139	-0.266	
lek lengte kwadraat	Λ^2 [m ²]		-0.157	-0.026	0.433	1.710	
lek lengte Λ	Λ [m]		-	-	0.658	1.308	

Tabel D.4 Berekeningen belangrijke parameters voor de lek lengte, voorbeeld modelproef DG21, tijdstip t = 1074,80s

tijdstip	$(\Lambda_{2-8})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{3-9})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{4-10})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{5-11})^2$ [m ²]
292,76 s	0,428	-0,059	0,206	0,348
292,80 s	0,248	-0,335	0,248	0,313
292,84 s	0,253	-0,186	0,171	0,188
292,88 s	0,309	0,018	0,121	0,036
292,92 s	0,459	0,037	0,154	-0,753
399,40 s	-0,183	-0,016	0,066	0,775
399,44 s	-0,182	0,051	-0,140	0,586
399,48 s	-0,200	0,060	-0,335	0,471
399,52 s	-0,197	0,010	0,122	0,481
399,56 s	-0,181	-0,039	0,349	0,483
1074,64 s	-0,153	-0,041	0,423	1,698
1074,68 s	-0,156	-0,033	0,369	1,517
1074,72 s	-0,155	-0,050	0,326	1,198
1074,76 s	-0,160	-0,031	0,414	1,512
1074,80 s	-0,157	-0,026	0,433	1,710

Tabel D.5 Uit stijghoogtemetingen berekende Λ^2 waarden van de basaltproeven uit 1984 (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap)

tijdstip	$(\Lambda_{2-8})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{3-9})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{4-10})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{5-11})^2$ [m ²]
292,76 s	0,428			
292,80 s	0,248			
292,84 s	0,253			
292,88 s	0,309			
292,92 s	0,459			
399,40 s				0,775
399,44 s				0,586
399,48 s				0,471
399,52 s				0,481
399,56 s				0,483
1074,64 s				
1074,68 s				
1074,72 s				
1074,76 s				
1074,80 s				

Tabel D.6 Geselecteerde uit stijghoogtemetingen berekende Λ^2 waarden van de basaltproeven uit 1984 die gebruikt zijn voor de statistische analyse van de lek lengte (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap; lege cellen = voldoet niet aan criteria)

tijdstip [s]	$(\Lambda_{6-28})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{9-29})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{12-30})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{15-31})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{18-32})^2$ [m ²]
674,54	0,017	-0,038	0,467	0,156	0,150
674,55	0,016	-0,023	0,559	0,174	0,171
674,56	0,067	-0,060	0,643	0,184	0,188
674,57	0,036	-0,059	0,642	0,192	0,198
674,58	-0,001	-0,074	1,371	0,197	0,227
2678,99	-0,063	0,069	0,087	0,081	0,159
2679,00	-0,064	0,078	0,114	0,104	0,114
2679,01	-0,045	0,071	0,116	0,112	0,134
2679,02	-0,065	0,094	0,138	0,116	0,230
2679,03	-0,062	0,127	0,151	0,129	0,313
4190,83	0,037	0,161	0,110	0,236	0,175
4190,84	0,340	0,326	0,097	0,170	0,159
4190,85	0,116	0,131	0,086	0,206	0,150
4190,86	0,107	0,064	0,091	0,201	0,138
4190,87	0,162	0,150	0,086	0,161	0,138

Tabel D.7 Uit stijghoogtemetingen berekende Λ^2 waarden van de basaltproeven uit 2003 (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap)

tijdstip [s]	$(\Lambda_{6-28})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{9-29})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{12-30})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{15-31})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{18-32})^2$ [m ²]
674,54				0,156	
674,55				0,174	
674,56				0,184	
674,57				0,192	
674,58				0,197	
2678,99		0,069			
2679,00		0,078			
2679,01		0,071			
2679,02		0,094			
2679,03		0,127			
4190,83		0,161			0,175
4190,84					0,159
4190,85					0,150
4190,86					0,138
4190,87					0,138

Tabel D.8 Geselecteerde uit stijghoogtemetingen berekende Λ^2 waarden van de basaltproeven uit 2003 die gebruikt zijn voor de statistische analyse van de lek lengte (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap; lege cellen = voldoet niet aan criteria)

selectie	momenten	maximaal stijghoogteverschil [m]	overschrijdingskans [%]
initiële selectie	1118,92 – 1118,96	0,87	5
	3144,71 – 3144,75	1,09	1
	3649,35 – 3649,39	0,99	2
nieuwe selectie	156,52 – 156,56	0,71	14
	230,66 – 230,70	0,83	7
	366,22 – 366,26	0,85	6

Tabel D.9 Selectie van golven voor de leklengteanalyse van Basalton 2003 (proef 25)

tijdstip [s]	$(\Lambda_{6-28})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{9-29})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{12-30})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{15-31})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{18-32})^2$ [m ²]
1118,92	0,466	0,402	0,154	0,202	0,187
1118,93	1,120	0,133	0,273	0,227	0,228
1118,94	1,082	-0,038	0,276	0,285	0,219
1118,95	-16,922	0,871	0,323	0,275	0,281
1118,96	-0,089	0,112	0,291	-0,958	0,207
3144,71	-0,147	0,230	0,073	0,231	0,319
3144,72	-0,028	0,217	0,078	0,254	0,312
3144,73	-0,000	0,196	0,122	0,186	0,476
3144,74	0,020	0,180	0,134	0,195	0,461
3144,75	0,029	0,164	0,147	0,198	0,572
3649,35	0,585	0,797	0,049	0,358	0,269
3649,36	1,557	0,557	0,155	0,602	0,257
3649,37	-19,199	0,394	0,157	0,301	0,296
3649,38	0,719	0,472	0,201	0,177	0,386
3649,39	0,319	0,228	0,223	0,206	0,286

Tabel D.10 Uit stijghoogtemetingen berekende Λ^2 waarden van de Basaltonproeven uit 2003 (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap), initiële selectie gebaseerd op momenten met grote blokbewegingen (volgens Zsteen)

tijdstip [s]	$(\Lambda_{6-28})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{9-29})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{12-30})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{15-31})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{18-32})^2$ [m ²]
1118,92	0,466			0,202	
1118,93				0,227	
1118,94				0,285	
1118,95				0,275	0,281
1118,96					0,207
3144,71					
3144,72					
3144,73					
3144,74					
3144,75					
3649,35					
3649,36		0,557			0,257
3649,37		0,394			0,296
3649,38					
3649,39					

Tabel D.11 Geselecteerde uit stijghoogtemetingen berekende Λ^2 waarden van de Basaltonproeven uit 2003 die gebruikt zijn voor de statistische analyse van de lek lengte (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap), initiële selectie gebaseerd op momenten met grote blokbewegingen (volgens Zsteen; lege cellen = voldoet niet aan criteria)

tijdstip [s]	$(\Lambda_{6-28})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{9-29})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{12-30})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{15-31})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{18-32})^2$ [m ²]
156,52 s	-0,732	0,065	0,338	0,341	0,274
156,53 s	0,012	0,040	0,333	0,278	0,298
156,54 s	0,005	0,035	0,275	0,254	0,346
156,55 s	0,045	0,027	0,242	0,282	0,527
156,56 s	0,080	-0,016	0,138	0,279	0,430
230,66 s	0,072	0,344	0,233	0,182	-0,751
230,67 s	0,072	0,234	0,288	0,120	1,773
230,68 s	0,082	0,287	0,334	0,183	-4,883
230,69 s	0,048	0,206	0,322	0,264	-0,149
230,70 s	0,079	0,205	0,410	0,221	1,781
366,22 s	0,088	0,116	0,291	-0,692	0,391
366,23 s	0,038	0,142	0,272	9,469	0,387
366,24 s	0,072	0,096	0,277	0,107	0,456
366,25 s	0,109	0,155	0,252	0,187	0,494
366,26 s	0,026	0,120	0,268	-0,014	0,434

Tabel D.12 Uit stijghoogtemetingen berekende Λ^2 waarden van de Basaltonproeven uit 2003 (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap), selectie van golven met grote stijghoogteverschillen (maar met een lagere overschrijdingskans dan bij de initiële selectie)

tijdstip [s]	$(\Lambda_{6-28})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{9-29})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{12-30})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{15-31})^2$ [m ²]	$(\Lambda_{18-32})^2$ [m ²]
156,52 s				0,341	
156,53 s				0,278	
156,54 s				0,254	
156,55 s				0,282	
156,56 s				0,279	
230,66 s		0,344	0,233		
230,67 s		0,234	0,288		
230,68 s		0,287	0,334		
230,69 s		0,206	0,322		
230,70 s					
366,22 s			0,291		
366,23 s			0,272		
366,24 s			0,277		
366,25 s			0,252		
366,26 s			0,268		

Tabel D.13 Geselecteerde uit stijghoogtemetingen berekende Λ^2 waarden van de Basaltonproeven uit 2003 die gebruikt zijn voor de statistische analyse van de leklengte (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap; lege cellen = voldoet niet aan criteria) , selectie van golven met grote stijghoogteverschillen (maar met een lagere overschrijdingskans dan bij de initiële selectie)

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

Tabel D.14 Overzichtgemeten leklengten gebaseerd op stijghoogtemetingen, en berekend met ANAMOS

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]	0,05 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
leklengte	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 D. 15 Berekende doorlatendheden en leklengten volgens formules Klein Breteler (2002)

Bijlage E:

Stijghoogteverschil over de toplaag

Inhoud van Bijlage E

Lijst van Figuren

Lijst van Tabellen

Lijst van Symbolen

1	Inleiding	1
2	Wijze waarop het stijghoogteverschil is bepaald	1
3	Analyse extreme stijghoogteverschillen	6
3.1	Vaststellen van overschrijdingswaarden van stijghoogteverschillen	6
3.2	Relatie stijghoogteverschillen tot golfparameters.....	9
3.3	Relatie stijghoogteverschillen tot de sterkte van de bekleding	13
4	Samenvatting	14

Figuren

Lijst van Figuren

- Figuur E.1 Voorbeeld van een gefiltered signaal van stijghoogten en definitie van begin en einde van golven
- Figuur E.2 Overschrijdingskans stijghoogteverschil bij proef p004a (voorbeeld betrouwbare resultaten)
- Figuur E.3 Overschrijdingskans stijghoogteverschil bij proef p005 (voorbeeld voor betrouwbare en niet betrouwbare resultaten)
- Figuur E.4 Overschrijdingskromme voor integrale stijghoogteverschillen (proeven uit 1984 met basalt)
- Figuur E.5 Overschrijdingskromme voor integrale stijghoogteverschillen (proeven uit 2003 met Basalton)
- Figuur E.6 Verband tussen significante golfhoogte en stijghoogteverschil $\phi_{w2\%}$
- Figuur E.7 Verband tussen golfsteilheid en stijghoogteverschil $\phi_{w2\%}$
- Figuur E.8 Vergelijking tussen gemeten en berekende stijghoogteverschillen tov. de golfsteilheid
- Figuur E.9 2%-stijghoogteverschil tov. de locatie, proeven met basalt uit 1984 (boven), proeven met basalt uit 2003 (beneden)
- Figuur E.10 2%-stijghoogteverschil tov. de locatie, proeven met basalt uit 2003
- Figuur E.11 2%-stijghoogteverschil tov. de locatie, proeven met Basalton uit 2003

Lijst van Tabellen

Tabel E.1 Overzicht niet betrouwbare drukopnemerparen

Tabel E.2 Voorbeeld resultaten in ASCII-file maximaal stijghoogteverschil per golf

Tabel E.3 Bepalen van extreme integrale stijghoogteverschillen (selectie golven)

Tabel E.4 Gemeten extreme integrale stijghoogteverschillen (berekend voor alle drukopnemer) (door de beperkte nauwkeurigheid kunnen de werkelijke waarden uit 1984 20 à 30% hoger liggen)

Tabel E.5 Beoordeling sterkte van de bekleding bij begin van schade

I 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 anderzijds ook beïnvloed door de eigenschappen van de constructie (lek lengte). 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.

In 1984 waren 6 drukopnemers op het talud en 6 drukopnemers in het filter geïnstalleerd. Daarom zijn er op 6 locaties metingen van stijghoogteverschillen beschikbaar. In 2003 waren 26 drukopnemers op het talud en 7 drukopnemers in het filter geïnstalleerd. Om gebruik te kunnen maken van alle drukopnemermetingen op het talud werden fictieve drukopnemers in het filter aangenomen. De stijghoogten op deze locaties werden middels lineaire interpolatie tussen de echte drukopnemers in het filter berekend.

Als karakteristieke waarden werden de stijghoogteverschillen $\phi_{w13\%}$, $\phi_{w5\%}$, $\phi_{w2\%}$ en $\phi_{w0,5\%}$, bepaald. Het stijghoogteverschil $\phi_{w2\%}$ bij optreden van schade (overschrijding door één op de 50 golven) over alle drukopnemerparen is in bijlage F gebruikt om de klemming te berekenen.

Voor het optreden van schade is het alleen interessant als de stijghoogte in het filter groter is dan op de toplaag (kracht naar boven gericht; dus gevaar van uitlichting van stenen).

2 Wijze waarop het stijghoogteverschil is bepaald

Voor het verwerken van de grote databestanden werden met behulp van MATLAB routines ontwikkeld. Deze routines werden voor elke proef gebruikt. De routines zijn ontwikkeld in het kader van het onderzoek naar golfklappen (Coeveld, 2003). In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de verschillende stappen die in de software uitgevoerd worden of die betrekking hebben op de invoer of interpretatie van de resultaten.

1. Ter beschikking stellen van invoerfiles

Als invoerfiles zijn nodig:

- Configuratie file (ASCII-formaat): De configuratie file bevat belangrijke parameters die de modelproef beschrijven, zoals: waterdiepte, taludhelling, significante golfhoogte, piekperiode, brekerparameter, bermdimensies en locatie van de drukopnemers
- File met drukmetingen (ASCII-formaat): De matrix bevat tijdstippen en gemeten drukken voor de eerste drukopnemer. Deze metingen worden gebruikt om de golven te definiëren (begin en eind).

- File met stijghoogteverschillen (ASCII-formaat): Stijghoogteverschillen worden in een aparte procedure berekend. Voor de signalen van de stijghoogteverschillen is een 4Hz laagdoorlaatfilter toegepast.

2. Definiëren van begin en eind van de golven

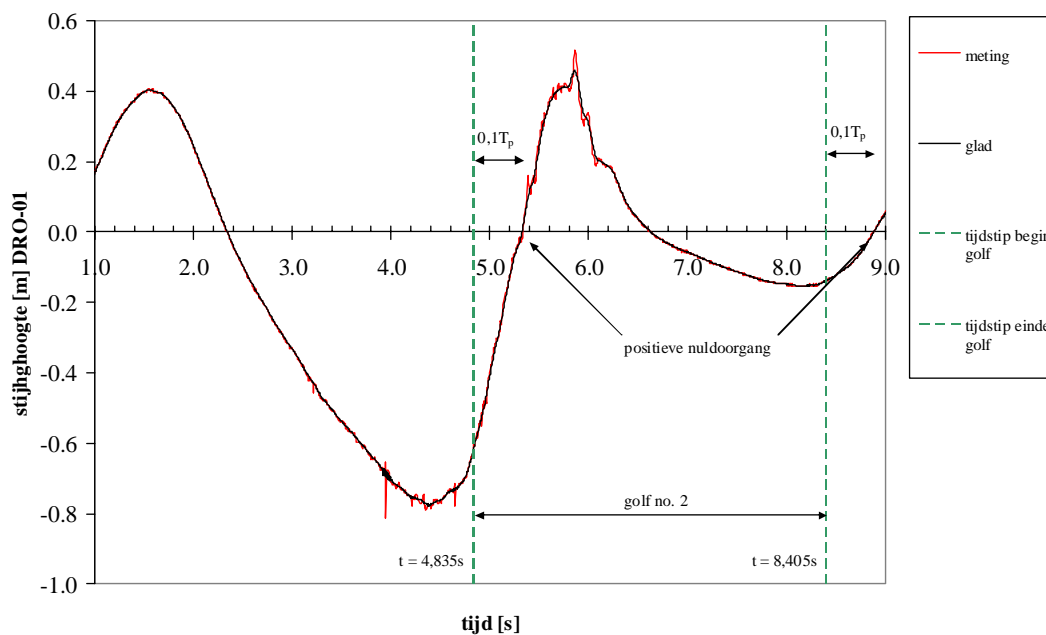
Om het maximale stijghoogteverschil voor iedere golf te kunnen bepalen moeten begin en eind van een golf gedefinieerd zijn (Coeveld, 2003).

Deze worden met behulp van de drukmetingen bij drukopnemer 1 bepaald. Het wordt aangenomen dat de drukmetingen bij de eerste drukopnemer het meeste op een gewone sinus met twee nuldoorgangen per golf lijken. De gemeten drukken worden naar stijghoogtes omgerekend:

$$\phi = \frac{p}{\rho_w \cdot g} + z \quad (4.1)$$

- ϕ = stijghoogte [m]
- p = druk [N/m²]
- ρ_w = dichtheid water, $\rho_w=1000$ kg/m³
- g = versnelling van de zwaartekracht, $g=9,81$ m/s²
- z = referentieniveau, hier stilwaterlijn [m]

De tijdreeks (stijghoogten) wordt vervolgens sterk gefilterd om extra nuldoorgangen te voorkomen (Figuur E.1). Dit gebeurt met behulp van een voortschrijdend gemiddelde (zwarte lijn) dat voor de tijdreeks (rode lijn) berekend wordt. Daarna worden in een subroutine de positieve nuldoorgangen bepaald. Elke golf wordt door een tijdsinterval gedefinieerd. De golf begint $0,1T_p$ voor de nuldoorgang en eindigt $0,1T_p$ voor de volgende nuldoorgang.



Figuur E.1 Voorbeeld van een gefiltered signaal van stijghoogten en definitie van begin en einde van golven

3. Bepalen van het maximale stijghoogteverschil per drukopnemerpaar voor iedere golf

Voor iedere golf zijn de maximale (lokale) stijghoogteverschillen per drukopnemerpaar bepaald en in een overschrijdingskromme getekend (zie Figuur A.11 t/m Figuur A.13). Op de x-as is de overschrijdingskans te zien (Rayleigh verdeeld), op de y-as het stijghoogteverschil. Uit de kromme kunnen karakteristieke waarden ($\phi_{w2\%}$, $\phi_{w0,5\%}$ etc.) worden afgelezen. De overschrijdingskrommen per drukopnemer worden verder geanalyseerd om meetfouten te identificeren. In sommige gevallen kan het gebeuren dat drukopnemers soms rare drukwaarden geven, tijdens de proef uitvallen of verlopen. Afhankelijk van het verloop van het tijdsignaal en de overschrijdingskromme zijn niet betrouwbare metingen eruit gehaald.

De volgende tabel geeft een overzicht over niet betrouwbare drukopnemerparen voor elke proef.

type	jaar	proef	niet betrouwbare drukopnemerparen
basalt	1984	21	1-7,3-9
basalt	1984	22	1-7,3-9
basalt	1984	23	1-7,3-9
basalt	2003	4a	16-31a,17-31b,22-33a,23-33b,24-34
basalt	2003	5	13-30a, 16-31a, 22-33a, 23-33b, 24-34
basalt	2003	6	13-30a, 16-31a, 22-33a, 23-33b, 24-34
basalt	2003	7a	13-30a, 16-31a, 22-33a, 23-33b, 24-34
basalt	2003	8a	13-30a,15-31
basalt	2003	16	15-31
basalt	2003	17	14-30b,15-31
basalt	2003	18	14-30b
Basalton	2003	21	13-30a,22-33a
Basalton	2003	22	19-32a,24-34
Basalton	2003	23	18-32, 19-32a, 22-33a, 23-33b, 24-34
Basalton	2003	24	20-32b, 22-33a, 23-33b, 24-34
Basalton	2003	25	23-33b, 24-34
Basalton	2003	26	23-33b, 24-34

Tabel E.1 Overzicht niet betrouwbare drukopnemerparen

In figuur E.9, E.10 en E.11 is het lokale stijghoogteverschil met 2%-overschrijdingspercentage van een aantal proeven getekend als functie van de locatie op het talud. In deze figuren valt als eerste op dat het stijghoogteverschil in een brede zone ongeveer constant is,

afgezien van enige spreiding. Verder valt op dat tijdens de proeven uit 1984 er slechts vier drukopnemer-paren waren, waardoor een vrij grof beeld verkregen wordt van het 2%-stijghoogteverschil. Gezien het feit dat het stijghoogteverschil weinig afhankelijk is van de locatie, zal de nauwkeurigheid hieronder weinig te lijden hebben.

4. Bepalen van het maximale stijghoogteverschil over alle betrouwbare drukopnemers voor iedere golf

In het vervolg van de analyse wordt niet meer gekeken naar de overschrijdingspercentages van de afzonderlijke drukopnemerparen (lokale stijghoogteverschil), maar wordt per golf van alle drukopnemerparen het grootste stijghoogteverschil beschouwd. Vervolgens kan een overschrijdingskromme gemaakt worden van al deze maxima. Dit levert een stijghoogteverschil op met een bepaald overschrijdingspercentage ongeacht de locatie waar het is opgetreden. Dit wordt het integrale stijghoogteverschil genoemd. Als in dit verslag het niet gespecificeerd is, wordt met het stijghoogteverschil meestal de integrale waarde bedoeld.

In de analyse procedure zijn voor iedere golf de stijghoogteverschillen over alle drukopnemers vergeleken. Het maximale stijghoogteverschil en de locatie van het optreden (drukopnemerpaar) zijn opgeslagen (Tabel E.2).

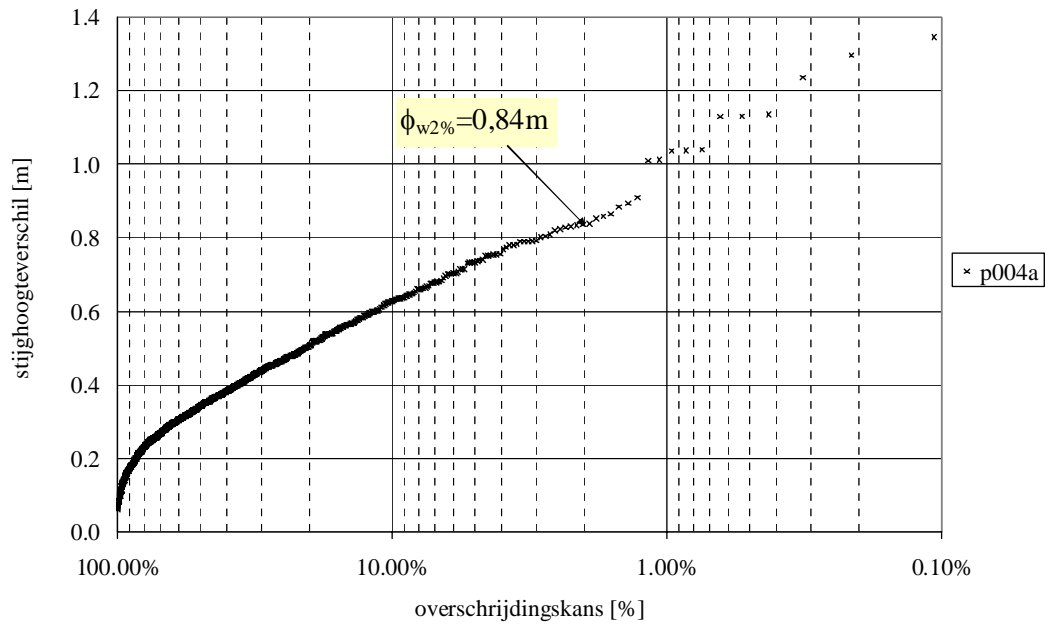
De volgende parameters zijn in een matrix opgeslaan:

- Golfnummer (voor identificatie),
- Drukopnemerpaar waar maximale stijghoogteverschil optreedt,
- Begintijd van de golf,
- Eindtijd van de golf,
- Tijdstip van het maximale stijghoogteverschil "TMaxSTV (s)",
- Maximaal stijghoogteverschil "MaxSTV [m]".

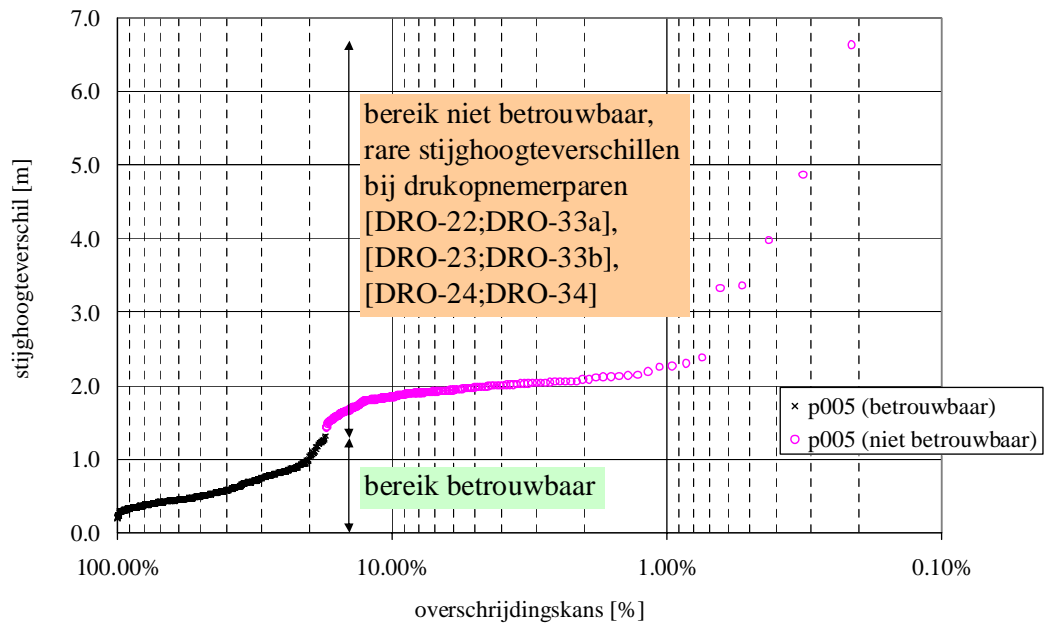
%Golf nr.	DroPaarNummer	Begintijd (s)	Eindtijd (s)	TMaxSTV (s)	MaxSTV (m)
1	22	0.220	4.835	2.575	0.363
2	8	4.835	8.405	5.935	0.488
3	19	8.405	13.120	11.290	0.205
4	7	13.120	18.170	18.170	0.071
5	12	18.170	22.970	19.110	0.813
6	2	22.970	27.790	23.720	0.881
7	20	27.790	31.630	29.880	0.368
8	21	31.630	35.320	33.870	0.264

Tabel E.2 Voorbeeld resultaten in ASCII-file maximaal stijghoogteverschil per golf

Het identificeren van meetfouten is mogelijk omdat de orde van grootte van de stijghoogteverschillen (afhankelijk van de situatie) bekend is. De overschrijdingskromme moet een bepaalde vorm hebben (grotendeels lineair op gepresenteerde log-schaal van de x-as). Bovendien moet het tijdsignaal om 0,0 m stijghoogteverschil variëren. Uit Figuur E.2 en Figuur E.3 wordt duidelijk waar stijghoogteverschillen niet betrouwbaar zijn en welk corresponderende drukopnemerpaar weggelaten moet worden.



Figuur E.2 Overschrijdingskans stijghoogteverschil bij proef p004a (voorbeeld betrouwbare resultaten)



Figuur E.3 Overschrijdingskans stijghoogteverschil bij proef p005 (voorbeeld voor betrouwbare en niet betrouwbare resultaten)

5. Bepalen van extreme stijghoogteverschillen ($\phi_{w13\%}, \phi_{w5\%}, \phi_{w2\%}, \phi_{w0,5\%}$)

Uitgangspunt voor het bepalen van het integrale stijghoogteverschil met een bepaalde overschrijdingsfrequentie is het aantal golven per test. Deze bedraagt bijvoorbeeld $N \approx 940$. In dit geval wordt de 0,5% waarde door ongeveer $n = 4$ golven overschreden. Daarom wordt vereenvoudigend aangenomen dat de $\phi_{w0,5\%}$ waarde gelijk aan het 4 na grootste berekende stijghoogteverschil is. Om de nauwkeurigheid van deze aanpak in te schatten zijn de

waarden ook bepaald op basis van een curve-fitting met een Weibull-verdeling door de punten. Het bleek dat de afwijking bij de $\phi_{w2\%}$ waarde minder dan 1% en bij de $\phi_{w0,5\%}$ waarde minder dan 5% was.

De resultaten zijn in hoofdstuk 3 van deze bijlage gepresenteerd.

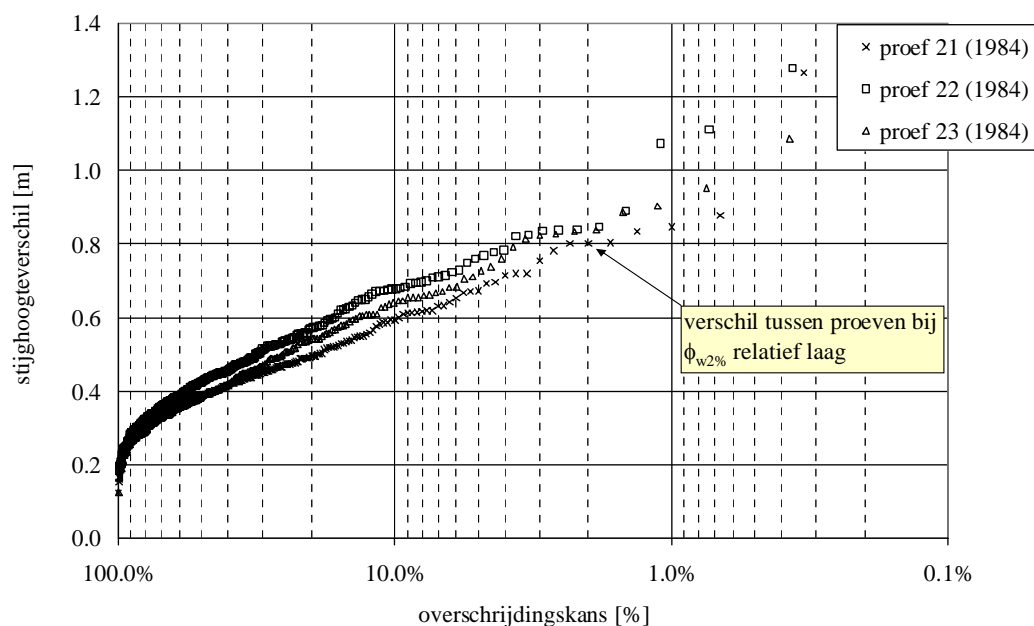
percentage	overschreden door n golven
13	122
5	47
2	18
0,5	4

Tabel E.3 Bepalen van extreme integrale stijghoogteverschillen (selectie golven)

3 Analyse extreme stijghoogteverschillen

3.1 Vaststellen van overschrijdingswaarden van stijghoogteverschillen

De resultaten voor de berekende extreme stijghoogteverschillen zijn in Tabel E.4 weergegeven. De verdere analyse is gebaseerd op de $\phi_{w2\%}$ -waarde omdat deze waarde in het algemeen als meest representatief beschouwd wordt voor de belasting van een constructie.



Figuur E.4 Overschrijdingskromme voor integrale stijghoogteverschillen (proeven uit 1984 met basalt)

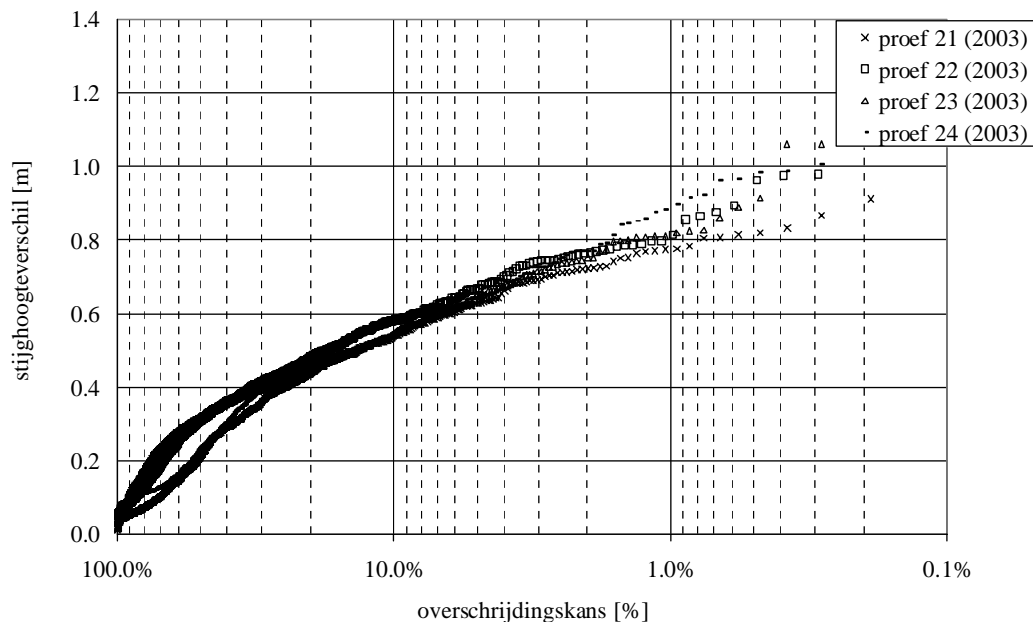
De stijghoogteverschillen zijn relatief groot t.o.v. het eigen gewicht van de bekleding:

- Basalt (1984): $\Delta D = 0,60$ m
- basalt (2003): $\Delta D = 0,40$ m
- Basalton (2003): $\Delta D = 0,37$ m

proef (type, jaar, nummer)			H_s [m]	ξ_{op} [-]	$\phi_{w13\%}$ [m]	$\phi_{w5\%}$ [m]	$\phi_{w2\%}$ [m]	$\phi_{w0,5\%}$ [m]	ANAMOS ϕ_w [m]
basalt	1984	21	1,55	1,47	0,55	0,67	0,80	0,86	0,43
basalt	1984	22	1,75	1,56	0,65	0,75	0,84	1,10	0,43
basalt	1984	23	1,85	1,61	0,61	0,71	0,83	0,94	0,45
basalt	2003	4a	1,20	1,82	0,58	0,73	0,83	1,13	0,36
basalt	2003	5	1,40	1,81	0,59	0,75	0,89	1,12	0,49
basalt	2003	6	1,54	1,87	0,59	0,76	0,89	1,06	0,50
basalt	2003	7a	1,10	2,52	0,52	0,61	0,59	0,76	0,46
basalt	2003	8a	1,20	2,51	0,44	0,56	0,66	0,83	0,48
basalt	2003	16	1,46	1,54	0,67	0,80	0,94	1,09	0,44
basalt	2003	17	1,60	1,53	0,72	0,85	0,99	1,26	0,47
basalt	2003	18	1,74	1,58	0,75	0,92	1,07	1,34	0,50
Basalton	2003	21	1,07	2,51	0,51	0,63	0,72	0,81	0,44
Basalton	2003	22	1,18	2,47	0,55	0,67	0,76	0,89	0,47
Basalton	2003	23	1,28	2,47	0,51	0,65	0,75	0,88	0,50
Basalton	2003	24	1,37	2,46	0,51	0,64	0,77	0,96	0,48
Basalton	2003	25	1,41	1,85	0,73	0,87	1,00	1,16	0,46
Basalton	2003	26	1,57	1,91	0,74	0,90	0,98	1,11	0,50

Tabel E.4 Gemeten extreme integrale stijghoogteverschillen (berekend voor alle drukopnemer) (door de beperkte nauwkeurigheid kunnen de werkelijke waarden uit 1984 20 à 30% hoger liggen)

De stijghoogteverschillen van de proeven uit 1984 (basalt) en 2003 (Basalton en basalt) hebben dezelfde orde van grootte. De proeven waar schade opgetreden is (1984: 22 en 23; 2003: proef 6, proef 8a) laten geen afwijkende extreme stijghoogteverschillen zien. Juist omgekeerd: Het uitlichten van een blok is bij een kleine belasting opgetreden (proef 8a: $\phi_{w2\%} = 0,66$ m). Bij de proeven met basalt (1984) was het stijghoogteverschil $\phi_{w2\%}$ voor elke van de drie proeven ongeveer hetzelfde, hoewel de golfbelasting (H_s) verschillend was. Dit is meer of minder toeval omdat de overschrijdingskrommen in het algemeen duidelijk verschillen en slechts bij $\phi_{w2\%}$ bijna dezelfde waarden laten zien (Figuur E.4). Opvallend is dat de stijghoogteverschillen bij proef 23 lager zijn dan bij proef 22 hoewel de golfbelasting bij proef 23 groter was. Een reden ervoor kan zijn dat bij proef 23 grotere stijghoogten opgetreden zijn maar bij drukopnemers die niet betrouwbaar zijn en eruit gehaald zijn.



Figuur E.5 Overschrijdingskromme voor integrale stijghoogteverschillen (proeven uit 2003 met Basalton)

Maar ook voor de proeven 21 t/m 24 (Basalton 2003) neemt het stijghoogteverschil $\phi_{w2\%}$ nauwelijks toe, terwijl de golfhoogte met bijna 30% toeneemt.

Tenslotte is in tabel E.4 te zien dat ANAMOS een sterke onderschatting geeft van het stijghoogteverschil.

Nauwkeurigheid

De resultaten hebben een beperkte nauwkeurigheid omdat de stijghoogtes met een beperkte nauwkeurigheid, beperkt aantal drukopnemers (ruimtelijke resolutie) en beperkte bemonsteringsfrequentie zijn gemeten. Deze beperkingen leiden tot fouten die doorwerken in de resulterende stijghoogteverschillen. Onderstaand worden 3 aspecten van de beperkte nauwkeurigheid nader belicht:

1. Nauwkeurigheid van de instrumenten:

Zoals weergegeven in bijlage D is de totale fout bij elk instrument verschillend en niet constant in de tijd, noch bij elke druk gelijk. Geschat wordt dat de fout kleiner is dan orde 5 mm waterkolom. Erg kleine stijghoogteverschillen over de toplaag moeten daarom gewantrouwd worden, maar hier worden stijghoogteverschillen geanalyseerd van 0,5 à 1,2 m. Deze fout blijft daardoor beperkt tot orde 1%.

2. Ruimtelijke resolutie:

Een golfklap geeft lokaal een hoge stijghoogte op de toplaag. Om die nauwkeurig te kunnen meten is door Klein Breteler en Coeveld (2004) vastgesteld dat de drukopnemers op de toplaag maximaal $0,13H_s$ uit elkaar mogen zitten. Verder hebben zij geconcludeerd dat een fout van 10% in het 2%-stijghoogteverschil (gediptheid) ontstaat als de drukopnemers $0,35H_s$ uit elkaar zitten en 20% als ze $0,6$ à $0,7H_s$ uit elkaar zitten. Tijdens het onderzoek uit 2003 zaten de drukopnemers op de toplaag

ongeveer 14 cm uit elkaar, hetgeen neerkomt op ca $0,11H_s$. Tijdens het onderzoek uit 1984 was de onderlinge afstand echter maar liefst 1,0 à 1,2 m en dat is $0,6$ à $0,7H_s$. Op grond hiervan wordt geconcludeerd dat de 2%-stijghoogteverschillen, die gemeten zijn in het onderzoek uit 1984, orde 20% lager zijn dan ze in werkelijkheid waren.

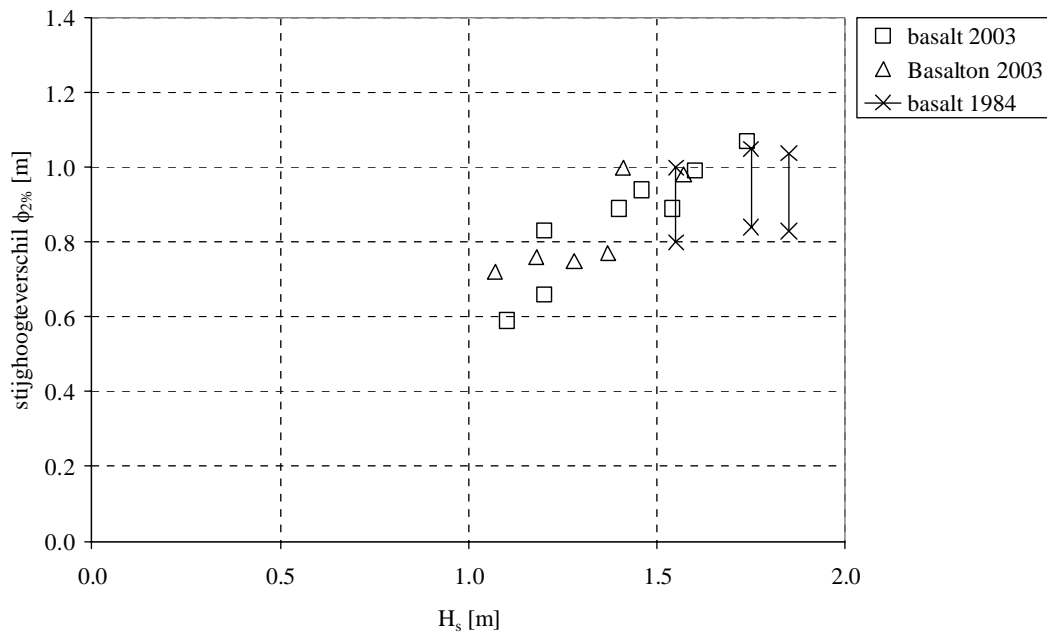
3. Beperkte bemonsteringsfrequentie:

Door Klein Breteler en Coeveld (2004) is vastgesteld dat golfklappen en de daarbij optredende stijghoogteverschillen flink onderschat kunnen worden als de bemonsteringsfrequentie te laag is. Zij stellen vast dat de bemonsteringsfrequentie tenminste 40 Hz moet zijn. In 2003 was dit 200 Hz en in 1984 was het 25 Hz. Op basis van de resultaten van Klein Breteler en Coeveld (2004) kan geconcludeerd worden dat het 2%-stijghoogteverschil, dat gemeten is in 1984, door de beperkte bemonsteringsfrequentie orde 10% lager is dan werkelijk is opgetreden.

Als deze bronnen van fouten worden opgeteld, resulteert dit in een vrij kleine fout in het 2%-stijghoogteverschil in de proeven uit 2003 (< 10%), maar een grote onderschatting van het 2%-stijghoogteverschil tijdens de proeven van 1984. Deze onderschatting bedraagt maar liefst 20 à 30%.

3.2 Relatie stijghoogteverschillen tot golfparameters

In Figuur E.6 en Figuur E.7 zijn de stijghoogteverschillen $\phi_{w2\%}$ uitgezet tegen de significante golfhoogte H_s en de golfsteilheid $s_{op}=H_s/L_{op}$. 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.



Figuur E.6 Verband tussen significante golfhoogte en stijghoogteverschil $\phi_{w2\%}$

Opvallend is dat een grotere golfhoogte niet altijd tot een groter stijghoogteverschil leidt.

Dit blijkt uit de resultaten van de proeven uit 1984 (proeven 22 en 23) en ook proeven uit 2003 (5 en 6; 22, 23 en 24). De proeven zijn steeds in series uitgevoerd met een vaste golfsteilheid en een stap voor stap toenemende golfhoogte. Het is denkbaar dat de vulling van de spleten tijdens de proeven wat uitgespoeld is, waardoor de lek lengte iets afnam en $\phi_{w2\%}$ relatief iets afnam. In Eysink & Klein Breteler (2003) is echter gerapporteerd dat de vulling van de spleten tijdens de proeven niet of nauwelijks uitgespoeld is.

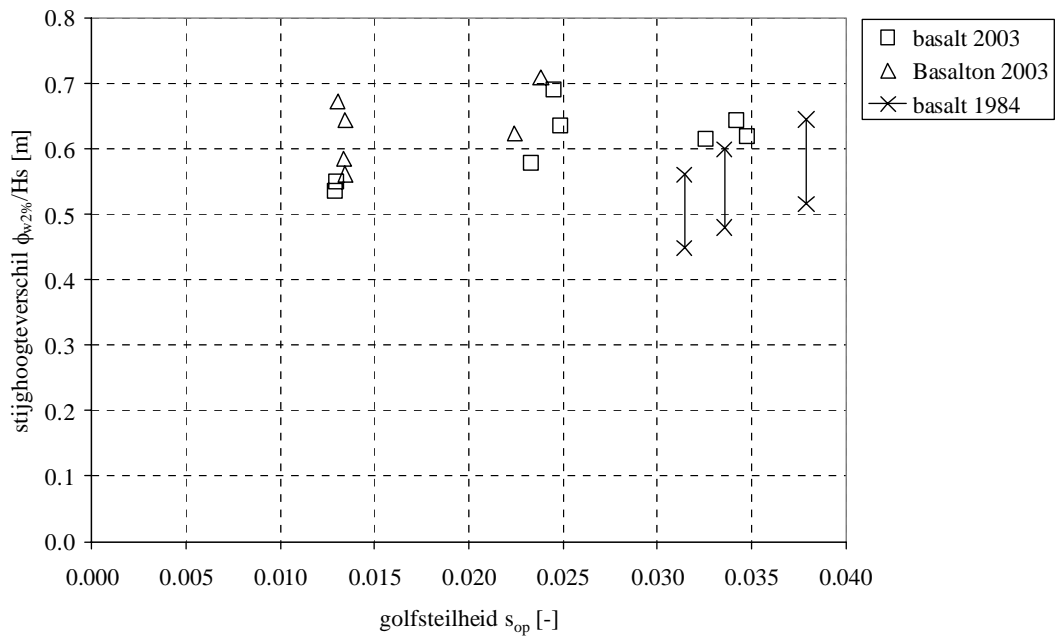
Desondanks zijn de metingen in Figuur E.7 dimensieloos uitgezet met $\phi_{w2\%}/H_s$ op de verticale as. Op de horizontale as is de golfsteilheid weergegeven omdat de huidige rekenmodellen, zoals ANAMOS, een duidelijke afhankelijkheid van de golfsteilheid laten zien, waarbij bij een toename van de golfsteilheid het stijghoogteverschil afneemt. ANAMOS is echter meer geschikt voor relatief dichte steenzettingen (grote lek lengte) dan de thans onderzochte relatief open steenzettingen. De vergelijking met de rekenmodellen komt later in deze paragraaf ter sprake.

Uit deze Figuur E.7 blijkt dat de golfsteilheid slechts een beperkte invloed heeft en het gemeten dimensieloze stijghoogteverschil tijdens de proeven met basalt uit 1984 gemiddeld $\phi_{w2\%}/H_s = 0,48$ was, en tijdens het onderzoek van 2003 voor basalt $\phi_{w2\%}/H_s = 0,62$ en Basalton $\phi_{w2\%}/H_s = 0,63$. Het werkelijke stijghoogteverschil was tijdens de proeven uit 1984 echter waarschijnlijk beduidend hoger (zie analyse van nauwkeurigheid in vorige paragraaf): $\phi_{w2\%}/H_s = 0,5$ à $0,6$.

Verder blijken de stijghoogteverschillen tijdens de proeven met basalt uit 1984 wat kleiner te zijn dan die uit 2003, zelfs als rekening gehouden wordt met een onderschatting van 25%. Dit is vooral opmerkelijk, omdat in bijlage D was vastgesteld dat de lek lengte van deze constructie juist wat groter is, en op grond daarvan juist wat grotere stijghoogteverschillen te verwachten waren.

In figuur E.9 is weliswaar te zien dat het 2%-stijghoogteverschil nauwelijks afhankelijk is van de locatie op het talud, waardoor een gering aantal opnemerpalen weinig invloed lijkt te hebben, maar bij het bepalen van de integrale 2%-waarde (gebaseerd op de grootste stijghoogteverschil per golf, onafhankelijk waar die is opgetreden) kan het aantal toch van invloed zijn. Als er namelijk weinig drukopnemerpalen aanwezig zijn, is de kans relatief groot dat het maximale stijghoogteverschil in een golf door de metingen onderschat wordt. Dan zal ook de 2%-waarde onderschat worden. Bij het bepalen van de 2%-waarden in figuur E.9 is echter uitgegaan van de locaties waar drukopnemerpalen aanwezig zijn. Er zijn dan altijd wel golven die ter plaatse van het betreffende drukopnemerpaar een groot stijghoogteverschil hebben gegeven. Daardoor zal in deze figuur de invloed van de onderlinge afstand van de drukopnemerpalen nauwelijks aanwezig zijn, terwijl voor een integrale 2%-waarde dit wel een belangrijk invloed heeft.

De gemeten stijghoogteverschillen bij basalt 2003 en Basalton 2003 verschillen ongeveer 5 à 10%, zie Figuur E.7. Dit is volledig verklaarbaar met het verschil in gemeten lek lengte, namelijk respectievelijk 0,44 en 0,54 m. Door dit verschil in lek lengte zal er volgens ANAMOS inderdaad een verschil in stijghoogteverschil van ongeveer 5 à 10% zijn.



Figuur E.7 Verband tussen golfsteilheid en stijghoogteverschil $\phi_{w,2\%}$

Vergelijking met empirische formules voor $\phi_{w,2\%}$

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:

als $H_s \cdot T_p > 6 \text{ ms}$

$$\frac{\phi_{w,2\%}}{H_s} = 3,3 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{c_w^{3/2} \cdot \left(0,7 + \frac{4 \cdot k}{\sqrt{g \cdot D}} \right)}{g \cdot \sqrt{H_s \cdot T_p}} \quad (4.2)$$

als $H_s \cdot T_p \leq 6 \text{ ms}$

$$\frac{\phi_{w,2\%}}{H_s} = 0,8 \cdot \left(0,7 + \frac{4 \cdot k}{\sqrt{g \cdot D}} \right) \quad (4.3)$$

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

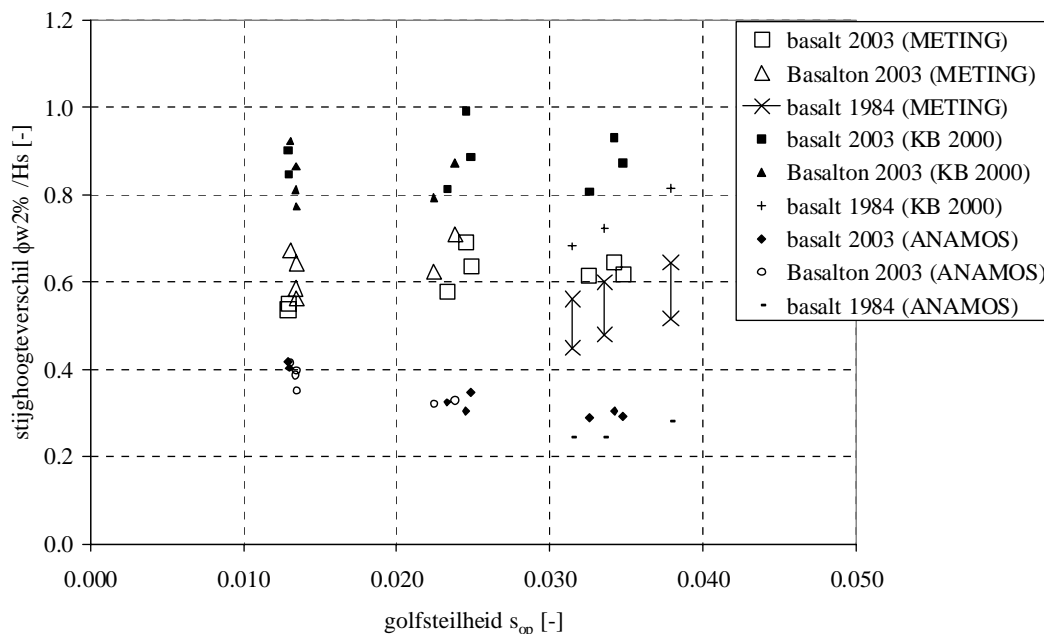
b = filterdikte [m]

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 eerdere constatering dat het stijghoogteverschil maar weinig afhankelijk is van de golfhoogte, komt dus overeen met deze formules.

In Figuur E.8 zijn de gemeten en de berekende stijghoogteverschillen weergegeven.

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 ingeschatte doorlatendheid van het filter.



Figuur E.8 Vergelijking tussen gemeten en berekende stijghoogteverschillen tov. de golfsteilheid

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).

3.3 Relatie stijghoogteverschillen tot de sterkte van de bekleding

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 ($\Delta \cdot D$):

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

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 E.5). 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} [-]	φ _{w2%} [m]	φ _{w2%} /(ΔD) [-]	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 E.5 Beoordeling sterkte van de bekleding bij begin van schade

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 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 E.5 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 bijlage F 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 Samenvatting

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 E.7 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. Het werkelijke stijghoogteverschil was tijdens de proeven uit 1984 echter 25% à 30% hoger (zie analyse van nauwkeurigheid in 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 hier aan bijgedragen heeft.

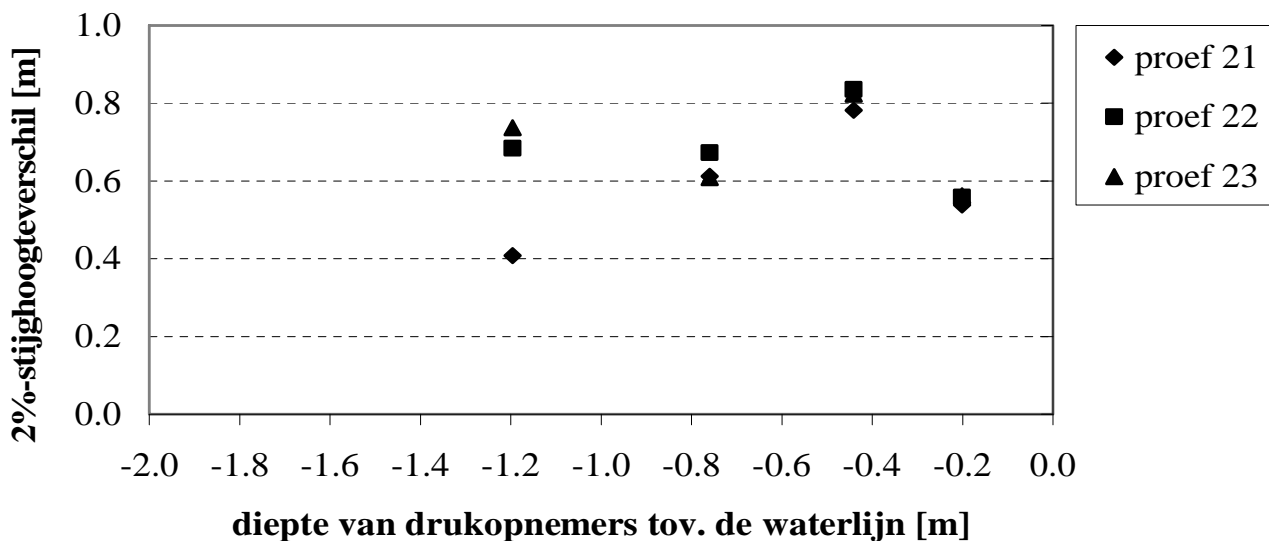
De gemeten stijghoogteverschillen bij basalt 2003 en Basalton 2003 zijn ongeveer gelijk, terwijl er toch een verschil in gemeten lek lengte is, namelijk respectievelijk 0,44 en 0,54 m. Dit verschil is echter zo klein, dat dit bij deze metingen inderdaad tot de geconstateerde kleine verschillen leidt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

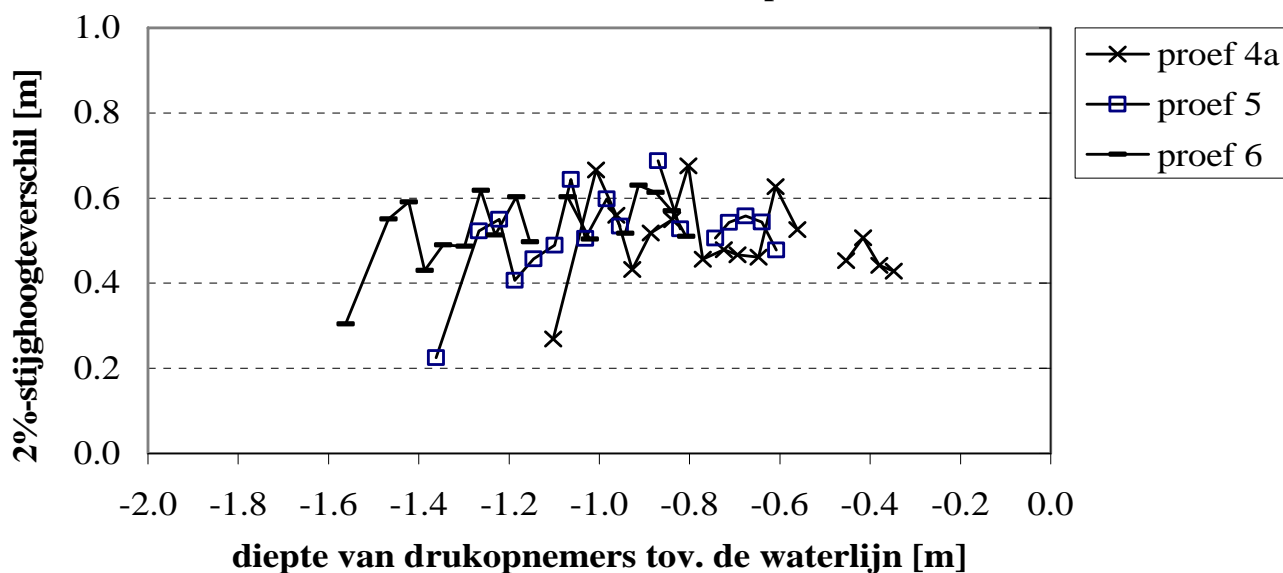
Het feit dat het stijghoogteverschil in de metingen slechts weinig toeneemt met toenemende golfhoogte is wel in goede overeenstemming met de formules uit Klein Breteler (2000).

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.

basaltproeven uit 1984 met $\xi_{op} = 1,47 - 1,61$



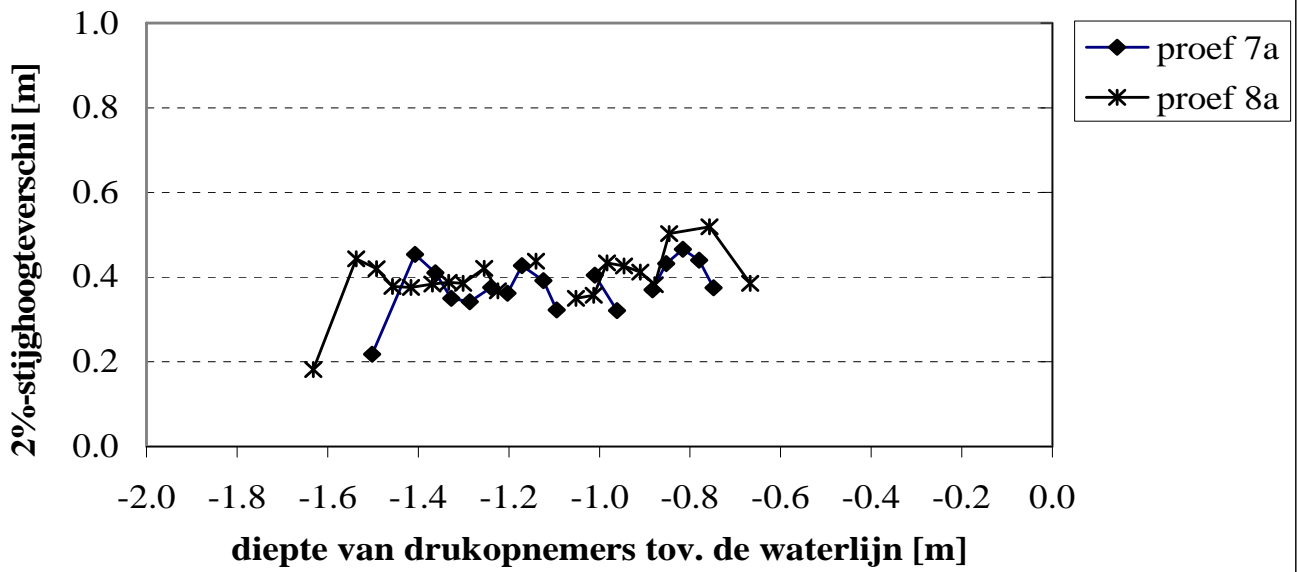
basaltproeven uit 2003 met $\xi_{op} = 1,81 - 1,87$



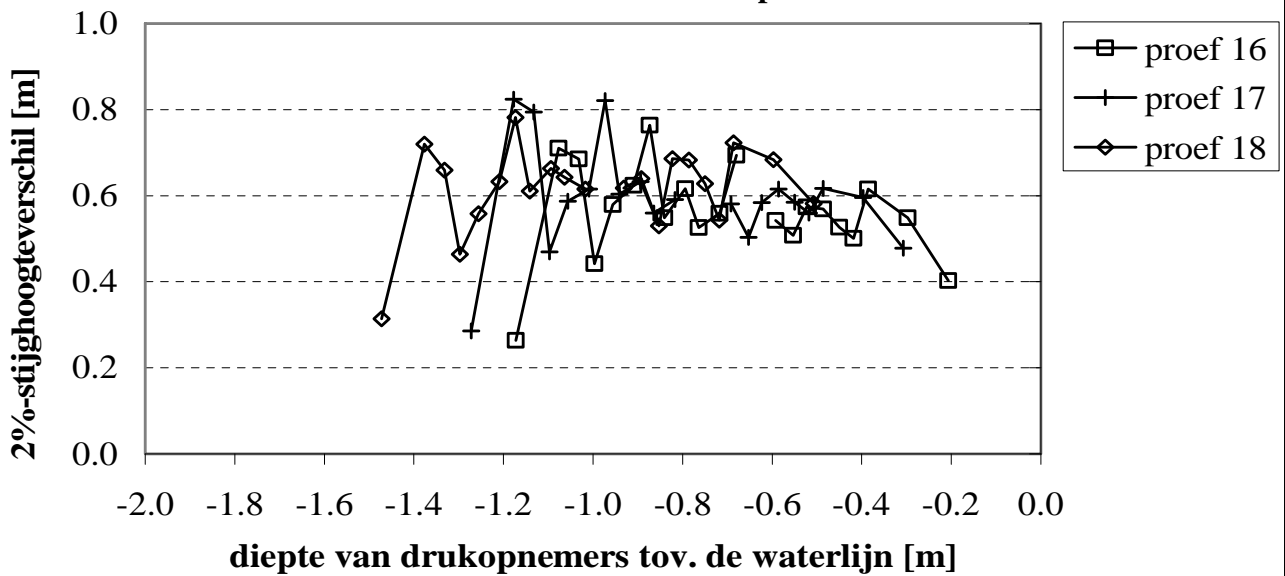
2%-stijghoogteverschillen tov. de locatie

proeven met basalt uit 1984 (boven), proeven met basalt uit 2003 (beneden)

basaltproeven uit 2003 met $\xi_{op} = 2,51 - 2,52$



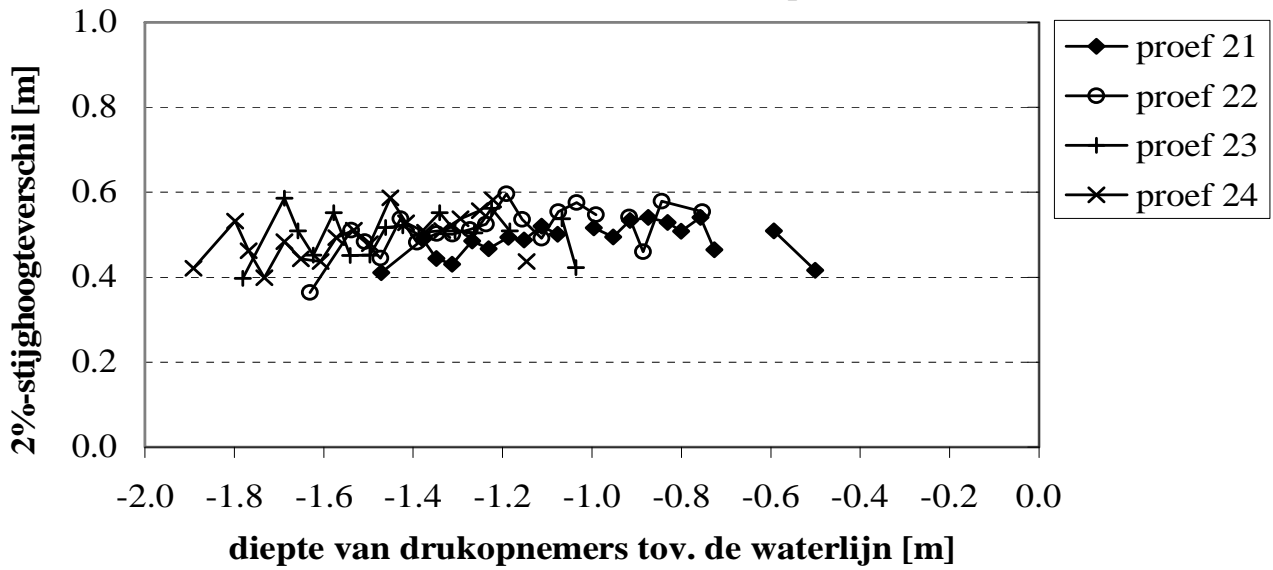
basaltproeven uit 2003 met $\xi_{op} = 1,53 - 1,58$



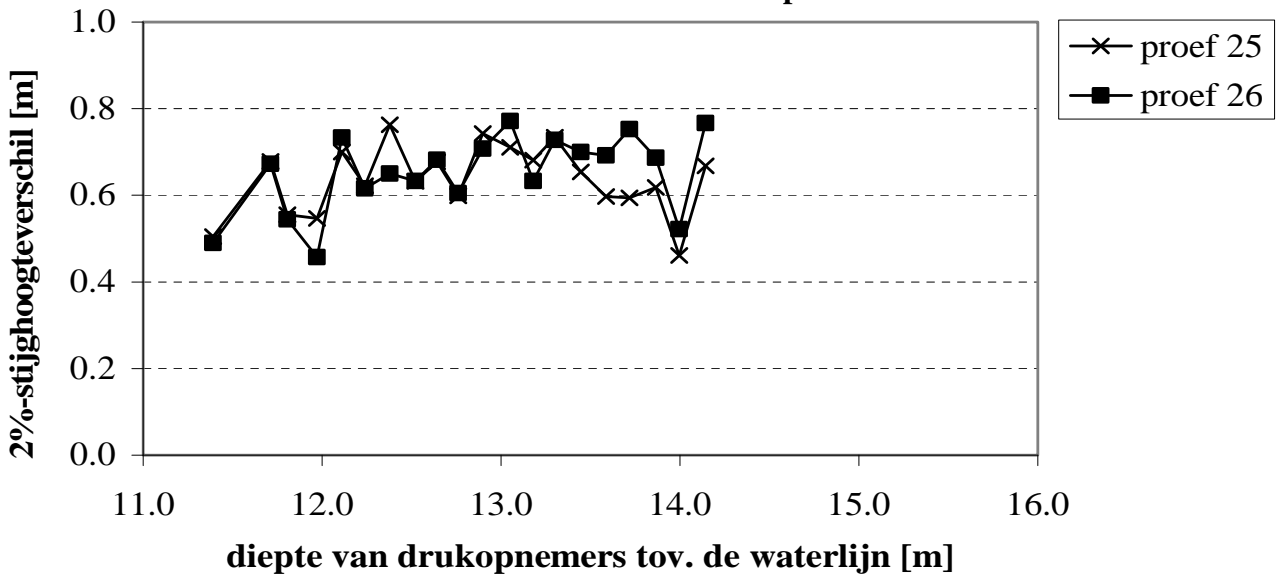
2%-stijgheverschillen tov. de locatie

proeven met basalt uit 2003

Basaltonproeven uit 2003 met $\xi_{op} = 2,46 - 2,51$



Basaltonproeven uit 2003 met $\xi_{op} = 1,85 - 1,91$



2%-stijgheightverschillen tov. de locatie

proeven met Basalton uit 2003

Bijlage F:

Klemming

Inhoud van Bijlage F

Lijst van Figuren

Lijst van Tabellen

1	Methodiek	1
2	Berekening van de klemming	2
3	Conclusie.....	7

Lijst van Figuren

Figuur F.1 Verband tussen het stijghoogteverschil $\phi_{w2\%}$ en de tijdsduur overbelaste situatie $t_{\phi>75\%}$ (het stijghoogteverschil uit de proeven van basalt 1984 is nog niet gecorrigeerd t.a.v. de aangetoonde onderschatting)

Figuur F.2 Relaties tussen brekerparameter en tijdsduur overbelasting

Lijst van Tabellen

Tabel F.1 Tijdsduur hoge belasting op de constructies

Tabel F.2 Berekende waarden van ϕ_{traag} en ϕ_{toe} bij een beweging van 0,1D

Tabel F.3 Berekende waarden van ϕ_{traag} en ϕ_{toe} bij een beweging van 0,25D

I Methodiek

De sterkte van een steenzetting wordt bepaald door het eigen gewicht van de stenen (ΔD) en de mate van interactie tussen de stenen. Dit laatste wordt de klemming genoemd. Het eigen gewicht, de klemming en de belasting (stijghoogteverschil, zie Bijlage E) bepalen samen de stabiliteit van de steenzetting. In deze bijlage wordt de grootte van de klemming bepaald op basis van de metingen.

Het bezwijken van een steenzetting vindt plaats als het stijghoogteverschil over een bepaalde tijdsduur groter is dan het eigen gewicht, aangevuld met invloedsfactoren en rekeninghoudend met de verhinderde toestroming naar een bewegende steen. De invloedsfactoren zijn:

1. De wrijving of klemkrachten van de steen;
2. De traagheid van de bewegende steen;
3. De verhinderde toestroming naar de bewegende steen.

De verhinderde toestroming naar een bewegende zuil heeft te maken met het feit dat onder de bewegende zuil de groeiende ruimte gevuld moet worden met water. Er stroomt als het ware water uit het filter achter de bewegende zuil aan. Het gevolg van deze stroming is een stijghoogteverval en dus een reductie van het stijghoogteverschil over de bewegende zuil. Dit proces is gelijk aan het vastgezogen schijnen te zijn van een steen aan de ondergrond. Men kan zich voorstellen dat een zuil onder water gemakkelijker uit de zetting is te lichten als men er langzaam aan trekt. Als men de zuil er heel snel uit wil trekken, schijnt het vastgezogen te zitten aan de ondergrond.

Als een zuil tijdens een groot stijghoogteverschil over de toplaag omhoog beweegt, dan is er evenwicht tussen de volgende krachten:

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

Voor dit krachtenevenwicht geldt (Klein Breteler 2000):

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

$$\phi_{traag} = 1,78 \cdot \frac{\varepsilon \cdot D^2 \cdot (\Delta + 2)}{g \cdot t_0^2} \quad (5.2)$$

$$\phi_{toe} = \frac{(\varepsilon \cdot D)^2 \cdot \sqrt{B \cdot L}}{1,5 \cdot \pi \cdot k' \cdot \Lambda \cdot t_0} \cdot \left(0,56 + 0,18 \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{B \cdot L}}{\Lambda} \right) \right) \quad (5.3)$$

met:

- εD = maximale blokbeweging, bijvoorbeeld 10% van de toplaagdikte (m)
- Λ = relatieve volumieke massa van de steen (-)
- t_0 = duur van de overbelaste situatie, dus de tijdsduur dat het stijghoogteverschil groter is dan het eigen gewicht plus wrijving en klemming (s)
- ϕ_{traag} = stijghoogteverschil dat overeenkomt met de invloed van de traagheid van een bewegend blok (-)
- BL = oppervlak van steen (m)
- ϕ_w = stijghoogteverschil over de toplaag (zonder blokbeweging) (m)
- Γ_{klem} = invloed van de klemkracht (-)
- ϕ_{toe} = stijghoogteverschil dat overeenkomt met de invloed van de toestroming naar een bewegende zuil (-)

Het stijghoogteverschil over de toplaag is gemeten ter plaatse van zuilen die niet of nauwelijks bewogen hebben. Deze geïnstrumenteerde zuilen waren versterkt door middel van stalen strips. De beweging van deze zuilen (en de naast liggen de zuilen) moest verhinderd worden omdat bewegingen het stijghoogteverschil beïnvloeden, en zeer grote bewegingen ook schade aan de drukopnemers kunnen geven.

De stijghoogteverschillen ϕ_{traag} en ϕ_{toe} kunnen gekwantificeerd worden met bovenstaande 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.

De waarde van Γ_{klem} is niet bekend, maar kan bepaald worden uit bovenstaand krachten-evenwicht. Het is immers de enige onbekende in formule (5.1):

$$\Gamma_{klem} = \frac{\phi_{w2\%} - \phi_{traag} - \phi_{toe}}{\Delta \cdot D \cdot \cos \alpha} \quad (5.4)$$

2 Berekening van de klemming

Op basis van de eigenschappen van de steenzetting, het gemeten stijghoogteverschil bij begin van schade, en bovenstaande formules, kan een schatting gemaakt worden van de klemming. In feite wordt er daarbij van uitgegaan dat de klemming de enige overgebleven onbekende factor is, hoewel het denkbaar is dat er ook nog andere processen meespelen. Vermoedelijk is echter de klemming de belangrijkste.

De eerste stap in het kwantificeren van klemming is het bepalen van het eigen gewicht van de toplaag:

- Basalt 1984: $\Delta D \cos \alpha = 0,576$ m
- Basalt 2003: $\Delta D \cos \alpha = 0,376$ m

- Basalton 2003: $\Delta D \cos \alpha = 0,351$ m.

Er wordt uitgegaan van de veronderstelling dat de belasting gekarakteriseerd kan worden met $\phi_{w2\%}$. Aan de hand van de proefresultaten is in Bijlage E de relatie gelegd tussen deze belasting en het ontstaan van schade:

- Basalt 1984: Schade bij $\phi_{w2\%} = 1,05$ m
- Basalt 2003:
 - Beginnende schade bij $\phi_{w2\%} = 0,89$ m
 - Geen schade bij $\phi_{w2\%} = 1,07$ m
- Basalton 2003: Geen schade bij $\phi_{w2\%} = 1,00$ m

proef			$t_{\phi > 50\%}$ [s]				$t_{\phi > 75\%}$ [s]			
type	jaar	nr.	μ	σ	min	max	μ	σ	min	max
basalt	1984	21	0,37	0,17	0,20	0,60	0,24	0,11	0,12	0,44
basalt	1984	22	0,44	0,16	0,28	0,68	0,26	0,13	0,12	0,52
basalt	1984	23	0,33	0,17	0,20	0,56	0,21	0,12	0,12	0,44
basalt	2003	4a	0,30	0,10	0,17	0,57	0,17	0,05	0,12	0,35
basalt	2003	5	0,29	0,11	0,18	0,58	0,16	0,05	0,11	0,29
basalt	2003	6	0,34	0,18	0,11	0,78	0,18	0,07	0,08	0,40
basalt	2003	7a	0,23	0,09	0,14	0,49	0,13	0,02	0,10	0,16
basalt	2003	8a	0,22	0,06	0,15	0,39	0,14	0,02	0,10	0,18
basalt	2003	16	0,37	0,11	0,22	0,58	0,20	0,05	0,15	0,31
basalt	2003	17	0,36	0,16	0,21	0,78	0,21	0,09	0,13	0,50
basalt	2003	18	0,37	0,19	0,17	0,97	0,22	0,06	0,12	0,32
Basalton	2003	21	0,31	0,14	0,17	0,68	0,16	0,05	0,10	0,32
Basalton	2003	22	0,28	0,11	0,13	0,51	0,16	0,07	0,09	0,41
Basalton	2003	23	0,24	0,09	0,14	0,52	0,14	0,05	0,09	0,33
Basalton	2003	24	0,30	0,17	0,15	0,75	0,18	0,09	0,09	0,48
Basalton	2003	25	0,34	0,18	0,16	0,78	0,19	0,07	0,11	0,33
Basalton	2003	26	0,34	0,13	0,20	0,58	0,19	0,07	0,11	0,35

Tabel F.1 Tijdsduur hoge belasting op de constructies

De waarde voor $\phi_{2\%}$ is vrij hoog ten opzichte van $\Delta D \cos \alpha$, waardoor de klemfactor aanzienlijk zal zijn.

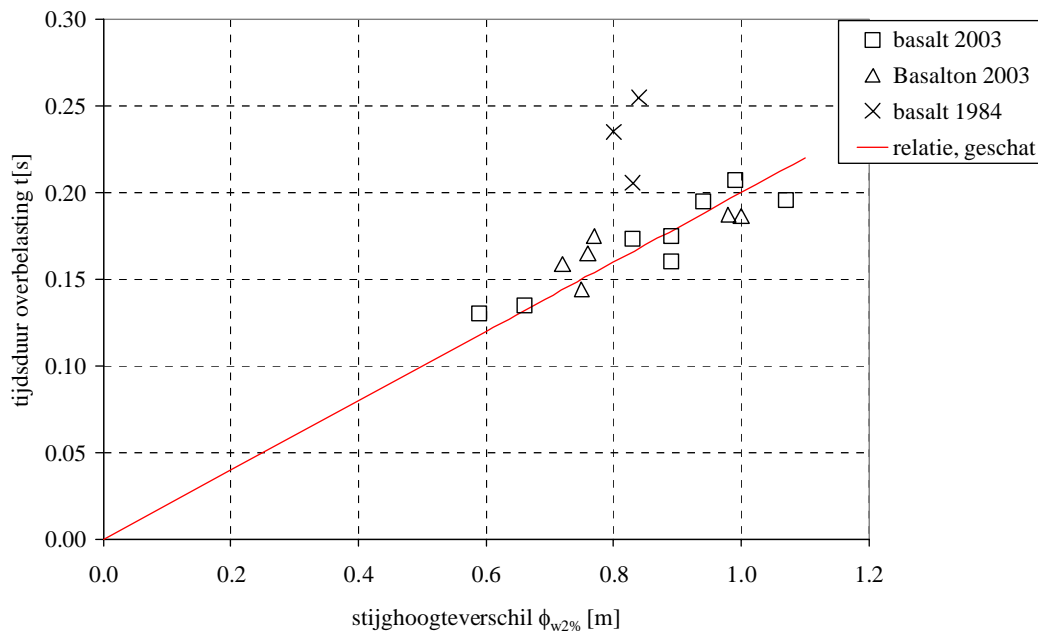
Hoewel de metingen tijdens de proeven op basalt in 1984 een veel kleiner stijghoogteverschil lieten zien (namelijk 0,84 m), is nu toch met een grotere waarde gewerkt. In de nauwkeurighedsanalyse in bijlage E kon immers worden aangetoond dat het gemeten stijghoogteverschil door de grote onderlinge afstand tussen de drukopnemers en de beperkte bemonsteringsfrequentie is onderschat met ca. 20 à 30%.

De grootte van ϕ_{traag} en ϕ_{toe} zijn te berekenen als we weten hoelang de overbelaste situatie aanhield. Het gaat om de tijdsduur in de maatgevende golf dat $\phi_w > \Gamma_{\text{klem}} \Delta D \cos \alpha$.

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.

Dit is niet voor alle golven gedaan, maar slechts de golven die een stijghoogteverschil gaven met overschrijdingsfrequentie tussen 1% en 3%. Tabel F.1 bevat de gemiddelde tijdsduur. Het is aangenomen dat de gemiddelde waarde (μ) ongeveer met de tijdsduur voor de $\phi_{w2\%}$ overeenkomt. De standaardafwijking σ is ook gegeven.

Het verband tussen het stijghoogteverschil $\phi_{w2\%}$ en de tijdsduur $t_{\phi > 75\%}$ is in Figuur F.1 weergegeven.

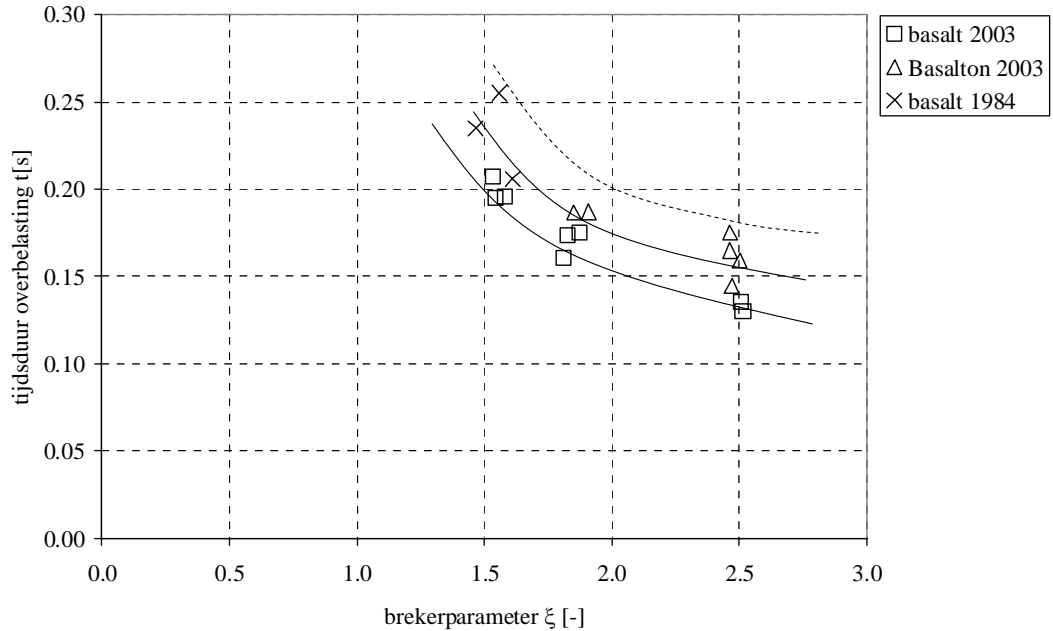


Figuur F.1 Verband tussen het stijghoogteverschil $\phi_{w2\%}$ en de tijdsduur overbelaste situatie $t_{\phi > 75\%}$ (het stijghoogteverschil uit de proeven van basalt 1984 is nog niet gecorrigeerd t.a.v. de aangetoonde onderschatting)

Relaties tussen de brekerparameter en de tijdsduur van de overbelasting $t_{75\%}$ zijn te zien in Figuur F.2 en Tabel F.1. In bijlage E is aangetoond dat het stijghoogteverschil in de metingen van basalt 1984 waarschijnlijk 20 à 30% zijn onderschat door de grote afstand tussen de drukopnemers. In figuur F.1 is te zien dat de meetpunten ook ten aanzien van de belastingduur beter komen te liggen als het stijghoogteverschil wat groter is (kruisjes komen verder naar rechts te liggen).

Er wordt gekozen om verdere berekeningen uit te voeren met de gemiddelde waarden van $t_{\phi > 50\%}$ en $t_{\phi > 75\%}$ tijdens de golfklappen, van de proeven rond begin van schade, of rond de proef met het grootste 2%-stijghoogteverschil:

- 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



Figuur F.2 Relaties tussen brekerparameter en tijdsduur overbelasting

Met formule (5.2) en (5.3) kan nu de waarde van ϕ_{traag} en ϕ_{toe} berekend worden. In onderstaande tabellen zijn enkele invoergrootheden en de resultaten vermeld. Er is gebruik gemaakt van de gemeten leklengte. De toplaagdoorlatendheid en filterdoorlatendheid zijn gecorrigeerd ten opzichte van de berekende waarde, zodat ze goed aansluiten bij de gemeten leklengte.

proef	Λ (m)	k' (m/s)	met $t_{\phi > 50\%}$		met $t_{\phi > 75\%}$	
			ϕ_{traag}	ϕ_{toe}	ϕ_{traag}	ϕ_{toe}
Basalt 1984	0,66	0,015	0,045	0,047	0,117	0,075
Basalt 2003	0,44	0,033	0,034	0,017	0,112	0,031
Basalt 2003	0,44	0,033	0,021	0,013	0,065	0,023
Basalton 2003	0,54	0,022	0,026	0,023	0,080	0,040

Tabel F.2 Berekende waarden van ϕ_{traag} en ϕ_{toe} bij een beweging van 0,1D

Gezien het feit dat er betrekkelijk weinig schade is opgetreden, worden de berekeningen verder uitgevoerd met de aanname dat de blokbeweging gelijk is aan 0,1D. Dit betreft de blokbeweging per golf van een vrij slecht geklemd blok (degene die schade heeft laten

zien), of een bovengrens van de beweging voor die proeven waarbij er geen schade is opgetreden.

proef	Λ (m)	k' (m/s)	met $t_{\phi} > 50\%$		met $t_{\phi} > 75\%$	
			ϕ_{traag}	ϕ_{toe}	ϕ_{traag}	ϕ_{toe}
Basalt 1984	0,66	0,015	0,113	0,117	0,292	0,188
Basalt 2003	0,44	0,033	0,085	0,043	0,281	0,077
Basalt 2003	0,44	0,033	0,053	0,034	0,163	0,059
Basalton 2003	0,54	0,022	0,065	0,057	0,199	0,099

Tabel F.3 Berekende waarden van ϕ_{traag} en ϕ_{toe} bij een beweging van 0,25D

Het is nu de vraag of gebruik moet worden gemaakt van $t_{\phi} > 50\%$ of $t_{\phi} > 75\%$. Deze keuze wordt bepaald door het volgende. De zuil kan gaan bewegen als het stijghoogteverschil groter wordt dan het eigen gewicht en de klemkracht: $\phi_w > \Gamma_{\text{klem}} \Delta D \cos \alpha$. Als op dat moment het stijghoogteverschil gelijk is aan de helft van de uiteindelijk piekwaarde van het stijghoogteverschil, dan moet $t_{\phi} > 50\%$ gebruikt worden. Is het gelijk aan driekwart van het maximum stijghoogteverschil, dan moet $t_{\phi} > 75\%$ gebruikt worden.

De methode om de waarde van Γ_{klem} te bepalen gaat als volgt:

- Kies een waarde voor Γ_{klem}
- Bereken de verhouding $\Gamma_{\text{klem}} \Delta D \cos \alpha / \phi_{2\% \text{-schade}}$
- Kies de grootte van t_o die hoort bij deze verhouding
- Bereken ϕ_{traag} en ϕ_{toe}
- Controleer of $\Gamma_{\text{klem}} \Delta D \cos \alpha \approx \phi_{2\% \text{-schade}} - \phi_{\text{traag}} - \phi_{\text{toe}}$
- Klopt dit niet, pas dan de gekozen waarde van Γ_{klem} aan en begin opnieuw

Als voorbeeld wordt de basalt uit 2003 (bij beginnende schade) beschouwd:

Stel $\Gamma_{\text{klem}} = 1,2$. Het stijghoogteverschil dat gelijk is aan eigen gewicht en klemkracht is dan $\phi_w = \Gamma_{\text{klem}} \Delta D \cos \alpha = 1,2 \cdot 0,376 = 0,45$ m. Er is vastgesteld dat er beginnende schade ontstaat tijdens proeven met een stijghoogteverschil $\phi_{2\% \text{-schade}} \approx 0,89$ m. De waarde van $\Gamma_{\text{klem}} \Delta D \cos \alpha$ is met de gegeven aanname ($\Gamma_{\text{klem}} = 1,2$) gelijk aan 0,45, en dat is 50% van $\phi_{2\% \text{-schade}} \approx 0,89$ m. Daarom moet gebruik gemaakt worden van $t_{\phi} > 50\% \approx 0,29$ s voor de bepaling van ϕ_{traag} en ϕ_{toe} . In bovenstaande tabellen is te zien dat bij een kleine beweging van 0,1D geldt: $\phi_{\text{traag}} + \phi_{\text{toe}} \approx 0,034 + 0,017 = 0,051$. Voor de controle komen we dus uit op $\phi_{2\% \text{-schade}} - \phi_{\text{traag}} - \phi_{\text{toe}} = 0,84$ en $\Gamma_{\text{klem}} \Delta D \cos \alpha = 0,45$ m, hetgeen niet gelijk is. Daarom kan geconcludeerd worden dat de begin-aanname, $\Gamma_{\text{klem}} = 1,2$, onjuist is. De waarde van Γ_{klem} is groter.

Op deze wijze kan iteratief de juiste waarde van Γ_{klem} gevonden worden:

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

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

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 $1,2$.

3 Conclusie

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. De klemming was ongeveer zo klein als plat gezette rechthoekige blokken (Klein Breteler 2000).

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 ($\Gamma_{klem} = 1,7$ 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).

Bijlage G:

Weinig geïnstrumenteerde proeven

Inhoud bijlage G

Lijst van Figuren

Lijst van Tabellen

1	Inleiding	1
2	Constructie-eigenschappen	1
	2.1 Basaltontalud	1
	2.2 Lage havendammen	1
3	Proefresultaten Basaltontalud (1983)	3
4	Proefresultaten Urk (2002)	4
5	Proefresultaten Ketelhaven (2002)	5
6	Proefresultaten Havendam (2004)	5
7	Analyse	7

Lijst van Figuren

Lijst van Tabellen

Tabel G.1 Golfcondities voor havendam van Urk (modelschaal)

Tabel G.2 Golfcondities voor havendam van Ketelhaven (modelschaal)

Tabel G.3 Golfcondities voor havendam uit 2004 (modelschaal)

I Inleiding

In het verleden zijn verschillende onderzoeken in de Deltagoot uitgevoerd naar de stabiliteit van basalt en Basalton als dijkbekleding. In deze bijlagen worden de resultaten beschreven van de onderzoeken die weinig of niet geïnstrumenteerde waren (weinig of geen drukopnemers in de bekleding).

Het eerste onderzoek is uitgevoerd in 1983 met Basalton op een dijktalud.

Verder zijn in 2002 twee modelonderzoeken uitgevoerd waarbij schade is opgetreden aan een basalttalud en in 2004 een met een Basaltontalud. In deze onderzoeken was de aandacht gericht op de kruin en het binnentalud van een lage havendam. Op het buitentalud was een bekleding van basalt (2002) of Basalton (2004) aangebracht die eigenlijk tijdens het gehele onderzoek stabiel had moeten blijven.

De resultaten zijn relevant voor het huidige onderzoek.

2 Constructie-eigenschappen

2.1 Basaltontalud

Het onderzoek naar de stabiliteit van Basalton is uitgevoerd met een talud van 1:3 dat eerst niet ingewassen en later wel ingewassen was (v.d. Weide en Visser 1983). Hier wordt de aandacht vooral gericht op het tweede deel van het onderzoek met een bekleding die was ingewassen met metaalslakken. De eigenschappen van de taludbekleding waren als volgt (zie ook in tabel 1 in de hoofdtekst van dit verslag (hoofdstuk 2) en figuur A.9):

- taludhelling: 1:3
- dikte van de toplaag: 15 cm
- soortelijke massa van de Basalton: $\rho_b = 2200 \text{ kg/m}^3$
- inwasmateriaal: metaalslakken (schatting: $D_{f15} = 10 \text{ mm}$)
- Bovenste (belangrijkste) filterlaag:
 - dikte van de filterlaag: $b = 15 \text{ cm}$
 - schatting korrelgrootte van de filterlaag: 20-90 mm; $D_{f15} \approx 25 \text{ mm}$ (schatting)
- Onderste filterlaag:
 - dikte van de filterlaag: $b = 20 \text{ cm}$
 - schatting korrelgrootte van de filterlaag: 0-90 mm; $D_{f15} \approx 3 \text{ mm}$ (schatting)
- ondergrond: zand

Helaas is de korrelgrootte, D_{f15} , van de metaalslakken en het filter in het verslag niet vermeld. De vermelde waarden zijn geschat aan de hand van de benaming van het materiaal en foto's.

2.2 Lage havendammen

In 2002 zijn modelproeven voor de havendammen van Urk en Ketelhaven in de Deltagoot uitgevoerd en in 2004 is nog eens algemeen onderzoek uitgevoerd met een lage havendam.

Modelopbouw en resultaten zijn gerapporteerd in Klein Breteler (2002) en Kuiper e.a. (2004). De belangrijkste constructieparameters zijn in tabel 1 in de hoofdtekst van dit verslag (hoofdstuk 2) samengevat. Opgemerkt moet worden dat voor deze bekledingen er niet is getrild en ingegolfd, waardoor initieel de klemming wat minder goed geweest zou kunnen zijn.

Urk (2002)

De havendam van Urk is op schaal 1:1,75 in de Deltagoot ingebouwd ten behoeve van het beproeven van de stabiliteit van de kruin en het achtertalud. Hier worden alleen de maten gegeven zoals ze in de Deltagoot zijn gerealiseerd (op modelschaal).

De dam was gebouwd op een valse vloer, waar onderdoor het golfoverslagdebiet weer terug kon stromen (zie Figuur A.4 en Figuur A.5).

Op het buitentalud was er een basaltbekleding aangebracht tot 17 cm onder de stilwaterlijn. Daarboven was er 15 cm dikke Basalton op een filterlaag van 5 cm aangebracht. De kruin van de dam stak 36 cm boven water uit.

De eigenschappen van de taludbekleding met basalt waren als volgt (zie ook in tabel 1 in de hoofdtekst van dit verslag (hoofdstuk 2)):

- taludhelling: 1:2,85
- dikte van de toplaag: 18-22 cm, gemiddeld: $D = 0,20$ m
- soortelijke massa van de basalt: $\rho_b = 2955$ kg/m³
- inwasmateriaal: steenslag 10-40 mm; $D_{15} \approx 10$ mm
- dikte van de filterlaag: $b = 20$ cm
- korrelgrootte van de filterlaag: 18-40 mm; $D_{f15} = 22$ mm
- ondergrond: geotextiel en zand

Ketelhaven (2002)

Met bijna dezelfde modelopstelling als die voor de havendam van Urk is de stabiliteit van de havendam van Ketelhaven in de Deltagoot onderzocht. De schaal bedroeg 1:2, maar hier worden alleen de maten gegeven zoals ze in de Deltagoot zijn gerealiseerd (op modelschaal). Op het buitentalud was een basaltbekleding aangebracht tot aan de kruin, die op een hoogte van 3,99 m boven de gootbodem lag (zie Figuur A.6 en Figuur A.7). De proeven zijn uitgevoerd met een waterstand van 4,33 m boven de gootbodem. De kruin lag derhalve 24 cm onder water.

De eigenschappen van de taludbekleding met basalt was zeer vergelijkbaar met die van Urk. Alleen de taludhelling was minder steil:

- taludhelling: 1:3,0
- dikte van de toplaag: 18-22 cm, gemiddeld: $D = 0,20$ m
- soortelijke massa van de basalt: $\rho_b = 2955$ kg/m³
- inwasmateriaal: steenslag 10-40 mm; $D_{15} \approx 10$ mm
- dikte van de filterlaag: $b = 20$ cm
- korrelgrootte van de filterlaag: 18-40 mm; $D_{f15} = 22$ mm
- ondergrond: geotextiel en zand

Havendam (2004)

Ten behoeve van algemeen onderzoek naar de stabiliteit van steenzettingen op de kruin en het binnentalud van havendammen is in 2004 een lage havendam in de Deltagoot gebouwd met Basalton op het buitentalud. Voor het onderhavige onderzoek is het buitentalud van belang.

De havendam had een recht buitentalud met taludhelling van 1:3, een 1 m brede kruin op 4,54 m boven de gootbodem en een binnentalud van 1:3 (zie figuur A.10):

- taludhelling: 1:3,0
- dikte van de toplaag: $D = 0,20$ m
- soortelijke massa van de basalt: $\rho_b = 2827$ kg/m³
- inwasmateriaal: steenslag 18-40 mm; $D_{f15} = 22$ mm
- dikte van de filterlaag: $b = 10$ cm
- korrelgrootte van de filterlaag: 18-40 mm; $D_{f15} = 22$ mm
- ondergrond: geotextiel en zandcementstabilisatie

De binnenkruinlijn en buitenkruin waren rond afgewerkt.

De voor het buitentalud relevante proeven zijn uitgevoerd met een waterstand gelijk aan de kruin en een waterstand op $0,38H_s$ à $0,40H_s$ onder de kruin (de kruin lag 42 à 54 cm boven de waterlijn).

3 Proefresultaten Basaltontalud (1983)

Tijdens het onderzoek zijn vele proeven uitgevoerd met regelmatige golven die voor het huidige onderzoek niet interessant zijn. Ook de vele proeven op de bekleding zonder inwassing zijn minder interessant en worden hier niet vermeld.

Er zijn twee onregelmatige golfproeven uitgevoerd op een ingewassen Basalton-bekleding met dikte van 15 cm. Zelfs bij de hoogste golven is geen schade ontstaan (v.d. Weide en Visser 1983).

Het verslag vermeldt dat de significante golfhoogte 1,76 m was. Hoewel het niet expliciet in het verslag vermeld is, zijn de proeven waarschijnlijk uitgevoerd met slechts één golfhoogtemeter, en zijn de vermelde golfhoogten dus de som van de inkomende en gereflecteerde golven. Met een schatting van de grootte van de reflectie (namelijk ca 38%) zijn de volgende inkomende golfcondities bepaald:

- Significante golfhoogte: $H_s = 1,63$ m
- Golfperiode bij de piek van het spectrum: $T_p = 6,14$ s
- Brekerparameter: $\xi_{op} = 2,00$
- $H_s/\Delta D = 9,1$
- Belastingparameter: $F = \xi_{op}^{2/3} \cdot H_s/(\Delta D) = 14,4$

Hieruit blijkt dat er geen schade ontstaan is, terwijl de belasting bijzonder hoog was. Na de proeven is gebleken dat de bekleding opgespannen stond tussen de gootwanden, waardoor de sterkte aanzienlijk hoger was, dan in werkelijkheid zou kunnen worden gerealiseerd.

Daarom zijn deze proeven nauwelijks bruikbaar in het huidige onderzoek.

4 Proefresultaten Urk (2002)

Reeds bij de eerste proef ($H_s = 0,76$ m en $T_p = 4,27$ s) was er begin van beweging van de basalt geconstateerd. Op de overgang van de basalt naar de Basalton waren er twee zuilen enkele centimeters omhoog gekomen. Op deze locatie is er een overgang van een relatief doorlatend en dik filter naar een veel minder doorlatend en dun filter aanwezig, waardoor de verschildrukken hier lokaal hoger zouden kunnen zijn. Daarom wordt dit begin van beweging nog niet in de beschouwing meegenomen.

Tijdens de tweede proef ($H_s = 0,90$ m en $T_p = 4,54$ s) is er op ongeveer 1 m (langs het talud gemeten) onder de overgang schade ontstaan: één zuil is uit de zetting gekomen.

Enkele relevante eigenschappen van de belasting bij begin van schade zijn (proef 2):

- golfsteilheid: $H_s/L_{op} = 0,028$
- brekerparameter: $\xi_{op} = 2,10$
- relatieve belasting parameter: $H_s/\Delta D = 2,30$
- stabiliteitsparameter: $F = 3,8$

De lage kruin van deze constructie, waardoor er een groot overslagdebiet was, zou invloed kunnen hebben gehad op de proefresultaten. Het inwasmateriaal dat uitspoelt, verdwijnt over de kruin en kan dus niet meer terugkomen in spleten, zoals dat wel geconstateerd is op dijktaaluds. Verder zouden golfklap sterker kunnen zijn (Klein Breteler en Coeveld 2004).

Vervolgens is de schade zorgvuldig herstelt en is de inwassing aangevuld. Daarna is er tot en met de laatste proef geen schade meer ontstaan. Enkele relevante eigenschappen van de belasting bij deze laatste proef zijn (proef 5):

- significante golfhoogte: $H_s = 1,09$ m
- golfperiode bij de piek van het spectrum: $T_p = 5,29$ s
- golfsteilheid: $H_s/L_{op} = 0,025$
- brekerparameter: $\xi_{op} = 2,22$
- relatieve belasting parameter: $H_s/\Delta D = 2,79$
- stabiliteitsparameter: $F = 4,8$

Een verbeterde vulling van de spleten leidt tot een betere interactie tussen de blokken (indirecte interactie). Misschien is ook de uitgelichte zuil iets beter tussen de naast liggende zuilen ingeklemd (directe interactie), omdat het met geweld er weer tussen geslagen is.

	proef 1	proef 2	proef 3	proef 4	proef 5
H_s [m]	0,76	0,90	0,91	0,95	1,09
T_p [s]	4,27	4,54	4,80	4,96	5,29
talud 1:	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
s_{op} [-]	0,027	0,028	0,025	0,025	0,025
ξ_{op} [-]	2,19	2,13	2,24	2,26	2,27
$H_s/\Delta D$ [-]	1,94	2,30	2,33	2,43	2,79
F [-]	3,3	3,8	4,0	4,2	4,8

Tabel G.1 Golfcondities voor havendam van Urk (modelschaal)

5 Proefresultaten Ketelhaven (2002)

Het begin van beweging van de basalt vond plaats bij de vierde proef bij een golfhoogte van $H_s = 0,70$ m en een golfperiode van $T_p = 4,17$ s (proef 14). Er was een basaltzuil 10 cm omhoog gekomen en een andere 3 cm. Na de proef is deze schade zorgvuldig hersteld. Tijdens de een na de laatste proef (Proef 15; $H_s = 0,80$ m en $T_p = 4,60$ s) is een vergelijkbare schade ontstaan: er was een basaltzuil 10 cm omhoog gekomen en een andere 4 cm. Gezien het feit dat er geen zuil uitgekomen is, wordt dit “begin van beweging” genoemd

Enkele relevante eigenschappen van de belasting bij begin van beweging zijn (proef 14):

- golfsteilheid: $H_s/L_{op} = 0,026$
- brekerparameter: $\xi_{op} = 2,08$
- relatieve belasting parameter: $H_s/\Delta D = 1,79$
- stabiliteitsparameter: $F = 2,9$

De lage kruin van deze constructie, waardoor er een groot overslagdebiet was, zou invloed kunnen hebben gehad op de proefresultaten. Daardoor is er minder golfneerloop en is er een dunnere waterlaag op het talud als de golfklap erop neerkomt. Dat zou tot een zwaardere golfklap kunnen leiden.

	proef 11	proef 12	proef 13	proef 14	proef 15	proef 16
H_s [m]	0,46	0,58	0,66	0,70	0,80	1,01
T_p [s]	3,54	3,81	4,04	4,17	4,60	4,82
talud 1:	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
s_{op} [-]	0,023	0,025	0,026	0,026	0,024	0,028
ξ_{op} [-]	2,17	2,09	2,07	2,08	2,14	2,00
$H_s/\Delta D$ [-]	1,18	1,48	1,69	1,79	2,05	2,58
F [-]	2,0	2,4	2,7	2,9	3,4	4,1

Tabel G.2 Golfcondities voor havendam van Ketelhaven (modelschaal)

6 Proefresultaten Havendam (2004)

Het proevenprogramma m.b.t. de havendam uit 2004 is weergegeven in tabel G.3.

Tijdens de eerste proef is geen schade ontstaan aan het buitentalud.

Proef P02 is gestopt na 29 minuten en 26 seconden, omdat er schade op het buitentalud optrad. Er was op circa 3.9 m boven de gootbodem één Basaltzuil geheel uit het talud gelicht. Visuele inspectie na het afpompen toonde dat er heel veel inwasmateriaal uit het

buitentalud was gespoeld, mede als gevolg van de relatief grote spleten tussen de stenen. Bovendien komt het inwasmateriaal dat over de kruin spoelt niet meer terug, terwijl op een normaal dijktaalud het inwasmateriaal heen en weer spoelt en voor een belangrijk deel op het talud blijft.

De spleten van $z = 2.2$ m tot $z = 3.2$ m ($z =$ hoogte boven de gootbodem) waren nog goed gevuld: circa 5 cm inwasmateriaal was eruit. Van $z = 3.2$ m tot $z = 4.2$ m waren op vele plaatsen de spleten tot aan de onderkant van de Basalton uitgespoeld. Op sommige plaatsen lagen de Basaltonzuilen zelfs los. Van $z = 4.2$ m tot $z = 4.4$ m was nog inwasmateriaal aanwezig in de zetting op het buitentalud.

	proef 1	proef 2	proef 3	proef 4	proef 11	proef 12	proef 13
H_s [m]	0.99	1.19	1.38	1.67	1.1	1.25	1.36
T_p [s]	4.67	5.04	5.47	5.97	4.94	5.24	5.55
talud 1:	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
R_c [m]	-0,01	0,01	0,01	0,02	0,42	0,48	0,52
s_{op} [-]	0.029	0.030	0.030	0.030	0.029	0.029	0.028
ξ_{op} [-]	1.95	1.93	1.94	1.92	1.96	1.95	1.98
$H_s/\Delta D$ [-]	2.71	3.24	3.78	4.57	3.01	3.42	3.72
F [-]	4.23	5.03	5.88	7.06	4.72	5.34	5.87

Tabel G.3 Golfcondities voor havendam uit 2004 (modelschaal)

Na inspectie is het buitentalud opnieuw ingewassen, maar nu met het grovere filtermateriaal. Losse stenen werden zo goed mogelijk vastgeklemd om de kans op schade op het buitentalud zo klein mogelijk te maken. Vervolgens is proef 2 voortgezet.

Ook aan het einde van proef 2 was er weer veel inwasmateriaal uit het buitentalud gespoeld, maar minder dan na 29 minuten. Van $z = 4.2$ m tot $z = 4.4$ m was het inwasmateriaal minder dan 5 cm uitgespoeld. Van $z = 3.5$ m tot $z = 4.2$ m was er gemiddeld 12 tot 15 cm van het inwasmateriaal uitgespoeld. Verder naar onder toe nam de uitspoeling weer af tot 3 à 4 cm helemaal onderaan (op $z = 2.2$ m).

Midden in de goot op circa 2 m van de kruin was een Basaltonzuil circa 4.5 cm uit het talud gekomen en er zaten wat zuilen los. Aan de westzijde (links, halzijde) van het buitentalud lijkt van $z = 3.5$ m tot $z = 3.8$ m iets van een bolling in het talud te zitten.

Na inspectie is het buitentalud weer opnieuw ingewassen met filtermateriaal en zijn losse stenen weer zo goed mogelijk vastgezet voor de volgende proef.

De proef 3 kon worden uitgevoerd zonder ernstige schade aan het buitentalud. Daar was wel weer veel inwasmateriaal uitgespoeld en er leek iets van een bolling op het buitentalud op te treden bij $z = 3.6$ m tot $z = 4.0$ m. Er staken ook twee blokken iets uit het talud; één blok stak er circa 2 cm uit en een ander circa 4 cm.

Van $z = 3.8$ m tot $z = 4.4$ m was 10 tot 12 cm van het inwasmateriaal van het buitentalud uitgespoeld. Van $z = 3.0$ m tot $z = 3.8$ m liep dat op tot 12 à 18 cm en op vele plaatsen zelfs

tot 20 cm (volledige uitspoeling). Daarna liep de uitspoeling snel terug tot circa 8 cm en minder. Op de kruin en het binnentalud was er weinig uitspoeling.

Na inspectie werd het buitentalud weer zo goed mogelijk hersteld en versterkt door losse stenen zoveel mogelijk klem te zetten door er stenen van het filtermateriaal tussen te slaan.

Proef P04 is reeds na 12 minuten en 40 seconden gestopt in verband met het optreden van schade aan de Basaltonbekleding op de kruin. Er was geen schade opgetreden aan het buitentalud.

Tijdens proef 11 is er geen schade aan het buitentalud opgetreden.

Het buitentalud van de havendam was na Proef P12 behoorlijk aangetast, maar niet bezweken. Er was sprake van een duidelijke vervorming van het taludoppervlak en plaatselijk was het inwasmateriaal uit de spleten gespoeld. Daardoor lagen ook enkele stenen los en waren enkele stenen iets omhoog gekomen.

Na proef 12 is het buitentalud zo goed mogelijk hersteld en is proef P13 uitgevoerd. Het schadebeeld na proef 13 was vergelijkbaar met die na proef 12.

Uit het bovenstaande blijkt dat er nog geen schade was ontstaan tijdens proef 1 en proef 11, die zijn uitgevoerd met een belastingniveau van respectievelijk $F = 4,2$ en $F = 4,7$. Tijdens proef 2 is er een zuil uit de bekleding geslagen bij $F = 5,0$. Na die gerepareerd te hebben, is het uiteindelijk met enige moeite (steeds weer opnieuw inwassen en bewegende stenen terugslaan en stoppen) gelukt om met dit talud een belasting van $F = 7,1$ (proef 4) te overleven.

7 Analyse

Het Basaltontalud uit 1983 was tot en met de hoogste belasting niet beschadigd geraakt, terwijl de belasting toch extreem hoog was. Vanwege de constatering dat de bekleding opgespannen geraakt was tussen de gootwanden, kan dit resultaat helaas niet gebruikt worden in het huidige onderzoek.

In vergelijking met Urk is bij Ketelhaven al bij een iets kleinere golfhoogte schade opgetreden, terwijl de taludhelling flauwer was.

Doorgaans is de hydraulische belasting op een flauwer talud minder. Die invloed is meestal sterker dan de mogelijk grotere klemming op een steil talud (a.g.v. een grotere normaalkracht in het vlak van het talud). Maar de normaalkracht in de bekleding van Ketelhaven zou ook kleiner kunnen zijn doordat de kruin beduidend lager was, waardoor wellicht toch dit effect overheerst over de kleinere belasting op het flauwere talud.

Er is beginnende schade aan de basalt op de havendammen van Urk en Ketelhaven opgetreden (beetje beweging tot één zuil eruit) bij een bijzonder lage golfbelasting. Dit ontstond al bij een belasting met $H_s/\Delta D \approx 2$ en $F \approx 3$. Dit is zelfs een kleinere belasting dan die in 1984 schade aan de basalt gaf (toen: $H_s/\Delta D \approx 3$ en $F \approx 4$).

De bekleding van Basalton op de havendam van 2004 bleek veel stabielere te zijn. Pas bij $F \approx 5$ is er schade ontstaan.

De volgende factoren kunnen bijgedragen hebben aan deze lage sterkte:

- Er is niet gezorgd voor een goede inwassing en mobilisatie van de interactie tussen de zuilen door het aanrillen van de zetting of door het ingolven.
- Een basalt-zetting heeft de neiging om in het vlak van het talud te comprimeren: de zuilen bewegen onder invloed van de golfbelasting naar beneden, terwijl de onderste zuilen op hun plek blijven. Deze bewegingen kunnen lokaal leiden tot losse zuilen.
- Sommige zuilen zijn niet mooi zuilvormig en deze imperfecte vorm kan ertoe leiden dat ze er makkelijker uit komen.
- Basalt is erg hard en glad, waardoor de klemming minder en bewegelijkheid groter kan zijn dan van Basalton.
- Op een havendam is de golfklap zwaarder vanwege de geringere dikte van de waterlaag op het talud.
- Op een havendam spoelt al het uitspoelende inwasmateriaal over de kruin weg en komt niet meer terug op het talud, zoals dat wel gebeurt op dijktaluds.