# Bijlage D:

Lokale leklengte

### Inhoud van Bijlage D

Lijst van Figuren Lijst van Tabellen

1	Inlei	Inleiding				
2	Meth	hodiek voor bepaling lokale leklengte	2			
3	Selec	ctie van stijghoogtemetingen	6			
4	Bepa	aling van de leklengte	7			
	4.1	Leklengte van basalt uit 1984	7			
	4.2	Leklengte van basalt uit 2003				
	4.3	Leklengte van Basalton uit 2003	15			
5	Anal	lyse	19			
6	Conc	clusie	21			

Tabellen

### Lijst van Figuren

- Figuur D.1 Schematisatie belangrijke parameters voor het bepalen van de lokale leklengte 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  $\Lambda^2$  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 leklengte 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  $\Lambda^2$  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
   Overzichtgemeten leklengten gebaseerd op stijghoogtemetingen, en berekend met ANAMOS
- Tabel D.2
   Berekende doorlatendheden en leklengten volgens formules Klein Breteler

   (2002)
- Tabel D.3
   Geselecteerde tijdstippen met grote blokbewegingen voor de leklengteanalyse
- Tabel D.4Berekeningen belangrijke parameters voor de leklengte, voorbeeld modelproefDG21, tijdstip t = 1074,80s
- Tabel D.5 Uit stijghoogtemetingen berekende  $\Lambda^2$  waarden van de basaltproeven uit 1984 (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap)

- Tabel D.6 Geselecteerde uit stijghoogtemetingen berekende  $\Lambda^2$  waarden van de basaltproeven uit 1984 die gebruikt zijn voor de statistische analyse van de leklengte (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap; lege cellen = voldoet niet aan criteria)
- Tabel D.7 Uit stijghoogtemetingen berekende  $\Lambda^2$  waarden van de basaltproeven uit 2003 (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap)
- Tabel D.8 Geselecteerde uit stijghoogtemetingen berekende  $\Lambda^2$  waarden van de basaltproeven 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)
- Tabel D.9
   Selectie van golven voor de leklengteanalyse van Basalton 2003 (proef 25)
- Tabel D.10 Uit stijghoogtemetingen berekende  $\Lambda^2$  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  $\Lambda^2$  waarden van de Basaltonproeven uit 2003 die gebruikt zijn voor de statistische analyse van de leklengte (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  $\Lambda^2$  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  $\Lambda^2$  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)
- Tabel D.14 Overzichtgemeten leklengten gebaseerd op stijghoogtemetingen, en berekend met ANAMOS
- Tabel D. 15 Berekende doorlatendheden en leklengten volgens formules Klein Breteler (2002)

### I Inleiding

De leklengte is de bepalende parameter ten aanzien van de grootte van de stijghoogteverschillen (belasting) over de toplaag. Een grote leklengte 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 leklengte is als volgt gedefineerd:

$$\Lambda = \sqrt{\frac{bkD}{k'}} \tag{3.1}$$

met

 $\Lambda$  = leklengte [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-gelineare doorlatendheid, zal de gelineariseerde waarde van de doorlatendheid afhankelijk zijn van het verhang:

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

met:

- i = verhang over het filter [-]
- a = laminaire weerstandscoëfficient van het filter [s/m]
- b = turbulente weerstandscoëfficient van het filter  $[s^2/m^2]$
- q = specifiek debiet door de toplaag [m/s]

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

$$k = \frac{q}{i} = -\frac{a}{2 \cdot b \cdot i} + \sqrt{\frac{1}{b \cdot i} + \frac{a^2}{4 \cdot b^2 \cdot i^2}}$$
(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 leklengte. In dit hoofdstuk wordt de lokale leklengte bepaald uit de gemeten stijghoogten op de toplaag en in het filter.

# 2 Methodiek voor bepaling lokale leklengte

#### Methodiek

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

$$q' = q_i - q_{i-1} \tag{3.4}$$

met

q' = gemiddelde debiet door de toplaag tussen de stippellijnen, per meter dijklengte  $(m^2/s/m)$ 

q = debiet door de filterlaag, per meter dijklengte  $(m^2/s/m)$ 

Het debiet door de toplaag is:

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

met:

 $\phi' - \phi$  = gemiddeld stijghoogteverschil over de toplaag tussen de stippellijnen (m) k' = doorlatendheid van de toplaag (gelineariseerd) (m/s) i' = verhang over de toplaag (-)

- D = dikte van de toplaag (m)
- $y_i$  = afstand tussen de drukopnemers i en i+1 (m)



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

Het gemiddeld stijghoogteverschil over de toplaag is:

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

De uitdrukkingen

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

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:

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

met:

b = dikte van de filter laag (m)

k = doorlatendheid van het filter (gelineariseerd) (m/s)

i = verhang in het filter (-)

Combineren van bovenstaande formules levert het volgende op:

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

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

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

met:

 $\Lambda$  = leklengte (m)

 $\Delta i$  = 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:  $\phi' \phi$ )
- een term voor de verandering in het stijghoogtegradiënt in het filter (noemer)
- een term voor de gemiddelde drukopnemerafstand  $(y_{i-1} + y_i)$

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 (φ' < φ) moet ook de verandering in de stijghoogtegradiënt in het filter negatief zijn (meer instroom dan uitstroom).</li>

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 irreëele getallen te werken werd gekozen om in de analyse de  $\Lambda^2$  –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 leklengte. 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:  $\phi' - \phi > 0,07$  m

gradiënt in het filter:  $i > 0.07/y_i$ 

Verder is voor het bepalen van de leklengte 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  $\phi$ ,  $\phi_{i-1}$  en  $\phi_{i+1}$  onafhankelijk zijn, geldt dat de fout in  $\Delta i$  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  $\Delta i$ , 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 leklengte 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 leklengteberekening 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 leklengte ontstaat, die echter vrijwel afwezig zal zijn tijdens het golffront.



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 leklengte 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 toplaag, resulterend in een bepaalde waarde van de leklengte. De voor dat moment bepaalde leklengte zou niet anders zijn als de bemonsteringsfrequentie veel hoger zou zijn geweest.

Al deze fouten tezamen beperken de nauwkeurigheid waarmee de leklengte 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 <u>gemiddelde</u> leklengte 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 leklengte bepaald worden met de ene groep drukopnemers (die door meetfouten een overschatting van de leklengte 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 leklengte op een bepaald moment en bepaalde locatie nauwkeurig te bepalen. De nauwkeurigheid van de gemiddelde leklengte (gemiddeld over de plaats en in de tijd) is wel redelijk goed. Als de leklengte alleen bepaald wordt als  $\phi'-\phi$  en  $\Delta i$  groot zijn, dan zal de nauwkeurigheid van de leklengte 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 leklengte 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 toplaag (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 toplaag 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) geselecteeerd die grote blokbeweging gaven en daarvoor is de lokale leklengte 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 = 292,84s; t = 292,84s; 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 leklengte geven. Tijdens de analyse is hierop gelet en dit bleek niet op te treden.

# 4 Bepaling van de leklengte

In dit hoofdstuk is de leklengte 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 Leklengte van basalt uit 1984

In de vorige paragraaf is aangegeven dat de lokale leklengte 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 leklengte.

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



proef uit 1984, nr. 21, tijdstip t=1074.80s

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 golftrog 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 leklengte. 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 leklengte (-0.157 m<sup>2</sup> tot  $1,710m^2$ , zie voorlaatste regel in Tabel D.4):

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

- De leklengte bij drukopnemerpaar 4-10 ( $\Lambda_{4-10}$ ) heeft een realistische waarde.
- De leklengte bij drukopnemerpaar 5-11 (Λ<sub>5-11</sub>) 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 leklengte hier een onrealistische waarde.

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

Op dezelfde manier werden alle geselecteerde tijdstippen en golven geanalyseerd. De resultaten voor  $\Lambda^2$  zijn vermeld in Tabel D.5. De negatieve waarden zijn cursief geschreven. Deze kunnen niet voor het berekenen van de lokale leklengte worden gebruikt.  $\Lambda^2$  waardes op de locatie van de trog van de golfklap zijn vet gemarkeerd.  $\Lambda^2$  waardes 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  $\Lambda^2$  bepalend zijn, traden boven de geïntrumenteerde testsectie op. Daarom was het niet mogelijk  $\Lambda^2$  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  $\Lambda^2$  waarden lijken onrealistisch hoog of onrealistisch laag en kunnen niet worden gebruikt om de lokale leklengte  $\Lambda$  te berekenen.
- De meeste zinvolle  $\Lambda^2$  waarden werden bij drukopnemerpaar 4+10 bepaald, dus bij de locatie van de golfklap (t = 292s) en de zeezijde van het golffront (t = 399s, t=1074s).
- Per tijdstip en locatie zijn de  $\Lambda^2$  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  $\Lambda^2$  waarden eigenlijk onrealistisch zijn. Dat zou kunnen betekenen dat de metingen wel goed zijn, maar het gekozen leklengtemodel niet altijd voldoende is. Men kan daarij 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  $\Lambda^2$  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 leklengtemodel niet mogelijk bij dit stijghoogteverschil over de toplaag (zie ook hoofdstuk 2).
- Bij drukopnemerpaar 3-9 werd voor alle drie geselecteerde golven Λ<sup>2</sup> ≈ 0 bepaald. Dit heeft met een heel laag stijghoogteverschil tussen toplaag en filter op die locatie te maken. De lokale leklengte 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 golffront 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

golftrog (drukopnemerpaar 2-8,  $\overline{\phi'-\phi} = -0.52$ m) en op de locatie van de golfklap op (drukopnemerpaar 4-10,  $\overline{\phi'-\phi} = 0.439$ 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:  $\overline{\phi'-\phi} = 0.146$ m.

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



proef nr. 21 uit jaar 1984 (basalt), tijdstip t=399,48s

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



Figuur D.6 Voorbeelden verloop  $\Lambda^2$  waarden ten opzicht van de tijd

Voor het bepalen van de gemiddelde leklengte kunnen niet alle  $\Lambda^2$  waarden gebruikt worden omdat deze soms onrealistisch zijn. Het is echter te verwachten dat er wel realistische  $\Lambda^2$ 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  $\Lambda^2$  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  $\Lambda^2$  waarden (50 van 60). De  $\Lambda^2$  waarden die aan de 4 genoemde eisen voldoen zijn in Tabel D.6 weergegeven. Van deze waarden werden de leklengte 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 toplaagdoorlatendheid 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 leklengte uitgaat van gelineariseerde doorlatendheden van filter en toplaag, zal de leklengte 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 leklengte. Er is wel een daling van de leklengte (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 leklengte aangehouden. Bij de metingen van Basalton 2003 is er overigens geen verandering van de leklengte 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 leklengte voor proef 21 uit 1984

### 4.2 Leklengte 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  $\Lambda^2$  waardes berekend. De instrumentatiedichtheid en de waterstand zijn samen met een voorbeeld voor stijghoogtemetingen (tijdstip t = 674,55s) 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 leklengte 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  $\Lambda^2$  waarden. Negatieve (dus in ieder geval onrealistische) waarden zijn cursief geschreven. De locaties van de golftrog (vet) en de golfklap (grijze achtergrond) verschillen bij de gekozen drie golven minder dan bij de geanalyseerde proef uit 1984.



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



Figuur D.10 Verloop  $\Lambda^2$  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  $\Lambda^2$  leiden tot de volgende conclusies:

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



Bij de eerste geselecteerde golf (t = 674s) 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  $\Lambda^2$  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  $\Lambda^2$  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  $\Delta i$ 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  $\Lambda^2$  waarden. Dit wordt bevestigd door de analyse van de tweede en derde golf: de verhanggradiënt in het filter volgt precies de golfvorm. De  $\Lambda^2$ waarden hebben een heel kleine spreiding (zie Tabel D.7).

Voor de statistische analyse van de leklengte werden uit Tabel D.7 realistische waarden voor  $\Lambda^2$  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 leklengte van  $\Lambda = 0,44$  m met een standardafwijking van  $\sigma = 0,05$  m. Het 90%- betrouwbaarheidsinterval is derhalve:  $0,36 < \Lambda < 0,52$ .

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

#### 4.3 Leklengte 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 leklengte is daarom identiek aan die van basalt uit 2003.

Zoals in Hoofdstuk 3 is beschreven, zijn voor de leklengteanalyse drie golven geselecteerd die volgens de Zsteen-sommen met een vrij dunne, fictieve, steenzetting tot grote blokbewegingen leiden. De leklengteanalyse voor deze initiële selectie werd uitgevoerd zoals beschreven in Hoofdstuk 4.1. Uit de resultaten bleek dat de standaardafwijking voor de gemiddelde leklengte van Basalton vrij groot was en de resultaten verdiende daarom extra aandacht.

De lokale leklengten van Basalton die aan de 4 selectiecondities (zie Figuur D.7) voldeden zijn vergeleken met de geselecteerde lokale leklengten voor basalt uit 1984 en 2003. Daarbij is opgevallen dat bij Basalton uit 2003 slechts enkele lokale leklengtewaarden in de golftrog aan deze selectiecondities voldeden, terwijl tijdens de geselecteerde proeven voor basalt uit 1984 en 2003 de waarden in golftrog 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 leklengte met de afgeleide formules te bepalen en leidt het toch toepassen van de formules tot een grote fout in de leklengte. Dit kan de oorzaak zijn geweest van de grote spreiding in de berekende leklengte (zie Tabel D.11).

Daarom zijn nieuwe golven geselecteerd met iets minder grote stijghoogteverschillen, waarna de leklengte 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.



proef nr. 25 uit jaar 2003 (Basalton), tijdstip t = 1118,94s

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  $\Lambda^2$ -waarden te berekenen (zie Tabel D.10). De  $\Lambda^2$ -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  $\Lambda^2$  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 leklengte ontstaat.
- De meeste realistische waarden traden bij de drukopnemerparen [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 golffront verder richting talud beweegt, waardoor de stijghoogte op het talud groter wordt. De verhanggradiënt in het filter (∂<sup>2</sup> φ/∂y<sup>2</sup>) 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 standardafwijking 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 leklengte is verder identiek. De stijghoogten werden gebruikt om met behulp van Formule (3.8) (hoofdstuk 2) de  $\Lambda^2$ -waarden te berekenen (zie Tabel D.12). De  $\Lambda^2$ -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.

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

- Lokale leklengten op locaties zeewaarts van de golftrog Berekende lokale leklengten zijn heel klein. Dit heeft te maken met heel lage stijghoogteverschillen en verhanggradiënten in het filter tussen toplaag en filter voor een golftrog. 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 leklengten ter plaatse van de golftrog
   De berekende leklengten op locaties van golftrogen zijn in een realistische range en voldoen in het algemeen aan de 4 selectiecondities voor betrouwbare lokale leklengten. 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 leklengten op locaties van de golfklap en achter de golfklap
   De berekende lokale leklengten op de locaties van golfklappen en achter de golfklappen voldoen niet aan de 4 selectiecondities. De spreiding van Λ<sup>2</sup>-waarden is op deze locaties vrij groot. Voor een deel van de locaties en tijdstippen werden onrealistisch grote Λ<sup>2</sup>-waarden en onrealistisch lage Λ<sup>2</sup>-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 leklengte werden aan de hand van de selectiecondities (zie Hoofdstuk 4.1) uit Tabel D.12 realistische waarden voor  $\Lambda^2$  geselecteerd (zie Tabel D.13). Uit deze tabel werden de statistische parameters voor de leklengte 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 standardafwijking van  $\sigma = 0,04$  m. Het 90%- betrouwbaarheidsinterval is derhalve:  $0,47 < \Lambda < 0,61$ .

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

# 5 Analyse

In deze bijlagen zijn de leklengten bepaald op basis van stijghoogtemetingen. Deze leklengte worden de gemeten leklengte genoemd. Daarnaast kan de leklengte 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.

	geme	berekend	
modelproef	gemiddelde [m]	90%- betrouwbaar- heidsinterval	$\Lambda_{anamos}$ [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 < $\Lambda$ < 0,61	0,52

Tabel D.1 Overzichtgemeten leklengten gebaseerd op stijghoogtemetingen, en berekend met ANAMOS

Bij de modelproeven uit 1984 is de berekende leklengte met ANAMOS rond 20% kleiner dan de gemeten leklengte, maar ligt nog wel ruim binnen het 90%betrouwbaarheidsinterval. Bij basalt uit 2003 is de leklengte 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 leklengte zijn de oorzaken van deze verschillen onderzocht. De leklengte is gedefineerd 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 leklengte van basalt uit 2003, berekend met de formules van Klein Breteler (2002), nu wel overeenkomt met de gemeten leklengte. De grote onzekerheid omtrent de eigenschappen van de steenzetting uit 1984 leidt tot zo'n grote onzekerheid omtrent de leklengte, dat de range zich maar liefst uitstrekt van 0,22 tot 1,6 m. Hiermee wordt duidelijk dat het berekenen van de leklengte 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 leklengte 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 leklengte die bepaald is uit de metingen.

Uit dit onderzoek bleek dat een relatief hoog percentage aan onrealistische waarden voor de leklengte optraden. Mogelijke reden voor ogenschijnlijk onrealistische  $\Lambda^2$  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 leklengte 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 meetonnauwkeurigheden kunnen tot onrealistische  $\Lambda^2$  waarden leiden.

Ondanks deze aspecten, die de nauwkeurigheid nadelig beïnvloeden, zijn de bepaalde leklengten realistisch en komen ze grofweg overeen met de berekende waarden. Voor de verdere analyse wordt gewerkt met de gemiddelde waarden van de gemeten leklengte 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 korreldiamater	D <sub>15</sub> [mm]	3 à 15	5 à 10	5 à 10
porositeit	n <sub>inw</sub> [-]	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 korreldiamater	D <sub>f15</sub> [mm]	15 à 25	20 à 25	20 à 25
porositeit	n <sub>f</sub> [-]	0,35 à 0,40	0,35 à 0,40	0,35 à 0,40
RESULTATEN VOLG	ENS FORMU	LES KLEIN BR	ETELER (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
$\Lambda$ range		0,22 à 1,6	0,27 à 0,61	0,27 à 0,60

Tabel D.2 Berekende doorlatendheden en leklengten volgens formules Klein Breteler (2002)

# 6 Conclusie

Gezien het feit dat de leklengte 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 leklengte 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 leklengte te bepalen. Uit de zo verkregen resultaten blijkt dat de leklengte 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 leklengte ( $\Lambda = 0,44$  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:  $0,47 \le \Lambda \le 0,61$  m
- Basalt uit 2003:  $0,36 < \Lambda < 0,52 \text{ m}$

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**

\* ... initiele 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 leklengteanalyse

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	<b>¢'</b> <sub>i</sub> [m]	5.161	5.352	5.390	5.437	4.799	5.847
stijghoogte in filter	$\phi_i$ [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	$\overline{\phi' - \phi}$ [m]		0.079	-0.009	-0.057	-0.520	
stijghoogtegradient in filter	·Δi [-]		-0.414	0.338	-0.139	-0.266	
leklengte kwadraat	$\Lambda^2  [m^2]$		-0.157	-0.026	0.433	1.710	
leklengte Λ	Λ [m]		-	-	0.658	1.308	

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

tijdstip	$\left(\Lambda_{2-8}\right)^2 [\mathrm{m}^2]$	$(\Lambda_{3-9})^2 [m^2]$	$(\Lambda_{4-10})^2 [m^2]$	$(\Lambda_{5-11})^2 [m^2]$
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  $\Lambda^2$  waarden van de basaltproeven uit 1984 (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap)

tijdstip	$\left(\Lambda_{2-8}\right)^2 \left[\mathrm{m}^2\right]$	$(\Lambda_{3-9})^2 [m^2]$	$\left(\Lambda_{410}\right)^2 \left[\text{m}^2\right]$	$\left(\Lambda_{5-11}\right)^2 \left[\mathrm{m}^2\right]$
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  $\Lambda^2$  waarden van de basaltproeven uit 1984 die gebruikt zijn voor de statistische analyse van de leklengte (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap; lege cellen = voldoet niet aan criteria)

tijdstip	$(\Lambda_{6-28})^2$	$(\Lambda_{9-29})^2$	$(\Lambda_{12-30})^2$	$(\Lambda_{15-31})^2$	$(\Lambda_{18-32})^2$
[ <b>s</b> ]	$[\mathbf{m}^2]$	$[\mathbf{m}^2]$	[ <b>m</b> <sup>2</sup> ]	լույ	[ <b>m</b> <sup>2</sup> ]
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  $\Lambda^2$  waarden van de basaltproeven uit 2003 (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap)

tijdstip	$(\Lambda_{6-28})^2$	$(\Lambda_{9-29})^2$	$(\Lambda_{12-30})^2$	$(\Lambda_{15-31})^2$	$(\Lambda_{18-32})^2$
[s]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]
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  $\Lambda^2$  waarden van de basaltproeven 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	momenten	maximaal stijghoogteverschil [m]	overschrijdingskans [%]
	1118,92 - 1118,96	0,87	5
initiële selectie	3144,71 - 3144,75	1,09	1
	3649,35 - 3649,39	0,99	2
	156,52 - 156,56	0,71	14
nieuwe selectie	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	$\left(\Lambda_{6-28} ight)^2$	$\left(\Lambda_{9-29} ight)^2$	$\left(\Lambda_{12-30}\right)^2$	$(\Lambda_{15-31})^2$	$\left(\Lambda_{18-32}\right)^2$
[ <b>s</b> ]	[ <b>m</b> <sup>2</sup> ]	[ <b>m</b> <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m*]	[m <sup>2</sup> ]
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  $\Lambda^2$  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 <sup>2</sup> ]	$(\Lambda_{15-31})^2$ [m <sup>2</sup> ]	$(\Lambda_{18-32})^2$ [m <sup>2</sup> ]
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  $\Lambda^2$  waarden van de Basaltonproeven uit 2003 die gebruikt zijn voor de statistische analyse van de leklengte (vet = in trog; grijze achtergrond = in golfklap), initiële selectie gebaseerd op momenten met grote blokbewegingen (volgens Zsteen; lege cellen = voldoet niet aan criteria)

tijdstip	$\left(\Lambda_{6-28} ight)^2$	$\left(\Lambda_{9-29} ight)^2$	$\left(\Lambda_{12-30}\right)^2$	$(\Lambda_{15-31})^2$	$(\Lambda_{18-32})^2$
[ <b>s</b> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[ <b>m</b> <sup>2</sup> ]	[ <b>m</b> <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]
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  $\Lambda^2$  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	$(\Lambda_{6-28})^2$	$(\Lambda_{9-29})^2$	$(\Lambda_{12-30})^2$	$(\Lambda_{15-31})^2$	$(\Lambda_{18-32})^2$
[S]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]
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  $\Lambda^2$  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)

	geme	berekend	
modelproef	gemiddelde [m]	90%- betrouwbaar- heidsinterval	$\Lambda_{ m anamos}$ [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 < $\Lambda$ < 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 korreldiamater	D <sub>15</sub> [mm]	3 à 15	5 à 10	5 à 10	
porositeit	n <sub>inw</sub> [-]	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 korreldiamater	D <sub>f15</sub> [mm]	15 à 25	20 à 25	20 à 25	
porositeit	n <sub>f</sub> [-]	0,35 à 0,40	0,35 à 0,40	0,35 à 0,40	
RESULTATEN VOLG	ENS FORMU	LES KLEIN BR	ETELER (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	
$\Lambda$ 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	Inleidi	ng	1					
2	Wijze waarop het stijghoogteverschil is bepaald							
3	Analys	se 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	Samer	watting	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.4Gemeten extreme integrale stijghoogteverschillen (berekend voor alle<br/>drukopnemer) (door de beperkte nauwkeurigheid kunnen de werkelijke waarden<br/>uit 1984 20 à 30% hoger liggen)
- Tabel E.5 Beordeling 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 (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.

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 fiktieve 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:

$$\phi = \frac{p}{\rho_w \cdot g} + z \tag{4.1}$$

 $\phi$  = stijghoogte [m]

 $p = druk [N/m^2]$ 

 $\rho_{\rm w}$  = dichtheid water,  $\rho_{\rm w}$ =1000 kg/m<sup>3</sup>

g = versnelling van de zwaartekracht, g=9,81 m/s

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 stijghoogtverschil "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):  $\Delta D = 0,60 \text{ m}$
- basalt (2003):  $\Delta D = 0,40 \text{ m}$
- Basalton (2003):  $\Delta D = 0,37 \text{ m}$

proef (t	ype, jaa	r,	H <sub>s</sub>	ξ <sub>op</sub>	<b>\$</b> w13%	<b>\$</b> w5%	<b>ф</b> <sub>w2%</sub>	<b>ф</b> w0,5%	ANAMOS
nummer)			[m]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	φ <sub>w</sub> [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<sub>s</sub>) 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<sub>s</sub> en de golfsteilheid s<sub>op</sub>=H<sub>s</sub>/L<sub>op</sub>. 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 leklengte 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 leklengte) 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 leklengte 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 opnemerparen 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 drukopnemerparen 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 drukopnemerparen 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 drukopnemerparen 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 leklengte, namelijk respectievelijk 0,44 en 0,54 m. Door dit verschil in leklengte zal er volgens ANAMOS inderdaad een verschil in stijghoogteverschil van ongeveer 5 à 10% zijn.



Figuur E.7 Verband tussen golfsteilheid en stijghoogteverschil  $\phi_{w2\%}$ 

#### 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:

<u>als  $H_{\underline{s}} \cdot T_{\underline{p}} > 6 \text{ ms}$ </u>

$$\frac{\phi_{w2\%}}{H_s} = 3,3 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{c_w^{3/2} \cdot \left(0,7 + \frac{4 \cdot k}{\sqrt{g \cdot D}}\right)}{g \cdot \sqrt{H_s \cdot T_p}}$$
(4.2)

<u>als H<sub>s</sub>·T<sub>p</sub> ≤6 ms</u>

$$\frac{\phi_{w2\%}}{H_s} = 0.8 \cdot \left(0, 7 + \frac{4 \cdot k}{\sqrt{g \cdot D}}\right)$$
(4.3)

- $\phi_{w2\%}$  = stijghoogteverschil met overschrijdingspercentage van 2%
- H<sub>s</sub> = 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  $\varphi_{w2\%}$  dus weinig toe met toenemende golfhoogte. Voor kleine golven, met  $H_s \cdot T_p < 6$  ms, is  $\varphi_{w2\%}$  evenredig met  $H_s$  en neemt het sterk toe met toenemende golfhoogte.

Alle proeven die in deze studie geanalyseerd zijn, zijn met  $H_s T_p > 6$  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 m<sup>2</sup> ( $\Delta$ ·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 <sub>s</sub> [m]	ξ <sub>ορ</sub> [-]	ф <sub>w2%</sub> [m]	φ <sub>w2%</sub> /(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 Beordeling 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 leklengte. De leklengte 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 leklengte 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,  $\Delta D$ , 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.











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  $\phi_{traag}$  en  $\phi_{toe}$  bij een beweging van 0,1D
- Tabel F.3 Berekende waarden van  $\phi_{traag}$  en  $\phi_{toe}$  bij een beweging van 0,25D

## I Methodiek

De sterkte van een steenzetting wordt bepaald door het eigen gewicht van de stenen ( $\Delta D$ ) 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):

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

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

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

met:

εD maximale blokbeweging, bijvoorbeeld 10% van de toplaagdikte (m) = Λ = relatieve volumieke massa van de steen (-) duur van de overbelaste situatie, dus de tijdsduur dat het stijghoogteverschil = to groter is dan het eigen gewicht plus wrijving en klemming (s) stijghoogteverschil dat overeenkomt met de invloed van de traagheid van een =  $\phi_{\text{traag}}$ bewegend blok (-) BL oppervlak van steen (m) = stijghoogteverschil over de toplaag (znder blokbeweging) (m) φ<sub>w</sub> = invloed van de klemkracht (-)  $\Gamma_{klem}$ = = stijghoogteverschil dat overeenkomt met de invloed van de toestroming naar φ<sub>toe</sub> 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  $\phi_{traag}$  en  $\phi_{toe}$  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  $\Gamma_{klem}$  is niet bekend, maar kan bepaald worden uit bovenstaand krachtenevenwicht. Het is immers de enige onbekende in formule (5.1):

$$\Gamma_{klem} = \frac{\phi_{w2\%} - \phi_{traag} - \phi_{toe}}{\Delta \cdot D \cdot \cos \alpha}$$
(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:  $\Delta D \cos \alpha = 0,576 \text{ m}$
- Basalt 2003:  $\Delta D \cos \alpha = 0,376 \text{ m}$

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

	$t_{\phi > 50\%}$ [s]				t <sub>φ&gt;75%</sub> [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 nauwkeurigheidsanalyse 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  $\phi_{traag}$  en  $\phi_{toe}$  zijn te berekenen als we weten hoelang de overbelaste situatie aanhield. Het gaat om de tijdsduur in de maatgevende golf dat  $\phi_w > \Gamma_{klem} \Delta D \cos \alpha$ .

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 ( $\mu$ ) ongeveer met de tijdsduur voor de  $\phi_{w2\%}$ overeenkomt. De standaardafwijking  $\sigma$  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:  $t_{\phi > 50\%} \approx 0.38 \text{ s}; t_{\phi > 75\%} \approx 0.24 \text{ s}$
- 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  $\phi_{traag}$  en  $\phi_{toe}$  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.

			met t	φ > 50%	met $t_{\phi} > 75\%$		
proef	Λ (m)	k' (m/s)	<b>\$</b> traag	<b>\$</b> toe	<b>\$</b> traag	ф <sub>toe</sub>	
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  $\phi_{traag}$  en  $\phi_{toe}$  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

			met t	<b>þ</b> > 50%	met $t_{\phi > 75\%}$		
proef	Λ (m)	k' (m/s)	<b>\$</b> traag	ф <sub>toe</sub>	<b>\$</b> traag	<b>\$</b> 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	

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

Tabel F.3 Berekende waarden van  $\phi_{traag}$  en  $\phi_{toe}$  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:  $\phi_w > \Gamma_{klem}\Delta Dcos\alpha$ . 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  $\Gamma_{klem}$  te bepalen gaat als volgt:

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

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

Stel  $\Gamma_{klem} = 1,2$ . Het stijghoogteverschil dat gelijk is aan eigen gewicht en klemkracht is dan  $\phi_w = \Gamma_{klem}\Delta D\cos\alpha = 1,2.0,376 = 0,45$  m. Er is vastgesteld dat er beginnende schade ontstaat tijdens proeven met een stijghoogteverschil  $\phi_{2\%-schade} \approx 0,89$  m. De waarde van  $\Gamma_{klem}\Delta D\cos\alpha$  is met de gegeven aanname ( $\Gamma_{klem} = 1,2$ ) gelijk aan 0,45, en dat is 50% van  $\phi_{2\%-schade} \approx 0,89$  m. Daarom moet gebruik gemaakt worden van  $t_{\phi > 50\%} \approx 0,29$  s voor de bepaling van  $\phi_{traag}$  en  $\phi_{toe}$ . In bovenstaande tabellen is te zien dat bij een kleine beweging van 0,1D geldt:  $\phi_{traag} + \phi_{toe} \approx 0,034 + 0,017 = 0,051$ . Voor de controle komen we dus uit op  $\phi_{2\%-schade} - \phi_{traag} - \phi_{toe} = 0,84$  en  $\Gamma_{klem}\Delta D\cos\alpha = 0,45$  m, hetgeen niet gelijk is. Daarom kan geconcludeerd worden dat de begin-aanname,  $\Gamma_{klem} = 1,2$ , onjuist is. De waarde van  $\Gamma_{klem}$  is groter.

Op deze wijze kan iteratief de juiste waarde van  $\Gamma_{klem}$  gevonden worden:

- Basalt 1984:  $\Gamma_{klem} = 1,2 \text{ à } 1,5$
- Basalt 2003:

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

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.

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

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

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  $\Gamma_{\text{klem}} \approx 1.7$  à 2,1 naar minstens  $\Gamma_{\text{klem}} > 2,0$  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 ( $\Gamma_{klem} = 1,7 \text{ à } 2,2$ ) 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).

# Bijlage G:

# Weinig geïnstrumenteerde proeven

## Inhoud bijlage G

#### Lijst van Figuren Lijst van Tabellen

1	Inlei	Inleiding	
2	Constructie-eigenschappen		1
	2.1	Basaltontalud	1
	2.2	Lage havendammen	1
3	Proe	fresultaten Basaltontalud (1983)	3
4	Proefresultaten Urk (2002)		4
5	Proe	Proefresultaten Ketelhaven (2002)	
6	Proefresultaten Havendam (2004)		5
7	Anal	yse	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 cm
  - schatting korrelgrootte van de filterlaag: 20-90 mm;  $D_{f15} \approx 25$  mm (schatting)
- Onderste filterlaag:
  - dikte van de filterlaag: b = 20 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:  $\rho_b = 2955 \text{ kg/m}^3$
- inwasmateriaal: steenslag 10-40 mm;  $D_{15} \approx 10$  mm
- dikte van de filterlaag: b = 20 cm
- korrelgrootte van de filterlaag: 18-40 mm;  $D_{f15} = 22 \text{ mm}$
- 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:  $\rho_b = 2955 \text{ kg/m}^3$
- inwasmateriaal: steenslag 10-40 mm;  $D_{15} \approx 10$  mm
- dikte van de filterlaag: b = 20 cm
- korrelgrootte van de filterlaag: 18-40 mm;  $D_{f15} = 22 \text{ mm}$
- 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:  $\rho_b = 2827 \text{ kg/m}^3$
- inwasmateriaal: steenslag 18-40 mm;  $D_{f15} = 22 \text{ mm}$
- dikte van de filterlaag: b = 10 cm
- korrelgrootte van de filterlaag: 18-40 mm;  $D_{f15} = 22 \text{ mm}$
- ondergrond: geotextiel en zandcementstabilistatie

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:  $H_s = 1,63 \text{ m}$
- 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:  $\xi_{op} = 2,10$
- relative 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 dijktaluds. 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:  $H_s = 1,09 \text{ m}$
- golfperiode bij de piek van het spectrum:  $T_p = 5,29$  s
- golfsteilheid:  $H_s/L_{op} = 0,025$
- brekerparameter:  $\xi_{op} = 2,22$
- relative 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 uitgelichtte 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 <sub>s</sub> [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 <sub>op</sub> [-]	0,027	0,028	0,025	0,025	0,025
ξ <sub>op</sub> [-]	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:  $\xi_{op} = 2,08$
- relative 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 <sub>s</sub> [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 <sub>op</sub> [-]	0,023	0,025	0,026	0,026	0,024	0,028
ξ <sub>op</sub> [-]	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 Basaltonzuil 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 dijktalud 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 <sub>s</sub> [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 <sub>c</sub> [m]	-0,01	0,01	0,01	0,02	0,42	0,48	0,52
s <sub>op</sub> [-]	0.029	0.030	0.030	0.030	0.029	0.029	0.028
ξ <sub>op</sub> [-]	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 stabieler 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 aantrillen 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 inperfecte 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.