



Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat

Dienst Weg- en Waterbouwkunde, TAW-A2

Reststerkte van dijkbekledingen

Granulaire filters

Verslag modelonderzoek in Scheldebak

deel II

Juli 1992



**GRONDMECHANICA
DELFT**



Reststerkte van dijkbekledingen

Granulaire filters

J.H. de Vroeg

Verslag modelonderzoek in Scheldebak

deel II

H 195/H 1490

1. Rapport nr. N 573	2. Serie nr. TAW-A2	3. Ontvanger catalogus nummer	
4. Titel en sub-titel Reststerkte van bekledingen. Gedrag van een filterlaag na initiële schade aan de toplaag		5. Datum rapport Juli 1992	
		6. Kode uitvoerende organisatie H195/H1490	
7. Schrijvers J.H. de Vroeg		8. Nr. rapport uitvoerende organisatie	
9. Naam en adres opdrachtnemer Waterloopkundig Laboratorium Voorsterweg 28, Marknesse Postbus 152 8300 AD Emmeloord		10. Projektnaam TAW*STEENZ	
		11. Kontaktnummer	
12. Naam en adres opdrachtgever Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde Postbus 5044 2600 GA Delft		13. Type rapport	
		14. Kode andere opdrachtgever	
15. Opmerkingen			
16. Referaat In een fysisch model is onderzoek gedaan naar een onderdeel van het bezwijkmechanisme van een steenzetting onder golfaanval. Het onderzoek was gericht op het gedrag van de filterlaag na initiële schade aan de toplaag. Voor dit gedrag zijn formules afgeleid.			
17. Trefwoorden Dijkbekleding, steenzetting, reststerkte		18. Distributie systeem	
19. Classificatie vrij toegankelijk	20. Classificatie deze pagina	21. Aantal blz.	22. Prijs

INHOUD

LIJST VAN TABELLEN

LIJST VAN FIGUREN

LIJST VAN FOTO'S

LIJST VAN SYMBOLEN

	blz.
1. <u>Inleiding</u>	1
1.1 Doel van het onderzoek	1
1.2 Opdracht	2
2. <u>Samenvatting en conclusies</u>	3
2.1 Samenvatting	3
2.2 Conclusies	5
3. <u>Beschrijving van de proeven</u>	8
3.1 Inleiding	8
3.2 Modelopstelling	8
3.3 Proevenprogramma	10
4. <u>Beschrijving van de proefresultaten</u>	12
4.1 Proef 1	12
4.2 Proef 2	13
4.3 Proef 3	15
4.4 Proef 4	15
4.5 Proef 5	16
4.6 Proef 6	18
4.7 Proef 7	19
4.8 Proef 8	21
4.9 Proef 9	22
4.10 Golfoploop	23
5. <u>Modellering van gedrag filterlaag</u>	24
5.1 Inleiding	24
5.2 Modelparameters	24
5.3 Invloed van het aantal golven	26
5.4 Invloed van de golfhoogte	26
5.5 Invloed van de golfsteilheid	27

INHOUD (vervolg)

	blz.	
5.6	Invloed van de golfrichting	28
5.7	Invloed van de gatgrootte	29
5.8	Invloed van de ligging van het gat t.o.v. de waterlijn	30
5.9	Invloed van de diameter van het filtermateriaal	31
5.10	Invloed van losse blokjes in de gaten	31
5.11	Evaluatie van het gedrag van de filterlaag bij grote gaten . . .	32
5.12	Overgangsconstructies	35
6.	<u>Formules voor het gedrag van de filterlaag</u>	37
7.	<u>Evaluatie en suggesties voor verder onderzoek</u>	45
7.1	Evaluatie	45
7.2	Suggesties voor verder onderzoek	47

REFERENTIES

TABELLEN

FIGUREN

FOTO'S

APPENDIX I: (Reken-)voorbeeld reststerktemodel

LIJST VAN TABELLEN

3.1 Proevenprogramma

4.1 Golfoploop voor loodrechte en scheve golfaanval

5.1 Gemeten dwarsdiameters B_d erosiekuilen

5.2 Met BREAKWAT berekende waarden voor $(B_o + B_g)$ en D_o voor grote gaten

5.3 Met vergelijking (5.1) berekende langstransporten bij grote gaten onder scheve golfaanval

5.4 Met BREAKWAT berekende hoeveelheden uitgespoeld filtermateriaal bij grote gaten onder loodrechte golfaanval

5.5 Totale hoeveelheden uitgespoeld filtermateriaal bij grote gaten (langs- en dwarstransport)

LIJST VAN FIGUREN

- 1.1 Definitie schets

- 3.1 Proefopstelling reststerkte filters in Scheldebak
- 3.2 Gaten in proefopstelling
- 3.3 Illustratie peiling van filterlaag
- 3.3 Zeefkrommen filtermateriaal
- 3.5 Gaten in toplaag voor proef 1 en 2, loodrechte golfaanval
- 3.6 Gaten in toplaag voor proef 1 en 2, hoek van golfaanval 40
- 3.7 Gaten in toplaag voor proef 1 en 2, hoek van golfaanval 70
- 3.8 Gaten in toplaag voor proef 3, 4, 5, 6, 9, loodrechte golfaanval
- 3.9 Gaten in toplaag voor proef 3, 4, 5, 6, 9, hoek van golfaanval 40
- 3.10 Gaten in toplaag voor proef 3, 4, 5, 6, 9, hoek van golfaanval 70
- 3.11 Gaten in toplaag voor proef 7, loodrechte golfaanval
- 3.12 Gaten in toplaag voor proef 7, hoek van golfaanval 40
- 3.13 Gaten in toplaag voor proef 7, hoek van golfaanval 70
- 3.14 Gaten in toplaag voor proef 8, loodrechte golfaanval
- 3.15 Gaten in toplaag voor proef 8, hoek van golfaanval 40
- 3.16 Gaten in toplaag voor proef 8, hoek van golfaanval 70

- 4.1 Ondermijning toplaag bij proef 2, loodrechte aanval
- 4.2 Ondermijning toplaag bij proef 2, 40° aanval
- 4.3 Ondermijning toplaag bij proef 2, 70° aanval
- 4.4 Ondermijning toplaag bij proef 3, loodrechte aanval
- 4.5 Ondermijning toplaag bij proef 3, 40° aanval
- 4.6 Ondermijning toplaag bij proef 3, 70° aanval
- 4.7 Ondermijning toplaag bij proef 4, loodrechte aanval
- 4.8 Ondermijning toplaag bij proef 4, 40° aanval
- 4.9 Ondermijning toplaag bij proef 4, 70° aanval
- 4.10 Ondermijning toplaag bij proef 5, loodrechte aanval
- 4.11 Ondermijning toplaag bij proef 5, 40° aanval
- 4.12 Ondermijning toplaag bij proef 5, 70° aanval
- 4.13 Ondermijning toplaag bij proef 6, loodrechte aanval
- 4.14 Ondermijning toplaag bij proef 6, 40° aanval
- 4.15 Ondermijning toplaag bij proef 6, 70° aanval
- 4.16 Ondermijning toplaag bij proef 7, loodrechte aanval
- 4.17 Ondermijning toplaag bij proef 7, 40° aanval
- 4.18 Ondermijning toplaag bij proef 7, 70° aanval

LIJST VAN FIGUREN (vervolg)

- 4.19 Ondernijning toplaag bij proef 8, loodrechte aanval
- 4.20 Ondernijning toplaag bij proef 8, 40° aanval
- 4.21 Ondernijning toplaag bij proef 8, 70° aanval
- 4.22 Ondernijning toplaag bij proef 9, loodrechte aanval
- 4.23 Ondernijning toplaag bij proef 9, 40° aanval
- 4.24 Ondernijning toplaag bij proef 9, 70° aanval
- 4.25 Golfoploop, hoek 40° en 70°, $H_s = 0,20$ m, $s_{op} = 0,04$
- 4.26 Golfoploop, hoek 40° en 70°, $H_s = 0,24$ m, $s_{op} = 0,04$
- 4.27 Golfoploop, hoek 40° en 70°, $H_s = 0,15$ m, $s_{op} = 0,02$

- 5.1 Illustratie parameters gebruikt voor modellering
- 5.2 Relatie tussen D_o en $(B_o + B_g)$
- 5.3 Relatie tussen B_d en $(B_o + B_g)$
- 5.4 Relatie $B_o - N$ voor verschillende H_s , loodrechte aanval
- 5.5 Relatie $B_o - N$ voor verschillende H_s , 40° aanval
- 5.6 Relatie $B_o - N$ voor verschillende H_s , 70° aanval
- 5.7 Relatie $B_o - N$ voor verschillende s_{op} , loodrechte aanval
- 5.8 Relatie $B_o - N$ voor verschillende s_{op} , 40° aanval
- 5.9 Relatie $B_o - N$ voor verschillende s_{op} , 70° aanval
- 5.10 Effekt van D_{50} en losse blokjes op B_o , loodrechte aanval
- 5.11 Effekt van D_{50} en losse blokjes op B_o , 40° aanval
- 5.12 Effekt van D_{50} en losse blokjes op B_o , 70° aanval
- 5.13 Relatie $D_o - N$ voor verschillende H_s , loodrechte aanval
- 5.14 Relatie $D_o - N$ voor verschillende H_s , 40° aanval
- 5.15 Relatie $D_o - N$ voor verschillende H_s , 70° aanval
- 5.16 Relatie $D_o - N$ voor verschillende s_{op} , loodrechte aanval
- 5.17 Relatie $D_o - N$ voor verschillende s_{op} , 40° aanval
- 5.18 Relatie $D_o - N$ voor verschillende s_{op} , 70° aanval
- 5.19 Effekt van D_{50} en losse blokjes op D_o , loodrechte aanval
- 5.20 Effekt van D_{50} en losse blokjes op D_o , 40° aanval
- 5.21 Effekt van D_{50} en losse blokjes op D_o , 70° aanval
- 5.22 Grindprofielen berekend met BREAKWAT
- 5.23 Effekt overgangsconstructie op erosiediepte D_o

- 6.1 Relatie tussen B_o/B_g en $H_s/(B_g\sqrt{s_{op}})$, onderscheid naar s_{op}
- 6.2 Relatie tussen B_o/B_g en $H_s/(B_g\sqrt{s_{op}})$, onderscheid naar d_g

LIJST VAN FIGUREN (vervolg)

- 6.3 Schematizatie van gemeten relatie tussen B_o/B_g en $H_s/(B_g\sqrt{s_{op}})$, voor $\frac{H_s}{B_g\sqrt{s_{op}}} > 3$
- 6.4 Relatie tussen ligging "draaipunt" en aantal golven N
- 6.5 Relatie tussen richtingscoeff. lijnen en aantal golven N
- 6.6 Relatie tussen richtingscoeff. lijnen en $(d_g\sqrt{s_{op}})/H_s$
- 6.7 Berekende waarden van $\frac{B_o}{B_g}$ voor de proeven
- 6.8 Vergelijking gemeten en berekende ondermijning diameter
- 6.9 Aanvulling van metingen met resultaten BREAKWAT berekeningen

LIJST VAN FOTO'S

- 4.1 Steenzetting met gat in proef 5
- 4.2 Verzakking toplaag na 1000 golven, proef 5
- 4.3 Eindsituatie toplaag onder 70° , proef 5
- 4.4 Eindsituatie toplaag onder 40° , proef 5
- 4.5a t/m c Losse blokken in gat bij proef 6
- 4.6 Uitspoeling zand bij 40° aanval, proef 8
- 4.7 Uitspoeling zand bij 70° aanval, proef 8

LIJST VAN SYMBOLEN

- B_d Dwarsdiameter erosiekuil
- B_g Diameter van gat in toplaag, gemeten in opwaartse richting langs talud
- B_o Ondernijningsdiameter
- d_g Afstand onderkant gat in toplaag t.o.v. SWL, gemeten langs talud, positief opwaarts
- d_o Afstand van onderkant erosiekuil t.o.v. SWL, gemeten langs talud, positief opwaarts
- D_o Erosiediepte, d.w.z. maximale diepte in erosiekuil
- D_{f50} Diameter van filtermateriaal welke door 50% (gewicht) wordt onderscheiden
- H_s Significante golfhoogte
- N Aantal golven
- s_{op} Golfsteilheid, op basis van piekperiode van golfspectrum
- α Hellingshoek talud
- β Hoek van golfaanval, ten opzichte van de normaal op het talud

1. Inleiding

1.1 Doel van het onderzoek

Dit rapport vormt een onderdeel van de studie naar de stabiliteit van talud-bekledingen onder golfaanval, uitgevoerd in het kader van TAW-A2. De opbouw van een dergelijke bekleding kan verschillend zijn. Het in dit rapport beschreven onderzoek richt zich op een steenzetting bestaande uit een toplaag van gezette blokken op een filterlaag van mijnsteen, zie figuur 1.1a.

Er bestaat een redelijk inzicht in het bezwijkmechanisme van een steenzetting (zie [1]), maar belangrijke fasen in dit proces zijn nog niet goed kwantitatief te beschrijven. Het bezwijkproces kan globaal als volgt worden samengevat:

- Fase 1: Het ontstaan van initiële schade aan de toplaag (via het uitlichten van één of meerdere stenen).
- Fase 2: Ondermijning van de toplaag door uitspoeling van de bovenste laag van het filter, zie figuur 1.1b.
- Fase 3: Verder instorten van de toplaag als de ondermijning te groot wordt. Hierdoor ontstaat een groter gat.
- Fase 4: Verder uitspoelen van filtermateriaal en opnieuw ondermijning van de toplaag.
- Fase 5: Het voorgaande kan zich in enkele stappen herhalen, waarbij het gat in de toplaag sprongsgewijs groeit. Op een zeker moment kan de filterlaag zo ver zijn geërodeerd dat de kern van de dijk aan de golfaanval wordt blootgesteld. Op dat moment kan worden gesteld dat de steenzetting (lokaal) is bezweken.

Alhoewel varianten op dit proces mogelijk zijn, is bij de opzet van de studie van het bovenbeschreven mechanisme uitgegaan. De aandacht is daarbij geheel gericht op het gedrag van de filterlaag. Het is van belang te weten of bij een bepaald gat in de toplaag en onder bepaalde golfcondities de filterlaag zover erodeert dat de kern van de dijk aan golfwerking wordt blootgesteld. Indien dat bij kleine gaten in de toplaag nog niet optreedt, kan dat via het bovenbeschreven ondermijningsmechanisme uiteindelijk bij grotere gaten in de toplaag wel optreden. Derhalve is informatie omtrent het gedrag van het filtermateriaal zowel in de breedte (ontwikkeling van het oppervlak van de erosiekuil) als in de diepte (ontwikkeling van de diepte van de erosiekuil) gewenst.

Indien alle stappen in het bovenbeschreven bezwijkmechanisme te kwantificeren zijn, zal het mogelijk zijn de "reststerkte" van een steenzetting te bepalen. Onder reststerkte wordt verstaan de tijdsduur tussen het ontstaan van initiële schade aan de toplaag en het moment dat de kern onder de filterlaag aan directe golfaanval wordt blootgesteld. De in dit rapport beschreven studie vormt dus een onderdeel in het bepalen van deze reststerkte.

Modelproeven zijn uitgevoerd om te komen tot een beter inzicht in het gedrag van de filterlaag. Een eerste aanzet hiertoe werd reeds gegeven in [1]. Uit overleg met de projectgroep TAW-A2 volgde een plan van onderzoek dat zeer specifiek was gericht op het gedrag van de filterlaag na initiële schade aan de toplaag.

Zo verviel een aanvankelijk idee om te beginnen met een volledige steenzetting om zodoende de ontwikkeling van toplaag en filter gelijktijdig te onderzoeken. In plaats daarvan werd besloten om verschillende gaten in de toplaag gefixeerd te houden, en de aandacht te richten op de bij deze gaten optredende schade in de filterlaag.

Tevens werd geconstateerd dat de proeven niet goed te combineren waren met golfdrukmetingen onder scheve golfaanval, zodat ook dit niet in het programma werd opgenomen. Wel werd de golfoploop gemeten voor scheve golfaanval.

Tevens volgde uit dit overleg dat behoefte bestond aan inzicht in het effect van de aanwezigheid van losse stenen (afkomstig uit de toplaag) in een gat en het effect van een overgangsconstructie boven een gat.

1.2 Opdracht

Op basis van de offerte HK4214/H195.12/hm (23 mei 1991) werd in brief WB/BX 912803 (21 juni 1991) opdracht verleend tot het uitvoeren van de studie. Voor Rijkswaterstaat trad ir. B.P. Rigter van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde op als projectleider. Het onderzoek werd uitgevoerd door dr.ir. J.W. van der Meer, ir. M. Klein Breteler en ir. J.H. de Vroeg van het Waterloopkundig Laboratorium. Dit rapport is geschreven door ir. J.H. de Vroeg.

De proeven zijn uitgevoerd in "de Scheldebak" van het Waterloopkundig Laboratorium, vestiging de Voorst.

2. Samenvatting en conclusies

2.1 Samenvatting

Onderzoek is uitgevoerd naar een onderdeel van het bezwijkmechanisme van een steenzetting onder golfaanval (figuur 1.1). Het onderzoek was gericht op het gedrag van de filterlaag na initiële schade aan de toplaag. Uitgaande van gaten in de toplaag met gefixeerde ligging en grootte, is bekeken in welke mate verdere ondermijning van de toplaag optreedt, en hoe diep de erosiekuil in de filterlaag wordt. Beide ontwikkelingen in de filterlaag zijn van belang voor het beoordelen van de reststerkte van een steenzetting. Onder reststerkte wordt verstaan de tijdsduur tussen het ontstaan van initiële schade aan de toplaag tot het moment dat de kern onder de filterlaag aan directe golfaanval wordt blootgesteld.

De resultaten van het onderzoek leveren een bijdrage aan het beschrijven van de bovenbeschreven essentiële fase in het bezwijkmechanisme. Om te komen tot een model voor het bepalen van de werkelijke reststerkte is extra informatie vereist in de vorm van een kritieke ondermijningsdiameter waarbij de toplaag verder instort. In dat geval kan een model worden opgezet waarbij (bij gegeven golfcondities) de gatgroei in de toplaag (na het ontstaan van initiele schade) en de groei van de erosiediepte worden gesimuleerd als functie van het aantal golven.

Het onderzoek is uitgevoerd in de vorm van modelproeven. De proefopstelling en de condities waren zodanig gekozen dat de resultaten naar prototype kunnen worden vertaald via een schaalfactor van 5 à 20. In een golfbasin waren 3 taluds aangebracht, alle met dezelfde helling van 1:3 maar met een verschillende richting ten opzichte van de inkomende golven (figuur 3.1). Op deze wijze konden de gevallen van loodrechte golfaanval, 40° golfaanval en 70° golfaanval simultaan worden getest.

In elk talud waren telkens 4 verschillende gaten aanwezig. Deze gaten in de toplaag werden gesimuleerd met rechthoekige gaten uitgesneden uit perspex platen, variërend van 0,01 m² tot 0,96 m², zie figuur 3.2. Onder de perspex platen waren bakken met filtermateriaal aangebracht tot zodanig grote afstanden van de gesimuleerde gaten dat grote ondermijningen (minimaal tot 0,30 m, model) mogelijk waren. Door het gebruik van perspex platen op deze bakken, kon de ontwikkeling van het filter goed worden gevolgd.

De volgende factoren welke het gedrag van de filterlaag kunnen beïnvloeden zijn beschouwd (modelwaarden):

- Aantal golven ($N = 250/1000/5000$)
- Golfhoogte ($H_s = 0,15 \text{ m}/0,20 \text{ m}/0,24 \text{ m}$)
- Golfsteilheid ($s_{op} = 0,04/0,02$)
- Golfrichting ($\beta = 0^\circ/40^\circ/70^\circ$)
- Gatgrootte in de toplaag ($0,01 \text{ m}^2/0,06 \text{ m}^2/0,24 \text{ m}^2/0,96 \text{ m}^2$)
- Ligging van het gat t.o.v. de waterlijn ($d_g = 0 \text{ m}/-0,36 \text{ m}$)
- Steenafmetingen van het filtermateriaal ($D_{f50} = 2,37 \text{ mm}/5,22 \text{ mm}$)
- Aanwezigheid van losse blokken in het gat
- Aanwezigheid van een overgangsconstructie boven het gat

In totaal zijn 9 proeven uitgevoerd, met voor elke proef een total duur van 5000 golven. Na 250, 1000 en 5000 golven werden de omtrek en de diepte van de erosiekuil gemeten.

Voor de $0,01 \text{ m}^2$ en de $0,06 \text{ m}^2$ gaten waren alle meetresultaten goed bruikbaar. Voor de grotere $0,24 \text{ m}^2$ en $0,96 \text{ m}^2$ gaten spoelden de bakken met filtermateriaal tijdens de proeven nagenoeg leeg, zodat relevante parameters niet of slechts voor een beperkt aantal golven uit de resultaten konden worden afgeleid. Het gedrag van het filter onder de grote gaten is geëvalueerd met bestaande formules voor grindstranden (voor zowel de ontwikkeling in dwarsrichting als de transporten in langsrichting). Door de invloed van langstransport erodeerde het filter bij deze grote gaten sneller onder scheve golfaanval dan onder loodrechte golfaanval. Het verschil in de uitgespoelde hoeveelheid grind bij 40° en 70° golfaanval was in het algemeen gering. Uit de evaluatie volgde dat in de beginfase van erosie het grootste deel van het uitgespoelde filtermateriaal via dwarstransport wordt afgevoerd, terwijl op de langere termijn (orde duizenden golven) de bijdrage van het langstransport gaat overheersen.

Uit de proefresultaten zijn relaties afgeleid voor de ondermijningsdiameter B_o en de erosiediepte D_o (figuur 5.1).

2.2 Conclusies

Vooraf wordt opgemerkt dat de gevonden relaties zijn gebaseerd op een beperkt aantal metingen. Sommige resultaten bij een aantal proeven lijken niet in een verband te passen, en het inzicht in de reproduceerbaarheid van de proeven is beperkt. Dit betekent dat vooralsnog de nodige voorzichtigheid moet worden betracht met het gebruik van de relaties. Met het oog hierop verdient het aanbeveling om op basis van de verkregen relaties een beperkt proevenprogramma te definiëren ter controle van het verkregen resultaat.

Bij alle gaten vond een naar boven gerichte uitbreiding van de erosie plaats. De onderkant van de erosiekuil viel altijd nagenoeg samen met de onderkant van het gat in de toplaag (zie b.v. figuur 4.1). Ook als zich een overgangsconstructie net boven het gat in de toplaag bevond, breidde de erosiekuil zich nauwelijks beneden het gat in de toplaag uit.

De ondermijningsdiameter B_o bleek voornamelijk afhankelijk te zijn van:

- het aantal golven N
- de golfhoogte H_g
- de golfsteilheid s_{op}
- de golfrichting β
- de grootte van het gat in de toplaag B_g
- de ligging van het gat t.o.v. de waterlijn d_g .

De grootte van het filtermateriaal (D_{f50}) en de aanwezigheid van losse blokjes in de gaten hadden weinig effect.

Een relatie kon worden afgeleid tussen de ondermijningsdiameter B_o en de bovengenoemde relevante parameters. Via een correlatie tussen de erosiediepte D_o en de ondermijningsdiameter B_o kon tevens de erosiediepte worden beschreven.

Bij het afleiden van relaties voor B_o is gebruik gemaakt van dimensieloze parameters. Er bleek een redelijk lineair verband te bestaan tussen de volgende twee dimensieloze parameters (zie Figuren 6.1 en 6.2):

B_o/B_g = De verhouding tussen de ondermijningsdiameter en de diameter van het gat in de toplaag.

$H_g/(B_g\sqrt{s_{op}})$ = Parameter voor het beschrijven van de invloed van de golfhoogte en de golfsteilheid. Deze parameter geeft een maat voor de golfaanval per eenheid van gatgrootte.

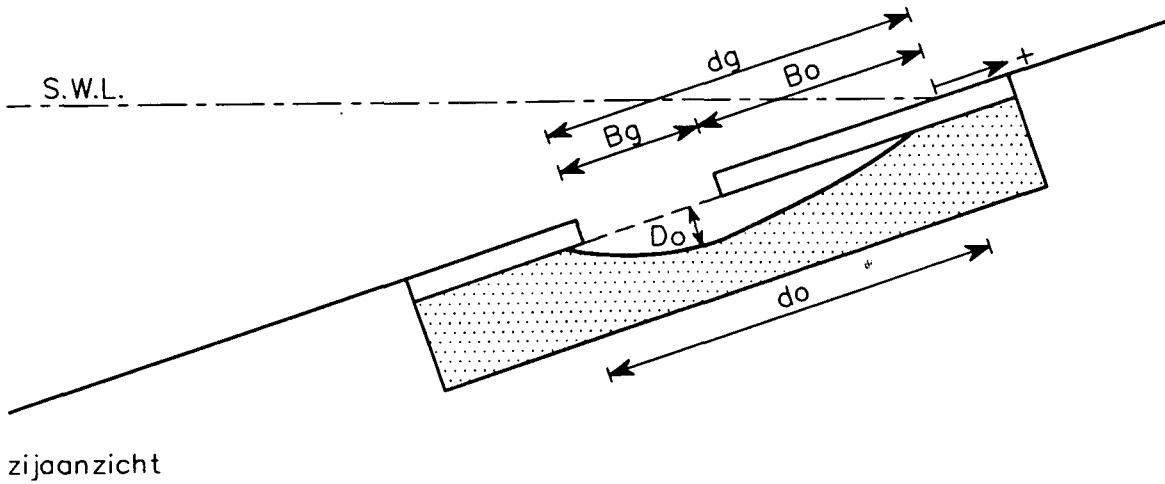


Figure 5.1 Illustratie parameters gebruikt voor modellering

De resultaten van de proeven kunnen worden samengevat in de onderstaande relaties.

(Zie voor een verklaring van de symbolen de lijst van symbolen en Figuur 5.1).

Er is onderscheid gemaakt tussen situaties waarvoor geldt $H_s / (B_g \sqrt{S_{op}}) > 3$ (het domein van de kleine tot middelgrote gaten) en die waarvoor geldt $H_s / (B_g \sqrt{S_{op}}) \leq 3$ (het domein van de zeer grote gaten). Bij de kleine tot middelgrote gaten hebben de plaats en de afmeting van het gat in de toplaag invloed op de ontwikkeling van de filtererosie.

Als $\frac{H_s}{B_g \sqrt{S_{op}}} > 3$ en $\beta < 20^\circ$:

$$\frac{B_o}{B_g} = 0,49N^{0,14} + (0,16 + 5 \cdot 10^{-5}N) e^{-0,08\sqrt{N} \left(\frac{d_g \sqrt{S_{op}}}{H_s} + 0,39 \right)^2} \left[\frac{H_s}{B_g \sqrt{S_{op}}} - 3 \right] \quad (6.4)$$

Als $\frac{H_s}{B_g \sqrt{S_{op}}} > 3$ en $\beta > 20^\circ$:

$$\frac{B_o}{B_g} = 0,49N^{0,14} + (0,28 + 3 \cdot 10^{-5}N) e^{-22 \left(\frac{d_g \sqrt{S_{op}}}{H_s} + 0,39 \right)^2} \left[\frac{H_s}{B_g \sqrt{S_{op}}} - 3 \right] \quad (6.5)$$

Als $\frac{H_s}{B_g \sqrt{S_{op}}} \leq 3$:

$$\frac{B_o}{B_g} = 0,28N^{0,14} \sqrt{\frac{H_s}{B_g \sqrt{S_{op}}}} \quad (6.6)$$

Algemene relaties zijn afgeleid voor de dwarsdiameter B_d en de erosiediepte D_o van de erosiekuil (zie Figuur 5.1).

$$\frac{B_d}{B_g} = 0,9 \cdot \left(1 + \frac{B_o}{B_g}\right) \quad (6.7)$$

$$\frac{D_o}{B_g} = 0,135 \cdot \left(1 + \frac{B_o}{B_g}\right) \quad (6.8)$$

De gevonden relaties gelden niet voor gaten net onder een overgangsconstructie. Bij deze gaten treedt weinig ondermijning van de omliggende toplaag op. De erosiediepte is echter wel een orde 2 groter dan de erosiediepte bij gaten zonder overgangsconstructie.

Met de afgeleide formules kan een gedeelte van de reststerkte worden beschreven. Om te komen tot een volledig model voor het bepalen van de reststerkte, is extra informatie in de vorm van een kritieke ondermijnings-diameter vereist. Deze kennis is noodzakelijk om de groei van het gat in de toplaag te kunnen voorspellen (de grootte van het gat in de toplaag is van zeer groot belang voor de mate van erosie van het filtermateriaal). Aanbevolen wordt dan ook om studie te verrichten naar de kritieke ondermijningsdiameter. Vervolgens kan een numeriek rekenmodel worden opgezet voor het bepalen van de reststerkte van een steenzetting. De stappen in een dergelijk rekenmodel zijn geïllustreerd in Appendix I.

3. Beschrijving van de proeven

3.1 Inleiding

Bij de opzet van de proeven stond het gedrag van de filterlaag centraal. Derhalve zijn de proeven uitgevoerd voor een aantal gaten in de toplaag met constante grootte. Slechts bij enkele proeven (proef 5, 6, 7 en 8) is tevens getracht om meer inzicht te verkrijgen in de ontwikkeling van schade in de toplaag.

De keuze van de golfhoogten en het filtermateriaal is zodanig gemaakt dat de resultaten kunnen worden vertaald met een schaalfactor in de range van 5 tot 20. Bij het beschrijven van de modelopstelling en de proefresultaten zijn alleen de modelwaarden gebruikt. Om naar de praktijk te vertalen moeten alle lengtematen met een factor 5 tot 20 worden vermenigvuldigd.

3.2 Modelopstelling

Een overzicht van de modelopstelling is gegeven in figuur 3.1.

De proeven zijn uitgevoerd in de 22 x 35 m² grote Scheldebak, met een totale breedte van het golfschot van 14 m. Deze breedte is door middel van scheidingswanden opgedeeld in 3 sekties. In de drie sekties zijn taluds onder een verschillende hoek ten opzichte van de inkomende golf aangebracht, zodat het effect van scheve golfaanval voor drie richtingen (0°, 40° en 70° ten opzichte van de normaal op het talud) simultaan kon worden onderzocht. In elk talud zijn telkens vier verschillende gaten tegelijkertijd onderzocht. Bij de taluds welke scheef liggen ten opzichte van de golfaanval zijn de gaten op grotere onderlinge afstanden aangebracht dan bij het talud onder loodrechte golfaanval. Dit is gedaan om beïnvloeding van de gaten onderling zoveel mogelijk te vermijden. Deze beïnvloeding zou bij scheve golfaanval op een talud kunnen plaatsvinden via beïnvloeding van de golfoploop door de omliggende gaten of via langstransport van filtermateriaal. De breedte van de verschillende sekties was zodoende bepaald door de onderlinge afstand van de gaten en de oriëntatie van de taluds ten opzichte van de golfaanval.

De proeven zijn alle uitgevoerd voor een talud van 1:3. De beschouwde taludbekledingen komen vaak voor op taluds van 1:3 à 1:4. Het voordeel van het onder-

zoeken van een talud van 1:3 is dat de constructie minder ruimte in de golfbak in beslag neemt. Bovendien kan worden verwacht dat bij een 1:3 talud een grotere erosiediepte in de filterlaag ontstaat dan bij een flauwer 1:4 talud.

In het talud waren 150 mm diepe bakken aangebracht voor het filtermateriaal, zie figuur 3.2. Deze bakken waren afgedekt met perspex platen, waarin de te onderzoeken gaten waren aangebracht. Het perspex was 25 mm dik.

In het perspex was in eerste instantie tevens een rooster van kleine gaatjes rond 6 mm geboord, om de 40 mm. Deze gaatjes werden aangebracht om de juiste doorlatendheid van de zetting te bewerkstelligen. Na de eerste proef zijn de meeste gaatjes boven de waterlijn echter dicht gemaakt, hetgeen zal worden toegelicht in hoofdstuk 4.

Voor het filtermateriaal werd grind gebruikt. Dit bevat niet de enigszins cohesieve eigenschap welke mijnsteen wel kan hebben. Bovendien is het grind wat ronder dan mijnsteen. Hierdoor kunnen de resultaten uit de proeven wat conservatief zijn.

De omtrek van de bak werd bepaald door de verwachte gatgroei in de filterlaag. Om hiervan een indruk te krijgen was vóór de bouw van de opstelling een indicatieve proef gedaan met een proefbakje in de Scheldegoot. In het proefbakje was fijn grind aangebracht, afgedekt met een laag perspex. In het perspex was een gat van 0,06 m² aangebracht. Het bakje was onder een talud in de goot gezet en met een klein aantal golven (orde 50) aangevallen. Uit dit principeproefje bleek dat perspex noodzakelijk was om een goed beeld te krijgen van wat zich onder de afdekplaat afspeelt. Ook werd duidelijk dat het materiaal vrij snel van bovenaf werd getransporteerd en onder de waterlijn kwam te liggen onder een flauw talud. De boven het gat aanwezige perspex rand met een breedte van 0,20 m bleek te klein, want de bovenkant van de filterbak kwam reeds bloot te liggen na dit kleine aantal golven. Op basis van deze gegevens werd besloten om de bovenrand van de filterbak hoger te leggen. Deze bovenrand moest minimaal 0,50 m boven de waterlijn liggen (gemeten langs het talud); daarbij moest de afstand tussen de bovenrand van het gat en de bovenrand van de filterbak minimaal 0,30 m zijn. Indien deze rand via een schaalfactor van de orde 10 naar prototype wordt vertaald, volgt hieruit dat in een deze opstelling vrije overspanningen van orde 3 m mogelijk waren. Het creëren van nog meer ruimte boven de gaten leek dan ook niet zinvol, omdat dergelijke grote overspanningen zeer waarschijnlijk zullen instorten, waarna een groter gat in de toplaag aanwezig is.

Op basis van deze filosofie zijn gaten van verschillende grootte in de toplaag beschouwd, namelijk 0,01 m², 0,06 m², 0,24 m² en 0,96 m². Zodoende kunnen de resultaten gebruikt worden om een uitbreidend gat in de toplaag te beschrijven.

Voor het bestuderen van de filtererosie gelden eenvoudige schaalregels:

$$n_T = \sqrt{n_L}$$

$$n_H = n_L$$

$$n_{Df50} = n_L$$

met:

$$n_L = \text{lengteschaal van het model}$$

$$n_T = \text{tijdschaal}$$

$$n_H = \text{golfhoogteschaal}$$

$$n_{Df50} = \text{korreldiameterschaal}$$

Verder is het vereist dat $D_{f90} > 6$ mm (in het model) in verband met schaalearfen.

3.3 Proevenprogramma

Het aantal uitgevoerde proeven bedroeg 9. Het proevenprogramma is gepresenteerd in tabel 3.1. In deze tabel wordt tevens verwezen naar de verschillende figuren (figuur 3.4 t/m 3.15) waarin de ligging van de gaten is aangegeven.

De volgende factoren welke de reststerkte van de filterlaag kunnen beïnvloeden zijn beschouwd:

- Aantal golven (stormduur);
- Golfhoogte;
- Golfsteilheid;
- Golfrichting;
- Grootte van het gat in de toplaag;
- Ligging van het gat t.o.v. de waterlijn;
- Steenafmetingen in de filterlaag;
- Aanwezigheid van losse blokken in het gat;
- Aanwezigheid van een overgangsconstructie boven het gat in de toplaag.

Voor alle proeven is de waterdiepte constant gehouden op 0,70 m.

Er zijn 9 proeven uitgevoerd. Tijdens elke proef is in elk gat het profiel van de filterlaag gepeild na 250, 1000 en 5000 golven.

De grootte van de gaten in de toplaag varieerde tussen $0,01 \text{ m}^2$ en $0,96 \text{ m}^2$. Na 250, 1000 en 5000 golven werd het profiel van de filterlaag bepaald. Voor de gaten kleiner of gelijk aan $0,06 \text{ m}^2$ werd de peiling uitgevoerd in 3 meetraaien: 2 raaien van boven naar beneden aan de beide zijanten van het gat in de toplaag, en 1 raai van boven naar beneden in het midden van het gat. Voor de gaten groter dan $0,06 \text{ m}^2$ werd gepeild in 4 raaien: 2 raaien van boven naar beneden aan de beide zijanten van het gat in de toplaag, en 2 raaien van boven naar beneden rond het midden van het gat.

De onderlinge afstand van de peilingen in een raai was in alle gevallen $0,04 \text{ m}$, zie figuur 3.3.

Bovendien werd op enkele punten langs het gat de omtrek van de kuil in het filter gemeten. In het geval dat de kuil lokaal de wand van de filterbak raakte, werd de daling van de filterlaag bij deze wand gemeten.

Na 250, 1000 en 5000 golven is bij alle gaten de omtrek van de ersoiekuil op de perspex platen getekend. Vervolgens is een foto gemaakt van de getekende omtrekken. Door deze gefotografeerde kuilvorm te combineren met de gemeten omtrekwaarden, kon achteraf de erosieontwikkeling goed worden vastgesteld.

Vrijwel alle proeven zijn uitgevoerd met filtermateriaal gekarakteriseerd door:

$$D_{f10} = 1,01 \text{ mm};$$

$$D_{f50} = 2,37 \text{ mm};$$

$$D_{f90} = 7,08 \text{ mm}.$$

Er is één proef uitgevoerd met grover filtermateriaal:

$$D_{f10} = 1,63 \text{ mm};$$

$$D_{f50} = 5,22 \text{ mm};$$

$$D_{f90} = 11,25 \text{ mm}.$$

De zeefkrommen van beide filters zijn gepresenteerd in figuur 3.4.

Alhoewel niet van direkt belang voor dit onderzoek is op de taluds onder scheve golfaanval de golfoploophoogte gemeten met een stappenbaak. Voor een talud 1:3 onder scheve golfaanval waren nog niet eerder olopmetingen verricht.

4. Beschrijving van de proefresultaten

4.1 Proef 1

Voor de condities bij deze proef wordt verwezen naar tabel 3.1.

Uit deze proef bleek dat de vervorming van de grote gaten ($0,96 \text{ m}^2$) na 250 golven al aanzienlijk was. De bakken onder de grotere gaten waren al snel voor een groot deel leeg. Vooral bij golfaanval van 40° bleek het filtermateriaal zeer snel uit de grote gaten te worden gespoeld. Onder deze hoek van golfaanval speelt het transport van filtermateriaal in langsrichting van het talud een belangrijke rol. Bij een golfrichting van 70° is de aanval minder omdat vrijwel van een strijkgolf sprake is.

Bij loodrechte aanval is er veel minder gelegenheid voor een groot gat om zich in de breedte uit te breiden. Loodrechte golfaanval is daarom minder gevaarlijk dan scheve golfaanval. Al vrij snel werd de bovenkant van de bak bereikt, en werd al het materiaal naar beneden getransporteerd. In werkelijkheid betekent dit dat het gat naar boven toe zou zijn gegroeid. Voor het onderzoek betekende dit dat het grote gat in de toplaag eigenlijk te laag lag.

Bij de kleinere gaten vond een doorgaand transport van filtermateriaal plaats. De ontwikkeling van de schade vond steeds plaats naar boven en naar de zijkanalen, terwijl aan de onderste rand van het gat in de toplaag het filtermateriaal aanwezig bleef.

Door de uitbreiding van de schade ontstond enige ruimte tussen de toplaag (perspex) en het filter. Dit had grote invloed op de waterbeweging. De in het perspex aangebrachte gaatjes waren gedimensioneerd op een situatie van aanliggend filtermateriaal onder de perspex plaat. De doorlatendheid van de filterlaag zelf is in deze situatie bepalend voor de waterstroming in de laag, en niet het open oppervlak van de zetting.

Als het filter niet meer tegen het perspex aanligt bepalen de (te grote) gaten de waterstroming. Hierdoor ontstaat een behoorlijke waterbeweging boven de gatrand, veroorzaakt door het vele water dat door de gaatjes stroomt bij een golfoploop. Daardoor erodeerde het filtermateriaal boven het gat meer dan in werkelijkheid het geval zou zijn (de zetting is in werkelijkheid minder doorlatend).

Gevolgtrekkingen uit de eerste proef waren:

- * Het rooster van gaatjes in het perspex heeft meer kwaad dan goed gedaan. Daarom werd besloten om deze gaatjes boven de bovenste gatrand dicht te maken, en de proef onder dezelfde golfcondities te herhalen.
- * Bij een erg groot gat ($0,96 \text{ m}^2$) onder scheve golfaanval ontwikkelt de schade in de filterlaag zich zeer snel. Een dergelijk groot gat in de toplaag zal zeker snel uitbreiden. Verder onderzoek met andere golfcondities is niet zinvol. Daarom werd besloten om in de volgende proef de twee grote gaten op de taluds onder 40° en 70° voor 75% van het gatoppervlak te vullen met losse blokken.
- * Het grote gat ($0,96 \text{ m}^2$) bij loodrechte aanval lag te laag, gezien de snelle groei van de erosiekuil tot de bovenwand van de filterbak. Dit gat, inclusief de bak met filtermateriaal, is daarom voor de volgende proeven 0,5 m langs het talud omhoog gebracht.

4.2 Proef 2

Voor de condities bij deze proef wordt verwezen naar tabel 3.1.

De ontwikkeling van de $0,01 \text{ m}^2$ en de $0,06 \text{ m}^2$ gaten is weergegeven in figuur 4.1 (loodrechte golfaanval), figuur 4.2 (40° golfaanval) en figuur 4.3 (70° golfaanval).

Proef 2 was vrijwel een herhaling van proef 1. De opstelling was echter verbeterd op basis van de gevolgtrekkingen uit proef 1.

In de grote gaten ($0,96 \text{ m}^2$) onder scheve golfaanval was nu voor 75% van het gatoppervlak aan losse blokken aangebracht. De blokken hadden een afmeting van $40 \times 40 \times 20 \text{ mm}$, en een massa van 60 gr. De aanwezigheid van de blokken in het gat had geen merkbaar effect ten opzichte van proef 1. De blokken verdwenen snel uit de gaten bij de eerste paar honderd golven, zodat de extra weerstand tegen uitspoelen van het filtermateriaal slechts voor zeer korte duur aanwezig was. Voor de grote gaten onder scheve golfaanval werd op basis van de proeven 1 en 2 dan ook geconcludeerd dat het filtermateriaal hieruit zeer snel weg speelde, en dat verder onderzoek naar deze grote gaten in de aanwezige opstelling niet zinvol was.

Het grote gat onder loodrechte aanval dat na de eerste proef 0,5 m naar boven was verplaatst, gaf in deze proef een mooi beeld te zien. Het materiaal aan de

bovenkant kalfde af. Pas na 5000 golven werd de bovenrand van de filterbak bereikt, en werd ook de bodem van de bak bovenin zichtbaar. Uit vergelijking met de ontwikkeling bij dit gat in proef 1 kan dus worden geconcludeerd dat de ligging van het gat t.o.v. S.W.L. een belangrijke rol speelt.

De omtrek van de erosiekuilen rond de middelgrote gaten ($0,06 \text{ m}^2$) bereikte al na 250 golven de zijkanten van de bak met filtermateriaal. Aan de bovenkant van de bak bleef echter nog wel filtermateriaal aanwezig, ook na 5000 golven.

Voor de kleinere gaten bleek dat het dichtmaken van de geboorde gaatjes boven de gatrand een groot effect had. Het water kon niet meer door de gaatjes naar binnen stromen en de erosie vond alleen plaats door golfwerking door het gat. De kleine gaten ($0,01 \text{ m}^2$) gaven op alle drie de taluds een groeiende omtrek van het erosiegat te zien, maar de zij- of bovenwand van de filterbak werd niet bereikt.

Gevolgtrekkingen uit de tweede proef zijn:

- * Verder testen van de grote gaten ($0,96 \text{ m}^2$) onder scheve golfaanval is niet zinvol. De aanwezigheid van losse blokken in het gat heeft geen effect. Daarom werd besloten om in de volgende proeven de grote gaten op de taluds onder 40° en 70° golfaanval te vervangen door kleinere gaten van $0,24 \text{ m}^2$. Het grote gat onder loodrechte golfaanval werd in de volgende proeven wel verder onderzocht.
- * De kleine gaten ($0,01 \text{ m}^2$) vertonen een mooi erosieverloop. Uit de groei van de omtrek van de erosiekuil in het filter, welke zichtbaar is door de perspex plaat, volgt dat een relatief grote ontwikkeling plaats vindt gedurende de eerste 250 golven. Na 1000 golven is echter nog steeds groei van de erosiekuil zichtbaar.
- * Bij de middelgrote gaten ($0,06 \text{ m}^2$) bereikt de erosiekuil de zijwanden van de bak met filtermateriaal. Bovenin de filterbak blijft filtermateriaal aanwezig.
- * In alle gevallen vormt de onderrand van het gat in de toplaag de onderkant van de erosiekuil.
- * De ligging van het gat t.o.v. S.W.L. is van belang.

4.3 Proef 3

Voor de condities bij deze proef wordt verwezen naar tabel 3.1.

De ontwikkeling van de 0,01 m² en de 0,06 m² gaten is weergegeven in figuur 4.4 (loodrechte golfaanval), figuur 4.5 (40° golfaanval) en figuur 4.6 (70° golfaanval).

Bij deze proef waren de grote gaten (0,96 m²) op de taluds onder 40° en 70° vervangen door drie maal kleinere gaten (0,24 m²). De afdekkende plaat perspex was passend gemaakt op de bij de 0,96 m² gaten behorende filterbakken. De zijranden kwamen hierdoor niet op 0,2 m vanaf de gatrand te liggen, maar veel verder. Voor de rand het dichtst bij het midden van de bak was dit 0,38 m en voor de andere rand 0,42 m. Omdat uit de voorgaande proeven bleek dat het filtermateriaal voornamelijk van de bovenkant werd aangevoerd, werd besloten het gat niet gecentreerd rond de waterlijn te leggen, maar iets hoger. De bovenkant lag nu 0,38 m boven de waterlijn, en de onderkant 0,22 m beneden de waterlijn (gemeten langs het talud). De ruimte tussen de bovenrand van het gat en de bovenrand van de bak met filtermateriaal was 0,52 m. De rest van de opstelling was gelijk aan die bij proef 2.

Proef 3 werd uitgevoerd met een grotere golfhoogte (maar gelijke golfsteilheid) als in proef 2 ($H_s = 0,15$ m en 0,20 m voor proef 2 resp. proef 3).

De ontwikkeling van de erosiekuilen rond de gaten leek op het oog zeer sterk op de ontwikkeling bij proef 2.

Uit het grote 0,96 m² gat onder loodrechte golfaanval was na 250 golven de bovenkant van de erosiekuil net tot aan de bovenkant van de bak gegroeid. Na 1000 golven was de bodem van de bak voor een zeer groot deel zichtbaar.

Uit de gaten van 0,24 m² onder scheve golfaanval verdween het filtermateriaal zeer snel. Ondanks de extra brede perspex randen bij deze gaten was al na 250 golven de zijkant en de bovenkant van de bak met filtermateriaal bereikt, en was reeds een stukje van de bodem van de bak zichtbaar.

4.4 Proef 4

Voor de condities bij deze proef wordt verwezen naar tabel 3.1.

De ontwikkeling van de 0,01 m² en de 0,06 m² gaten is weergegeven in figuur 4.7 (loodrechte golfaanval), figuur 4.8 (40° golfaanval) en figuur 4.9 (70° golfaanval).

De opstelling van proef 4 was gelijk aan die van proef 3. Alleen de golfhoogte werd verhoogd van $H_s = 0,20$ m in proef 3 naar $H_s = 0,24$ m in proef 4. De golfsteilheid werd gelijk gehouden op $s_{op} = 0,04$.

Het kwalitatieve beeld van de erosieontwikkeling tijdens de proef leek zeer veel op die van proef 3, met mooi ontwikkelende erosiekuilen voor de kleine gaten ($0,01$ m²) en een redelijk verloop voor de middelgrote gaten ($0,06$ m²). Bij deze middelgrote gaten bleef bovenin de bak wel filtermateriaal aanwezig, maar bereikte de erosiekuil snel de zijkanten van de filterbak.

Bij het grote $0,96$ m² gat onder loodrechte aanval was na ongeveer 200 golven de bovenwand van de filterbak al enigszins zichtbaar. Na 1000 golven was de bak half leeggespoeld.

Bij de grote $0,24$ m² gaten onder scheve golfaanval verliep de uitspoeling van filtermateriaal weer zeer snel (ontwikkeling tot aan de randen van de bak binnen 250 golven).

De conclusie voor de $0,24$ m² gaten onder scheve golfaanval was dan ook gelijk aan die voor de $0,96$ m² gaten. Uitspoeling van het filtermateriaal vindt bij gaten van deze grootte zeer snel plaats. Al na enkele honderden golven heeft de erosiekuil in de filterlaag zich zo ver uitgebreid, dat de constant gehouden gatgrootte in de toplaag niet meer reeel is. Het is zeer waarschijnlijk dat de toplaag boven de erosiekuil instort, waardoor het gat in de toplaag groeit. Verder onderzoek naar gaten groter of gelijk aan $0,24$ m² onder scheve golfaanval leek dan ook niet zinvol.

4.5 Proef 5

Voor de condities bij deze proef wordt verwezen naar tabel 3.1.

De ontwikkeling van de $0,01$ m² en de $0,06$ m² gaten is weergegeven in figuur 4.10 (loodrechte golfaanval), figuur 4.11 (40° golfaanval) en figuur 4.12 (70° golfaanval).

De onderzochte gaten in proef 5 waren gelijk aan die in proef 4. De enige verandering in de opstelling was dat in de $0,24$ m² gaten onder scheve golfaanval een toplaag van gezette losse blokken was geplaatst. De blokken hadden een afmeting van $41 \times 41 \times 41$ mm en een massa van 180 gram. In deze steenzetting was een gat ter grootte van 3 blokjes gelaten, zie foto 4.1. Het gat lag één rij blokjes onder de waterlijn. De blokjes lagen goed tegen elkaar, maar niet zodanig dat van inklemming tussen de wanden van de bak sprake was.

De overige gaten waren onveranderd ten opzichte van de situatie in proef 4. De proef werd nu uitgevoerd met een golfhoogte $H_s = 0,15$ m en een lagere golfsteilheid van 0,02.

Het erosiepatroon voor de kleine en middelgrote gaten (tot $0,06$ m²) verschilt op het oog niet veel met het patroon in de voorafgaande proeven, met uitzondering van het onder loodrechte golfaanval liggende kleine ($0,01$ m²) gat onder de waterlijn. Dit gat vertoonde wat erosie na 250 golven, maar was na 1000 golven weer geheel opgevuld met materiaal afkomstig uit de berm van het grote $0,96$ m² gat. Een effect van de kleine golfsteilheid was dat het uit het grote gat afkomstige filtermateriaal relatief hoog op het talud bleef liggen. Op den duur spreidde dit materiaal zich ook in zijwaartse richting uit. Zodoende kon het door de golven in het onder de waterlijn gelegen kleine gat worden gespoeld. In hoeverre het hoger gelegen kleine gat door dit effect is beïnvloed is niet met zekerheid te zeggen. Wel lijkt uit de metingen ook bij dit gat de voortgang van de erosie tussen 250 en 1000 golven wat langzaam te gaan. Nadat na 1000 golven het onder de kleine gaten aanwezige filtermateriaal naar dieper water was geschoven, ging de erosie gewoon door.

Het grote $0,96$ m² gat onder loodrechte aanval toont na 250 golven een erosiekuil die nog ongeveer 20 cm verwijderd ligt van de bovenkant van de bak. Na 1000 golven is echter boven in de filterbak een gedeelte van de bodem zichtbaar.

Voor de met gezette blokken gevulde grote gaten onder scheve golfaanval gebeurde tijdens de eerste 250 golven niet veel. Na 1000 golven was het bovenste deel van de stenen in het gat onder 70° aanval verzakt, zie foto 4.2. Bij 40° aanval was geen bijzondere ontwikkeling zichtbaar. Toevalligheden, als een lokaal iets lossere zetting bij voorbeeld, zijn waarschijnlijk een belangrijke faktor bij het ontstaan van dergelijke gaten. In het verzakte gedeelte van de toplaag onder 70° aanval ontstond, boven het initiële gat in de toplaag, een tweede gat. Nadat dit tweede gat zich enigszins ontwikkeld had, spoelde het filtermateriaal in hoog tempo uit. Ter plaatse van dit nieuwe gat (op enige afstand boven het initiële gat in het talud) stroomde tijdens de golfoploop water naar binnen. Tijdens de maximale golfneerloop komt de waterspiegel beneden het initiële gat in de toplaag, en spuit een hoeveelheid water met filtermateriaal door dit onderste gat naar buiten. In de situatie met twee gaten boven elkaar ontstond dus een aanzienlijk grotere uitspoeling van filtermate-

riaal. De eindsituatie na 5000 golven voor de steenzetting onder 70° en 40° golfaanval is gepresenteerd op de foto's 4.3 respectievelijk 4.4.

Na afloop van de proef bleek dat een gedeelte van de stenen in de toplaag onder 70° aanval zeer stevig zat ingeklemd. De blokken in het gat onder 40° aanval zaten als geheel ingeklemd. Enkele korreltjes fijn grind in de kieren tussen de blokken hadden de toplaag muurvast gezet tussen de omliggende perspex randen.

4.6 Proef 6

Voor de condities bij deze proef wordt verwezen naar tabel 3.1.

De ontwikkeling van de $0,01 \text{ m}^2$ en de $0,06 \text{ m}^2$ gaten is weergegeven in figuur 4.13 (loodrechte golfaanval), figuur 4.14 (40° golfaanval) en figuur 4.15 (70° golfaanval).

In proef 6 is voor de kleine en middelgrote gaten gekeken naar het effect van losse blokken in de gaten. De gebruikte blokjes hadden een afmeting van $41 \times 41 \times 41 \text{ mm}$ en een massa van 180 gram.

Voor de kleine $0,01 \text{ m}^2$ gaten was het percentage blokken 62% van het gatoppervlak, en voor de middelgrote gaten van $0,06 \text{ m}^2$ 50%. Voor het grote $0,96 \text{ m}^2$ gat onder loodrechte golfaanval was het percentage losse blokken 58%. De foto's 4.5a t/m c geven een beeld van de beginsituatie voor de verschillende gaten. In de grote $0,24 \text{ m}^2$ gaten onder scheve golfaanval was weer een steenzetting aangebracht met dezelfde blokjes als in proef 5, maar nu met veel grotere ruimten (meer dan een mm) tussen de blokjes. Voor de grotere ruimte tussen de blokjes was gekozen om het ontstaan van inklemming, zoals in proef 5, te voorkomen. In de uit blokjes geconstrueerde toplaag was, op dezelfde plaats als bij proef 5, een gat ter grootte van 3 blokjes aangebracht.

De golfhoogte was $H_s = 0,20 \text{ m}$ met een golfsteilheid van $s_{op} = 0,04$.

Deze condities waren gelijk aan die in proef 3.

De losse blokjes leken weinig effect te hebben op de erosie van het filter. In de kleine $0,01 \text{ m}^2$ gaten bleven enkele blokjes gedurende de gehele 5000 golven in het gat, doch op het oog had dit weinig effect op de groei van de erosiekuil. Op alle taluds waren de blokjes uit de middelgrote gaten van $0,06 \text{ m}^2$ reeds na 250 golven verdwenen.

In het grote $0,96 \text{ m}^2$ gat onder loodrechte golfaanval bleven de blokjes vrij lang in het gat aanwezig. Na 250 golven waren er nauwelijks blokjes uit het gat verdwenen. De erosie van het filtermateriaal was ook nog zeer bescheiden. Na 1000 golven echter was het grootste deel van de blokjes uit het gat gespoeld, en was ook de erosie van het filtermateriaal flink uitgebreid. Er was echter nog een ruime hoeveelheid filtermateriaal boven het gat aanwezig. Na 5000 golven waren alle blokjes uit het gat verdwenen, en was de bovenkant van de filterbak geheel leeggespoeld.

Bij de gezette blokjes in de $0,24 \text{ m}^2$ gaten onder scheve golfaanval was na 250 golven nog geen schade zichtbaar. Na 1000 golven was echter weer op het talud onder 70° aanval, en ongeveer op dezelfde plaats als bij proef 5 een groot gat ontstaan boven het kleine initiële gat. Ook nu trad hierdoor weer een versneld verlies van filtermateriaal via het onderste gat op. De erosie had zich na 5000 golven dan ook flink uitgebreid. De zetting op het talud onder 40° aanval bleef gedurende de gehele 5000 golven intact. Wel was sprake van enige afvoer van filtermateriaal door het gat in de steenzetting, en ontwikkelde zich een kuil van vrij grote omtrek.

Na afloop van de proef bleek dat de zetting in dit talud, ondanks de vrij grote ruimte tussen de blokjes, weer in een zeer vaste inklemming was geraakt.

4.7 Proef 7

Voor de condities bij deze proef wordt verwezen naar tabel 3.1.

De ontwikkeling van de $0,01 \text{ m}^2$ en de $0,06 \text{ m}^2$ gaten is weergegeven in figuur 4.16 (loodrechte golfaanval), figuur 4.17 (40° golfaanval) en figuur 4.18 (70° golfaanval).

In proef 7 is gekeken naar het effect van een overgangconstructie net boven de kleine gaten van $0,01 \text{ m}^2$. De overgangsconstructie was gemodelleerd door middel van een plank aangebracht net boven de gaten, zodat de toevoer van filtermateriaal van bovenaf volledig was geblokkeerd.

De middelgrote gaten van $0,06 \text{ m}^2$ werden wat hoger op het talud geplaatst, zodanig dat de onderkant van het gat nu op S.W.L. lag.

Het grote $0,96 \text{ m}^2$ gat onder loodrechte golfaanval werd vervangen door een gat van $0,24 \text{ m}^2$. Dit $0,24 \text{ m}^2$ gat lag nu op (ongeveer) dezelfde hoogte als de $0,24 \text{ m}^2$ gaten in de taluds onder scheve golfaanval.

In de $0,24 \text{ m}^2$ onder scheve golfaanval werd weer een steenzetting geplaatst. Dit keer werden kleinere blokjes gebruikt, met afmetingen van $25 \times 25 \times 25 \text{ mm}$ en een massa van 40 gram. Door het toepassen van kleinere blokjes was de kans op inklemming van de toplaag tussen de zijwanden van de bak kleiner. De blokken waren weer los (met tussenruimte van meer dan een mm) op het filter gelegd. Op dezelfde plaats als in de proeven 5 en 6 was een gat in deze toplaag aangebracht ter grootte van 6 blokjes.

De opstelling is gepresenteerd in de figuren 3.10 t/m 3.12.

De proef werd uitgevoerd met golven $H_s = 0,20 \text{ m}$ met golfsteilheid $s_{op} = 0,04$. De golfcondities zijn dus vergelijkbaar met die in proef 3 en 6.

Door de aanwezigheid van de overgangsconstructie boven de $0,01 \text{ m}^2$ gaten, kon de ontwikkeling van het erosiegat naar boven toe niet plaats vinden. In plaats daarvan vond de ontwikkeling veel sterker in zijwaartse richting plaats. Ook was een bescheiden uitbreiding van het gat beneden de onderrand van het gat in de toplaag te zien. De overgangsconstructie beïnvloedde de erosieontwikkeling via het afkappen van de toevoer van materiaal van bovenaf en via het beïnvloeden van de waterbeweging in het gat. De golven welke in het gat doken, reflekterden nu immers direkt tegen een harde wand.

Bij de middelgrote $0,06 \text{ m}^2$ gaten was na 250 golven de erosiekuil reeds gegroeid tot aan de bovenkant van de bak met filtermateriaal, en was het niveau van de filterlaag bij deze rand zelfs al iets gezakt. Dit zakken ging verder in de volgende 4000 golven. De bodem van de bak was na 5000 golven echter nog niet zichtbaar.

Onder het grote $0,24 \text{ m}^2$ gat onder loodrechte aanval groeide de erosiekuil tijdens de eerste 250 golven reeds tot aan de bovenrand van de bak. Na 1000 golven was nog net de bodem van de filterbak niet zichtbaar en na 5000 golven was de bovenste helft van de filterbak zichtbaar.

Bij de $0,24 \text{ m}^2$ gaten onder scheve aanval was na 250 golven nog geen ontwikkeling van betekenis te zien. Het initiële gat in de toplaag had zich op het talud onder 40° met twee blokjes uitgebreid. Na 1000 golven was echter een groot (tientallen blokjes) tweede gat dicht boven dit initiële gat ontstaan (slechts een rij blokjes scheidde de twee gaten). De erosiekuil in de filterlaag was hierdoor flink uitgebreid. Bij de zetting onder 70° aanval waren enkele blokjes aan de bovenkant van de zetting losgeraakt. Rond dit gebied ontstond direkt wat erosie van de filterlaag. Na 5000 golven waren uit de $0,24 \text{ m}^2$

gaten onder zowel 40° als 70° aanval alle blokjes verdwenen, en was de bovenste helft van de bodem van de bak zichtbaar.

4.8 Proef 8

Voor de condities bij deze proef wordt verwezen naar tabel 3.1.

De ontwikkeling van de 0,01 m² en de 0,06 m² gaten is weergegeven in figuur 4.19 (loodrechte golfaanval), figuur 4.20 (40° golfaanval) en figuur 4.21 (70° golfaanval).

In proef 8 werd de opstelling weer gewijzigd, zie de figuren 3.13 t/m 3.15. De 0,01 m² gaten werden vervangen door spleten, en het eronderliggende filtermateriaal door zand. De bovenkant van de spleten lag in alle gevallen op 118 mm beneden SWL. In elk talud was een horizontale spleet aangebracht met een lengte van 64 mm, en een verticale spleet van 91 mm. De breedte van alle spleten was gelijk aan 2,5 mm. De D₅₀ van het zand onder de toplaag was 0,100 mm.

Eenzelfde proef, maar alleen onder loodrechte golfaanval, was iets eerder op grotere schaal uitgevoerd in de Deltagoot. De proef op kleinere schaal werd uitgevoerd om enig idee te krijgen van de schaaleffekten welke hierbij kunnen optreden.

De middelgrote 0,06 m² gaten waren weer gepositioneerd op hun oorspronkelijke positie onder de waterspiegel. Nu was boven deze gaten een overgangsconstructie aangebracht.

Het grote 0,24 m² gat onder loodrechte golfaanval was onveranderd ten opzichte van de vorige proef.

In de 0,24 m² gaten onder scheve golfaanval was een steenzetting aangebracht van dezelfde blokjes als gebruikt in proef 7 (25x25x25 mm). Het initiële gat in deze laag was echter wat groter gemaakt, en had nu een grootte van 10 blokjes.

Proef 8 werd uitgevoerd met golfhoogte H_s = 0,15 m en golfsteilheid s_{op} = 0,02. Dit benaderde het best de proef in de Deltagoot, waar onder andere een golf van H_s = 1,5 m met een golfsteilheid van s_{op} = 0,015 was beschouwd. De golfcondities tijdens proef 8 waren identiek aan de condities bij proef 5.

Met het oog was nauwelijks enige erosie van het zand onder de spleten te zien. Een probleem ontstond na enige tijd bij de spleten onder loodrechte aanval. Zij raakten regelmatig verstopt met grind afkomstig uit de naastliggende bakken. De proefresultaten kunnen dus enigszins verstoord zijn voor deze twee spleten. Na

afloop van de proef bleek dat bij de spleten onder loodrechte aanval geen duidelijke uitspoeling van zand had plaats gevonden. Bij 40° aanval was alleen iets gebeurd bij de vertikaal georiënteerde spleet (foto 4.6), en bij 70° aanval alleen bij de horizontaal georiënteerde spleet (foto 4.7).

Voor de 0,06 m² gaten was het effect van de overgangsconstructie een grotere groei van de gaten in zijwaartse richting en in de diepte. Bovendien vond een lichte uitbreiding van de erosie naar beneden plaats, d.w.z. tot onder de onderste rand van het gat. Op het eind van de proef was voor het gat onder 40° aanval een deel van de bodem van de filterbak zichtbaar. Voor de loodrechte en 70° aanval was de bodem nog bedekt.

In het grote 0,24 m² gat onder loodrechte aanval begon de bodem bovenin de filterbak na 1000 golven net zichtbaar te worden. Na 5000 golven was de bak leeggespoeld. Op het oog leek de ontwikkeling zeer sterk op die in proef 7. Bij de steenzettingen onder scheve golf aanval was bij de 40° aanval reeds na 250 golven een tweede gat helemaal bovenin de zetting ontstaan. De zetting onder 40° was toen nog intact. Na 1000 golven waren beide zettingen weggespoeld. Het niveau van het filtermateriaal ter plaatse van de bovenrand van de filterbak was in beide gevallen aanzienlijk gedaald. Na 5000 golven was bovenin beide bakken de bodem zichtbaar.

4.9 Proef 9

Voor de condities bij deze proef wordt verwezen naar tabel 3.1.

De ontwikkeling van de 0,01 m² en de 0,06 m² gaten is weergegeven in figuur 4.22 (loodrechte golfaanval), figuur 4.23 (40° golfaanval) en figuur 4.24 (70° golfaanval).

In proef 9 werd uitgegaan van de gaten welke waren onderzocht in de proeven 3 t/m 6, zie de figuren 3.7 t/m 3.9. Bij deze proef werd gekeken naar de invloed van een grotere diameter van het filtermateriaal. Het oude filtermateriaal met $D_{50} = 2,37$ mm werd vervangen door filtermateriaal met $D_{50} = 5,22$ mm.

De proef werd uitgevoerd met golfhoogte $H_s = 0,20$ m en golfsteilheid $s_{op} = 0,04$. Het effect van de grootte van het filtermateriaal op de erosie van de filterlaag kon dus worden verkregen uit vergelijking van de resultaten met die van proef 3.

Op het oog week de erosieontwikkeling niet veel af van die voor het fijne materiaal. De kleine 0,01 m² gaten gaven een mooi erosiepatroon. De erosiekuilen in de middelgrote 0,06 m² gaten raakten al snel de zijwanden van de bak,

maar de bovenkant van de bak werd niet bereikt. Bij de grote $0,24 \text{ m}^2$ gaten onder scheve golfaanval werd de bodem van de bak na 1000 golven al voor een klein gedeelte zichtbaar. Hetzelfde gold voor het grote $0,96 \text{ m}^2$ gat onder loodrechte golfaanval. Na 5000 golven waren alle grote gaten weer nagenoeg leeggespoeld.

4.10 Golfoploop

Tijdens elke proef is op één van de taluds onder scheve golfaanval de golfoploop gemeten met een stappenbaak. Wegens technische storingen zijn de metingen bij proef 1, 2 en 3 mislukt. Als gevolg hiervan zijn voor de golfconditie $H_s = 0,15 \text{ m}$ met $s_{op} = 0,04$ geen metingen beschikbaar. De meetresultaten voor de overige proeven zijn gepresenteerd in de figuren 4.25, 4.26 en 4.27, in de vorm van overschrijdingskrommen voor de oploophoogte.

In figuur 4.25 is het resultaat gepresenteerd voor $H_s = 0,20 \text{ m}$ met $s_{op} = 0,04$. Voor elke hoek van golfaanval zijn twee metingen beschikbaar. Deze metingen komen redelijk goed overeen. De oploop bij 70° golfaanval is duidelijk kleiner dan de oploop bij 40° .

In figuur 4.26 is het resultaat gepresenteerd voor $H_s = 0,24 \text{ m}$ met $s_{op} = 0,04$. Hiervoor was voor elke hoek van golfaanval slechts één meting beschikbaar. Het beeld is gelijk aan dat bij $H_s = 0,20 \text{ m}$, maar de oploophoogten zijn nu uiteraard wat groter.

In figuur 4.27 is tenslotte het resultaat gepresenteerd voor $H_s = 0,15 \text{ m}$ met $s_{op} = 0,02$. De resultaten zijn qua oploophoogte vergelijkbaar met die van $H_s = 0,20 \text{ m}$ met $s_{op} = 0,04$.

Tenslotte zijn in tabel 4.1 de oploopwaarden met een overschrijdingspercentage van 2% ($Z_{2\%}$) voor de verschillende hoeken van golfaanval met elkaar vergeleken.

5. Modellering van gedrag filterlaag

5.1 Inleiding

De erosie van de filterlaag is uitgedrukt in twee relevante grootheden: het oppervlak van de erosiekuil en de diepte van de erosiekuil. Beide zijn van belang voor het beoordelen van de reststerkte. Het oppervlak van de erosiekuil is bepalend voor verdere groei van het gat in de toplaag, omdat deze toplaag verder zal instorten bij een zekere omvang van de ondermijning. De diepte van de erosiekuil is bepalend voor het al of niet uitspoelen van materiaal uit de kern van de dijk (dit criterium van erosiediepte ligt ten grondslag aan de definitie van reststerkte, zie paragraaf 1.1).

De erosie is onderzocht voor drie verschillende golfhoogten, en voor drie verschillende stormduren. Voor één van de golfhoogten is tevens de invloed van de golfsteilheid beschouwd. Alle proeven zijn bovendien simultaan uitgevoerd voor verschillende hoeken van golfaanval. Voor één golfconditie is de invloed van de grootte van het filtermateriaal beschouwd. Het erosieverloop voor deze condities is beschouwd voor gaten in de toplaag van verschillende grootte en met een verschillende ligging ten opzichte van de waterlijn. Getracht is om de invloed van al deze parameters kwantitatief uit te drukken.

De analyse is voornamelijk gebaseerd op de resultaten van de 0,01 m² en de 0,06 m². De grote 0,24 m² en 0,96 m² gaten spoelden dermate snel uit dat zij in veel gevallen geen betrouwbare informatie gaven voor alle stormduren. Deze gaten zijn, in tegenstelling tot de kleine gaten, enigszins vergelijkbaar met een grindstrand. De ontwikkeling van het filter in de grote gaten is daarom apart geëvalueerd in paragraaf 5.11 met behulp van BREAKWAT [2] en formules voor langstransport van grind.

5.2 Modelparameters

De volgende symbolen zijn gebruikt voor de verschillende grootheden en parameters, zie figuur 5.1.

Parameters om het filtergedrag te beschrijven:

- B_o = Ondernijningsdiameter. Dit is de afstand tussen de bovenkant van de erosiekuil en bovenkant van het gat in de toplaag, gemeten langs het talud. Deze parameter is gekozen voor de analyse omdat hij het meest relevant is voor de ondermijning van de toplaag (de gatgroei is het sterkst naar boven toe gericht) en tevens omdat deze parameter goed is af te leiden uit de metingen.
- B_d = Dwarsdiameter. Deze parameter is minder goed af te leiden uit de metingen dan B_o , omdat in de meeste gevallen de zijwanden van de filterbak eerder werden bereikt door de erosiekuil dan de bovenwand. Derhalve zou deze parameter voor een groot aantal gevallen geschat moeten worden. Uit de bruikbare metingen is echter een correlatie af te leiden tussen B_d en $(B_o + B_g)$, zie figuur 5.2. Indien het gedrag van B_o bekend is, kan via deze relatie dus eenvoudig B_d worden bepaald. Gemeten waarden voor B_d zijn gepresenteerd in tabel 5.1.
- D_o = Erosiediepte, d.w.z. de maximale diepte in de erosiekuil. Ook deze parameter vertoonde een duidelijke correlatie met $(B_o + B_g)$, zie figuur 5.3. Via deze correlatie kan D_o worden bepaald via de uit de analyse verkregen formule voor B_o .
- d_o = Plaats van de erosiekuil, d.w.z. de afstand van de onderkant van de erosiekuil t.o.v. S.W.L., gemeten langs het talud. Voor kuilen gelegen boven S.W.L. is d_o positief.

In het proevenprogramma is beschouwd wat de invloed is op B_o , D_o en d_o van de volgende parameters:

- N = Aantal golven
- H_s = Significante golfhoogte
- s_{op} = Golfsteilheid, berekend op basis van de piek periode van het golfspectrum
- β = De hoek van golfaanval, ten opzichte van de normaal op het talud
- B_g = Diameter van het gat in de toplaag, gemeten in opwaartse richting langs het talud
- d_g = Plaats van het gat in de toplaag, d.w.z. de afstand van de onderkant van het gat in de toplaag t.o.v. S.W.L., gemeten langs het talud. Voor gaten gelegen boven S.W.L. is d_g positief
- D_{f50} = De diameter van het filtermateriaal welke door 50% (gewicht) wordt onderschreden

Tevens is de invloed van de aanwezigheid van losse blokjes in de gaten beschouwd.

Alvorens getracht zal worden om de meest relevante effecten in formules samen te vatten, worden de invloeden afzonderlijk besproken.

5.3 Invloed van het aantal golven

B_o
--

Voor een beeld van de invloed van het aantal golven op de ontwikkeling van de ondermijningsdiameter van de filterlaag wordt verwezen naar de figuren 5.4 t/m 5.6. De in de figuren gepresenteerde resultaten zijn afgeleid van de proeven 2, 3 en 4. In het algemeen wordt een groei van de ondermijningsdiameter gevonden met toenemend aantal golven. Alleen voor het boven water gelegen 0,01 m² gat is de maximale ondermijningsdiameter reeds na 250 golven ontwikkeld. De na 250 golven ontwikkelde ondermijningsdiameter verandert gedurende de daarop volgende golven nagenoeg niet. Voor de gaten waarbij wel groei van de ondermijning optreedt met toenemend aantal golven, kan worden gesteld dat na 250 golven de ondermijningsdiameter globaal reeds 50% bedraagt van de waarde na 5000 golven.

D_o
--

De invloed van het aantal golven op de erosiediepte is te zien in de figuren 5.13 t/m 5.15. Voor de 0,01 m² gaten (zowel onder als boven water) blijkt de maximale erosiediepte reeds na 250 golven te zijn bereikt. Alleen bij het 0,06 m² gat wordt het algemene beeld gevonden van een toename van de erosiediepte met een toenemend aantal golven.

5.4 Invloed van de golfhoogte

B_o
--

Voor het effect van de golfhoogte op de ondermijningsdiameter wordt nogmaals verwezen naar de figuren 5.4 t/m 5.6.

Voor loodrechte golfaanval wordt in het algemeen een toename van de ondermijningsdiameter gevonden met toenemende golfhoogte. Alleen bij het 0,06 m² gat wordt voor H_s = 0,24 m een afwijking van dit beeld gevonden, voor een stormduur

tot 1000 golven. Het lijkt er op dat dit te wijten is aan een toevalligheid welke een remmend effect heeft gehad tijdens de eerste 250 golven. Na 5000 golven is de ondermijningsdiameter toch weer het grootst voor $H_s = 0,24$ m. Uit de resultaten voor 40° golfaanval volgt een niet zo duidelijk verband tussen ondermijningsdiameter en golfhoogte. Voor het onder water gelegen $0,01$ m² gat neemt de ondermijningsdiameter toe met toenemende golfhoogte. Voor het boven water gelegen $0,01$ m² gat is de ondermijningsdiameter onafhankelijk van de golfhoogte. Voor het $0,06$ m² gat wordt de grootste ondermijningsdiameter gevonden bij de kleinste golfhoogte.

Een soortgelijk beeld geldt voor de resultaten voor 70° golfaanval. Hier wordt alleen een toename van de ondermijningsdiameter met toenemende golfhoogte gevonden voor het $0,06$ m² gat. Voor het boven water gelegen $0,01$ m² gat is de ondermijningsdiameter weer onafhankelijk van de golfhoogte, terwijl bij het onder water gelegen $0,01$ m² gat een onduidelijk verband met de golfhoogte is gemeten.

D_o
--

De verschillen in de erosiediepte voor de verschillende golfhoogten zijn niet groot, zie de figuren 5.13 t/m 5.15. Voor loodrechte golfaanval wordt geen duidelijke relatie gevonden tussen de golfhoogte en de erosiediepte. Alleen voor gat 4 treedt een toename van de erosiediepte op met toenemende golfhoogte. Hetzelfde geldt voor dit gat onder 40° aanval. Voor 70° aanval is het beeld wat eenduidiger. Hier treedt voor $H_s = 0,15$ m de kleinste erosie-diepte op, terwijl een grotere erosiediepte wordt gemeten voor $H_s = 0,20$ m en $H_s = 0,24$ m. De waarde van de maximale erosiediepte is voor beide laatstgenoemde golfhoogten ongeveer gelijk.

5.5 Invloed van de golfsteilheid

B_o
--

Het effect van de golfsteilheid op de ondermijningsdiameter is gepresenteerd in de figuren 5.7 t/m 5.9. In de figuren zijn de resultaten van proef 5 vergeleken met die van proef 2. Beide proeven zijn uitgevoerd met dezelfde significante golfhoogte ($H_s = 0,15$ m) maar met verschillende golfperiode. Het globale beeld is een wat grotere ondermijningsdiameter bij een kleinere golfsteilheid. Een duidelijke uitzondering op dit beeld wordt gevonden voor het $0,06$ m² gat onder 40° golfaanval. Voor het boven water gelegen $0,01$ m² gat onder 70° aanval is het

effekt van de golfsteilheid niet duidelijk (het effekt varieert enigszins met het aantal beschouwde golven). De resultaten voor de andere gaten onder 70° golfaanval zijn ongevoelig voor de golfsteilheid.

D_o
--

Het effekt van de golfsteilheid op de erosiediepte is gepresenteerd in de figuren 5.16 t/m 5.18. Voor de gaten onder loodrechte golfaanval blijkt de erosiediepte wat kleiner te worden bij een afnemende golfsteilheid. Hetzelfde geldt voor de $0,01 \text{ m}^2$ gaten onder 40° golfaanval. Voor het $0,06 \text{ m}^2$ gat is het effekt niet geheel duidelijk (afhankelijk van het aantal golven). Voor alle gaten onder 70° aanval wordt een toename van de erosiediepte gevonden bij afnemende golfsteilheid (het omgekeerde dus van hetgeen werd gevonden bij loodrechte aanval).

5.6 Invloed van de golfrichting

In de voorgaande beschouwingen zijn enkele verschillen naar voren gekomen voor de resultaten gevonden voor verschillende hoeken van golfaanval. Zij worden in het volgende samengevat.

B_o
--

Globaal kan worden gesteld dat er nauwelijks verschil is in de orde-grootte van de ontwikkelde ondermijningsdiameters bij de verschillende hoeken van golfaanval. Er zijn echter een paar opvallende verschillen.

Het boven water gelegen $0,01 \text{ m}^2$ gat is voor scheve golfaanval ongevoelig voor de golfhoogte. Onder loodrechte golfaanval is er nog wel eenduidelijke relatie tussen de golfhoogte en de ondermijningsdiameter (zie de figuren 5.4 t/m 5.6). Overigens geldt voor dit boven water gelegen $0,01 \text{ m}^2$ gat dat de ontwikkelde ondermijningsdiameter wat groter is dan de diameter ontwikkeld onder scheve golfaanval. Verder lijkt het in eerste instantie vreemd dat het $0,06 \text{ m}^2$ gat onder 40° golfaanval en het onder water gelegen $0,01 \text{ m}^2$ gat onder 70° aanval de grootste ondermijningsdiameter ontwikkelen bij de kleinste golfhoogte. Het effekt van de golfhoogte lijkt bij scheve aanval dus minder duidelijk aanwezig te zijn.

Het effekt van de golfsteilheid lijkt enigszins bepaald te worden door de hoek van golfaanval. Voor loodrechte aanval leidt een verkleining van de golfsteilheid tot een grotere ondermijningsdiameter, terwijl bij 70° de golfsteilheid

nauwelijks van betekenis is. Voor 40° is het effect van de golfsteilheid onduidelijk.

D_o

--

Het globale beeld is dat bij golfaanval onder 40° een wat grotere erosiediepte wordt gevonden dan bij loodrechte aanval. Bij 70° aanval is er geen duidelijk verschil ten opzichte van de situatie met loodrechte aanval. Verder treden enkele opvallende verschillen op in de resultaten gevonden voor verschillende hoeken van golfaanval.

Het meest opvallende verschil is de eenduidige relatie van de erosiediepte bij 70° golfaanval, in tegenstelling tot het vrij warrige beeld bij loodrechte en 40° aanval. Bij 70° aanval lijkt de diepte voor een golfhoogte groter dan $H_s = 0,20$ m niet meer afhankelijk van deze golfhoogte.

Het effect van de golfsteilheid op de erosiediepte blijkt sterk bepaald te worden door de hoek van golfaanval. Een kleinere golfsteilheid leidt bij loodrechte golfaanval tot een kleinere erosiediepte en bij 70° aanval juist tot een grotere erosiediepte. Voor 40° aanval is het effect niet helemaal duidelijk.

5.7 Invloed van de gatgrootte

B_o

--

Inzicht in het effect van de gatgrootte op de ondermijningsdiameter kan worden verkregen uit het vergelijken van het onder water gelegen $0,01 \text{ m}^2$ gat en het onder water gelegen $0,06 \text{ m}^2$ gat in de figuren 5.4 t/m 5.6. Tevens kan voor $H_s = 0,20$ m het resultaat van het boven water gelegen $0,01 \text{ m}^2$ gat worden vergeleken met het boven water gelegen $0,06 \text{ m}^2$ gat. Zonder uitzondering kan worden gesteld dat bij het grotere gat een wat grotere ondermijningsdiameter ontstaat.

D_o

--

Op dezelfde wijze kan uit de figuren 5.13 t/m 5.15 inzicht worden verkregen op het effect van de gatgrootte op de erosiediepte. Hierbij valt op dat bij de $0,01 \text{ m}^2$ gaten na 250 golven de maximale erosiediepte reeds bereikt is. Bij het $0,06 \text{ m}^2$ gat heeft zelfs na 1000 golven nog een verdere toename van de erosiediepte plaats. De grootste ontwikkeling vindt echter ook hier tijdens de eerste 250 golven plaats. De erosiediepte behorend bij de $0,06 \text{ m}^2$ gaten is aanzienlijk groter dan de erosiediepte behorend bij de $0,01 \text{ m}^2$ gaten.

5.8 Invloed van de ligging van het gat t.o.v. de waterlijn

B_o
--

Inzicht in de invloed van de gatligging op de ondermijningsdiameter kan worden verkregen uit vergelijking van de resultaten voor het onder water gelegen 0,01 m² gat en het boven water gelegen 0,01 m² gat in de figuren 5.4 t/m 5.6. Hieruit worden enkele duidelijke verschillen zichtbaar. Een eerste verschil is dat het boven water gelegen 0,01 m² gat na 250 golven reeds zijn maximale ondermijningsdiameter heeft bereikt. Voor loodrechte golfaanval is deze maximale waarde nog wel afhankelijk van de golfhoogte, maar voor scheve golfaanval heeft ook de golfhoogte geen invloed op de ondermijningsdiameter. Voor het onder water gelegen 0,01 m² gat geldt een geheel ander beeld. De ontwikkelde ondermijningsdiepte is zowel afhankelijk van de golfhoogte als van het aantal golven. Alleen bij 70° aanval lijkt na 1000 golven een evenwicht te zijn bereikt (welke nog wel afhankelijk is van de golfhoogte). Voor deze 0,01 m² gaten is de ondermijningsdiameter behorend bij het onder water gelegen gat aanzienlijk groter dan die behorend bij het boven water gelegen gat.

In de figuren 5.4 t/m 5.6 is voor de golfhoogte $H_s = 0,20$ m ook het effect te zien van de ligging van het 0,06 m² gat. Dit effect is anders dan voor de 0,01 m² gaten. Bij het 0,06 m² gat lijkt de ondermijningsdiameter wat groter te zijn voor boven water gelegen gat. Na 1000 golven verandert de ondermijningsdiameter behorend bij het boven water gelegen gat niet veel meer. Voor 40° aanval is voor het boven water gelegen gat slechts de meting na 250 golven gepresenteerd, aangezien na 1000 golven de filterbak grotendeels was leeggespoeld.

D_o
--

De ontwikkeling van de erosiediepte verloopt voor het boven en het onder water gelegen 0,01 m² gat nagenoeg gelijk (zie de figuren 5.13 t/m 5.15). Voor het 0,06 m² gat bij $H_s = 0,20$ m worden wel aanzienlijke verschillen gevonden, maar het effect voor loodrechte aanval en 70° aanval is tegengesteld gericht.

5.9 Invloed van de diameter van het filtermateriaal

De invloed van de grootte van het filtermateriaal volgt uit vergelijking van het resultaat van proef 9 met het resultaat van proef 3. Voor beide proeven is gewerkt met dezelfde golfcondities ($H_s = 0,20$ m en $s_{op} = 0,04$). De zeefkrommen van het filtermateriaal dat is gebruikt voor de proeven 3 en 9 zijn gepresenteerd in figuur 3.3. De D_{f50} waarde van het in proef 9 gebruikte materiaal is een faktor 2,2 groter dan de D_{f50} waarde van het materiaal gebruikt in proef 3. Deze faktor bedraagt zowel voor de D_{f10} als de D_{f90} waarde 1,6. Het in proef 9 gebruikt materiaal is dus een orde 2 groter dan het in proef 3 gebruikte materiaal.

B_o
--

Het effect van de diameter van het filtermateriaal op de ondermijningsdiameter is gepresenteerd in de figuren 5.10 t/m 5.12.

Het algemene beeld bij loodrechte aanval is dat de ondermijningsdiameter afneemt met toenemende filterdiameter. Bij scheve aanval is het effect veel minder duidelijk, en worden resultaten gevonden variërend van een kleinere ondermijningsdiameter bij grover filtermateriaal tot een gelijke of zelfs grotere ondermijningsdiameter.

D_o
--

Het effect van de diameter van het filtermateriaal op de erosiediepte is gepresenteerd in de figuren 5.19 t/m 5.21. Ook hier wordt geen eenduidig beeld gevonden. In de meeste gevallen neemt de erosiediepte iets af als gevolg van het grovere filtermateriaal. Er zijn echter ook verschillende gevallen waarvoor het effect nihil is, en in een enkel geval wordt zelfs een wat grotere erosiediepte gevonden bij het grovere filtermateriaal.

5.10 Invloed van losse blokjes in de gaten

B_o
--

De invloed op de ondermijningsdiameter van losse blokjes in de gaten is gepresenteerd in de figuren 5.10 t/m 5.12. De figuren volgen uit een vergelijking van de resultaten van proef 3 en proef 6. Alleen voor loodrechte golfaanval wordt enig effect gevonden van de aanwezigheid van losse blokjes. De blokjes

hebben soms een vergrotend en soms een verkleinend effect op de ondermijningsdiameter. Voor scheve golfaanval is het effect van de blokjes nihil. De enige uitzondering hierop vormt het onder water gelegen $0,01 \text{ m}^2$ gat onder 70° aanval. Hierbij moet echter worden bedacht dat voor dit geval het resultaat met de aanwezigheid van blokjes beter past in het algemene beeld zoals dat is gepresenteerd in figuur 5.6. Voor dit gat moet het resultaat van proef 3 dan ook met de nodige argwaan worden beschouwd.

D_o
--

Het effect op de erosiediepte van losse blokjes in de gaten is gepresenteerd in de figuren 5.19 t/m 5.21. Ook hier is sprake van een zeer klein of niet eenduidig effect op de ontwikkelde erosiediepte.

5.11 Evaluatie van het gedrag van de filterlaag bij grote gaten

De beschouwingen in paragraaf 5.3 t/m 5.10 zijn gericht op de proefresultaten voor de $0,01 \text{ m}^2$ gaten en de $0,06 \text{ m}^2$ gaten. Voor de grotere $0,24 \text{ m}^2$ en $0,96 \text{ m}^2$ gaten is een deel van de resultaten niet direct te vertalen in een ondermijningsdiameter en een erosiediepte, aangezien de wanden (en de bodem) van de filterbak vrij snel na aanvang van de proef (zeg na enkele honderden golven) werden bereikt. De gatgrootte is in deze gevallen dan ook zo groot dat gesproken kan worden van een grindstrand onder directe golfaanval. Als de gatgrootte een zekere waarde overschrijdt, zal het gedrag van de filterlaag veel minder afhankelijk worden van de gatgrootte, omdat de golfaanval op de filterlaag niet meer wordt beïnvloed door de toplaag. Dit betekent dat het gedrag van de filterlaag zal lijken op dat van een grindstrand. Het gedrag van grindstranden kan worden geëvalueerd met het programma BREAKWAT.

Een gedetailleerde vergelijking van de proefresultaten voor de grote gaten met berekeningsresultaten is niet erg zinvol, omdat de proefresultaten sterk door de houten wanden van de filterbak zijn beïnvloed. Indien de erosiekuil deze wanden (nagenoeg) raakt, zal een versnelde erosie optreden door de reflectie van de inkomende golf tegen de wand en het ontbreken van filtermateriaal van bovenaf. Wel is het zinvol om met behulp van berekeningen achteraf het snelle leegspoelen van de filterbakken onder de grote gaten in de toplaag te verklaren.

Om het verloop van de proeven voor de grote gaten enigszins te verklaren zijn profielberekeningen voor grindstranden uitgevoerd met het programma BREAKWAT.

De resultaten van deze berekeningen voor loodrechte golfaanval zijn gepresenteerd in figuur 5.22. De bijbehorende gatdiameter $B_o + B_g$ en erosiediepte D_o zijn gepresenteerd in tabel 5.1. Bij het interpreteren van de berekende waarden voor $B_o + B_g$ moet worden bedacht dat een waarde van $(B_o + B_g) \geq 1,5$ m betekent dat de erosiekuil de bovenkant van de filterbak heeft bereikt. Uit de resultaten volgt dat de gatdiameter $B_o + B_g$ in alle gevallen behalve bij proef 2, zich tot dichtbij of net buiten de bovenkant van de filterbak uitstrekt. Dit verklaart het snelle leegspoelen van deze gaten bij de proeven 3 en 4 en in wat mindere mate bij proef 5. Bij proef 2 was daarentegen na 1000 golven nog een aanzienlijke hoeveelheid filtermateriaal aanwezig bovenin de filterbak. Ook na 5000 golven was bovenin nog wat filtermateriaal aanwezig, alhoewel de bodem van de bak wel zichtbaar was. Het al of niet volledig tot de bovenkant van de filterbak wegspoelen van het filtermateriaal kan dus redelijk worden beschreven met BREAKWAT. De erosiediepte wordt echter onderschat.

Bij scheve golfaanval verdwijnt een deel van het filtermateriaal uit het gat via langtransport. Een schatting van de hoeveelheid langtransport is gemaakt met behulp van de langtransportformule (Van der Meer, 1990), welke is gebaseerd op het werk van Van Hijum en Pilarczyk (1982). De formule beschrijft het langtransport als functie van de golfhoogte H_s , de golfperiode T_p , de hoek van golfaanval β en de steendiameter D_{f50} :

$$\frac{S(x)}{g D_{n50}^2 T_p} = 0.0012 \frac{H_s \sqrt{\cos \beta}}{D_{n50}} \left\{ \frac{H_s \sqrt{\cos \beta}}{D_{n50}} - 11 \right\} \sin \beta \quad (5.1)$$

De formule geeft een totaal transport langs een grindprofiel, lopend van de teen van het profiel tot ongeveer de waterlijn. Dit betekent dat de transporten, bepaald met bovenstaande formule en de golfcondities, langtransporten opleveren voor een profiel tussen ongeveer S.W.L. en S.W.L. -0,70 m, indien dit profiel geheel uit grind zou bestaan.

Een deel van deze transportcapaciteit gaat echter verloren, omdat deze aanwezig is boven de steenzetting in plaats van boven het grind. Er moet dus een reductie worden toegepast op het met bovenstaande formule bepaalde transport, omdat slechts een beperkt deel van het profiel uit verplaatsbaar materiaal bestaat. Aangezien de verdeling van de langtransportcapaciteit van grind over een profiel niet precies bekend is, kan deze reductie slechts worden geschat.

Daarom is een onder- en bovengrensbepaling van 0,10 respectievelijk 0,50, welke vrij arbitrair zijn gekozen, doch zodanig dat bij de eerstgenoemde faktor

waarschijnlijk wat onderschatting en bij laatstgenoemde faktor waarschijnlijk wat overschatting van het langstransport optreedt. De resultaten zijn gepresenteerd in tabel 5.2. Voor golfaanval onder 40° is het langstransport het grootst, voor 70° wat kleiner en voor loodrechte golfaanval is het langstransport nul. Opgemerkt wordt dat eigenlijk gesproken zou moeten worden van "langstransportcapaciteit" in plaats van "langstransport". De gepresenteerde transportwaarden hebben betrekking op hoeveelheden van het betreffende grindmateriaal welke onder de beschouwde golfcondities kunnen worden getransporteerd, indien dit transport ongehinderd kan plaats vinden. In het geval van de filterbakconstructie en de perspex plaat rond het gat, wordt de langsafvoer van filtermateriaal echter wel gehinderd. De wanden van de filterbak en de perspex plaat zullen een grotere obstructie voor langstransport gaan vormen naarmate er meer filtermateriaal uit het gat is gespoeld, en het filter dieper onder de perspex plaat komt te liggen. Dit effect komt niet tot uitdrukking in de transportwaarden gepresenteerd in tabel 5.2. De tabel maakt echter wel duidelijk dat er tijdens nagenoeg alle proefcondities voldoende langstransportcapaciteit aanwezig was om de grote bakken blootgesteld aan scheve golfaanval na 1000 tot 5000 golven geheel te ledigen (het totaal volume aan filtermateriaal onder de $0,96 \text{ m}^2$ gaten was $0,306 \text{ m}^3$).

Om de in langsrichting afgevoerde hoeveelheid materiaal te kunnen vergelijken met de in dwarsrichting afgevoerde hoeveelheid, is uit de $(B_o + B_g)$ en de D_o waarden een schatting gemaakt van het corresponderende volume. Omdat de vorm van de erosiekuil wat kan variëren, is weer gewerkt met een onderschatting en een overschatting van dit volume. De schattingen zijn gepresenteerd in tabel 5.3. Vervolgens zijn de in langs- en dwarsrichting afgevoerde hoeveelheden (uit tabel 5.3 respectievelijk 5.2) filtermateriaal bij elkaar opgeteld, zie tabel 5.4. Hieruit blijkt dat voor het $0,96 \text{ m}^2$ gat onder loodrechte golfaanval ($0,306 \text{ m}^3$ aan filtermateriaal in filterbak aanwezig) na 5000 golven kan worden verwacht dat de filterbak grotendeels leeg is, doch nooit in zijn geheel. Voor de $0,96 \text{ m}^2$ bakken onder scheve golfaanval mag worden verwacht dat de bakken zo goed als leeg zijn gespoeld. Daarbij is het verschil in afvoercapaciteit bij 40° en 70° golfaanval gering. Deze conclusies uit de berekeningen komen goed overeen met de gevonden ontwikkeling bij de grote gaten tijdens de proeven. Tenslotte wordt voor de gaten onder scheve aanval nog opgemerkt dat na 250 golven het grootste deel van het uitgespoelde filtermateriaal via dwarstransport is afgevoerd, terwijl na 5000 golven het aandeel van het langstransport het grootst is. Bij 1000 golven zijn de bijdragen van langs- en dwarsafvoer ongeveer gelijkwaardig.

De bovenstaande evaluatie bevestigt dat het gedrag van filtermateriaal bij grote gaten in de top laag (in de proeven gaten groter of gelijk aan $0,24 \text{ m}^2$) redelijk beschreven kan worden met de bestaande formules voor grindstranden.

5.12 Overgangsconstructies

Bij de gaten met een overgangsconstructie kan de naar boven gerichte uitbreiding van de erosiekuil niet plaats vinden, omdat zich direct boven het gat een harde constructie bevindt. Bij de proeven was een overgangsconstructie plaatsvast en over de volledige filterlaagdikte aangebracht. Hierdoor kan geen toevoer van filtermateriaal van bovenaf plaats vinden en de waterbeweging in het gat wordt beïnvloed doordat de watermassa die het gat instroomt nu tegen de overgangsconstructie reflecteert.

Hierdoor ontstaan erosiekuilen van een veel kleinere omvang (d.w.z. kleinere B_0) dan bij de gaten zonder overgangsconstructie, zie de figuren 4.16 t/m 4.21. Er is een lichte tendens tot erosie beneden het gat in de top laag zichtbaar. Het algemene beeld is dat geen of een beperkte ondermijningsdiameter van maximaal de helft van de gathoogte B_g ontstaat tijdens de eerste 250 golven. Onder ondermijningsdiameter wordt in dit geval verstaan de afstand tussen de onderkant van de erosiekuil en de onderkant van het gat in de top laag, gemeten langs het talud. Bij de gaten met overgangsconstructie is de ondermijning dus naar beneden gericht, in tegenstelling tot de ondermijning bij de gaten zonder overgangsconstructie. Tijdens de daarop volgende golven groeit deze ondermijning nauwelijks. Deze ondermijning is aanzienlijk kleiner dan bij de gaten zonder overgangsconstructie. Hieruit kan worden geconcludeerd dat voor verdere groei van gaten in de top laag als gevolg van het overschrijden van een kritieke ondermijning de lokatie net onder een overgangsconstructie minder kritisch is. Echter, de aanwezigheid van de overgangsconstructie leidt wel tot een grotere diepte van de erosiekuil. Dit is geïllustreerd in figuur 5.23. Hierin zijn erosiediepten D_0 vergeleken welke onder gelijke golfcondities ontstaan bij een gat met een overgangsconstructie en een gat zonder overgangsconstructie. Voor de $0,01 \text{ m}^2$ gaten zijn de daar gepresenteerde erosiediepten D_0 afgeleid van de proeven 3 en 7. Voor de $0,06 \text{ m}^2$ gaten zijn de erosiediepten afgeleid van de proeven 5 en 8. De grootste erosiediepte wordt gevonden ter plaatse van de overgangsconstructie. Bij de $0,06 \text{ m}^2$ gaten wordt op dit punt de filterlaag (welke een dikte heeft van $0,15 \text{ m}$) zelfs geheel weggespoeld.

Het erosieproces voor gaten in de toplaag welke zich dicht onder een overgangsconstructie bevinden is dus nauwelijks vergelijkbaar met dat van de in paragraaf 5.1 t/m 5.11 beschreven gaten zonder overgangsconstructie. Als zeer globale richtlijn zou op basis van de beperkte hoeveelheid beschikbare metingen voor dit geval kunnen worden gegeven:

1. Er hoeft minder rekening te worden gehouden met een groeiende ondermijning van de toplaag. Een beperkte ondermijning van de toplaag treedt nu op onder het gat in de toplaag, in plaats van er boven. In zijwaartse richting is de ondermijning van de toplaag vergelijkbaar met de zijwaartse ondermijning bij gaten zonder overgangsconstructie.
2. Er moet daarentegen wel rekening worden gehouden met een sterke erosie in de diepte. De erosiediepte op een bepaald moment is zeker een orde 2 groter dan de erosiediepte bij gaten zonder overgangsconstructie.

6. Formules voor het gedrag van de filterlaag

Uit de voorgaande beschouwingen blijkt dat met een zekere spreiding een verband kan worden verwacht tussen de ondermijningsdiameter B_o enerzijds en N , H_s , s_{op} , B_g en d_g anderzijds. Tevens is dit verband, zij het wat minder duidelijk, ook terug te vinden in de erosiediepte D_o .

Daarom is gekozen voor B_o als de te beschrijven parameter, en wordt D_o (en ook B_d) hieraan gekoppeld via de in figuur 5.3 gepresenteerde correlatie.

Bij het afleiden van relaties voor B_o is gebruik gemaakt van dimensieloze parameters. In eerste instantie zijn hierbij alleen de resultaten van proef 2 t/m 4 (varierende golfhoogte maar constante golfsteilheid) en proef 5 (kleinere golfsteilheid) gebruikt. Hieruit bleek dat een redelijk lineair verband kon worden gevonden tussen de volgende twee dimensieloze parameters:

B_o/B_g = De verhouding tussen de ondermijningsdiameter en de diameter van het gat in de toplaag. Uit de beschouwingen in paragraaf 5.7 volgde dat de grootte van de ondermijningsdiameter gekoppeld was aan aan de grootte van het gat in de toplaag.

$H_s/(B_g\sqrt{s_{op}})$ = Parameter voor het beschrijven van de invloed van de golfhoogte en de golfsteilheid. Deze parameter geeft een maat voor de golfaanval per eenheid van gatgrootte.

In figuur 6.1 is voor de verschillende hoeken van golfaanval en voor de verschillende stormduren de relatie tussen bovengenoemde dimensieloze parameters uitgezet. Het verband is nog wel afhankelijk van de ligging van het gat ten opzichte van de waterlijn.

Vervolgens is het aantal punten uitgebreid met behulp van de resultaten van de proeven uitgevoerd met losse blokjes in de gaten. Uit de beschouwing in paragraaf 5.10 volgde reeds dat de blokjes in de gaten geen duidelijke invloed hadden. De toegevoegde resultaten passen dan ook goed in de reeds gevonden relatie, zie figuur 6.2. In figuur 6.2 zijn de effecten van H_s , s_{op} , B_g en de aanwezigheid van blokjes in de beschouwing betrokken, echter nog afzonderlijk voor de verschillende combinaties van N en β , en met verschillende relaties voor de onder water gelegen en de boven water gelegen gaten.

Vervolgens is het effect van de hoek van golfaanval β beschouwd in figuur 6.3, die een samenvatting is van de grafieken in figuur 6.2. In deze figuur zijn tevens rechte lijnen getrokken voor de verschillende golfrichtingen en de boven en onder water gelegen gaten afzonderlijk. Hoewel dit dus eigenlijk tot 6 rechte lijnen per figuur zou leiden, zijn er na het samenvoegen van vrijwel samenvallende lijnen in elke figuur nog slechts 3 lijnen over. Uit de figuren kan het volgende worden afgeleid:

- Per aantal golven N kunnen alle lijnen door een gezamenlijk snijpunt worden getrokken.
- Dit snijpunt ligt voor elke aantal golven N op dezelfde positie langs de horizontale as ($H_g/(B_g\sqrt{s_{op}}) = 3$), maar verschuift met toenemend aantal golven N omhoog langs de verticale as (toename B_o/B_g ter plaatse van het snijpunt met toenemend aantal golven).
- Voor de boven water gelegen gaten onder 40° en 70° zijn de lijnen horizontaal.
- Voor de overige gevallen is de richtingscoëfficiënt van de lijnen een functie van N , d_g en β .

De met het snijpunt van de lijnen corresponderende waarde van B_o/B_g is een functie van alleen het aantal golven N . Het uit figuur 6.3 af te lezen gedrag van het snijpunt is goed te beschrijven door middel van een machtsfunctie, zie figuur 6.4. De ligging van het snijpunt op de horizontale as is onafhankelijk van het aantal golven; de constante waarde op deze as is ($H_g/(B_g\sqrt{s_{op}}) = 3$).

Relatie B_o/B_g voor x-as = 3

$$\text{Als } \frac{H_g}{B_g\sqrt{s_{op}}} = 3:$$

$$\frac{B_o}{B_g} = 0,49N^{0,14} \quad (6.1)$$

Het snijpunt kan worden beschouwd als de overgang tussen twee verschillende fysische processen. Uitgaande van de golfhoogte-range van $0,15 \text{ m} < H_g < 0,25 \text{ m}$, is $H_g/(B_g\sqrt{s_{op}}) > 3$ het domein van de kleine gaten en $H_g/(B_g\sqrt{s_{op}}) < 3$ het domein van de zeer grote gaten.

Bij de kleine gaten hebben de plaats en de afmeting van het gat in de toplaag invloed op de ontwikkeling van de filtererosie. De inkomende golven worden

sterk vervormd door het beperkte gatoppervlak in de toplaag voordat zij de filterlaag bereiken. Bij de zeer grote gaten heeft de gatafmeting geen invloed meer op de erosie, en gaat een sterke analogie optreden met grindstranden. De inkomende golven bereiken nu de filterlaag onverstoord. Voor het beschrijven van het gedrag van grindstranden zijn modellen beschikbaar (zie ook paragraaf 5.11). Het geringe aantal meetpunten in dit domein kan dus worden aangevuld met berekende punten. Hierop wordt later in deze paragraaf teruggekomen.

De richtingscoëfficiënten van de rechte lijnen in figuur 6.3 zijn in figuur 6.5 uitgezet als functie van het aantal golven. Voor alle gevallen is het verband redelijk lineair. De richtingscoëfficiënt wordt sterk bepaald door de hoek van golfaanval en door de ligging van het gat ten opzichte van de waterlijn. Voor de boven water gelegen gaten is de richtingscoëfficiënt onafhankelijk van het aantal golven. Voor de onder water gelegen gaten neemt de richtingscoëfficiënt toe met het aantal golven.

Op basis van de metingen is het niet mogelijk het effect van de hoek van golfaanval gedetailleerd te beschrijven. Er blijkt een significant verschil te zijn tussen $40/70^\circ$ aanval enerzijds en loodrechte aanval anderzijds. Daarbij is er nauwelijks verschil voor de ontwikkeling van de ondermijningsdiameter B_0 voor 40° en 70° aanval. Derhalve is een relatie voor B_0 afgeleid voor loodrechte aanval (zeg $\beta < 20^\circ$) en voor scheve aanval (zeg $\beta > 20^\circ$).

Wel is getracht het effect van de gatligging op de richtingscoëfficiënt zo goed mogelijk te beschrijven. Het is aannemelijk dat de ligging van het gat d_g moet worden beschouwd in relatie tot de golfaanval. Derhalve is gekeken naar het verband tussen de dimensieloze parameter $d_g\sqrt{s_{op}}/H_s$ en de richtingscoëfficiënt. Voor het $0,01 \text{ m}^2$ en het $0,06 \text{ m}^2$ gat zijn proefresultaten beschikbaar voor twee waarden van d_g . Een rechtlijnig verband door deze twee punten mag niet buiten het bereik van de beproefde waarden van d_g worden geëxtrapoleerd. Immers, verwacht mag worden dat voor zeer hoog in het talud gelegen gaten de richtingscoëfficiënt nul wordt, omdat de golven het gat niet bereiken. Hetzelfde geldt voor zeer diep gelegen gaten, waar het filtermateriaal niet meer door de golven in beweging wordt gebracht. Dehalve dient door de gemeten punten een verband te worden gelegd welke voor grote absolute waarden van d_g naar nul gaat. Op basis van de golfoploop op het talud kan een gatligging worden aangegeven waarboven geen filter-erosie meer optreedt. Bovendien kan op basis van de relaties voor de ontwikkeling van grindprofielen de actieve diepte van het grindfilter worden

afgeschat. Op basis hiervan kan een gatligging worden aangegeven waaronder geen filter-erosie meer optreedt. Uit de 2%-golfoploop onder loodrechte golf-aanval volgt een bovengrens voor filter-erosie voor $d_g\sqrt{s_{op}}/H_s = 1$ à $1,5$. Voor scheve aanval is deze bovengrens kleiner. Voor het afschatten van de ondergrens voor filter-erosie is beschouwd tot welke diepte een grindprofiel nog actief is onder het beproefde golfhoogtebereik. Hiervoor is de "transition-height" (Van der Meer, 1988 [3]) als criterium genomen. Dit leidt tot een ondergrens voor filter-erosie voor $d_g\sqrt{s_{op}}/H_s = -0,8$ à $-0,9$. De op deze wijze bepaalde orde-grootten voor $d_g\sqrt{s_{op}}/H_s$ geven aan voor welke waarden van $d_g\sqrt{s_{op}}/H_s$ de richtings-coëfficiënt tot dicht bij nul moet zijn genaderd.

Door de gemeten richtingscoëfficiënten, behorend bij de twee beproefde waarden van d_g , is een relatie gefit in de vorm van een normale verdeling. De algemene vorm van de normale verdeling is: $y = a e^{-b(x-c)^2}$, waarin a , b en c nader te bepalen coëfficiënten zijn. De functie heeft een maximum waarde $y_{max} = a$ als $x = c$. Verder is de functie symmetrisch ten opzichte van dit maximum. De breedte van de "top" wordt bepaald door de coëfficiënt b . Bij het fitten van deze verdeling door de gemeten waarden is de plaats van de top gekozen op $d_g = -0,36$ m. Dit punt was bij de opzet van de proeven gekozen als het meest kritieke punt voor schade aan de toplaag.

Voor loodrechte en scheve golfaanval is afzonderlijk een verband afgeleid. Het gevonden verband is gepresenteerd in figuur 6.6. De gefitte functie is in te passen binnen de onzekerheidsmarges in de metingen. De richtingscoëfficiënten naderen redelijk tot nul voor de hierboven afgeschatte waarden van $d_g\sqrt{s_{op}}/H_s$. De gevonden relaties voor de richtingscoëfficiënt zijn:

Voor loodrechte aanval:

$$\text{richt. coeff.} = (0,16 + 5 \cdot 10^{-5}N) e^{-0,08\sqrt{N} \left(\frac{d_g\sqrt{s_{op}}}{H_s} + 0,39 \right)^2} \quad (6.2)$$

Voor scheve aanval:

$$\text{richt. coeff.} = (0,28 + 3 \cdot 10^{-5}N) e^{-22 \left(\frac{d_g\sqrt{s_{op}}}{H_s} + 0,39 \right)^2} \quad (6.3)$$

Via de combinatie van relatie (6.1) voor het snijpunt van de lijnen en de relaties (6.2) en (6.3) voor de richtingscoëfficiënten van de lijnen zijn de volgende relaties af te leiden voor B_o/B_g , voor waarden van $H_s/(B_g\sqrt{s_{op}}) > 3$.

Voor loodrechte aanval:

Als $\frac{H_s}{B_g \sqrt{S_{op}}} > 3$ en $\beta < 20^\circ$:

$$\frac{B_o}{B_g} = 0,49N^{0,14} + (0,16 + 5 \cdot 10^{-5}N) e^{-0,08\sqrt{N} \left(\frac{d_g \sqrt{S_{op}}}{H_s} + 0,39 \right)^2} \left[\frac{H_s}{B_g \sqrt{S_{op}}} - 3 \right] \quad (6.4)$$

Voor scheve aanval:

Als $\frac{H_s}{B_g \sqrt{S_{op}}} > 3$ en $\beta > 20^\circ$:

$$\frac{B_o}{B_g} = 0,49N^{0,14} + (0,28 + 3 \cdot 10^{-5}N) e^{-22 \left(\frac{d_g \sqrt{S_{op}}}{H_s} + 0,39 \right)^2} \left[\frac{H_s}{B_g \sqrt{S_{op}}} - 3 \right] \quad (6.5)$$

In figuur 6.7 zijn met het bovenbeschreven model berekende punten (op basis van gemeten randvoorwaarden) uitgezet. Uit vergelijking met figuur 6.3 blijkt de overeenkomst tussen model en metingen voor $d_g = 0$ (boven water gelegen gaten bij proeven) en $d_g = -0,36$ m (onder water gelegen gaten bij proeven) zeer goed. In figuur 6.7 zijn tevens berekende waarden voor $d_g = -1$ m en $d_g = +1$ m uitgezet. Hiervoor zijn geen metingen beschikbaar. De waarden zijn dan ook meer bedoeld als een illustratie van het door het model gesuggereerde effect van de gatligging. Zo volgt voor scheve golfaanval dat bij $d_g = +/- 1$ m de richtingscoëfficiënt van de lijn reeds nul is, terwijl bij loodrechte aanval dit nog niet het geval is.

In figuur 6.8 zijn berekende en gemeten waarden van B_o/B_g (voor bepaalde waarden van $H_s/(B_g \sqrt{S_{op}})$) tegen elkaar uitgezet. Hieruit blijkt dat de berekeningen goed voldoen. Bedacht moet worden dat bij scheve golfaanval een aanzienlijke spreiding aanwezig was in de meetresultaten. Dit komt uiteraard ook weer naar voren in de in figuur 6.8 gepresenteerde vergelijking.

Tenslotte is het gedrag van B_o/B_g beschouwd in het domein van de zeer grote gaten waarvoor geldt dat $H_s/(B_g \sqrt{S_{op}}) < 3$. In dit domein zijn weinig bruikbare metingen beschikbaar. In paragraaf 5.11 is beschreven hoe het kleine aantal bruikbare metingen in dit domein kan worden aangevuld met de resultaten van

BREAKWAT berekeningen. In paragraaf 5.11 bleek dat met BREAKWAT de ondermijningsdiameter goed kan worden voorspeld, maar dat met BREAKWAT de erosiediepte wordt onderschat. Het gebruik van BREAKWAT is in dit domein gerechtvaardigd, omdat bij zeer grote gaten de onverstoorde golf (niet verstoord door een beperkte gatgrootte) het filter vervormt. Het gedrag van een grind/steenlaag onder directe golfaanval kan goed worden voorspeld met BREAKWAT. De waarden van tabel 5.1 zijn voor enkele waarden van $1 \text{ m} < B_g < 3 \text{ m}$ toegevoegd aan de gemeten punten, resulterend in figuur 6.9. Hieruit volgt dat de berekende punten redelijk goed aansluiten bij de gemeten punten.

De spreiding van de resultaten in dit gebied is dermate groot dat verschillende verbanden kunnen worden gelegd. Theoretisch het meest correct is wellicht de benadering waarbij wordt uitgegaan van $(B_o + B_g) = 0$ als $H_s = 0$. Omdat in het beschouwde domein de erosieontwikkeling niet meer afhankelijk is van de gatgrootte, zou nu het verband kunnen zijn:

$$B_o + B_g = a \cdot \frac{H_s}{\sqrt{s_{op}}}$$

Deze uitdrukking is identiek aan:

$$\frac{B_o}{B_g} = -1 + a \cdot \frac{H_s}{B_g \sqrt{s_{op}}}$$

met a een nader te bepalen richtingscoëfficiënt (afhankelijk van N).

Bovenstaande benadering leidt dus tot een lineair verband tussen B_o/B_g en $H_s/(B_g \sqrt{s_{op}})$ waarbij ook negatieve ondermijningsdiameters kunnen optreden (fysisch betekent dit een erosiekuil kleiner dan het gat in de toplaag, hetgeen bij zeer grote gaten een reële situatie is).

Een nadeel van deze benadering is dat het tot wat onderschatting van de ondermijningsdiameter leidt ten opzichte van de gemeten en berekende punten in figuur 6.9.

Een theoretisch minder goede, maar beter bij de gemeten en berekende punten in figuur 6.9 passende benadering is een machtsfunctie die voor $H_s = 0$ of $B_g \rightarrow \infty$ een ondermijningsdiameter $B_o = 0$ geeft (geen negatieve ondermijningsdiameters). Door de in figuur 6.9 gepresenteerde punten blijkt een macht 0.5 goed te voldoen, zodat het verband tussen B_o/B_g en $H_s/(B_g \sqrt{s_{op}})$ wordt (voor alle hoeken van golfaanval):

als $\frac{H_g}{B_g \sqrt{s_{op}}} \leq 3$:

$$\frac{B_o}{B_g} = 0,28N^{0,14} \sqrt{\frac{H_g}{B_g \sqrt{s_{op}}}} \quad (6.6)$$

Voor waarden van $H_g / (B_g \sqrt{s_{op}}) < 1$ is deze benadering wat conservatief.

Via de correlatie tussen B_d en $(B_o + B_g)$ gepresenteerd in figuur 5.2 is nu ook de dwarsdiameter van het gat B_d te bepalen:

$$\frac{B_d}{B_g} = 0,9 \cdot \left(1 + \frac{B_o}{B_g}\right) \quad (6.7)$$

Tevens is de erosiediepte D_o nu te bepalen via de in figuur 5.3 gepresenteerde correlatie tussen D_o en $(B_o + B_g)$. Figuur 5.3a en 5.3b bestaan beide uit dezelfde meetpunten, maar in figuur 5.3a is onderscheid gemaakt naar hoek van golfaanval terwijl in figuur 5.3b onderscheid is gemaakt naar de verschillende gaten. Er blijkt geen duidelijk onderscheid mogelijk tussen de verschillende golfrichtingen, zodat voor zowel scheve als loodrechte golfaanval dezelfde relatie tussen D_o en $(B_o + B_g)$ kan worden genomen. Bij de onderverdeling naar de verschillende gaten treedt wel een duidelijk groepering van de punten op. Tussen het onder- en boven water gelegen 0,01 m² gat is verschil. Bij de onder water gelegen gaten ontwikkelen zich grotere erosiediameters $(B_o + B_g)$ en grotere erosiediepten D_o dan bij de boven water gelegen gaten. De grootste erosiediameters $(B_o + B_g)$ en erosiediepten D_o worden gevonden voor het grotere 0,6 m² gat. Dit geeft nogmaals aan dat inzicht in de ontwikkeling van de erosiediameter (welke bepalend is voor verdere groei van het gat in de toplaag) essentieel is bij het bepalen van de reststerkte. Een 0,01 m² gat zal immers in veel gevallen na een bepaald aantal golven zijn uitgroeid tot een 0,06 m² gat, welke correspondeert met een aanzienlijk grotere erosiediepte. Een beschouwing van de ontwikkeling van de erosie in de diepte kan dus nooit los worden gezien van de ontwikkeling van het gat in de toplaag.

De in figuur 5.3 getrokken rechte lijn kan worden beschouwd als een redelijk conservatieve schatting van de erosiediepte. Hierbij moet nog worden opgemerkt dat enkele van de in figuur 5.3 aangegeven diepten wat onderschat kunnen zijn. Bij het meten van de diepten in de kuil is immers alleen direkt onder het gat in de toplaag gemeten (zie figuur 3.2), terwijl de erosiekuil tot buiten dit bereik doorloopt. In de meeste gevallen was dit geen probleem, omdat het

diepste punt van de erosiekuil onder het gat in de toplaag lag. In enkele gevallen is echter niet met zekerheid vast te stellen of ook werkelijk het diepste punt in de erosiekuil is gemeten. In die gevallen is het diepst gemeten punt aangehouden, welke dus een onderschatting kan zijn van de werkelijk maximale diepte. Overigens kon dit meetprobleem nauwelijks worden vermeden. Het verwijderen van alle perspex platen na elke test zou de tijdsduur per proef aanzienlijk hebben vertraagd. Belangrijk is ook dat door het herhaaldelijk verwijderen en weer aanbrengen van de perspex platen een grote kans bestaat op verstoring van de situatie (b.v. niet meer goed aansluiten van platen op filterlaag, lokale lekkages ter plaatse van bevestigingspunten platen, in filterbak stappen van personen).

De in figuur 5.3 getrokken lijn wordt beschreven met:

$$\frac{D_o}{B_g} = 0,135 \cdot \left(1 + \frac{B_o}{B_g}\right) \quad (6.8)$$

7. Evaluatie en suggesties voor verder onderzoek

7.1 Evaluatie

In [1] is een bureaustudie verricht naar de reststerkte van bekledingsconstructies. De studie bevatte een inventarisatie van de bestaande kennis, en gaf een eerste opzet voor de kwantificering van de reststerkte. In het volgende wordt een verband gelegd tussen de resultaten van de modelproeven en relevante bevindingen beschreven in [1].

In [1] wordt een proef besproken die is uitgevoerd in de Deltagoot. Bij de proef werd 0,5 m onder S.W.L. kunstmatig initiële schade aangebracht door een blok (oppervlak $0,25 \text{ m}^2$ en $B_g = 0,5 \text{ m}$) uit de toplaag te verwijderen. Vervolgens werd de ontwikkeling van de ondermijningsdiameter B_o beschouwd onder de golfconditie $H_s = 1,43 \text{ m}$ en $s_{op} = 0,03$. Het talud lag onder een helling 1:3,5.

De omstandigheden zijn dus globaal vergelijkbaar met de omstandigheden waaronder de resultaten voor het onder water gelegen $0,01 \text{ m}^2$ gat gepresenteerd in figuur 5.7 zijn verkregen, als deze met een schaalfactor van ongeveer 10 worden vermenigvuldigd. Daarom mag dezelfde orde-grootte voor de filtererosie worden verwacht.

In de Deltagootproef worden ondermijnde oppervlakken gevonden van ongeveer $1,3 \text{ m}^2$ na 180 golven en 4 m^2 na 900 golven. Hierbij zijn de proefduren vermeld in [1] omgerekend naar aantallen golven via een gemiddelde golfperiode $T_m = 5 \text{ sec}$.

Indien voor het gemak wordt uitgegaan van een cirkelvormige erosiekuil (hetgeen een redelijke benadering is, zie figuur 5.2), kan dit worden vertaald in ondermijningsdiameters (gemeten t.o.v. de bovenkant van het gat in de toplaag) van 0,8 m na 180 golven en 1,7 m na 900 golven.

Uit figuur 5.7 volgt voor het onderwater gelegen $0,01 \text{ m}^2$ gat een ondermijningsdiameter B_o (omgerekend met een schaalfactor 10) van ongeveer 1,5 m na 180 golven en 2 m na 900 golven. Uit de relatie (5.4) volgt een ondermijningsdiameter van 1,5 m na 180 golven en van 1,8 m na 900 golven. De berekende ondermijningsdiameter na 180 golven is dus duidelijk iets te hoog, maar de berekende ondermijningsdiameter na 900 golven sluit zeer goed aan bij de resultaten van de Deltagootproef.

De diepte van de erosiekuil bleek in de Deltagoot maximaal ongeveer 10 cm te bedragen. Volgens figuur 5.16 zou de diepte maximaal ongeveer 5 cm zijn. Met vergelijking (5.8) wordt een grotere erosiediepte van 0,27 m na 180 golven en 0,31 m na 900 golven berekend. De berekende erosiediepte is dus aanzienlijk groter dan die gemeten bij de Deltagoot proeven. Hierbij kan worden opgemerkt dat bij de Deltagootproef een 4 cm dikke uitvullaag aanwezig was tussen het mijnsteen en de toplaag. Wellicht is de maximale diepte in de erosiekuil wat afgevlakt door het materiaal uit de uitvullaag.

Bij de overige in [1] besproken schadegevallen ontbreken stukjes essentiële informatie om een soortgelijke evaluatie toe te kunnen passen.

De gemeten sterke erosie in de diepte ter plaatse van overgangsconstructies betekent dat een ondermijning van de overgangsconstructie en doorgaande erosie van het filter boven deze constructie niet denkbeeldig is. Een dergelijk geval is beschreven in [1]. Het betrof daar een praktijkschade, vastgesteld bij de Philipsdam, waarbij erosie van het filter welke ontstond onder een overgangsconstructie zich tot boven overgangsconstructie uitbreidde. Hierdoor werd de overgangsconstructie ondermijnd. Deze overgangsconstructie reikte echter niet erg diep (40 cm). Bij de Scheldebakproeven was de overgangsconstructie vast opgesteld over de gehele dikte van de filterlaag. Hierdoor kon bij de proeven geen erosie boven de overgangsconstructie plaatsvinden, en kon de overgangsconstructie niet worden ondermijnd.

Tevens zijn in [1] enkele gevoeligheden beschouwd van de erosiediepte D_0 voor onder andere de stormduur N , de golfhoogte H_s , de golfperiode T_p en de korrelgrootte van het filtermateriaal D_{f50} . De gevoeligheden werden afgetast door middel van berekeningen met BREAKWAT.

Voor het effect van de stormduur N werd een verloop gevonden dat globaal analoog is aan het beeld afgeleid uit de proeven: een zeer snelle groei van de erosiediepte tijdens de eerste golven, en vervolgens een zeer trage voortgang van de groei.

Een sterke gevoeligheid van de erosiediepte voor de golfhoogte H_s werd in [1] ook gevonden. Bovendien was het verband vrijwel lineair. Dit komt vrij goed overeen met de metingen.

Bovendien werd een vrijwel lineair verband gevonden tussen de erosiediepte en $1/\sqrt{s_{op}}$. Ook dit komt goed overeen met de metingen.

Voor het effect van de korrelgrootte van het filtermateriaal werd in [1] gevonden dat deze bij taluds 1:3 à 1:4 slechts een zeer gering effect had (bij een talud 1:5 was het effect wel aanzienlijk!). Gaande van $D_{f50} = 5$ mm naar $D_{f50} = 50$ mm (een vertienvoudiging van de korreldiameter) nam de erosiediepte slechts af met 20% en 40% bij een talud 1:3 respectievelijk 1:4. Dit komt goed overeen met de resultaten van het huidige modelonderzoek. Overigens werd in geen van de in [1] berekende gevallen de erosiediepte groter dan 1,0 m.

7.2 Suggesties voor verder onderzoek

De uit de metingen afgeleide vergelijkingen voor het beschrijven van het gedrag van het filter zijn gebaseerd op een beperkt aantal proeven. Soms waren bepaalde proefresultaten niet erg eenduidig, en de mate van reproduceerbaarheid van de proeven is niet goed aan te geven. Toch waren duidelijke verbanden af te leiden tussen de belangrijkste parameters die het gedrag van de filterlaag bepalen. Uit de evaluatie in paragraaf 7.1 bleek dat er weinig goed gedocumenteerde gevallen beschikbaar zijn om de vergelijkingen te toetsen. Daarom zou kunnen worden overwogen een nieuw proevenprogramma te starten toegespitst op het controleren van de nu gevonden verbanden. De afgeleide relaties zouden bij de opzet van dit proevenprogramma als uitgangspunt moeten dienen. Met name de invloed van de ligging van het gat t.o.v. S.W.L. (d_g) zou nader kunnen worden bekeken. De term voor het beschrijven van deze invloed maakt de afgeleide vergelijkingen vrij ingewikkeld, terwijl deze term slechts op enkele metingen (twee verschillende waarden voor d_g) is gebaseerd. De ligging van het gat t.o.v. S.W.L. is van belang, omdat tijdens een storm aanzienlijke waterstandsvariaties kunnen optreden.

De resultaten van het onderzoek beschrijven een belangrijk deel van de processen welke bepalend zijn voor de resterende van een steenzetting. Om echter te komen tot een model voor het bepalen van de werkelijke reststerkte is extra informatie in de vorm van een "kritieke ondermijningsdiameter" vereist. Hiermee wordt bedoeld de ondermijningsdiameter waarbij het ondermijnende deel van de toplaag verder instort. De kennis over deze kritieke diameter zal ongeveer even nauwkeurig moeten zijn als de kennis over de te verwachten ondermijningsdiameter voordat beide kunnen worden samengebracht in een reststerktemodel. In dit reststerktemodel zou uiteindelijk (bij gegeven golfcondities) als functie van het aantal golven de gatgroei in de toplaag (initiële schade - ondermijning - instorten - verdere ondermijning etc.) en de groei van de erosiediepte moeten

worden gesimuleerd. Aanbevolen wordt om studie te verrichten naar de kritieke ondermijningsdiameter en om een numeriek reststerktemodel op te zetten. In Appendix I is een rekenvoorbeeld gepresenteerd van de stappen in zo'n model.

REFERENTIES

1. Waterloopkundig Laboratorium.
Taludbekledingen van gezette steen.
Rapport voor R.W.S., Dienst Weg- en Waterbouwkunde.
TAW-A2, reststerkte N462, 1991.

2. Waterloopkundig Laboratorium.
Handleiding bij programma BREAKWAT, part B.
"design tool for rubble mound structures", 1990.

3. Van der Meer, J.W:
Rock slopes and gravel beaches under wave attack, 1988.

Proef no.	H_s	s_{op}	Filter	Gaten (zie figuur)	Bijzonderheden
1	0,15	0,04	fijn	3.4-3.6	-
2	0,15	0,04	fijn	3.4-3.6	Grote gat onder loodrechte aanval 0,50 m omhoog. Grote gaten onder scheve aanval gevuld met 75% losse blokken.
3	0,20	0,04	fijn	3.7-3.9	Grote gaten (0,96 m ²) onder scheve aanval vervangen door kleinere gaten (0,24 m ²)
4	0,24	0,04	fijn	3.7-3.9	-
5	0,15	0,02	fijn	3.7-3.9	-
6	0,20	0,04	fijn	3.7-3.9	75% losse blokken in gaten
7	0,15	0,04	fijn	3.10-3.12	Overgangsconstructie in kleine gaten
8	0,15	0,02	fijn	3.13-3.15	Overgangsconstructie in middel-grote gaten
9	0,20	0,04	grof	3.7-3.9	-

Alle proeven hadden een totale duur van 5000 golven, met metingen van de filterlaag uitgevoerd na 250, 1000 en 5000 golven

Tabel 3.1 Proevenprogramma

H _s (m)	s _{op}	Oploophoogte Z _{2x} (m) bij hoek van golfaanval		
		0°	40°	70°
0,20	0,04	0,50	0,40	0,19
0,24	0,04	0,60	0,48	0,21
0,15	0,02	0,57	0,40	0,20

Z_{2x} voor loodrechte aanval afgeleid uit $Z_{2x} = 1,5 * H_s * \tan\alpha / \sqrt{s_{op}}$
(met α = taludhelling)

Z_{2x} voor scheve aanval gemeten, zie figuur 4.25 t/m 4.27

Tabel 4.1 Golfoploop voor loodrechte en scheve golfaanval

Proef	Gat*	N	B _d (m)**		
			0° aanval	40° aanval	70° aanval
2	0,01 m ² o.w.	250	0,21	0,26	0,16
		1000	0,28	0,34	0,30
		5000	0,32	r	0,38
	0,01 m ² b.w.	250	0,23	0,25	0,18
		1000	0,27	0,28	0,23
		5000	0,29	0,31	0,24
	0,06 m ² o.w.	250	0,49	r	0,49
		1000	r	r	r
		5000	r	r	r
3	0,01 m ² o.w.	250	0,27	0,31	0,21
		1000	0,33	r	0,25
		5000	r	r	0,28
	0,01 m ² b.w.	250	0,23	0,25	0,23
		1000	0,25	0,29	0,26
		5000	0,27	0,32	0,28
	0,06 m ² o.w.	250	r	r	r
		1000	r	r	r
		5000	r	r	r
4	0,01 m ² o.w.	250	0,23	0,30	0,22
		1000	0,28	0,37	0,25
		5000	0,39	r	0,30
	0,01 m ² b.w.	250	0,22	0,26	0,22
		1000	0,25	0,31	0,27
		5000	0,30	0,34	0,31
	0,06 m ² o.w.	250	r	r	r
		1000	r	r	r
		5000	r	r	r

* o.w. = onder water, b.w. = boven water

** r = rand van filterbak bereikt (waar mogelijk is breedte geschat en verwerkt in figuur 5.2)

Tabel 5.1 Gemeten dwarsdiameters B_d erosiekuilen

Proef	Gat*	N	B _d (m)**		
			0° aanval	40° aanval	70° aanval
5	0,01 m ² o.w.	250	0,23	0,27	0,21
		1000	-	0,33	0,23
		5000	0,37	r	0,30
	0,01 m ² b.w.	250	0,22	0,25	0,22
		1000	0,23	0,29	0,25
		5000	0,27	0,33	0,28
	0,06 m ² o.w.	250	r	r	r
		1000	r	r	r
		5000	r	r	r
6	0,01 m ² o.w.	250	0,26	0,26	0,17
		1000	0,35	0,36	0,20
		5000	r	r	0,27
	0,01 m ² b.w.	250	0,20	0,25	0,22
		1000	0,23	0,26	0,25
		5000	0,28	0,30	0,27
	0,06 m ² o.w.	250	r	r	r
		1000	r	r	r
		5000	r	r	r
9	0,01 m ² o.w.	250	0,22	0,23	0,17
		1000	0,25	0,31	0,20
		5000	0,35	r	0,23
	0,01 m ² b.w.	250	0,21	0,22	0,18
		1000	0,23	0,26	0,24
		5000	0,24	0,30	0,27
	0,06 m ² o.w.	250	r	r	0,50
		1000	r	r	0,59
		5000	r	r	r

Tabel 5.1 (vervolg)

Proef no.	H_s (m)	s_{op}	N	$B_o + B_g$ (m)	D_o (m)
2	0,15	0,04	250	0,9	0,05
			1000	0,8	0,05
			5000	0,8	0,05
3	0,20	0,04	250	1,5	0,08
			1000	1,4	0,08
			5000	1,4	0,08
4	0,24	0,04	250	2,2	0,08
			1000	1,9	0,08
			5000	1,9	0,08
5	0,15	0,02	250	1,2	0,08
			1000	1,1	0,08
			5000	1,1	0,08

De in deze tabel gepresenteerde waarde zijn berekend! (zie figuur 5.22)

Voor alle beschouwde gevallen geldt:

Als $(B_o + B_g) \geq 1,5$ m, dan zou bovenkant filterbak bereikt zijn tijdens een proef

Tabel 5.2 Met BREAKWAT berekende waarden voor $(B_o + B_g)$ en D_o voor grote gaten

40° golfaanval

Proef no.	In langsrichting afgevoerd volume (m ³)		
	na 250 golven	na 1000 golven	na 5000 golven
1, 2	0,005 - 0,025	0,020 - 0,100	0,102 - 0,510
3, 6, 7	0,013 - 0,065	0,052 - 0,260	0,260 - 1,300
4	0,022 - 0,110	0,089 - 0,445	0,444 - 2,222
5, 8	0,010 - 0,050	0,041 - 0,205	0,206 - 1,030

70° golfaanval

Proef no.	In langsrichting afgevoerd volume (m ³)		
	na 250 golven	na 1000 golven	na 5000 golven
1, 2	0,003 - 0,015	0,012 - 0,060	0,058 - 0,290
3, 6, 7	0,012 - 0,060	0,050 - 0,250	0,248 - 1,240
4	0,020 - 0,100	0,081 - 0,405	0,404 - 2,020
5, 8	0,006 - 0,030	0,023 - 0,115	0,117 - 0,585

Aanwezige hoeveelheid grind in filterbak: 0,306 m³

Tabel 5.3 Met vergelijking (5.1) berekende langstransporten bij grote gaten onder scheve golfaanval

Proef no.	In dwarsrichting afgevoerd volume (m ³)		
	na 250 golven	na 1000 golven	na 5000 golven
1, 2	0,010 - 0,030	0,008 - 0,025	0,008 - 0,025
3, 6, 7	0,042 - 0,140	0,037 - 0,120	0,037 - 0,120
4	0,091 - 0,305	0,068 - 0,225	0,068 - 0,225
5, 8	0,027 - 0,090	0,023 - 0,075	0,023 - 0,075

ondergrens schatting: $0,3 * \pi/4 * (B_o + B_g)^2 * D_o$

bovengrens schatting: $\pi/4 * (B_o + B_g)^2 * D_o$

Aanwezige hoeveelheid grind in filterbak: 0,306 m³

Tabel 5.4 Met BREAKWAT berekende hoeveelheden uitgespoeld filtermateriaal bij grote gaten onder loodrechte golfaanval

0° golfaanval

Proef no.	Uitgespoelde hoeveelheid filtermateriaal (m ³)		
	na 250 golven	na 1000 golven	na 5000 golven
1, 2	0,010 - 0,030	0,008 - 0,025	0,008 - 0,025
3, 6, 7	0,042 - 0,140	0,037 - 0,120	0,037 - 0,120
4	0,091 - 0,305	0,068 - 0,225	0,068 - 0,225
5, 8	0,027 - 0,090	0,023 - 0,075	0,023 - 0,075

40° golfaanval

Proef no.	Uitgespoelde hoeveelheid filtermateriaal (m ³)		
	na 250 golven	na 1000 golven	na 5000 golven
1, 2	0,015 - 0,055	0,028 - 0,125	0,110 - 0,535 *
3, 6, 7	0,055 - 0,205	0,089 - 0,380 *	0,297 - 1,420 *
4	0,113 - 0,415	0,157 - 0,670 *	0,512 - 2,447 *
5, 8	0,037 - 0,140	0,064 - 0,280	0,229 - 1,105 *

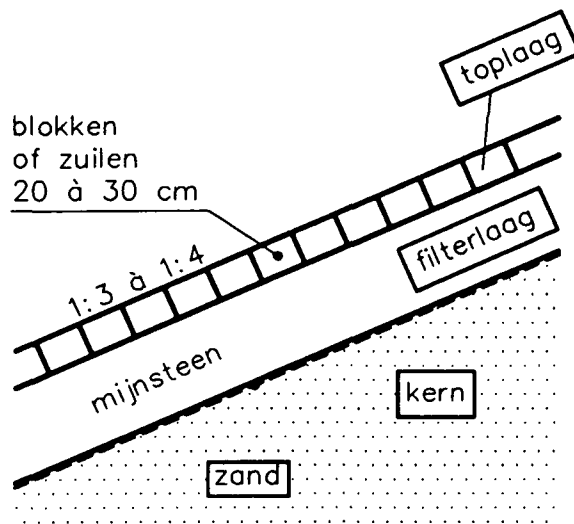
70° golfaanval

Proef no.	Uitgespoelde hoeveelheid filtermateriaal (m ³)		
	na 250 golven	na 1000 golven	na 5000 golven
1, 2	0,013 - 0,045	0,020 - 0,085	0,066 - 0,315
3, 6, 7	0,054 - 0,200	0,087 - 0,370 *	0,285 - 1,360 *
4	0,111 - 0,405	0,149 - 0,630 *	0,472 - 2,245 *
5, 8	0,033 - 0,120	0,046 - 0,190	0,140 - 0,660 *

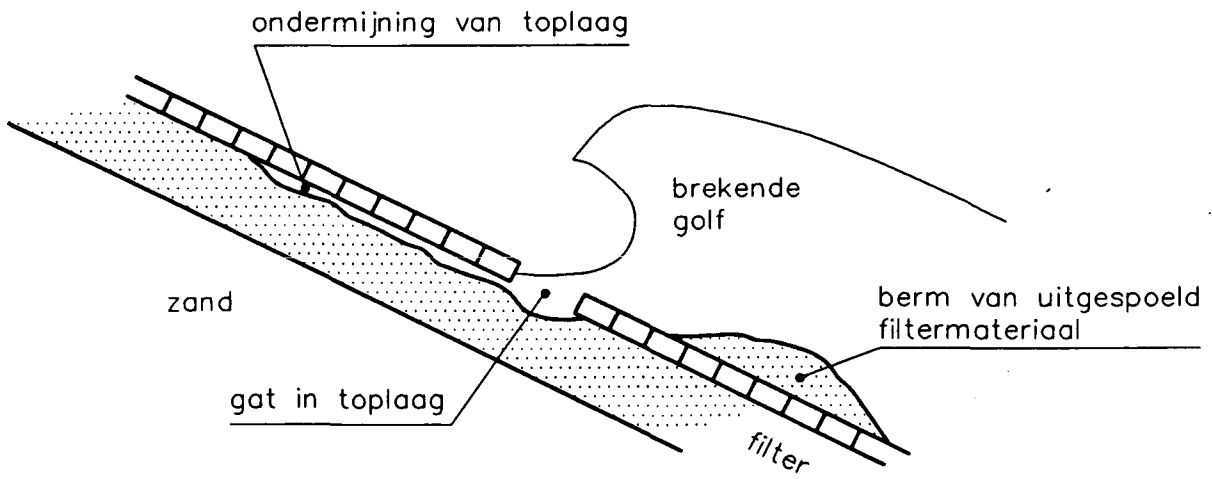
* filterbak nagenoeg leeggespoeld

Aanwezige hoeveelheid grind in filterbak: 0,306 m³

Tabel 5.5 Totale hoeveelheden uitgespoeld filtermateriaal bij grote gaten
(langs- en dwarstransport)

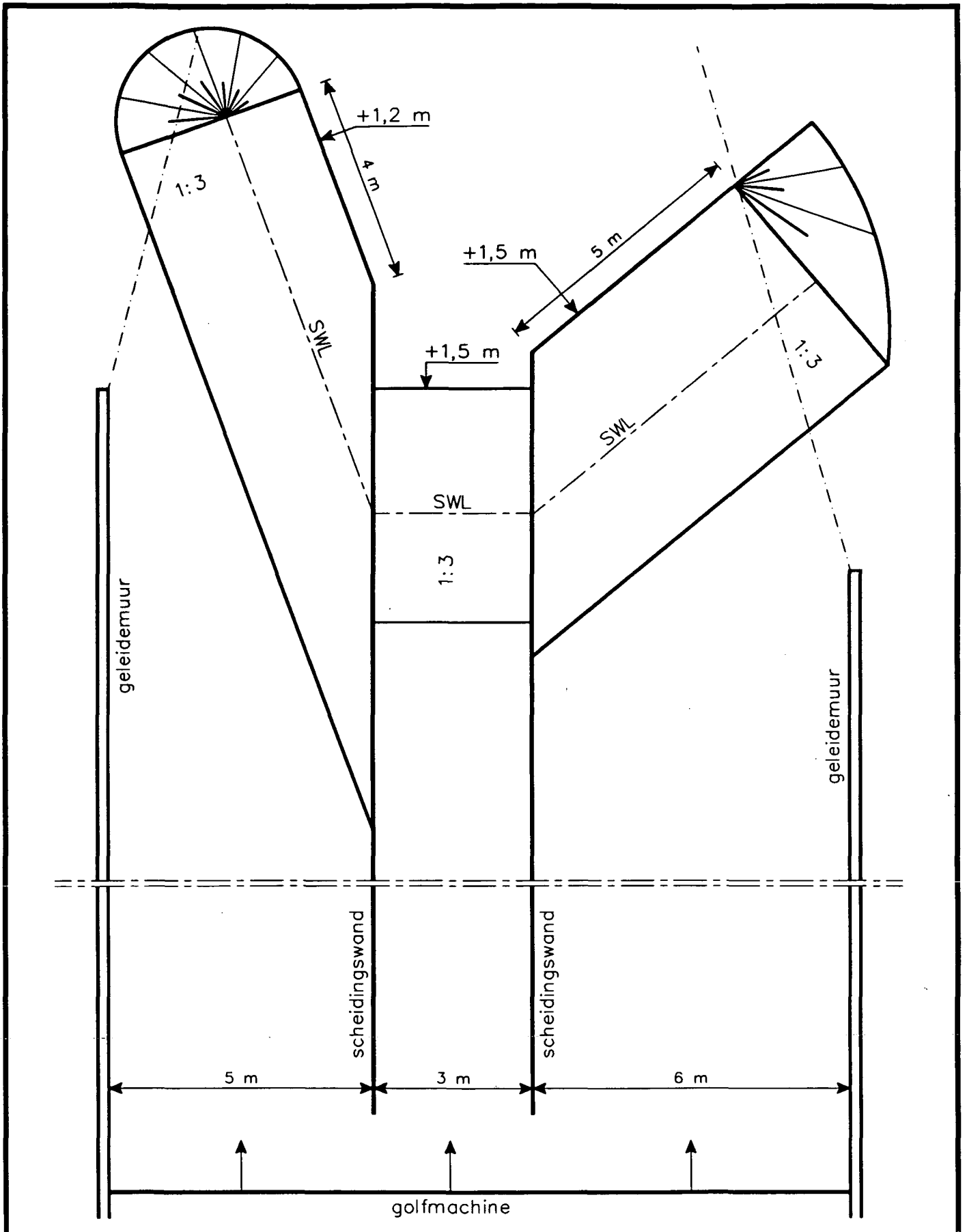


a. Steenzetting



b. Ondermijning van de toplaag

DEFINITIESCHETS

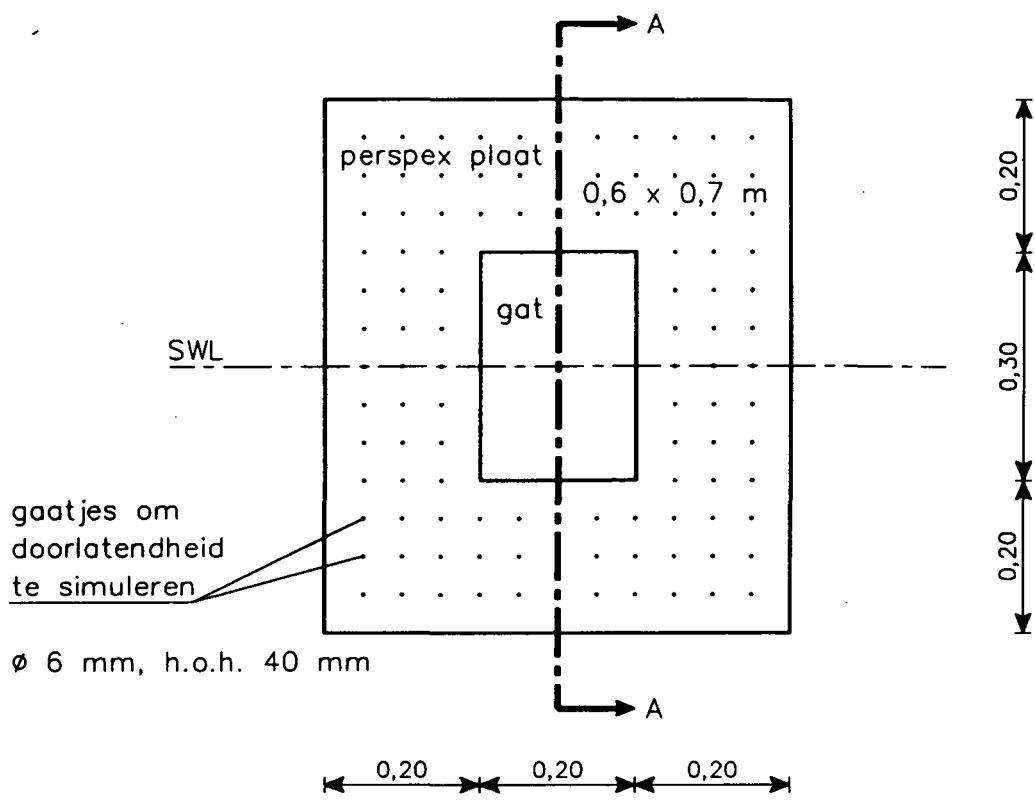


PROEFOPSTELLING RESTSTERKTE FILTERS
IN SCHELDEBAK

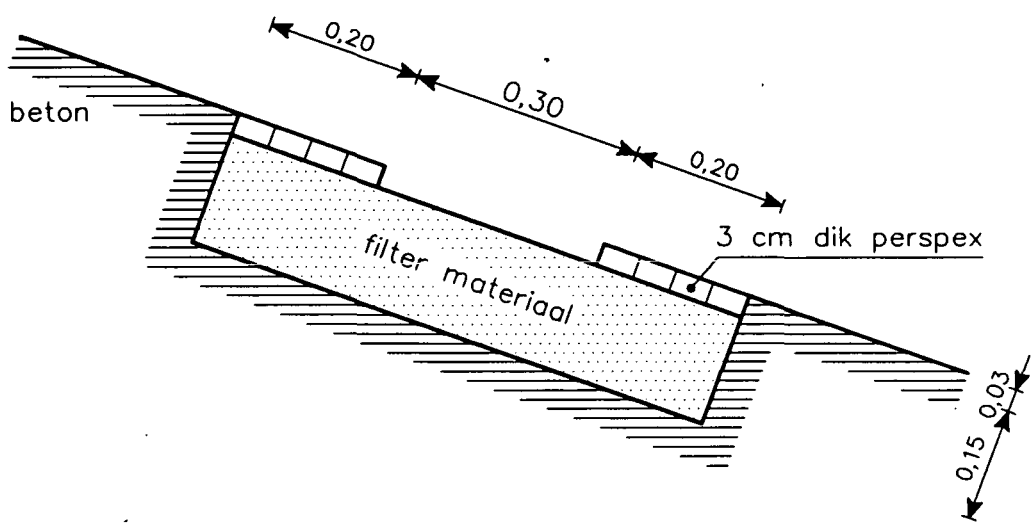
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 3.1



BOVENAANZICHT



DOORSNEDE A-A

- Onderzochte gaten:
- 0,01 m²
 - 0,06 m²
 - 0,24 m²
 - 0,96 m²

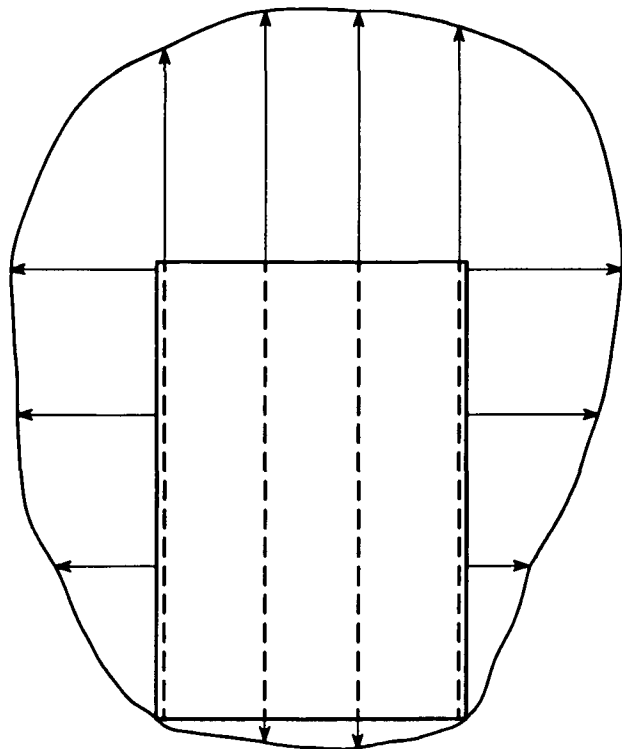
maten in m

GATMODELLERING VOOR 0,06 m² GAT

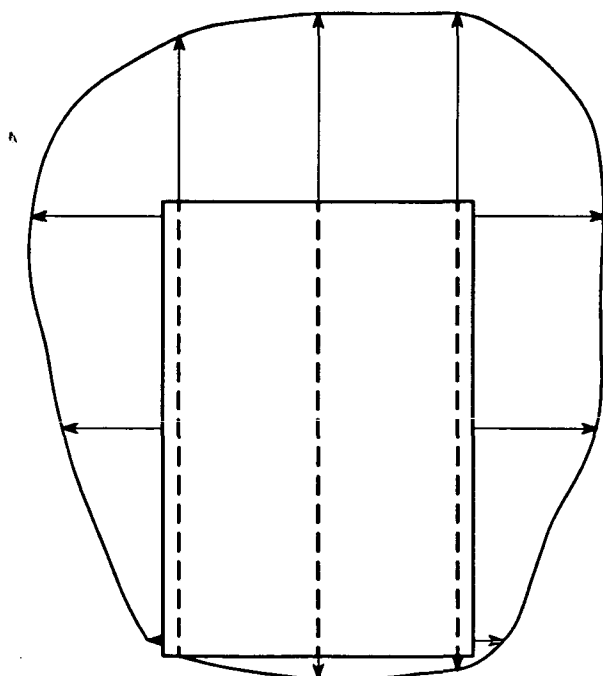
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 3.2



illustratie meetpunten voor
gaten 0,6 x 0,4
en 1,2 x 0,8 m²



illustratie meetpunten voor
gaten 0,1 x 0,1
en 0,3 x 0,2 m²

→ = omtrekmeting van kuil in filter

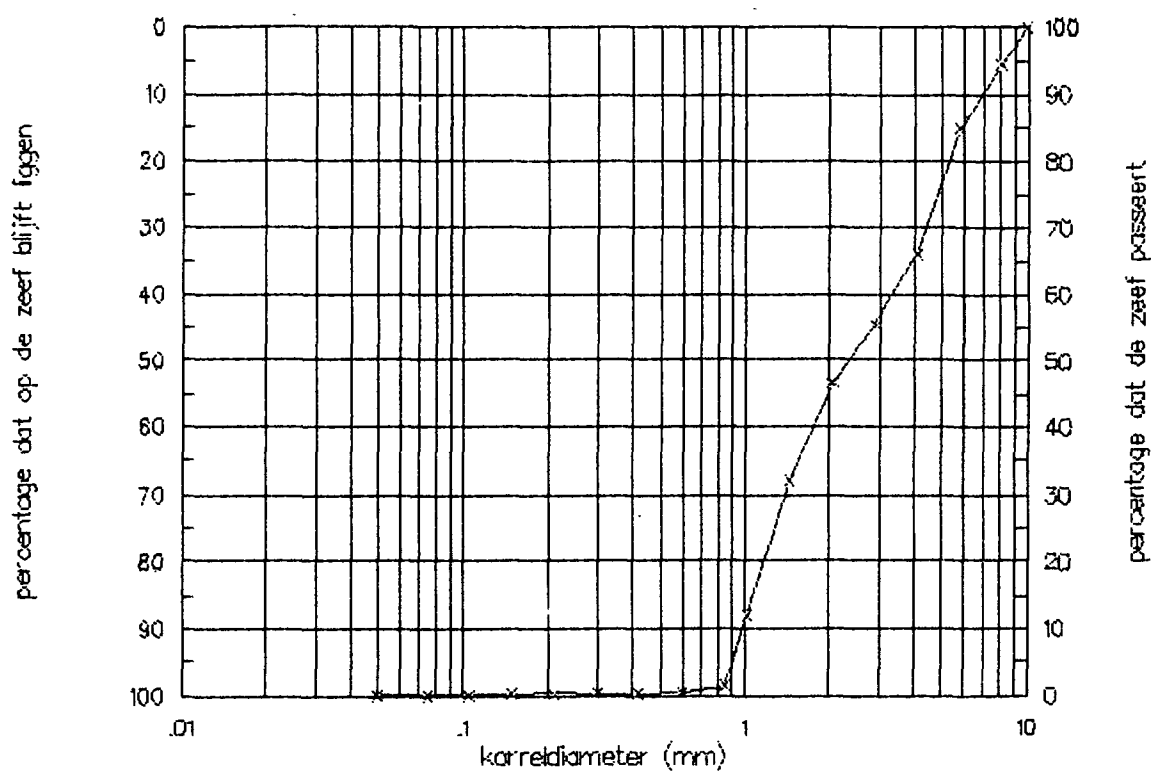
----- = raaien waarlangs diepten gemeten op afstanden van 4 cm

ILLUSTRATIE PEILING VAN FILTERLAAG

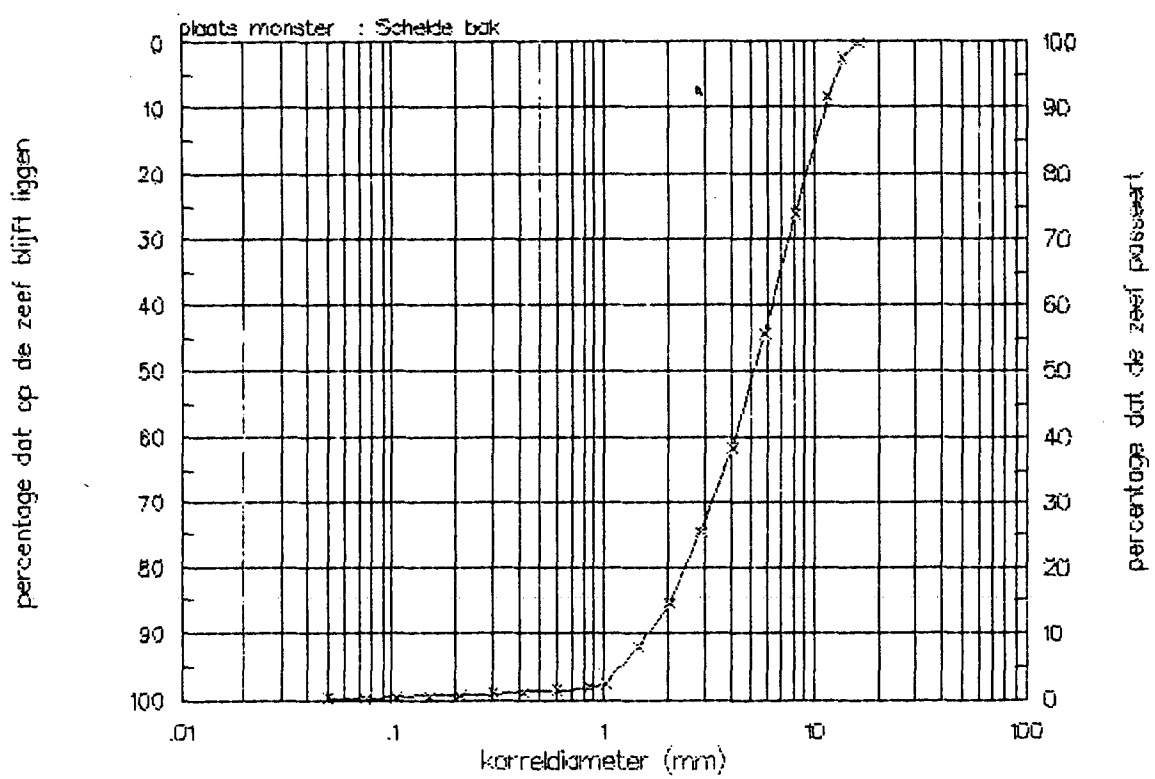
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 3.3



d10 = 101 mm
 d50 = 2.37 mm
 d90 = 7.08 mm



d10 = 163 mm
 d50 = 5.22 mm
 d90 = 11.25 mm

ZEEFKROMMEN FILTERMATERIAAL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 3.4



← proef 2

← proef 1

gat 3

gat 4

1,7 x 1,2

1,2 x 0,8

1,1 x 0,6

gat 1

gat 2

1,1 x 0,5

0,7 x 0,5

0,1
x0,1

0,1
x0,1

0,3x0,2

S.W.L.

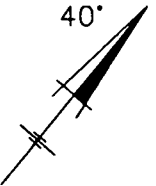
modelmaten in meters

OPSTELLING PROEF 1,
LOODRECHTE AANVAL

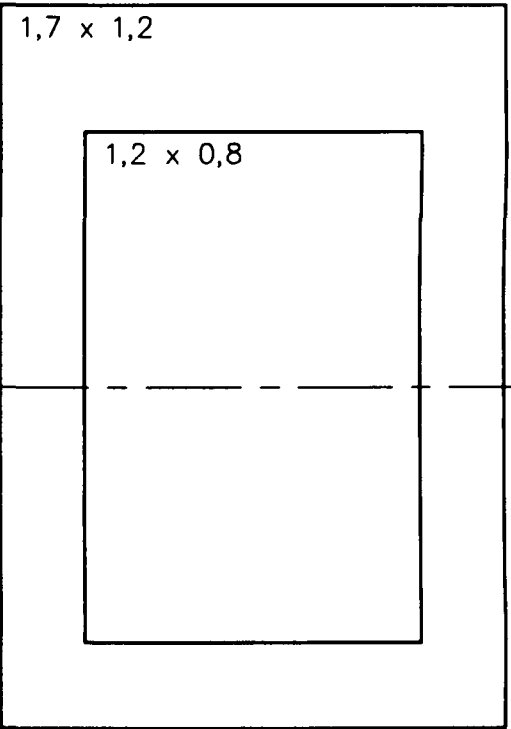
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 3.5

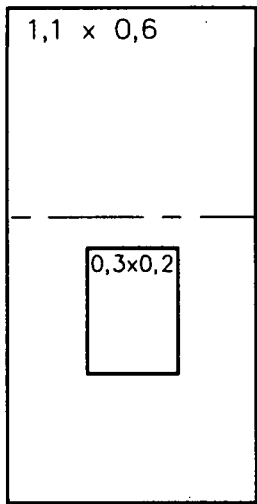


gat 3



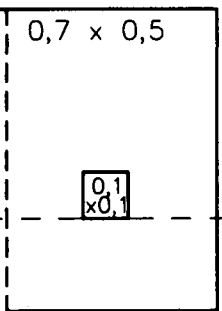
in proef 2: 75% losse blokken

gat 4

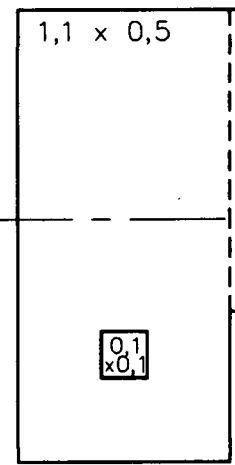


S.W.L.

gat 2



gat 1



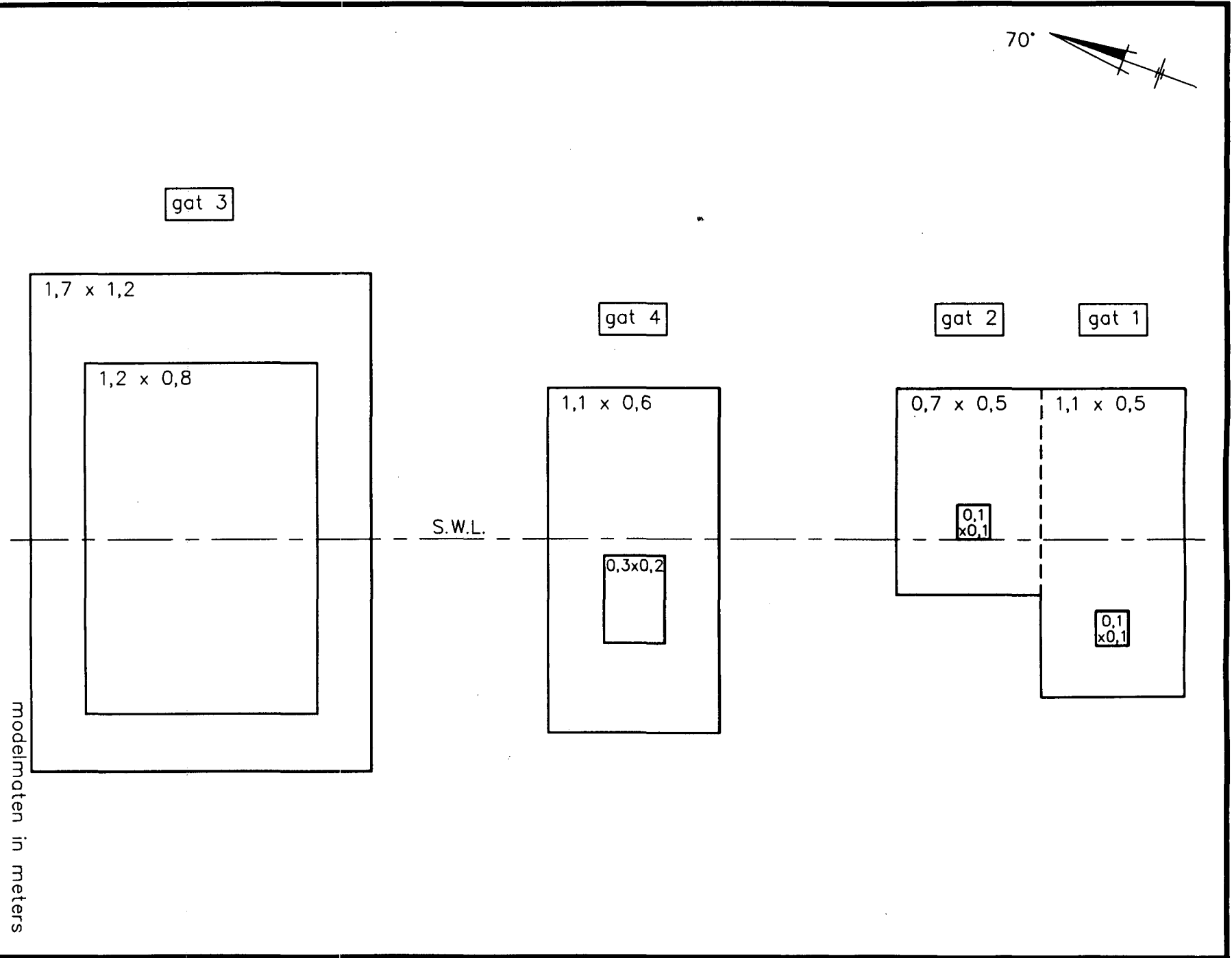
modelmaten in meters

OPSTELLING PROEF 1 EN 2,
40° AANVAL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 3.6



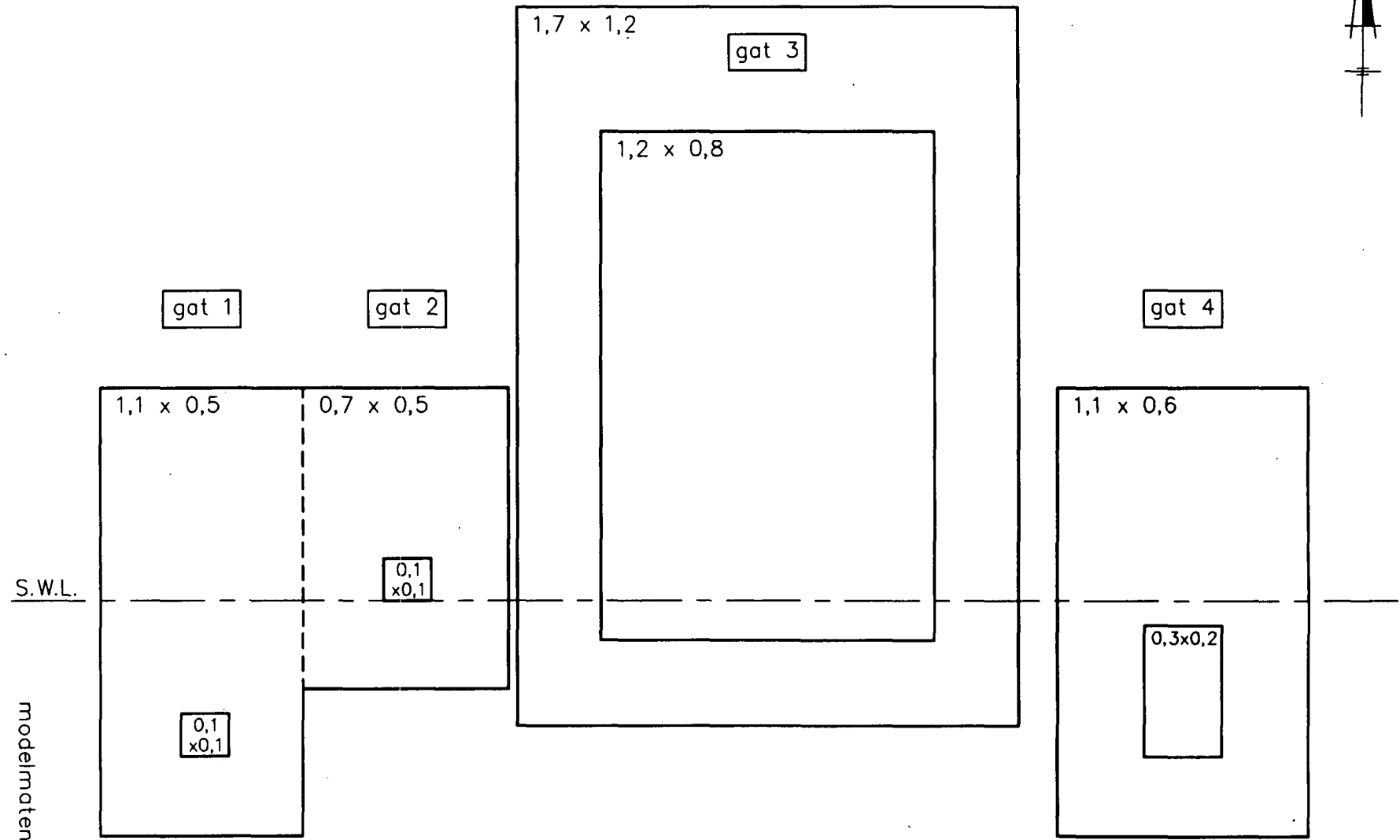
modelmaten in meters

OPSTELLING PROEF 1 EN 2,
70° AANVAL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 3.7



in proef 6: 62% losse blokken

in proef 6: 58% losse blokken

in proef 6: 50% losse blokken

modelmaten in meters

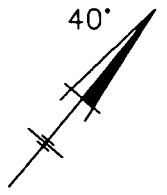
S.W.L.

OPSTELLING PROEF 3, 4, 5, 6 EN 9,
LOODRECHTE AANVAL

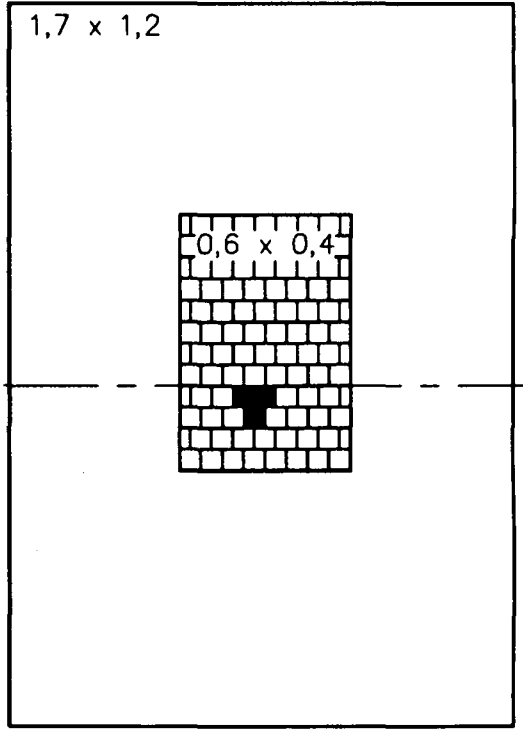
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 3.8

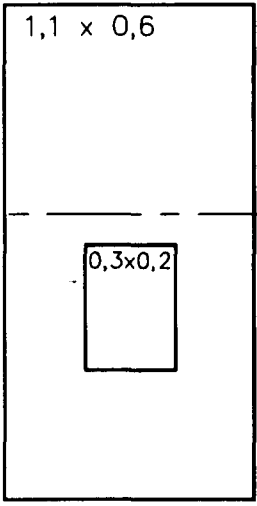


gat 3



in proef 5 en 6: steenzetting in gat

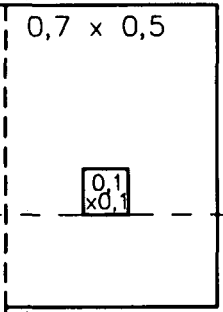
gat 4



in proef 6: 50% losse blokken

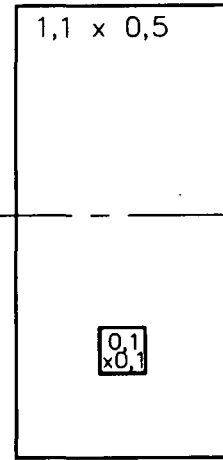
S.W.L.

gat 2



in proef 6: 62% losse blokken

gat 1



modelmaten in meters

OPSTELLING PROEF 3, 4, 5, 6 EN 9,
40° AANVAL

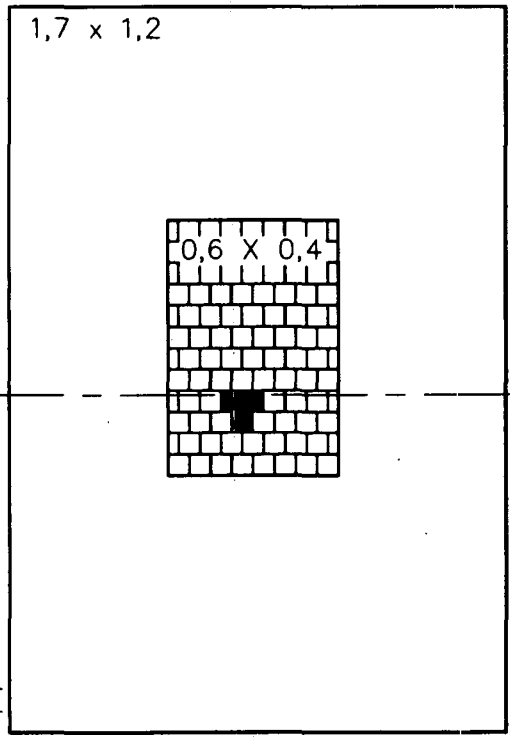
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 3.9



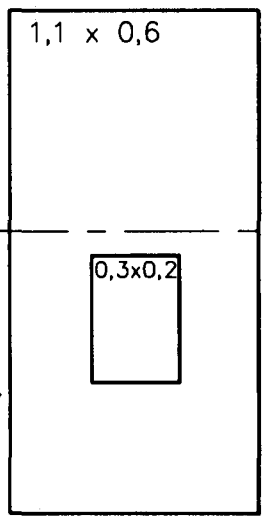
gat 3



modelmaten in meters

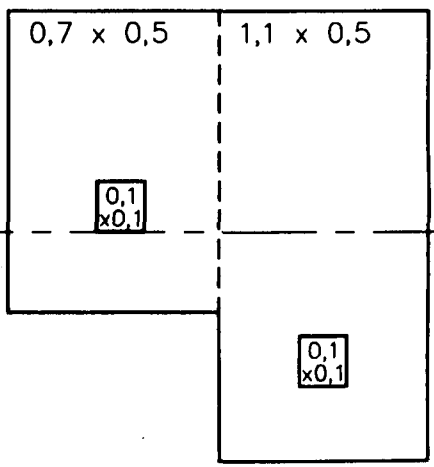
in proef 5 en 6: steenzetting in gat

gat 4



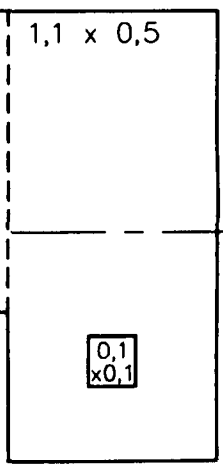
in proef 6: 50% losse blokken

gat 2



in proef 6: 62% losse blokken

gat 1

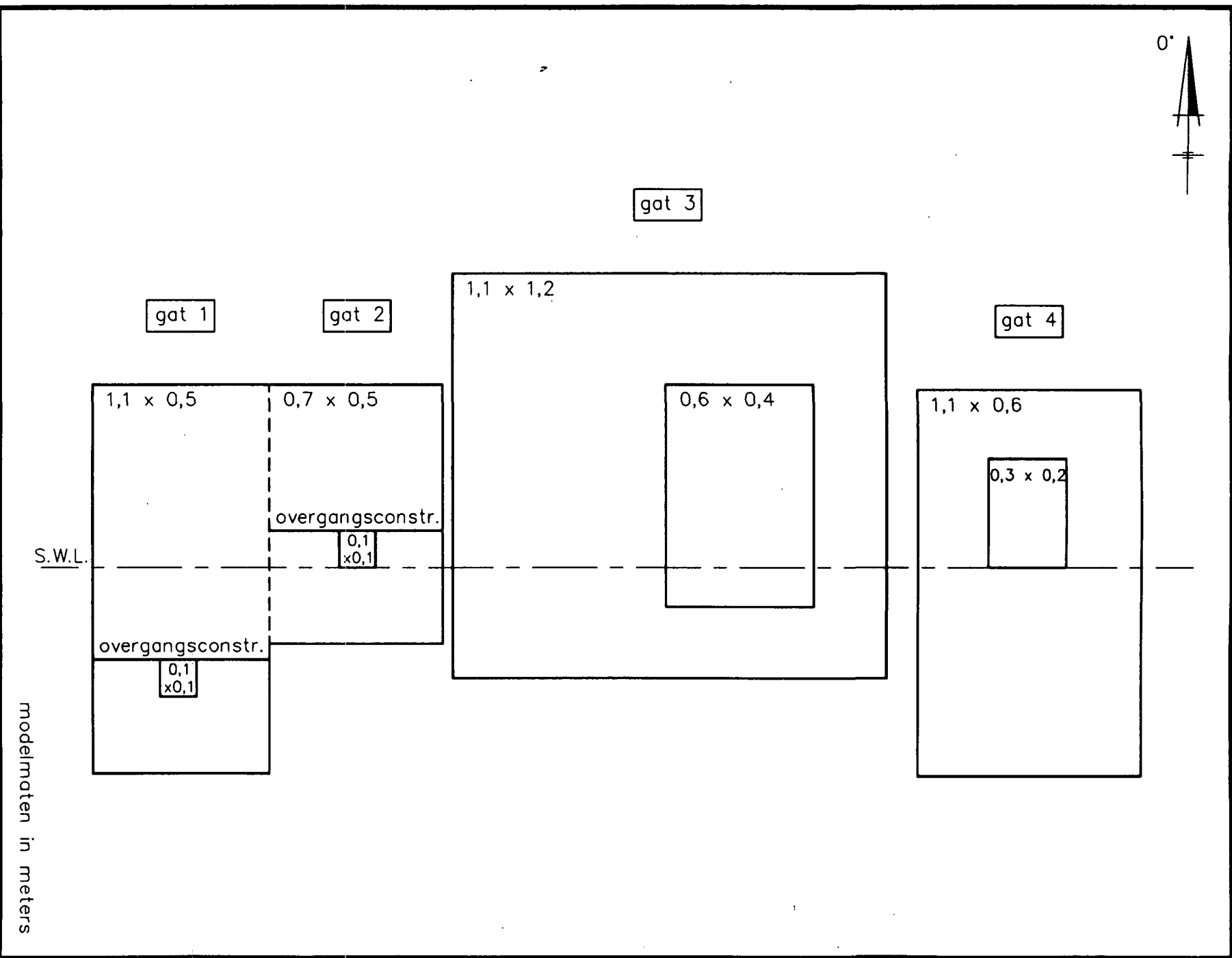


OPSTELLING PROEF 3, 4, 5, 6 EN 9,
70° AANVAL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 3.10



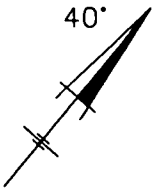
modelmaten in meters

OPSTELLING PROEF 7,
LOODRECHTE AANVAL

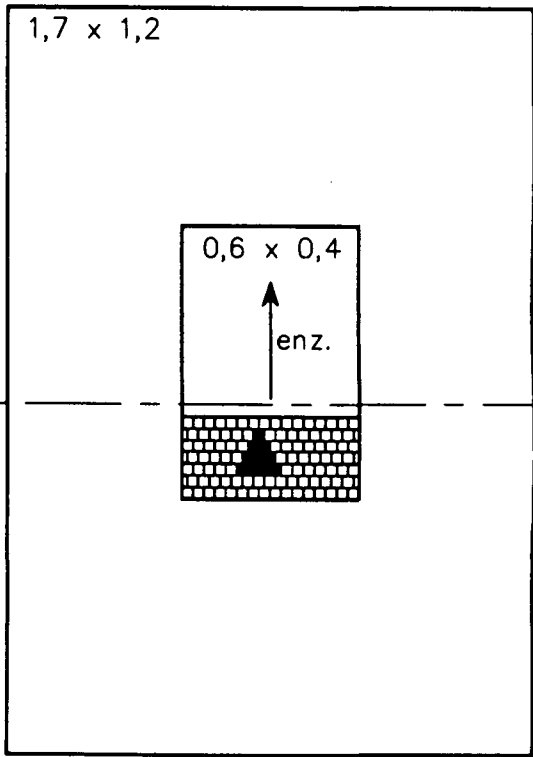
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

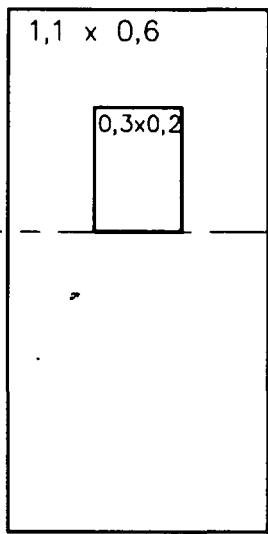
FIG. 3.11



gat 3

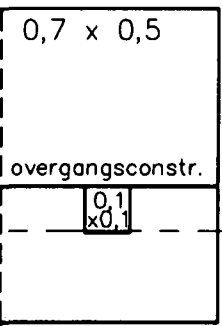


gat 4

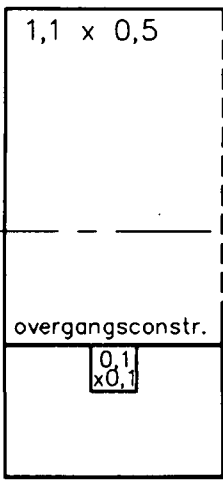


S.W.L.

gat 2



gat 1



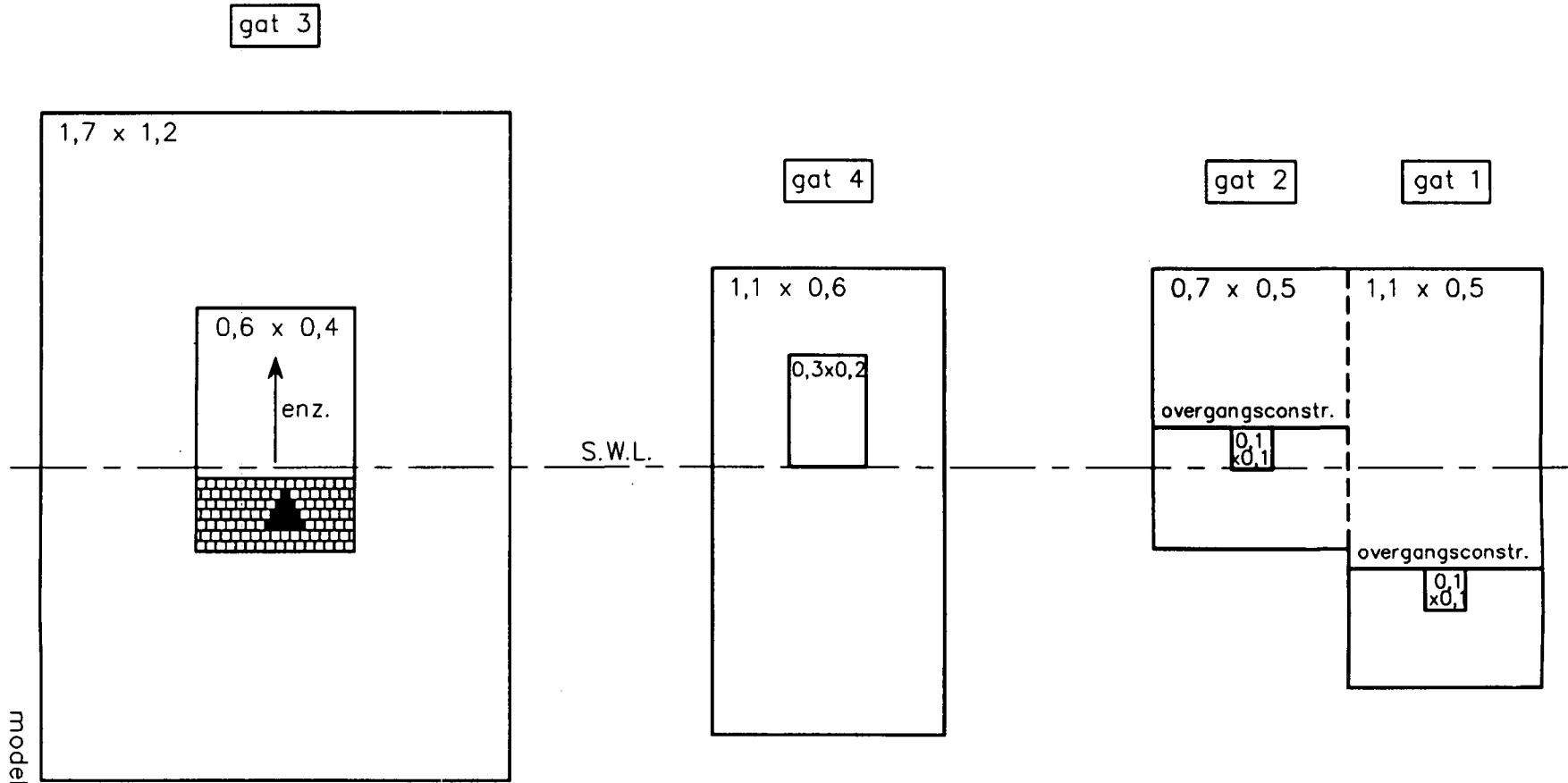
modelmaten in meters

OPSTELLING PROEF 7,
40° AANVAL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 3.12



steenzetting in gat

modelmaten in meters

OPSTELLING PROEF 7,
70° AANVAL

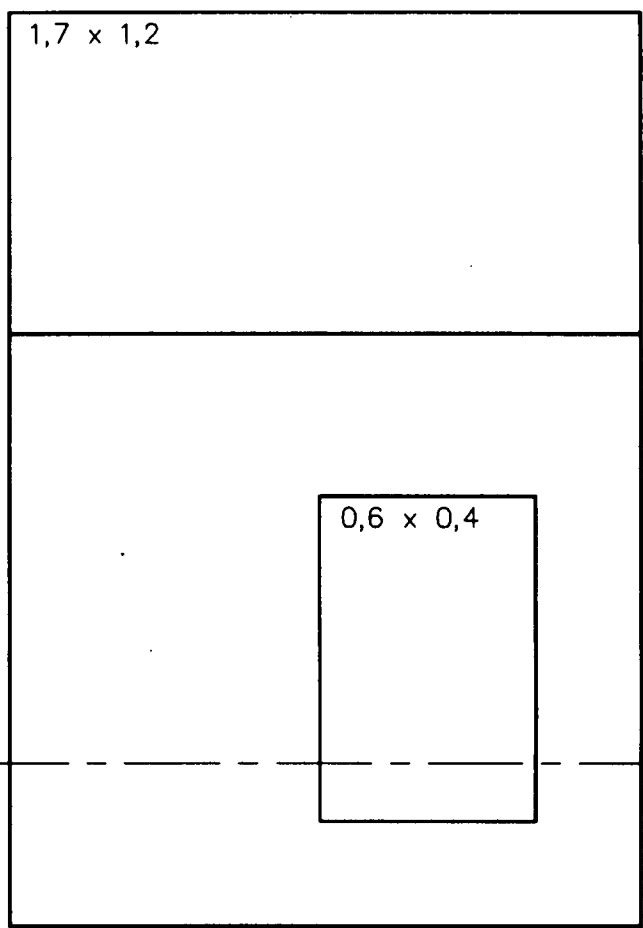
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

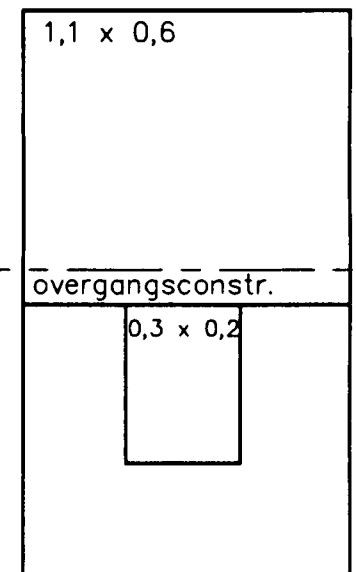
FIG. 3.13



gat 3

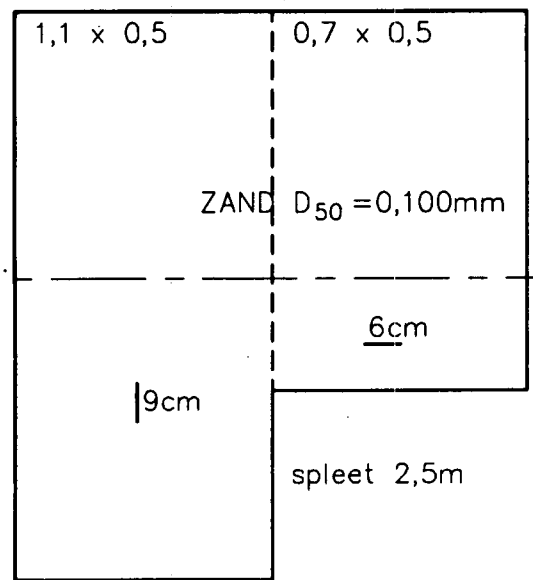


gat 4



"gat 2"

"gat 1"



ZAND $D_{50} = 0,100\text{mm}$

6cm

S.W.L.

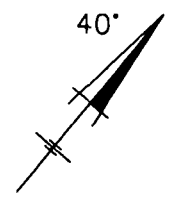
modelmaten in meters

OPSTELLING PROEF 8,
LOODRECHTE AANVAL

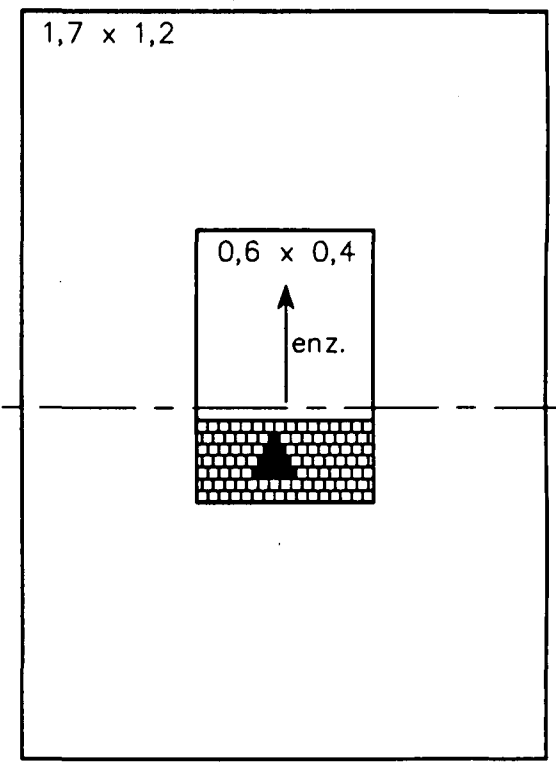
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

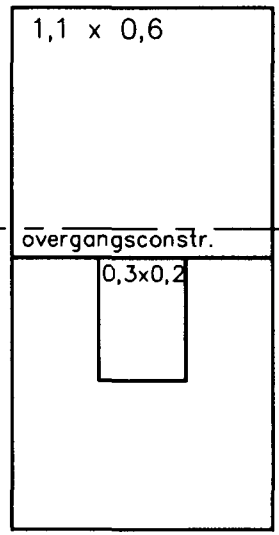
FIG. 3.14



gat 3

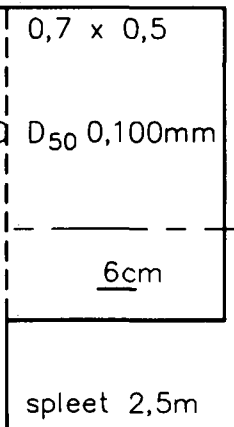


gat 4

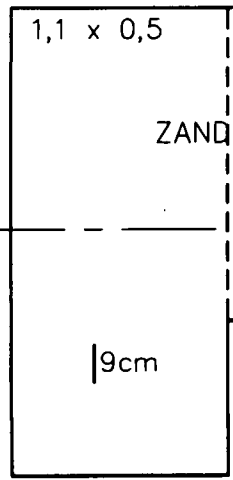


S.W.L.

"gat 2"



"gat 1"



ZAND D₅₀ 0,100mm

modelmaten in meters

OPSTELLING PROEF 8,
40° AANVAL

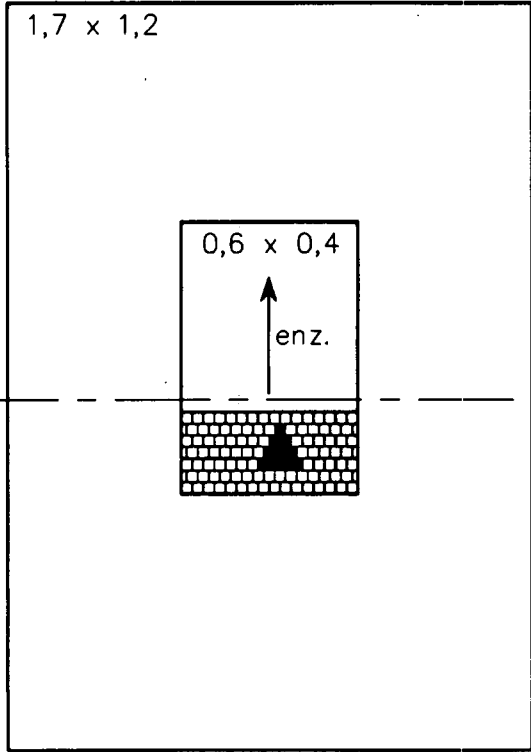
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 3.15

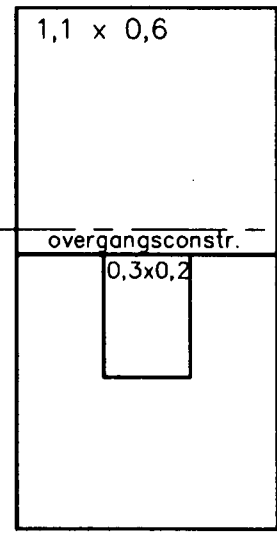


gat 3

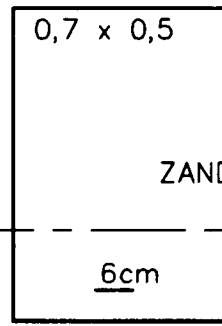


steenzetting in gat

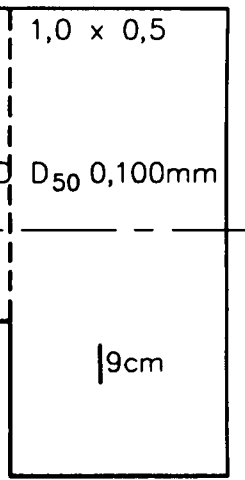
gat 4



"gat 2"



"gat 1"



modelmaten in meters

OPSTELLING PROEF 8,
70° AANVAL

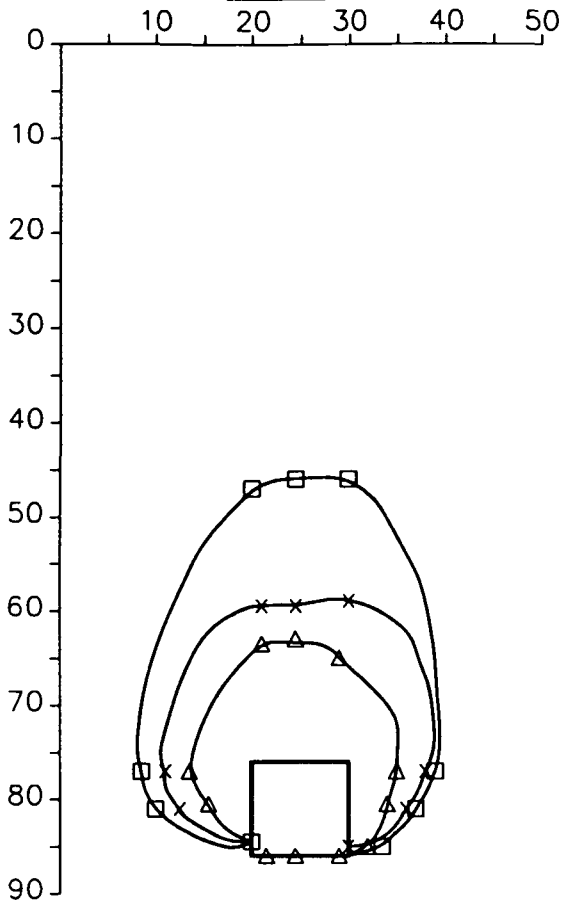
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 3.16

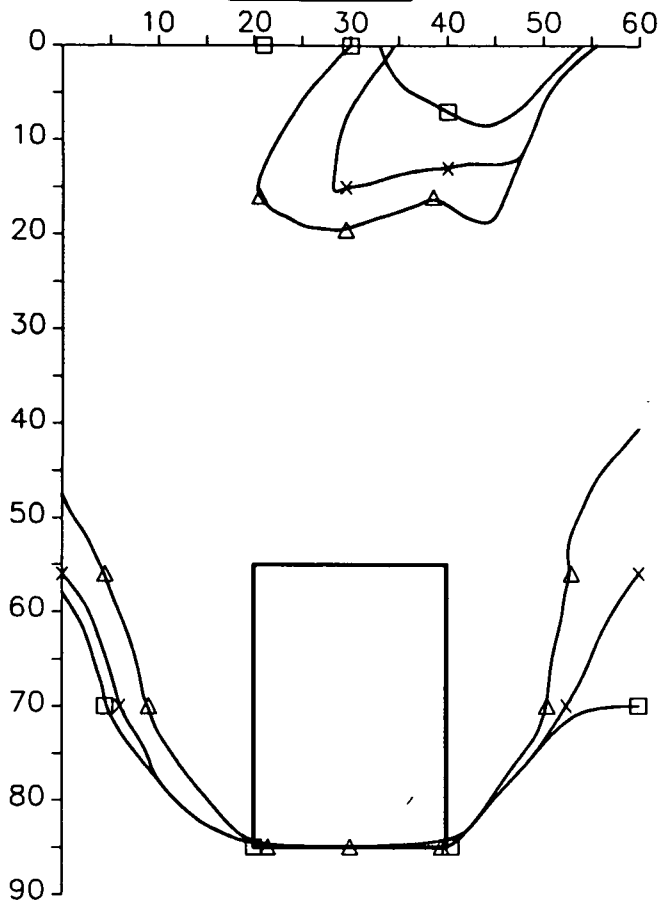
GAT1

W M2 0°



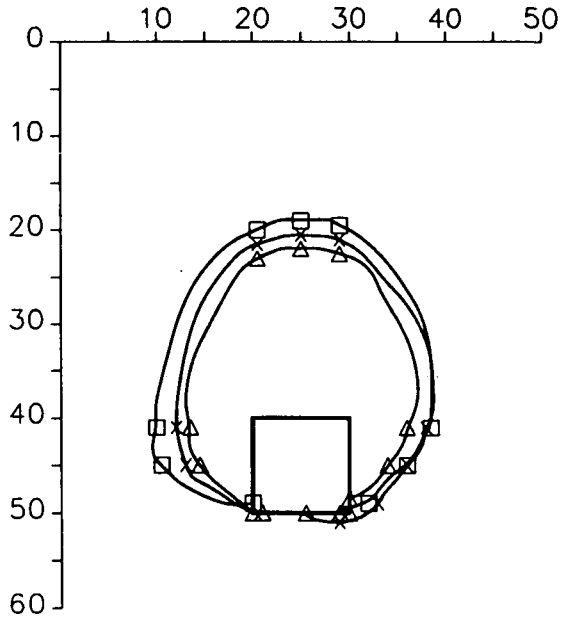
GAT4

W M2 0°



GAT2

W M2 0°



GAT1 → 0,01m² onder water

GAT2 → 0,01m² boven water

GAT4 → 0,06m² onder water

Δ = na 250 golven

x = na 1000 golven

□ = na 5000 golven

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 2,
0° AANVAL

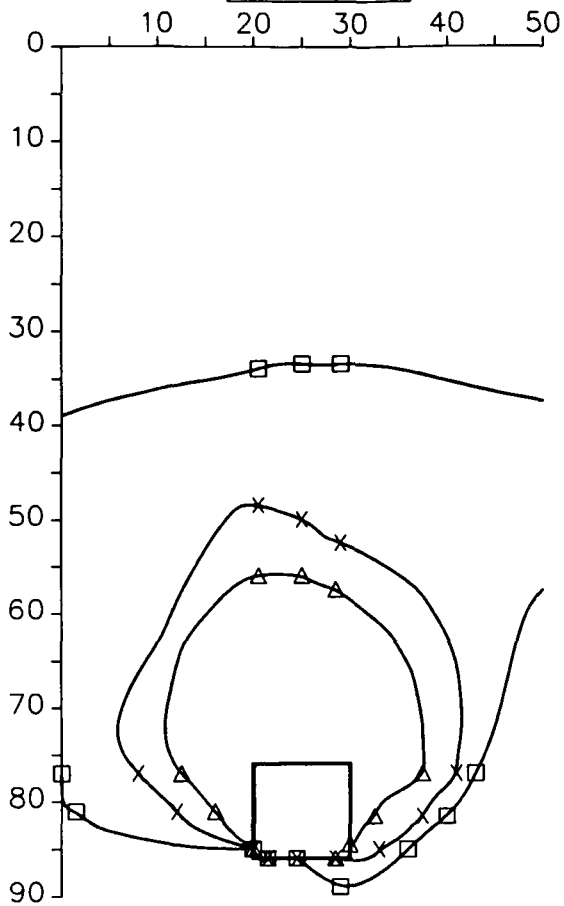
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 4.1

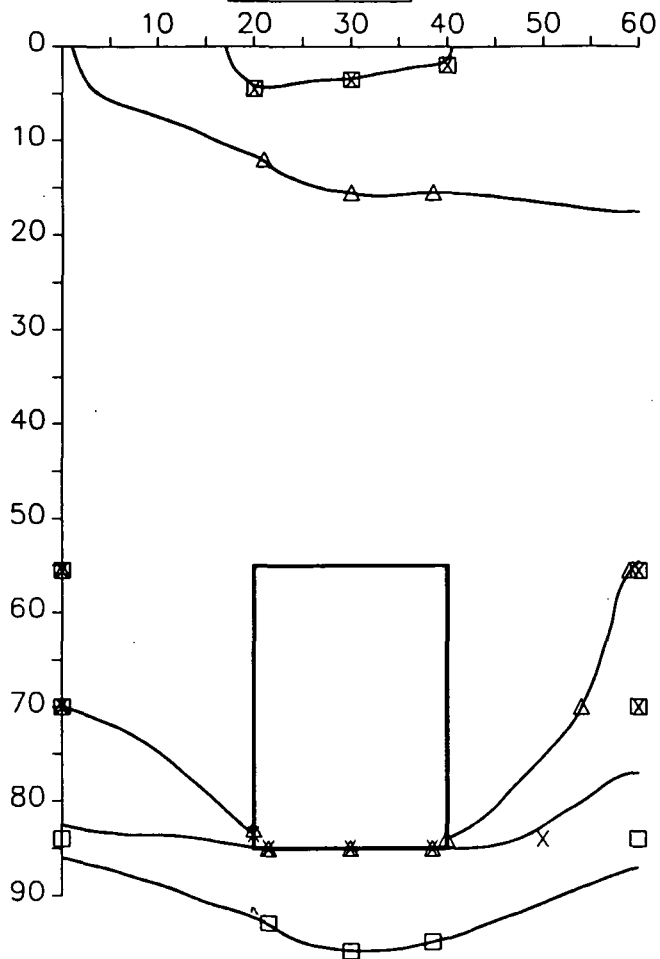
GAT1

W R2 40°



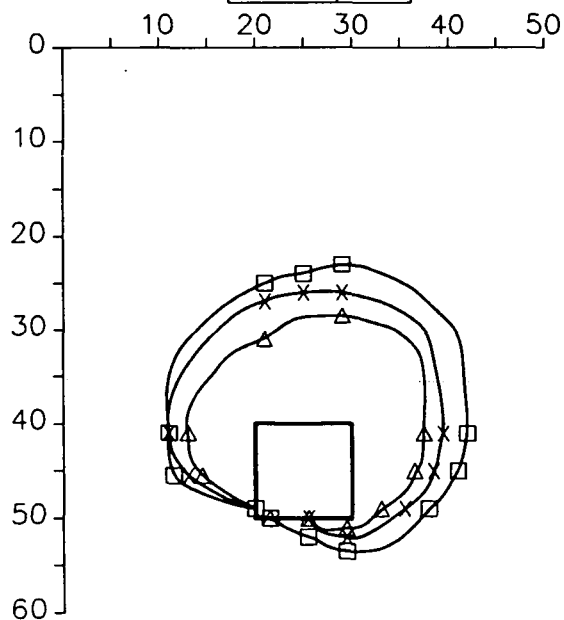
GAT4

W R2 40°



GAT2

W R2 40°



GAT1 → 0,01m² onder water

GAT2 → 0,01m² boven water

GAT4 → 0,06m² onder water

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 2,
40° AANVAL

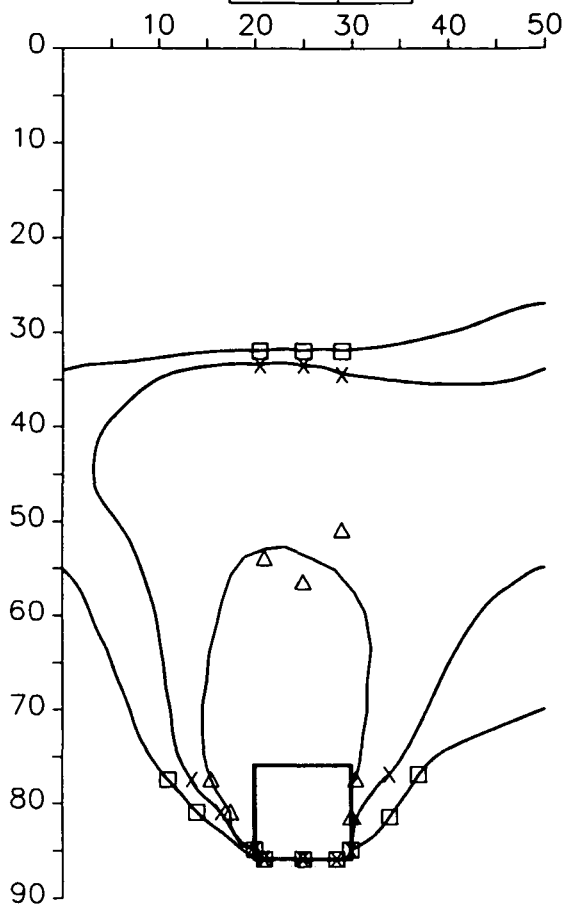
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 4.2

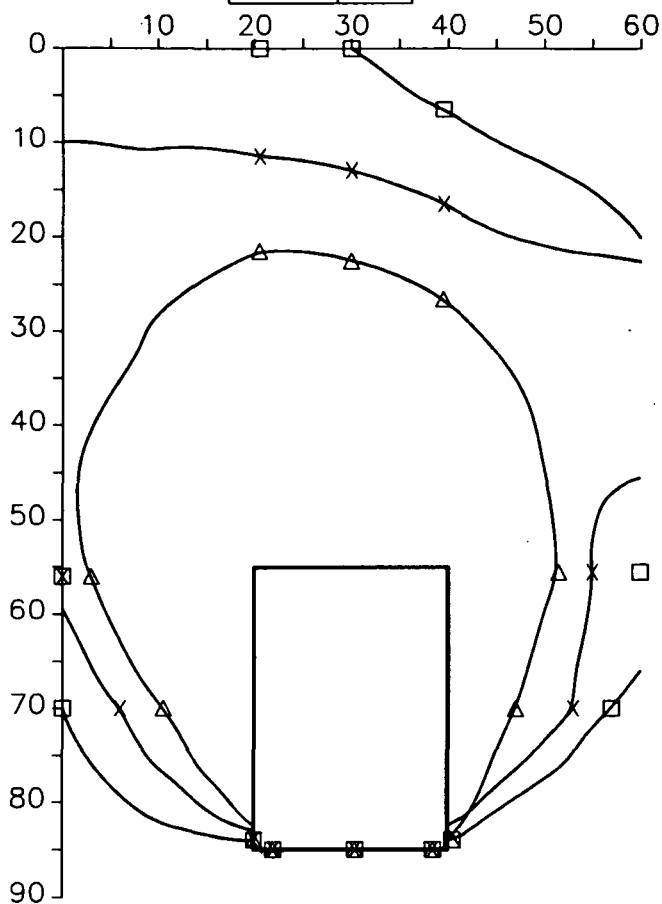
GAT1

W L2 70°



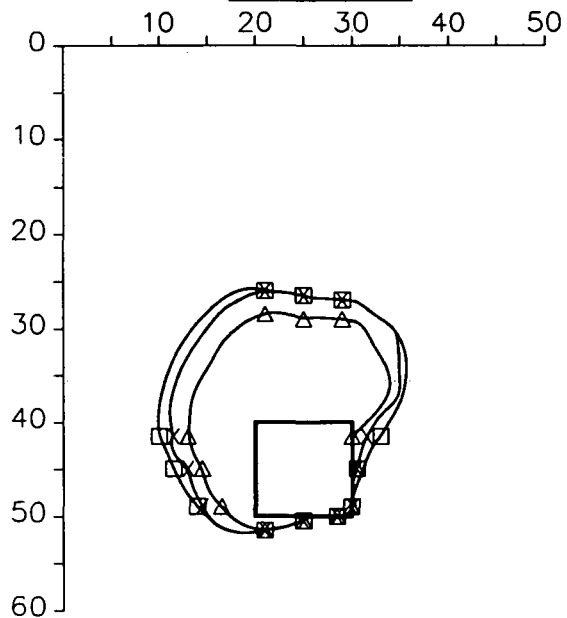
GAT4

W L2 70°



GAT2

W L2 70°

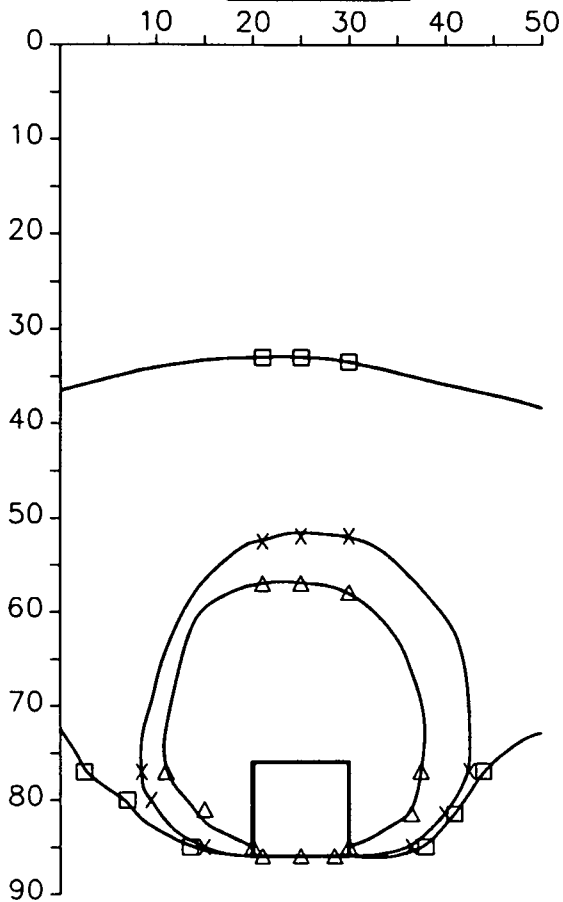


- GAT1 → 0,01m² onder water
- GAT2 → 0,01m² boven water
- GAT4 → 0,06m² onder water

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 2,
70° AANVAL

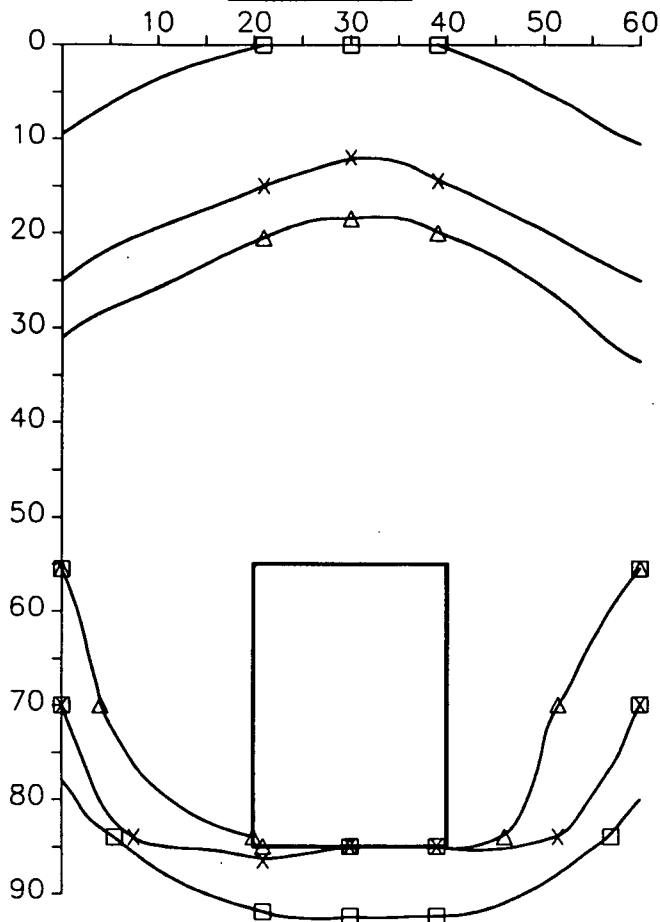
GAT1

W M3 0°



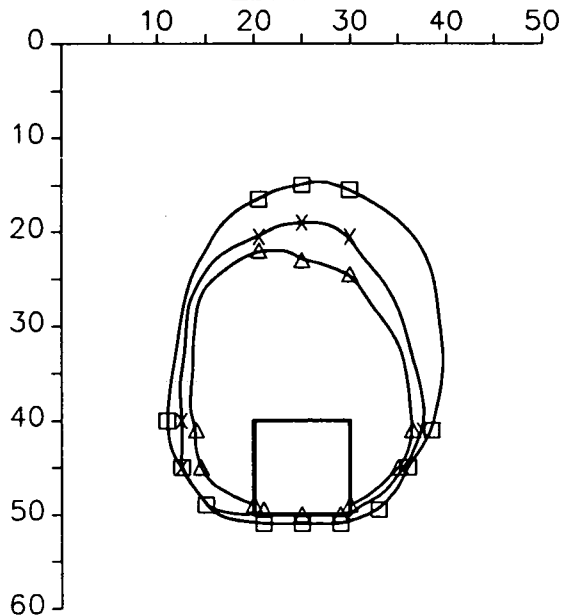
GAT4

W M3 0°



GAT2

W M3 0°



- GAT1 → 0,01m² onder water
- GAT2 → 0,01m² boven water
- GAT4 → 0,06m² onder water

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 3,
0° AANVAL

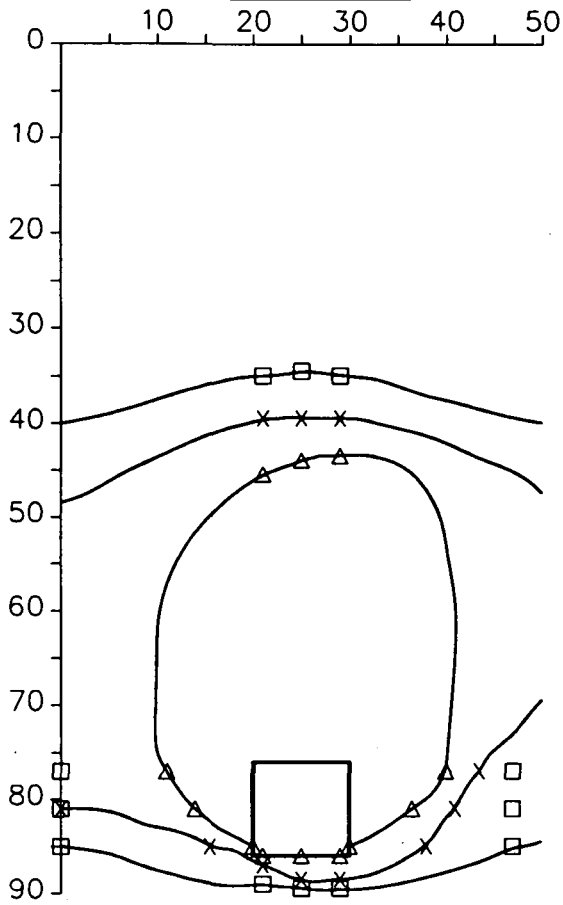
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 4.4

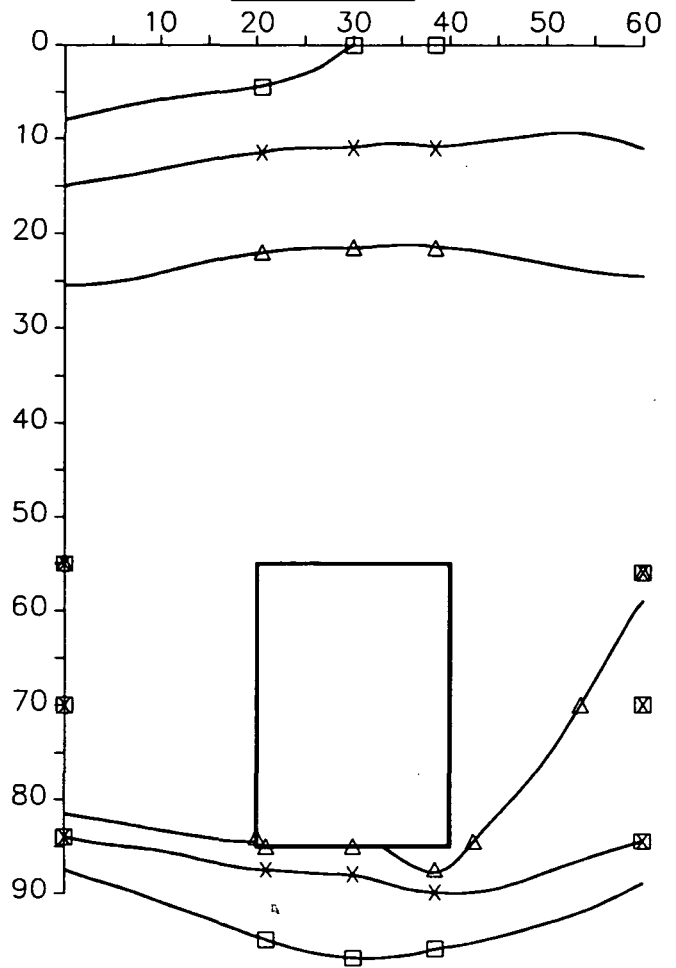
GAT1

W R3 40°



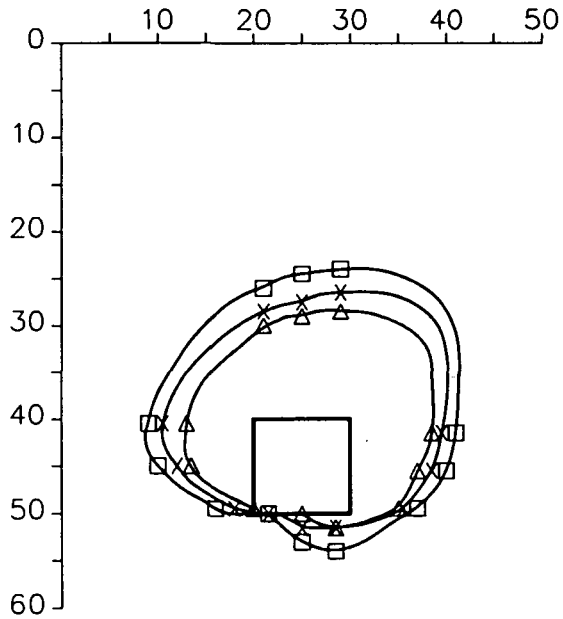
GAT4

W R3 40°



GAT2

W R3 40°



- GAT1 → 0,01m² onder water
- GAT2 → 0,01m² boven water
- GAT4 → 0,06m² onder water

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 3,
40° AANVAL

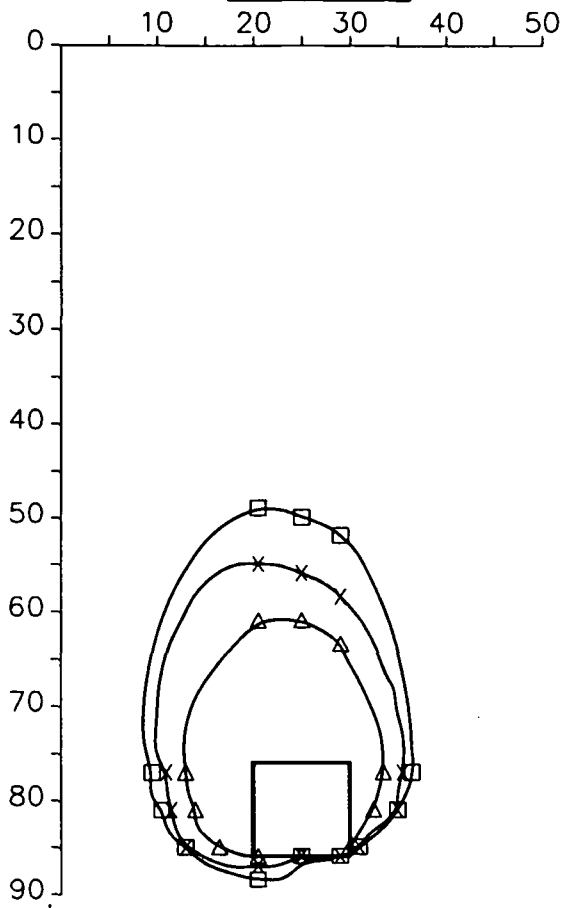
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 4.5

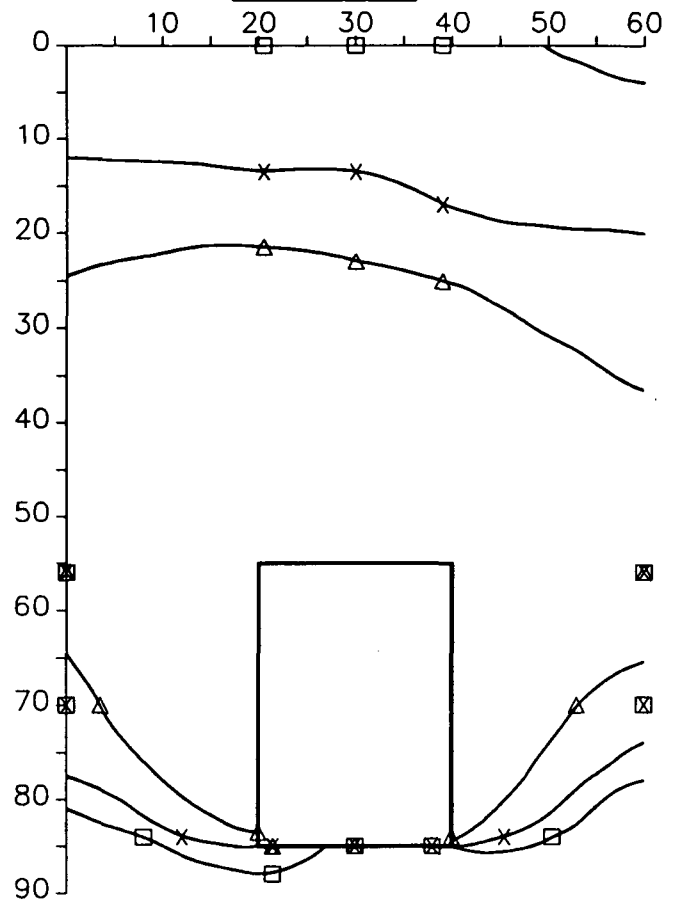
GAT1

W L3 70°



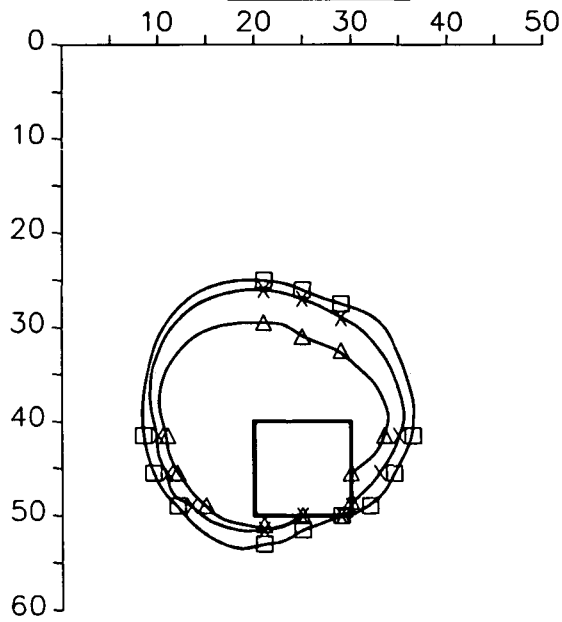
GAT4

W L3 70°



GAT2

W L3 70°

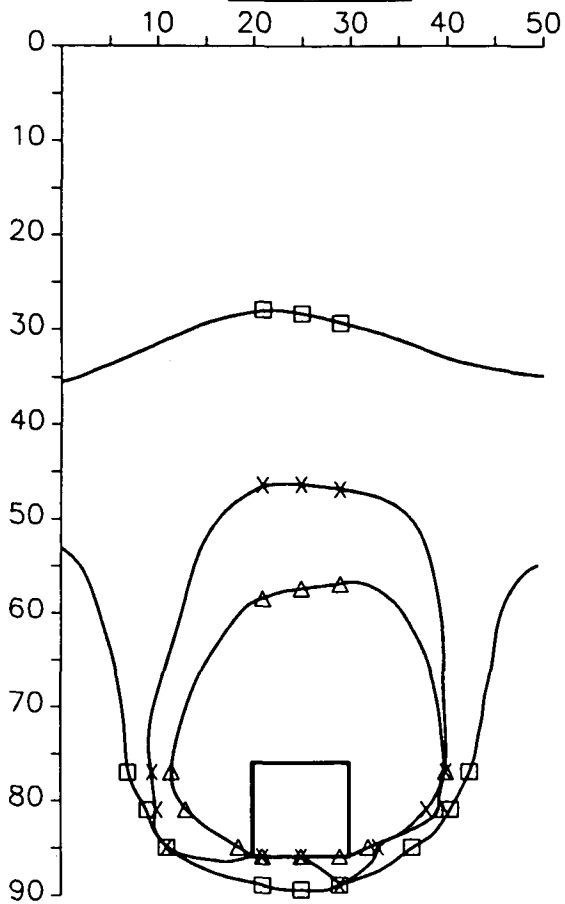


- GAT1 → 0,01m² onder water
- GAT2 → 0,01m² boven water
- GAT4 → 0,06m² onder water

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 3,
70° AANVAL

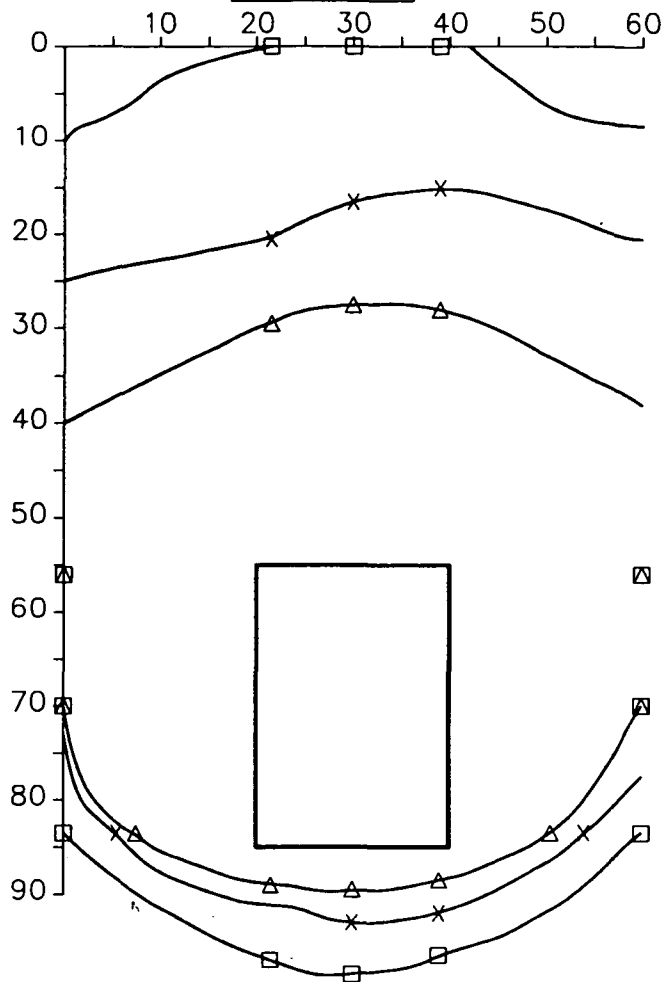
GAT1

W M4 0°



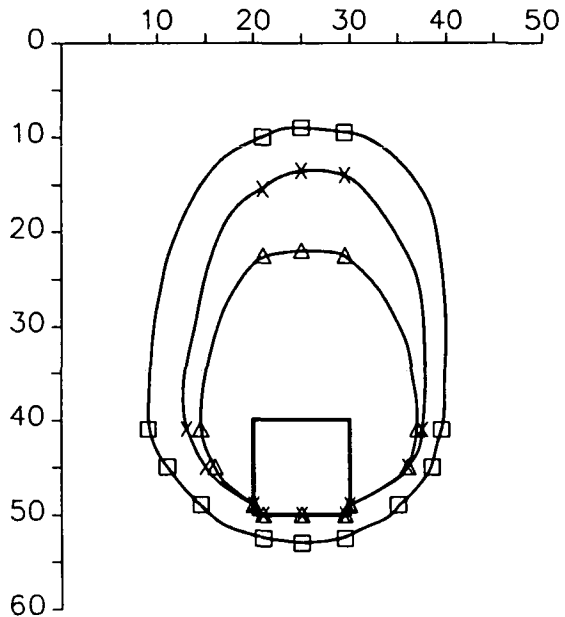
GAT4

W M4 0°



GAT2

W M4 0°

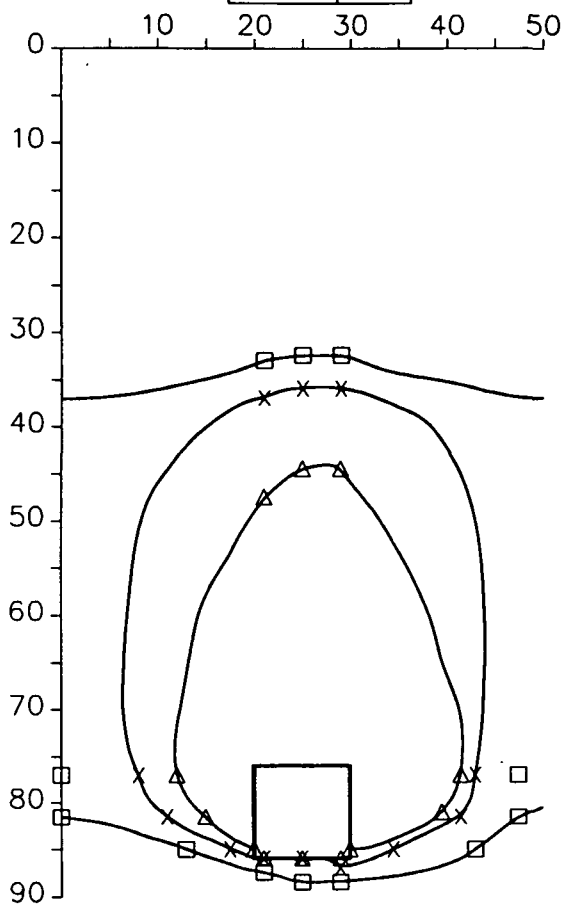


- GAT1 → 0,01m² onder water
- GAT2 → 0,01m² boven water
- GAT4 → 0,06m² onder water

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 4,
0° AANVAL

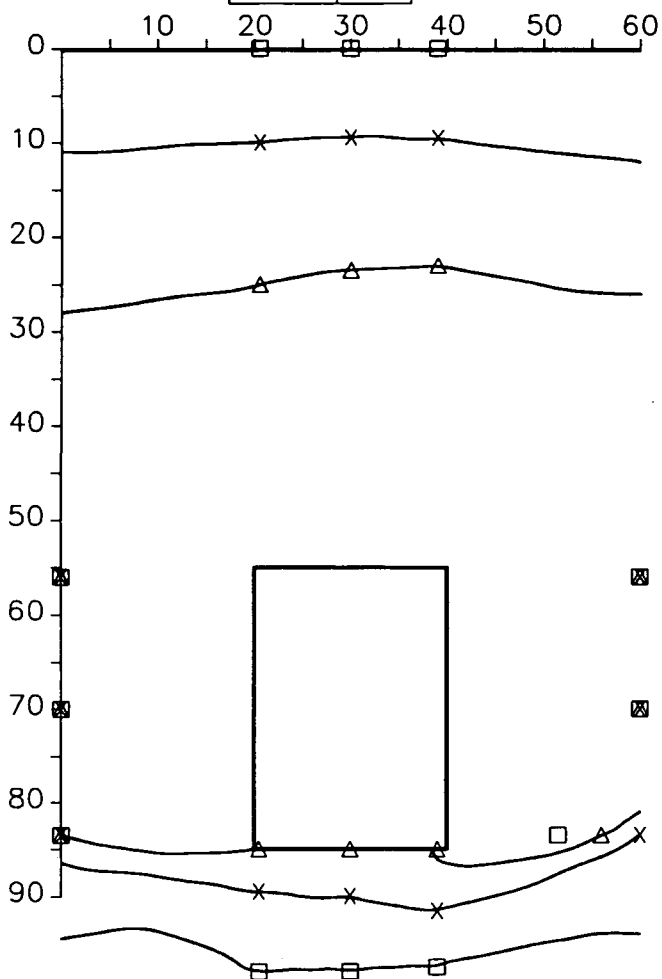
GAT1

W R4 40°



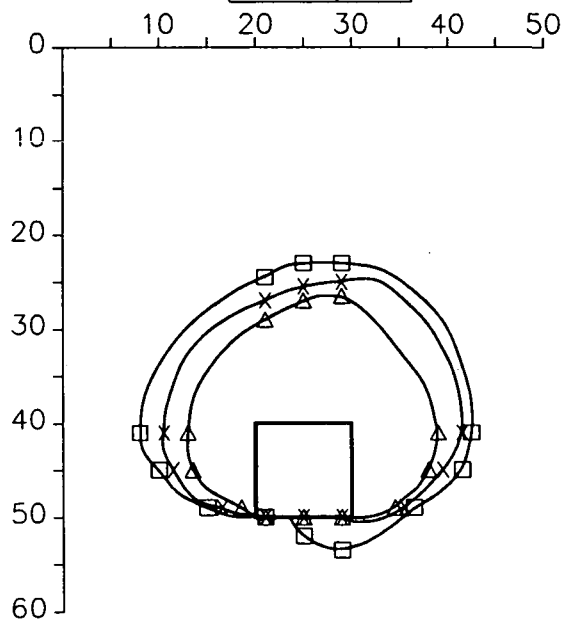
GAT4

W R4 40°



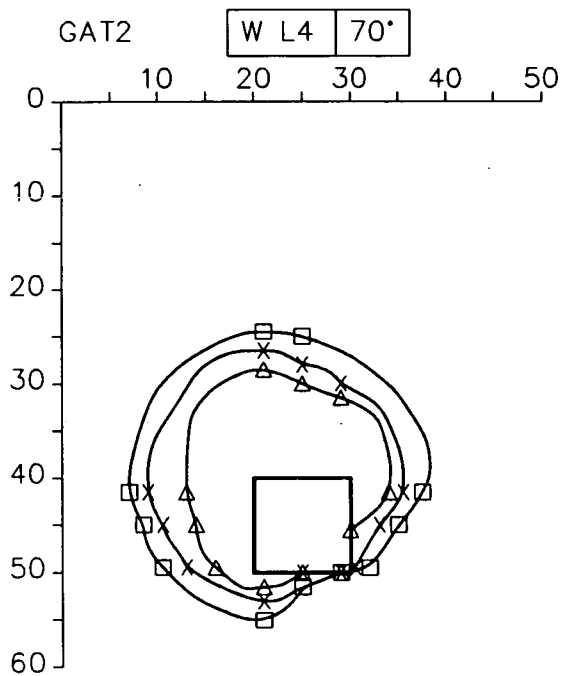
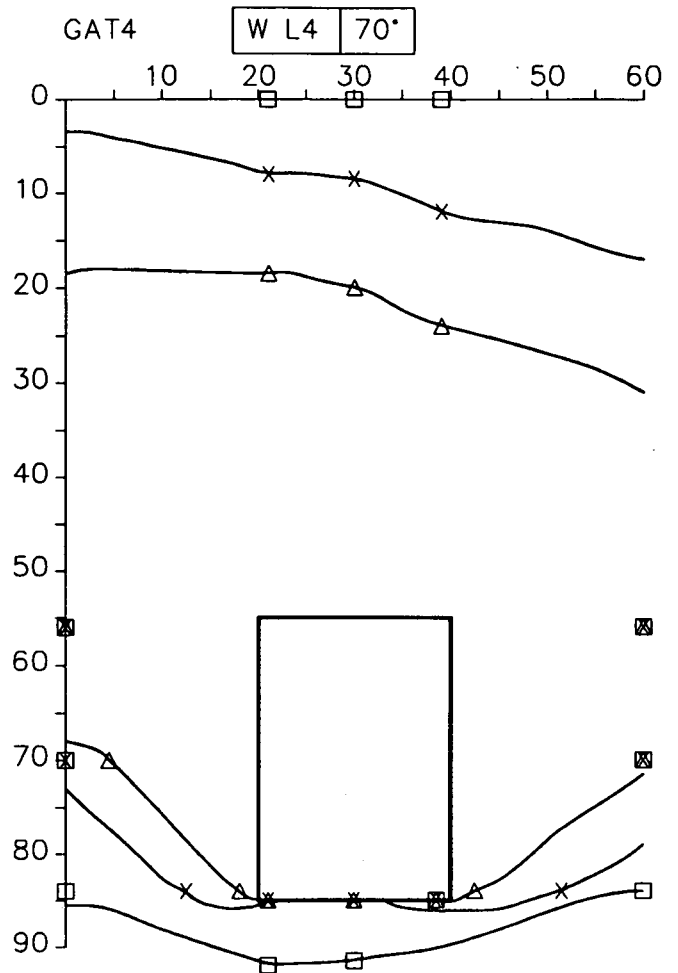
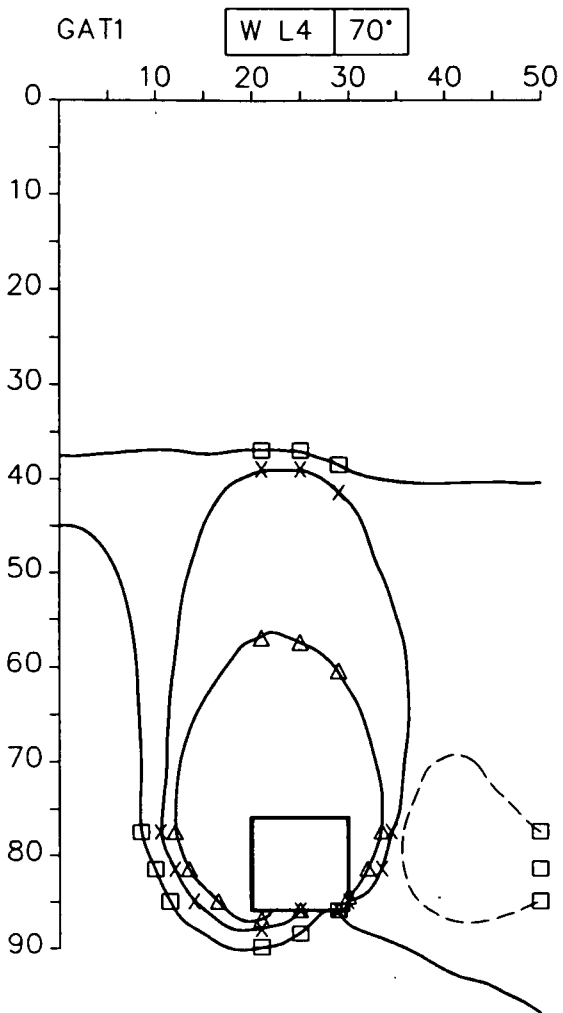
GAT2

W R4 40°



- GAT1 → 0,01m² onder water
- GAT2 → 0,01m² boven water
- GAT4 → 0,06m² onder water

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 4,
40° AANVAL

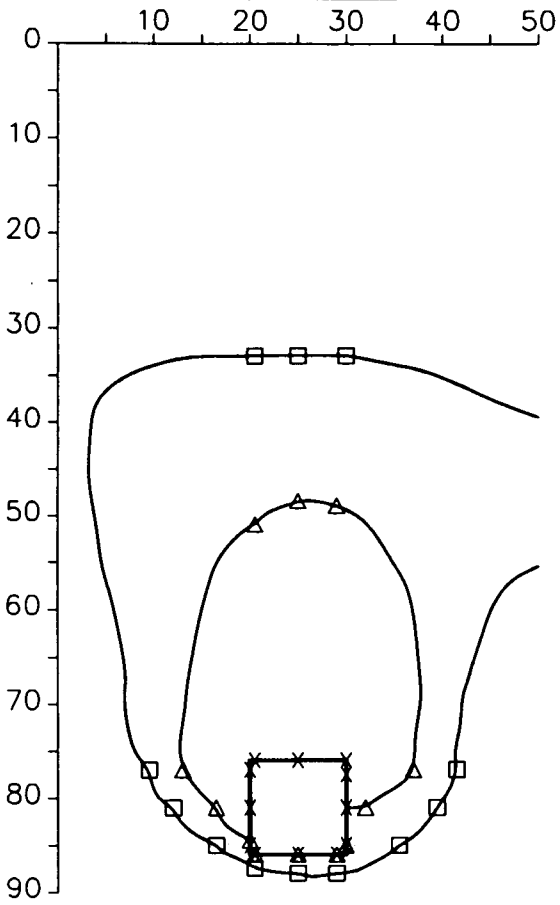


- GAT1 \longrightarrow 0,01m² onder water
- GAT2 \longrightarrow 0,01m² boven water
- GAT4 \longrightarrow 0,06m² onder water

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 4,
70° AANVAL

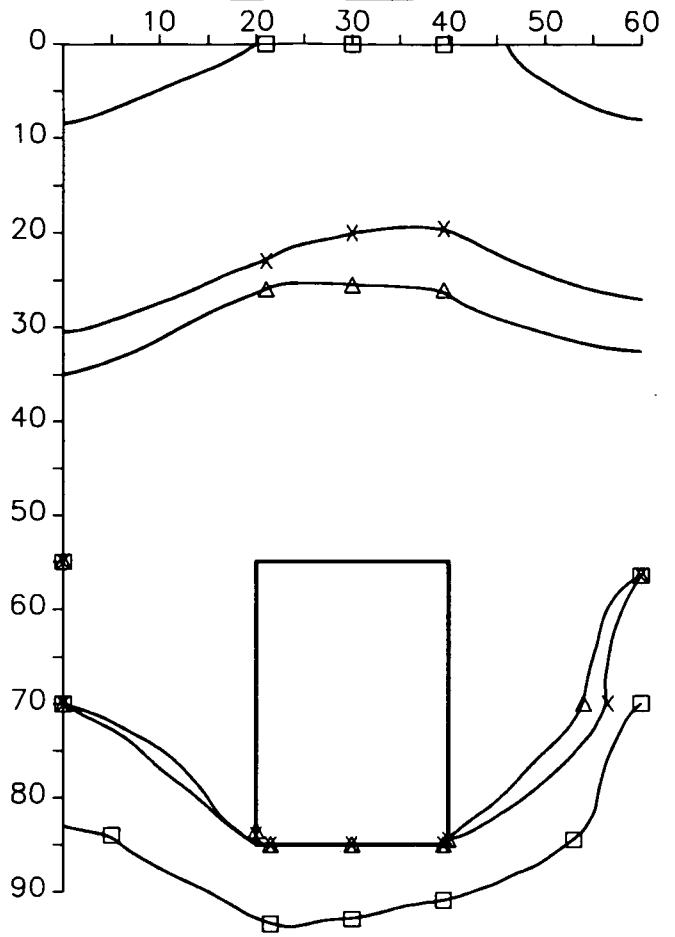
GAT1

W M5 0°



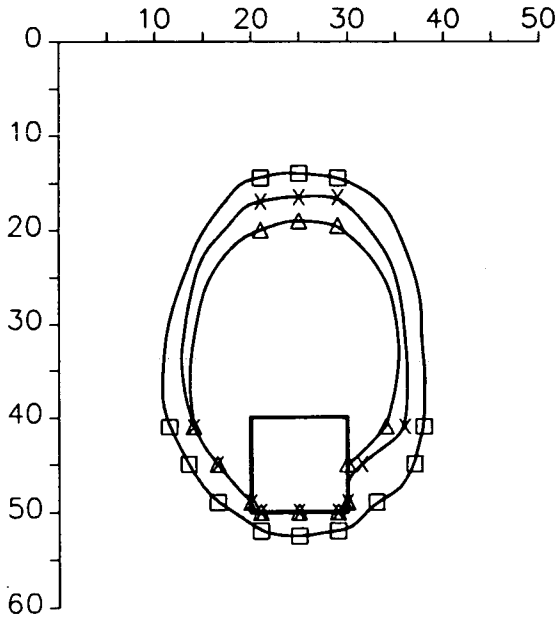
GAT4

W M5 0°



GAT2

W M5 0°



GAT1 → 0,01m² onder water

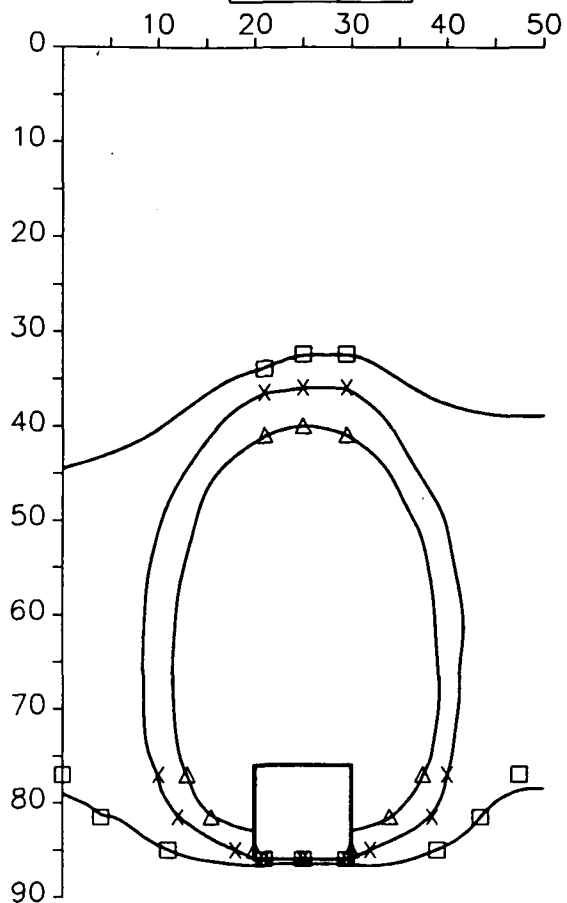
GAT2 → 0,01m² boven water

GAT4 → 0,06m² onder water

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 5,
0° AANVAL

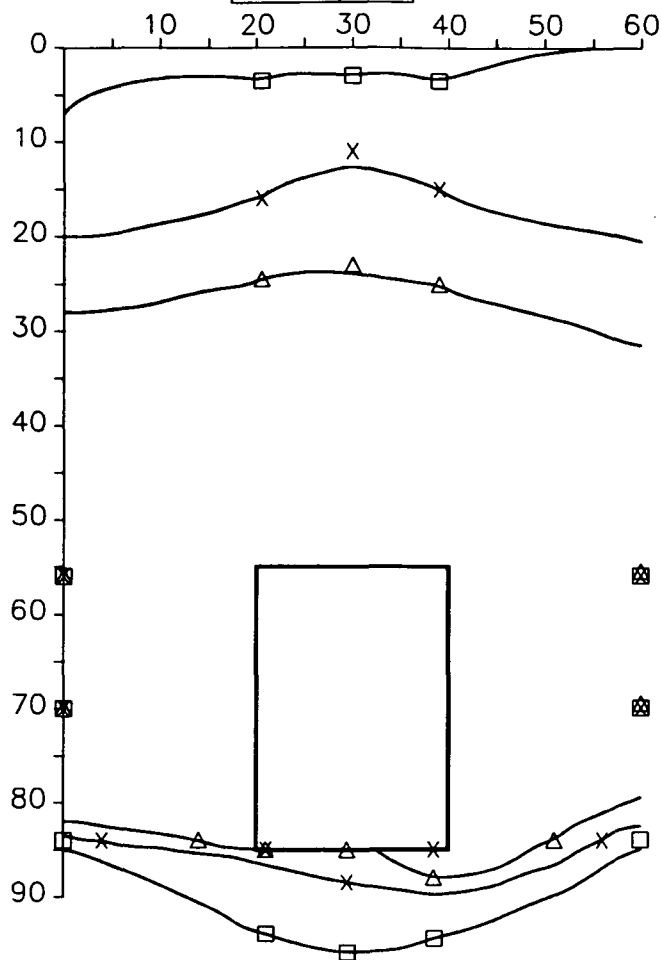
GAT1

W R5 40°



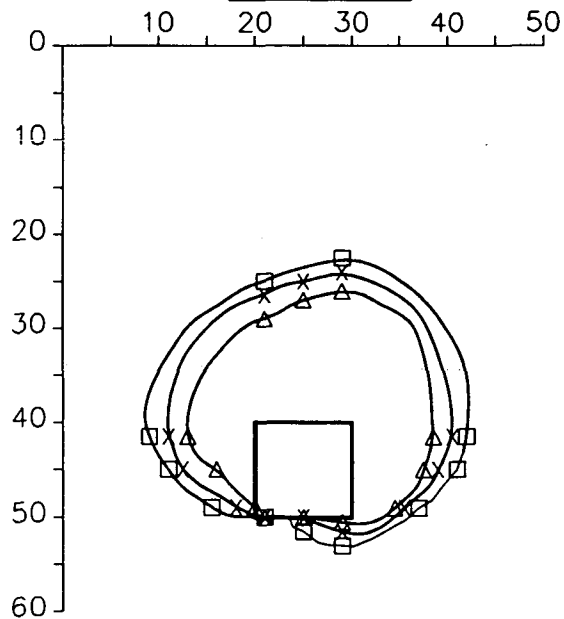
GAT4

W R5 40°



GAT2

W R5 40°



GAT1 → 0,01m² onder water

GAT2 → 0,01m² boven water

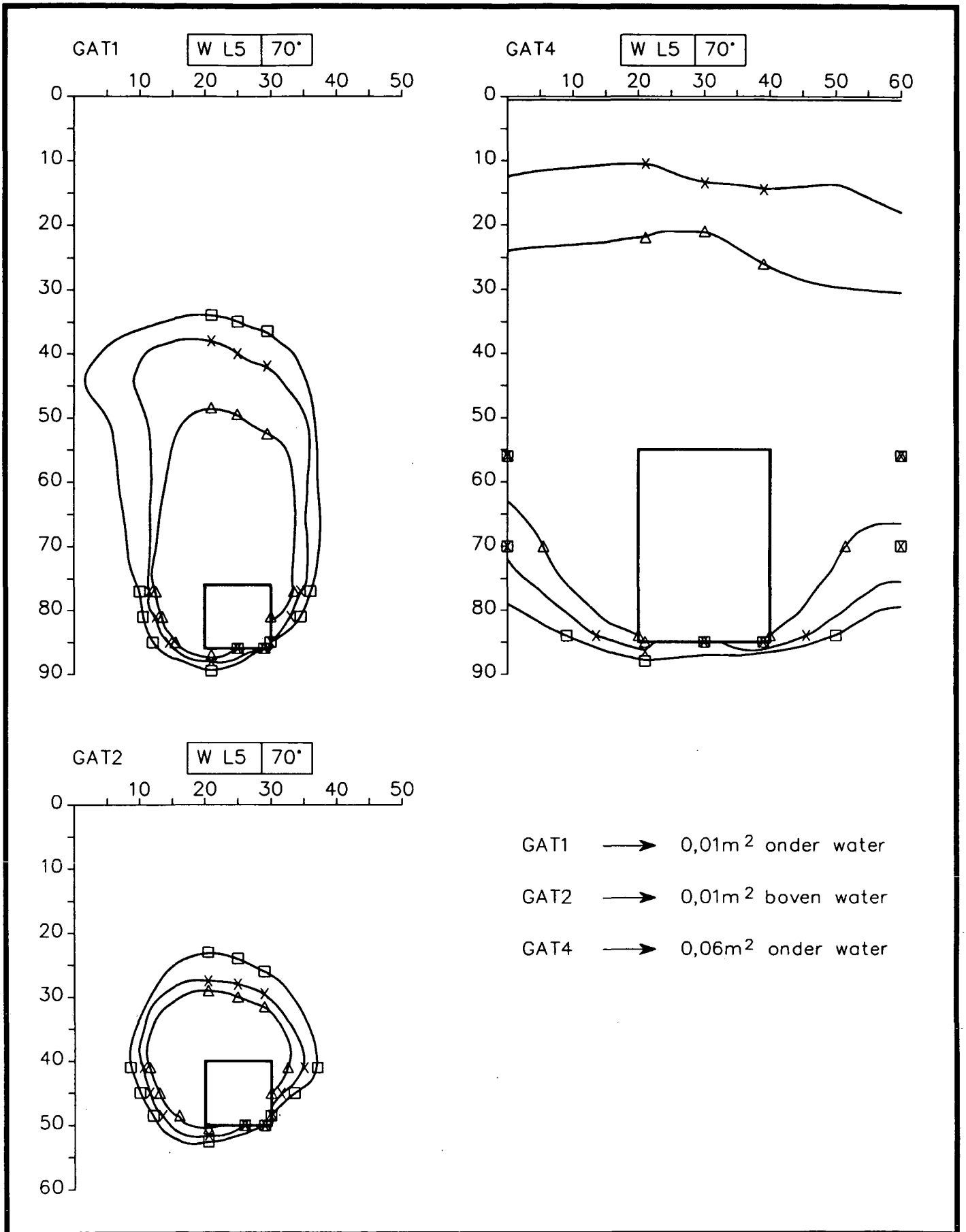
GAT4 → 0,06m² onder water

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 5,
40° AANVAL

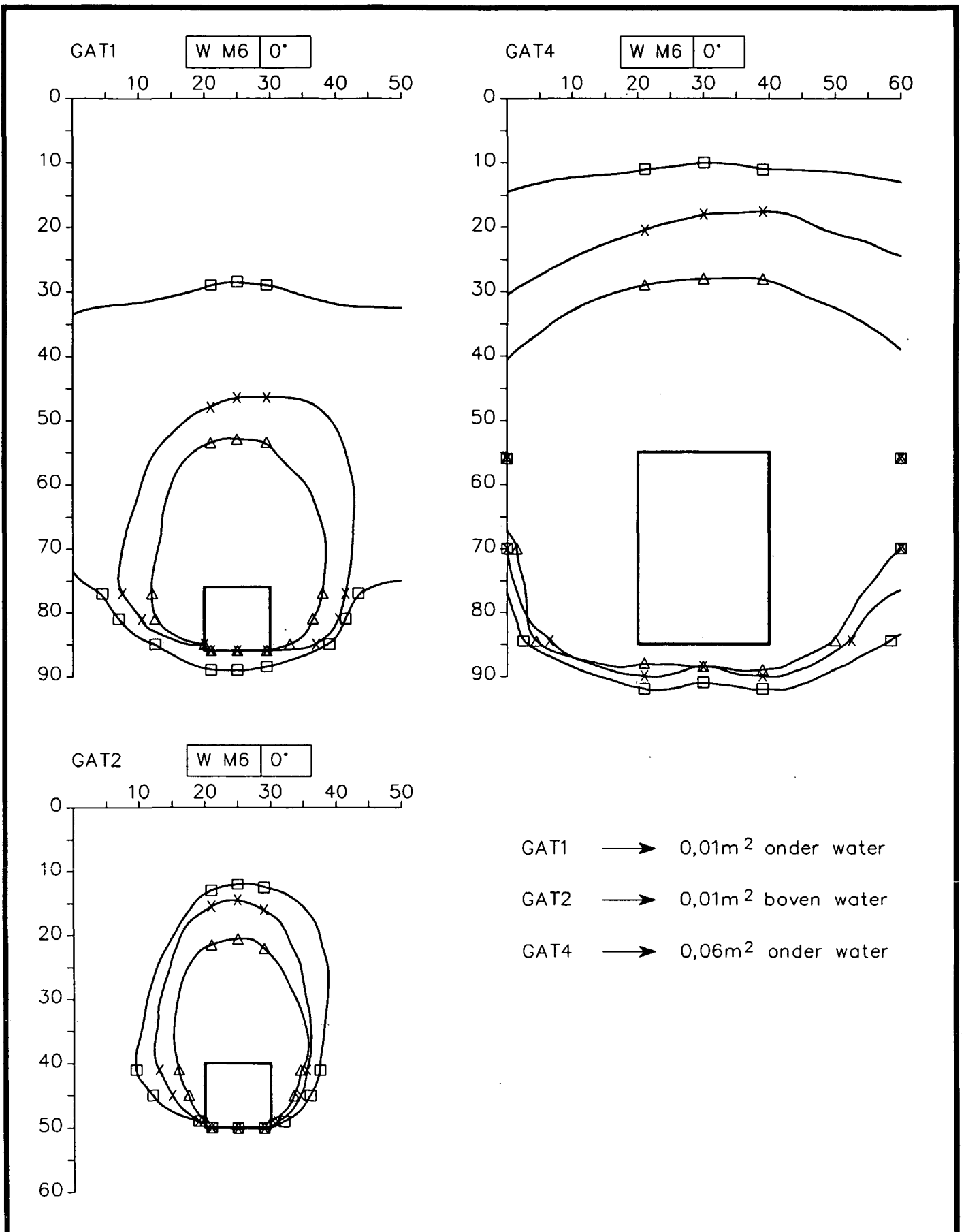
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 4.11



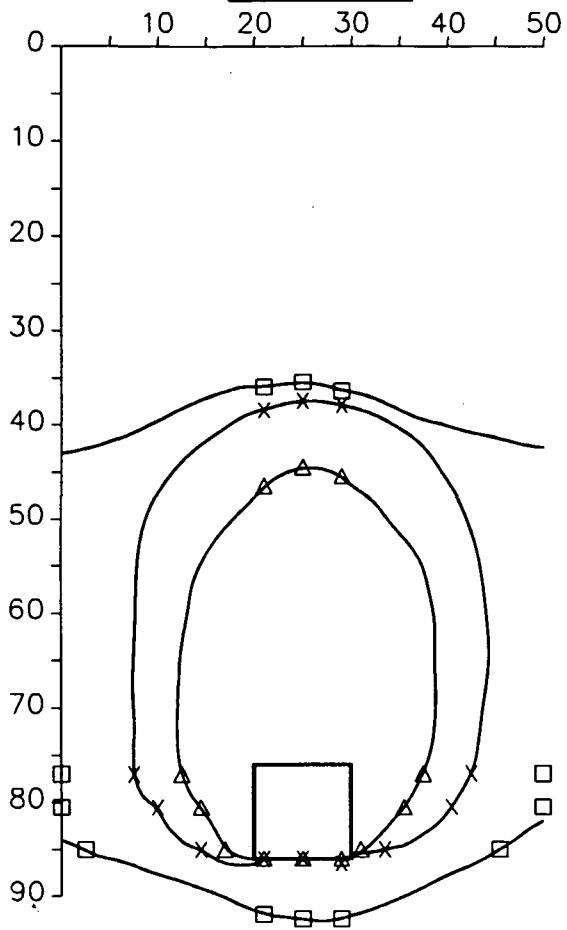
ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 5,
70° AANVAL



ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 6,
0° AANVAL

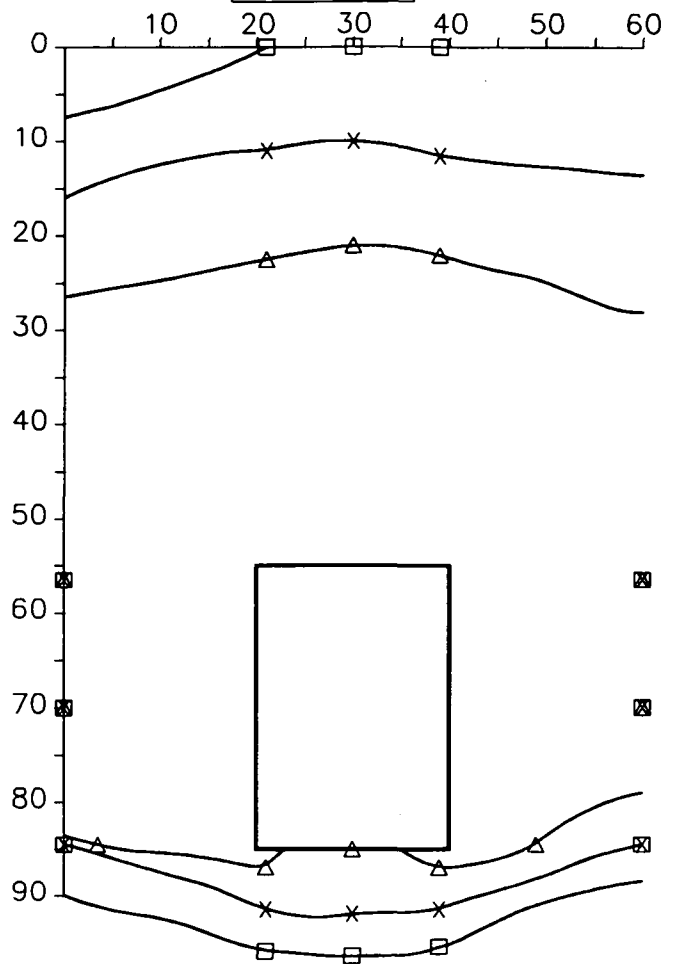
GAT1

W R6 40°



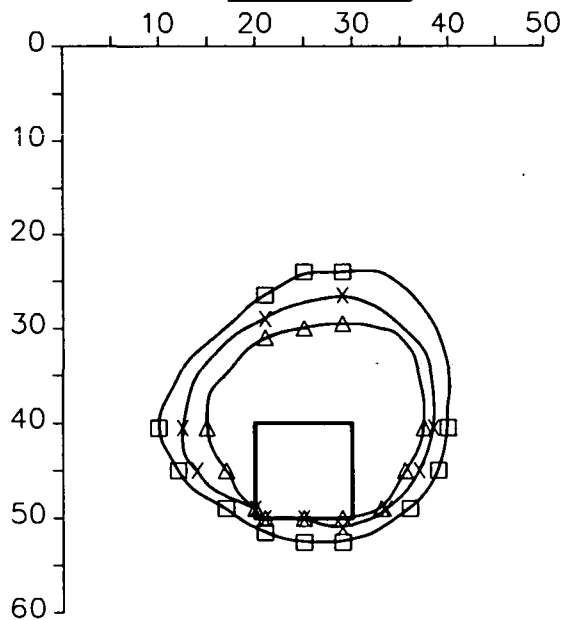
GAT4

W R6 40°



GAT2

W R6 40°



- GAT1 → 0,01m² onder water
- GAT2 → 0,01m² boven water
- GAT4 → 0,06m² onder water

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 6,
40° AANVAL

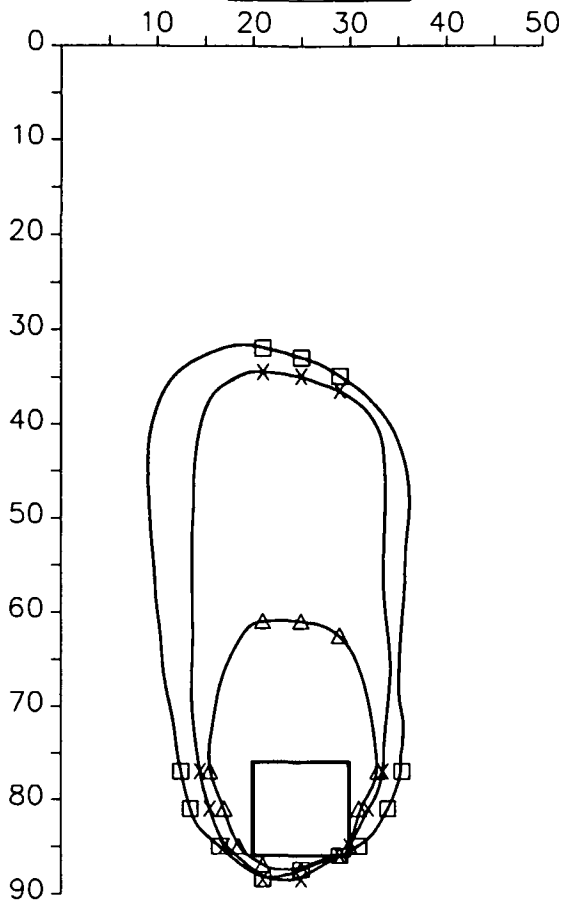
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 4.14

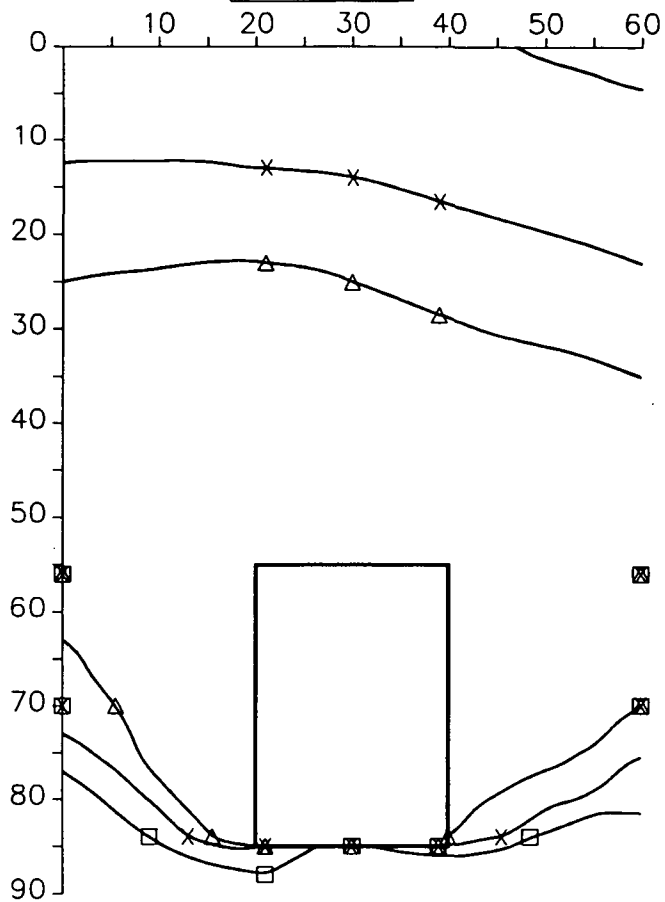
GAT1

W L6 70°



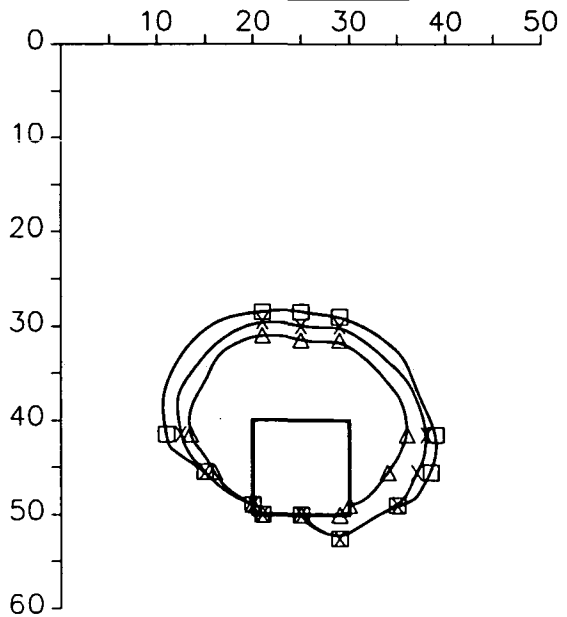
GAT4

W L6 70°



GAT2

W L6 70°



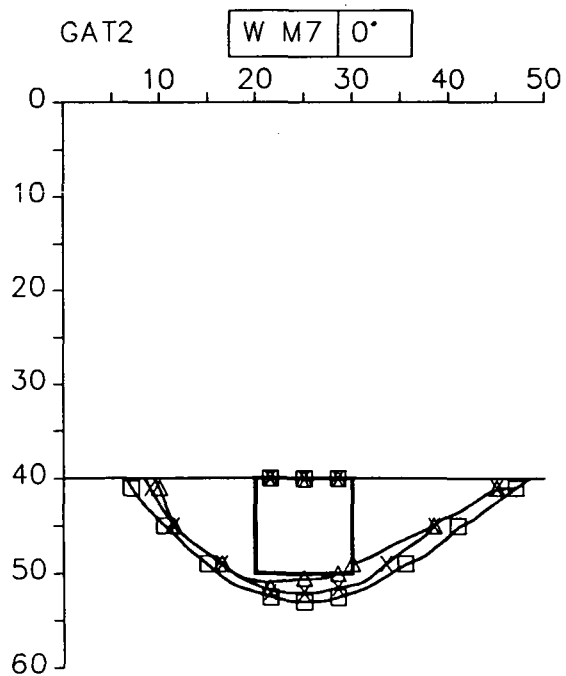
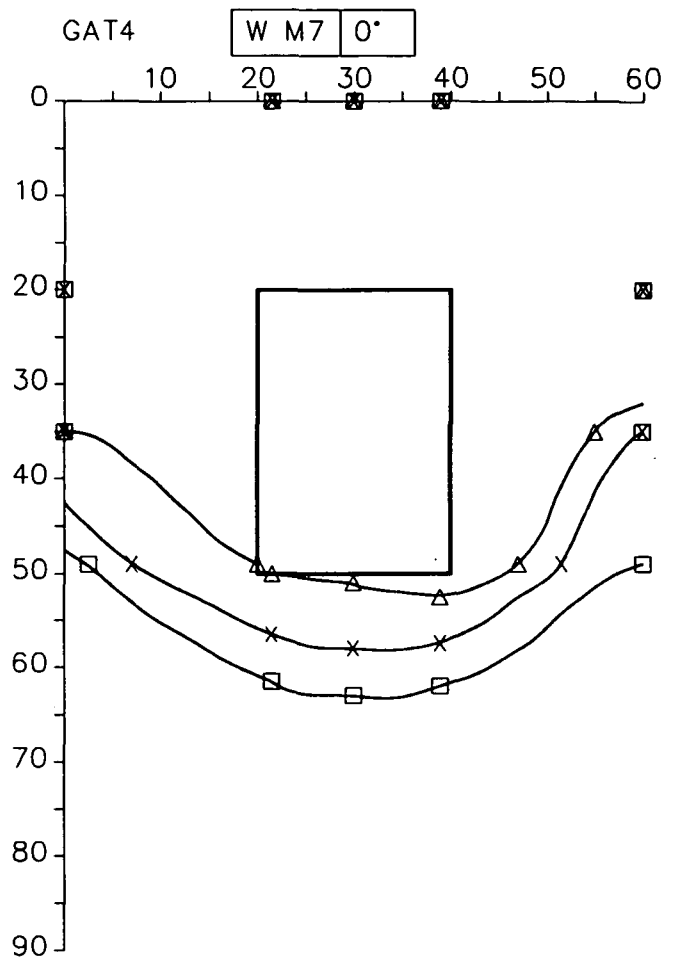
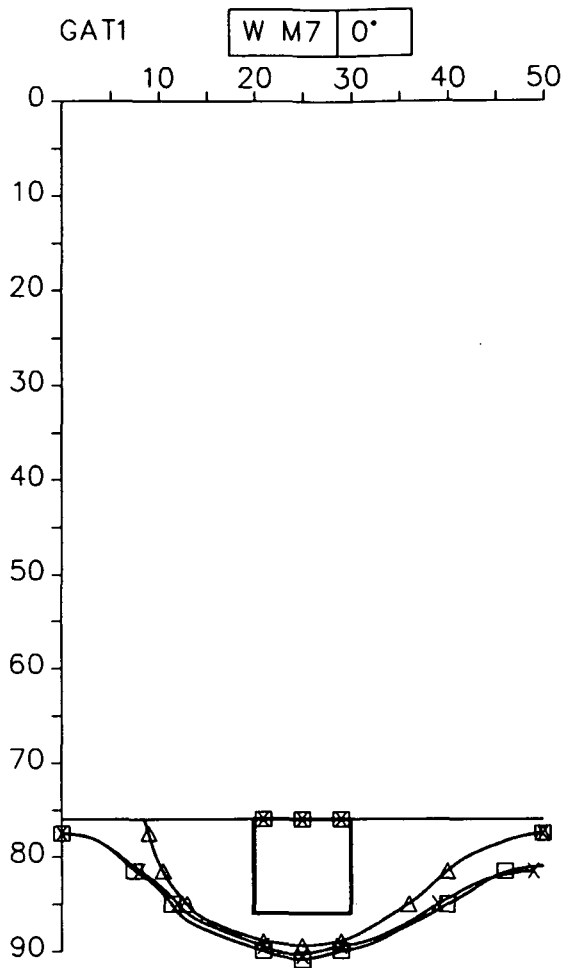
- GAT1 → 0,01m² onder water
- GAT2 → 0,01m² boven water
- GAT4 → 0,06m² onder water

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 6,
70° AANVAL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

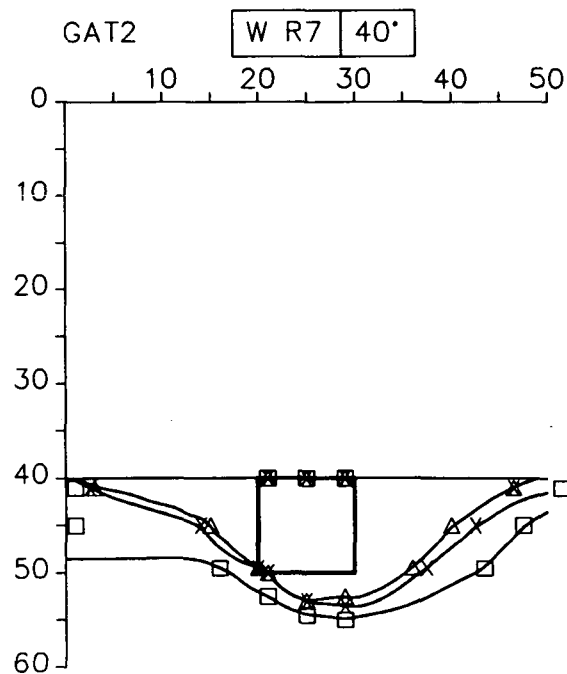
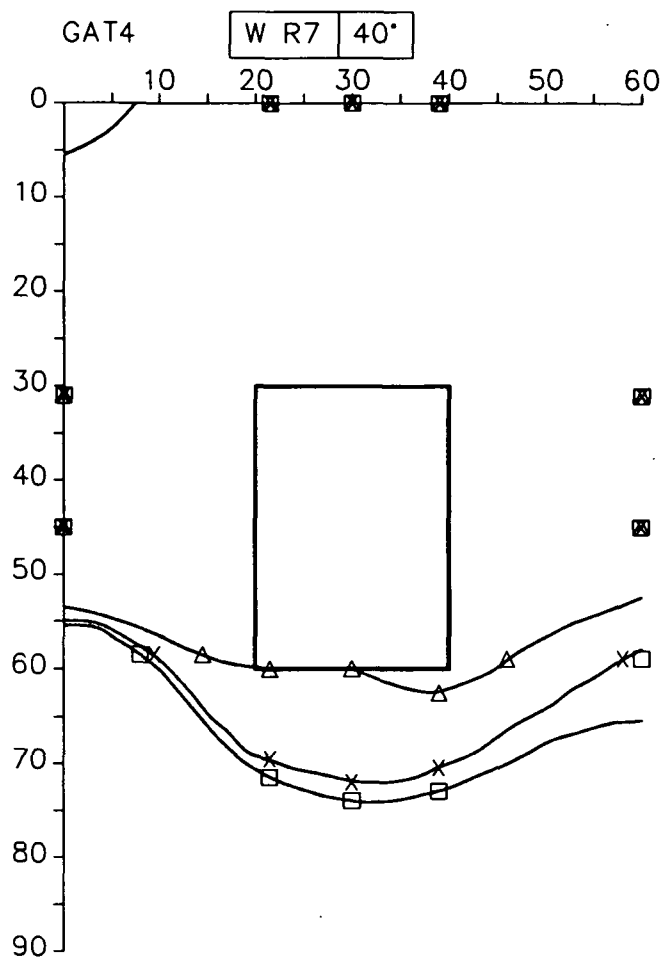
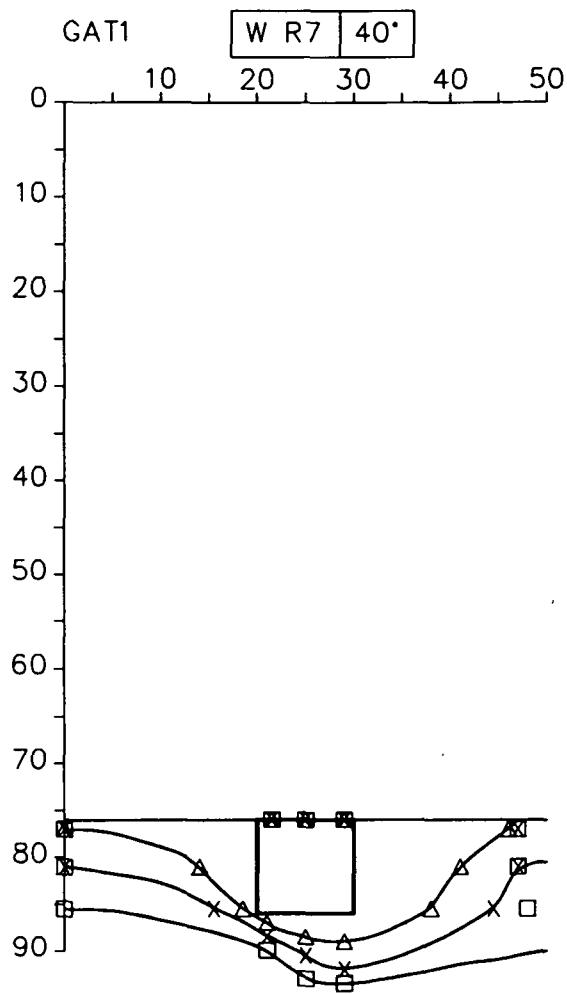
H 1490

FIG. 4.15



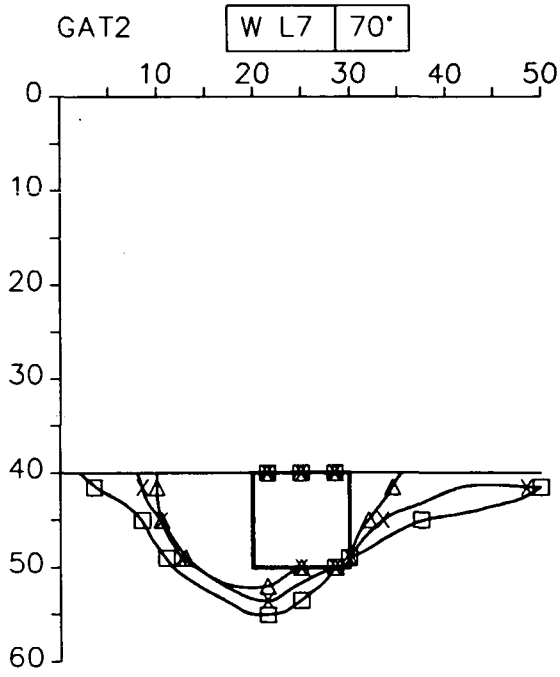
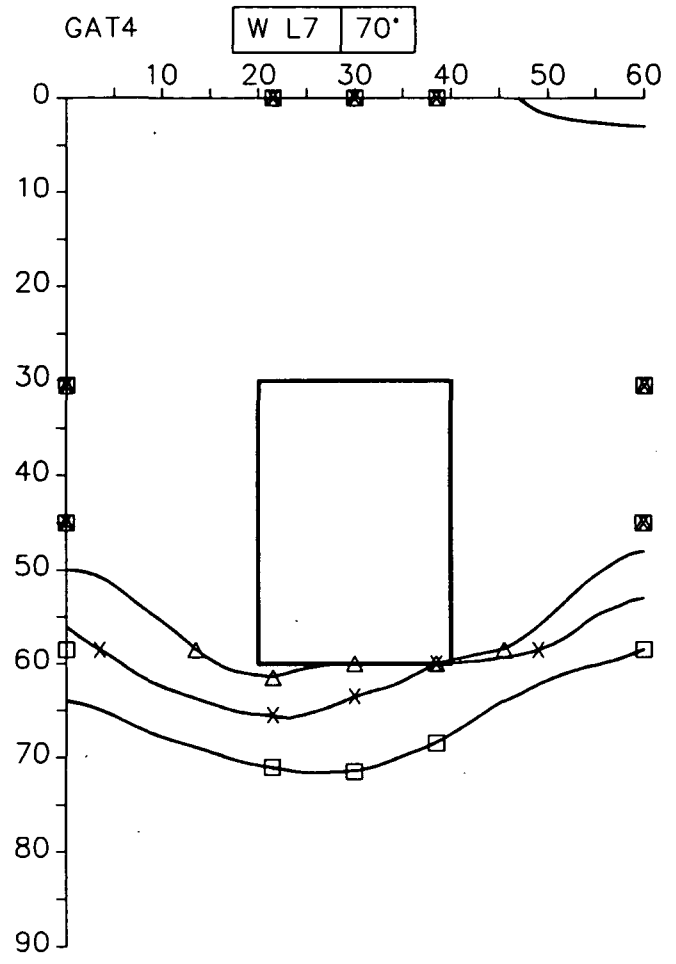
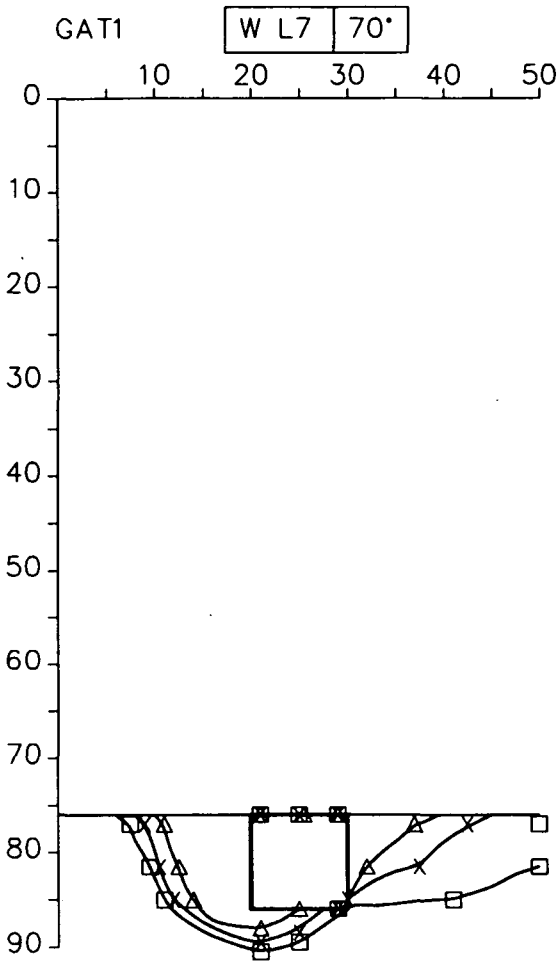
- GAT1 → 0,01m² onder water
- GAT2 → 0,01m² boven water
- GAT4 → 0,06m² onder water

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 7,
0° AANVAL



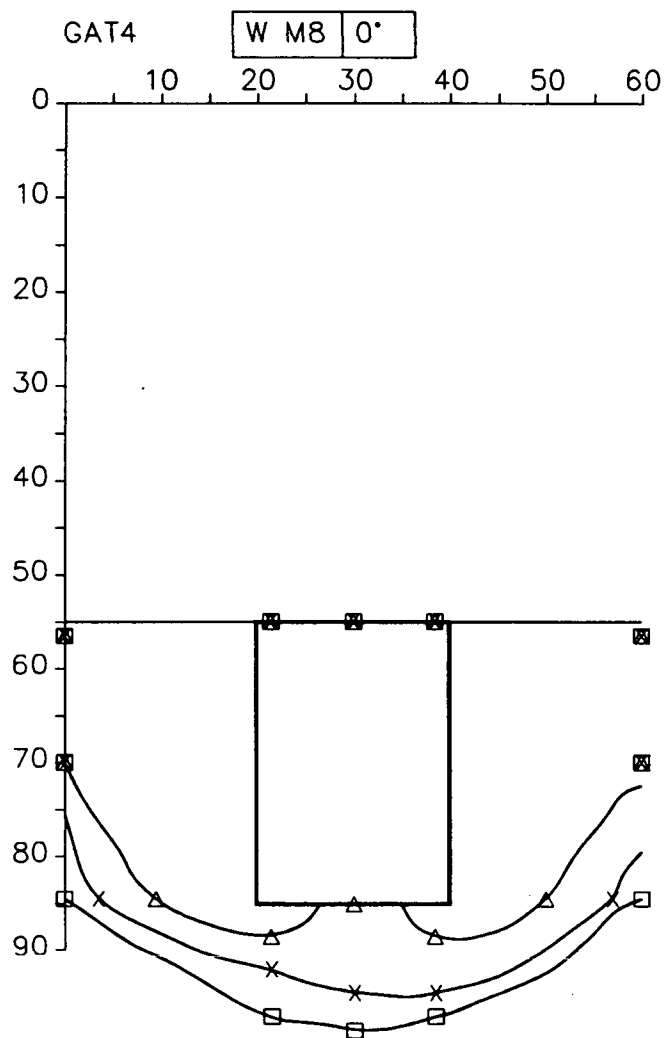
- GAT1 → 0,01m² onder water
- GAT2 → 0,01m² boven water
- GAT4 → 0,06m² onder water

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 7,
40° AANVAL



GAT1 → 0,01m² onder water
 GAT2 → 0,01m² boven water
 GAT4 → 0,06m² onder water

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 7,
70° AANVAL



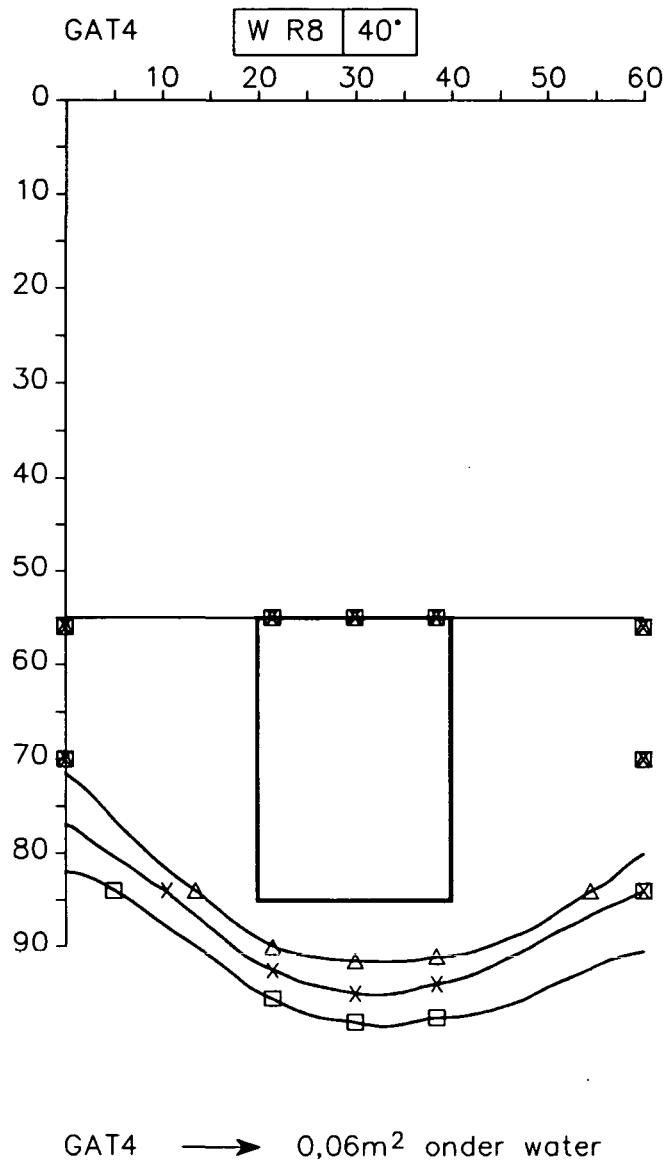
GAT4 → 0,06m² onder water

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 8,
0° AANVAL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 4.19

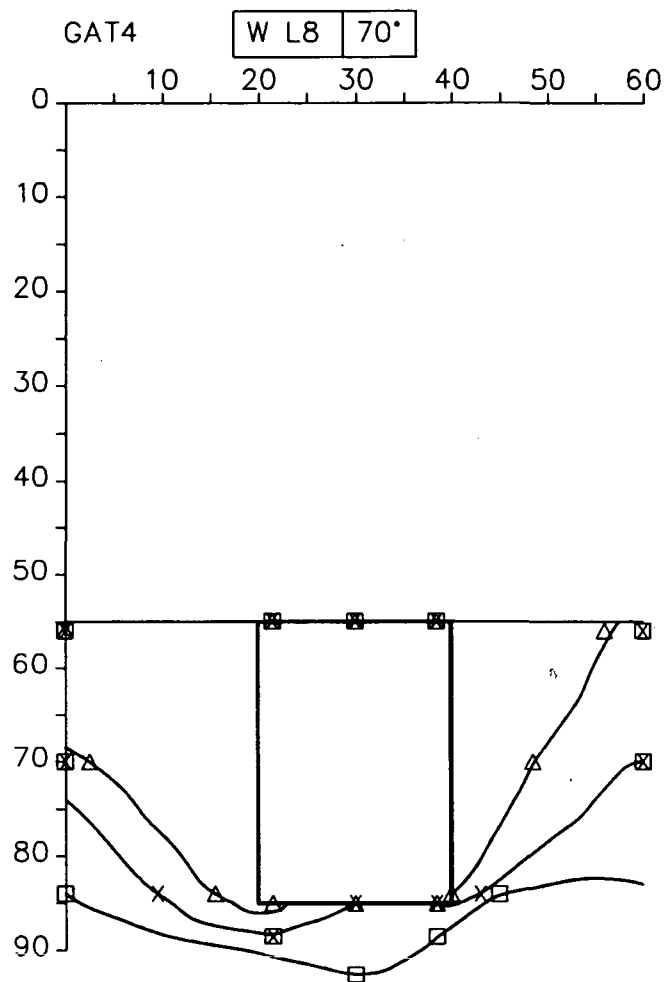


ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 8,
40° AANVAL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 4.20



GAT4 → 0,06m² onder water

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 8,
70° AANVAL

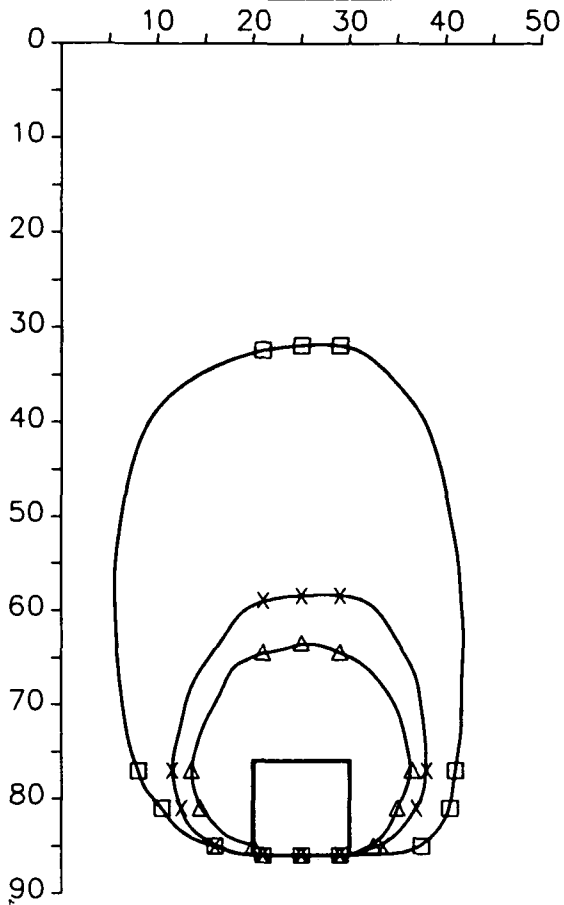
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 4.21

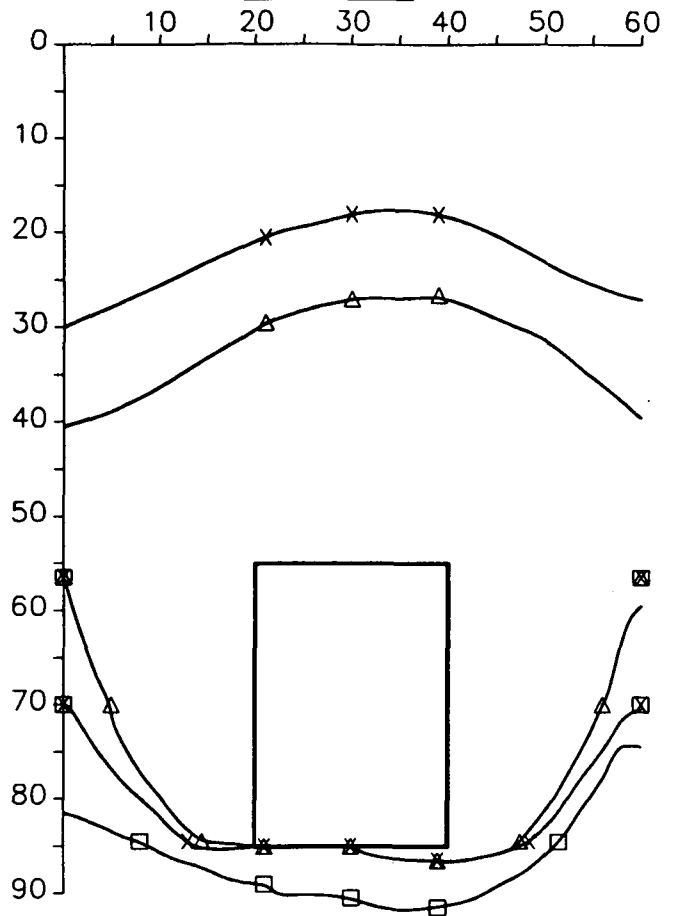
GAT1

W M9	0°
------	----



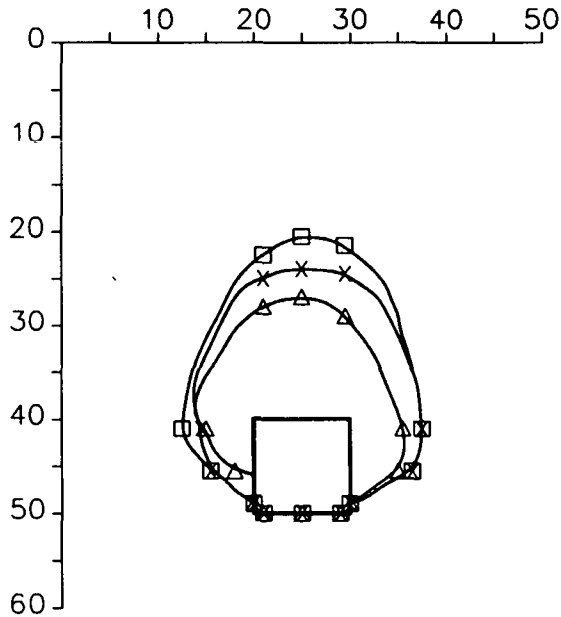
GAT4

W M9	0°
------	----



GAT2

W M9	0°
------	----

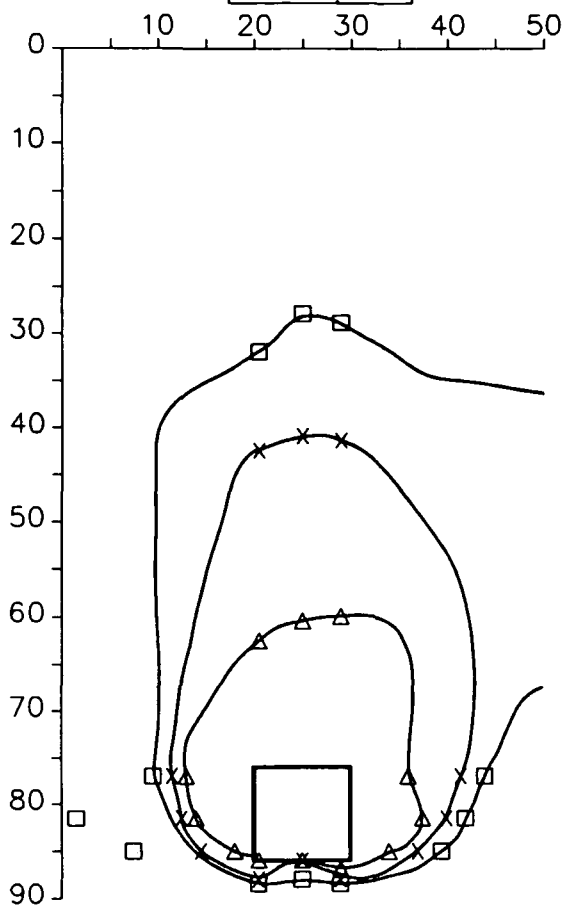


- GAT1 → 0,01m² onder water
- GAT2 → 0,01m² boven water
- GAT4 → 0,06m² onder water

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 9,
0° AANVAL

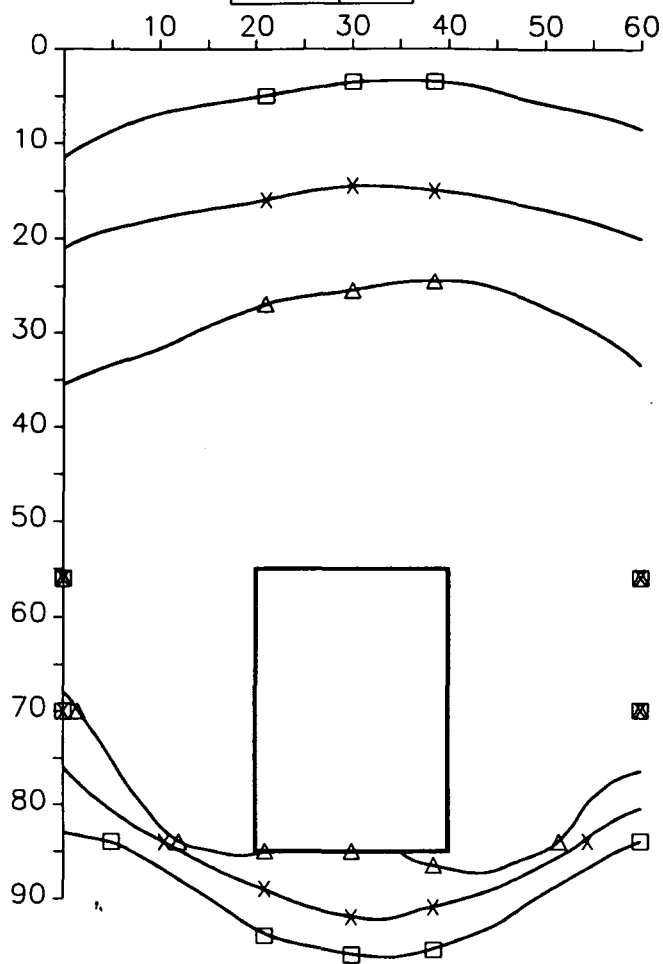
GAT1

W R9 40°



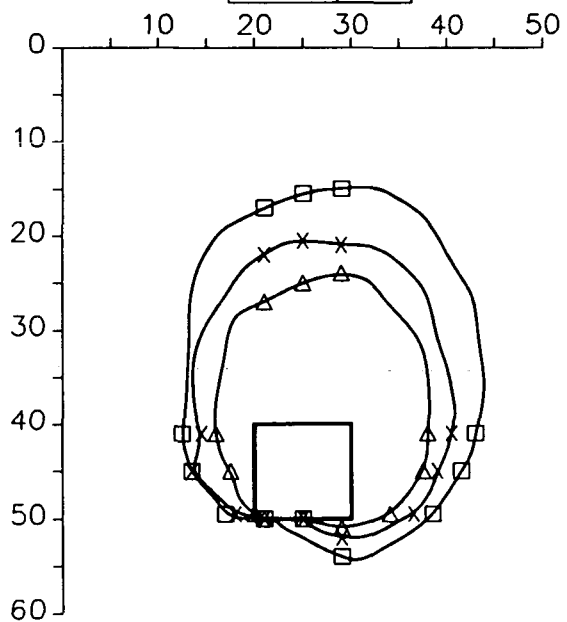
GAT4

W R9 40°



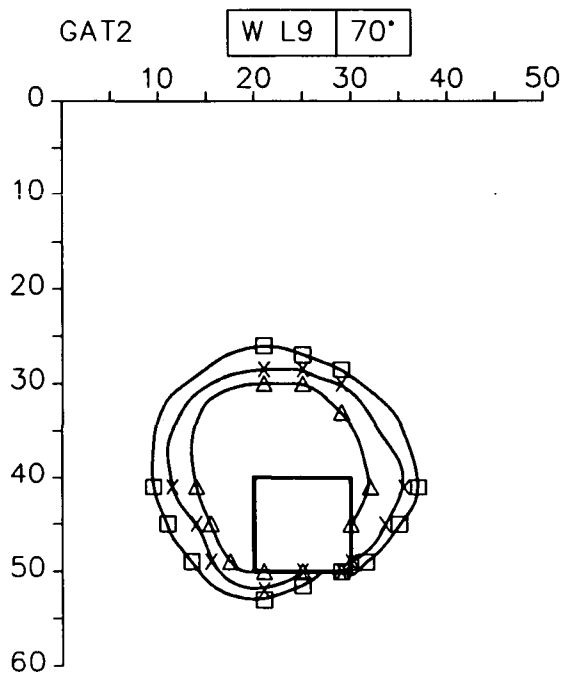
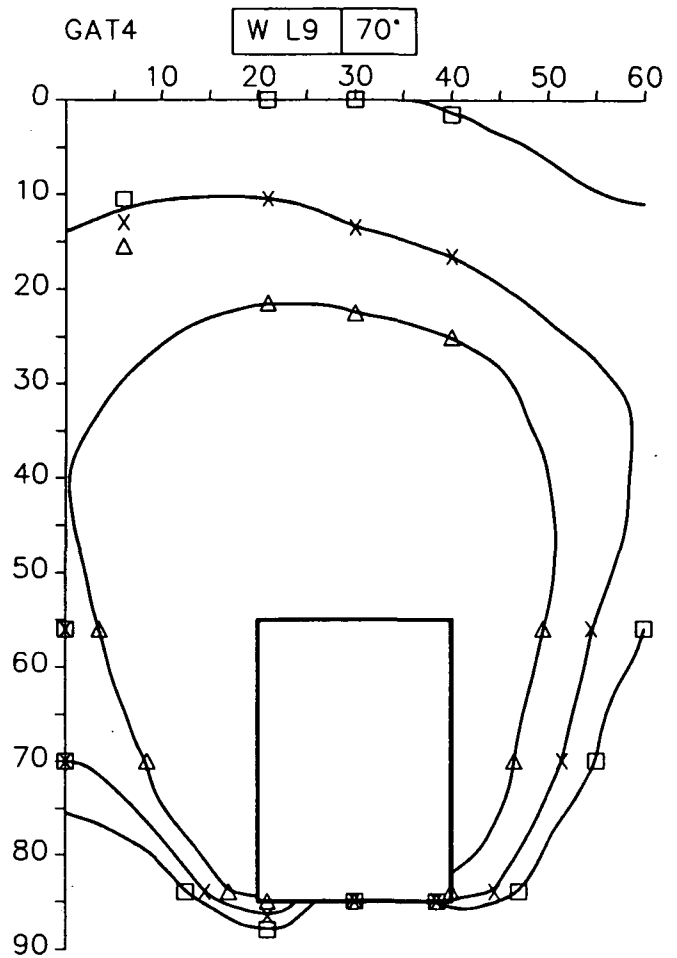
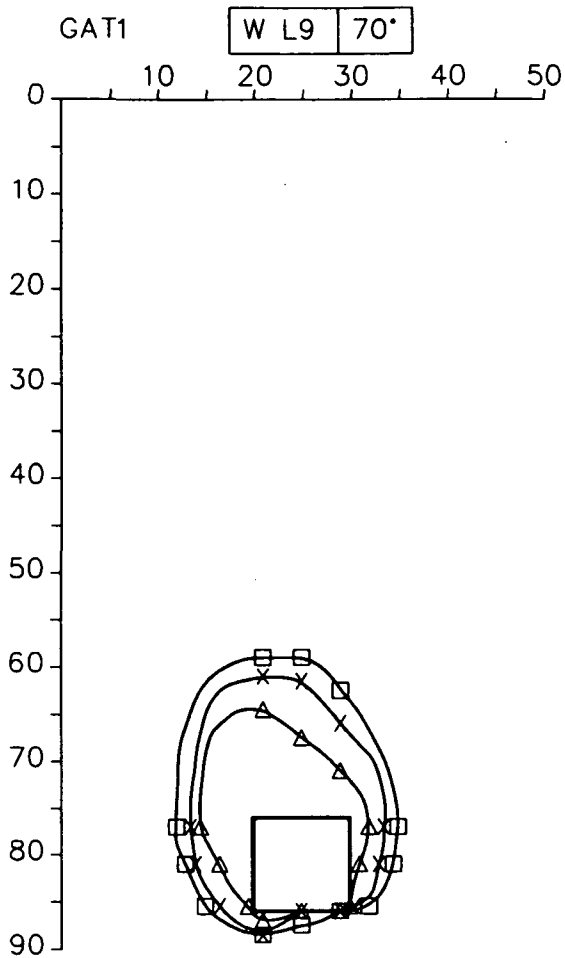
GAT2

W R9 40°



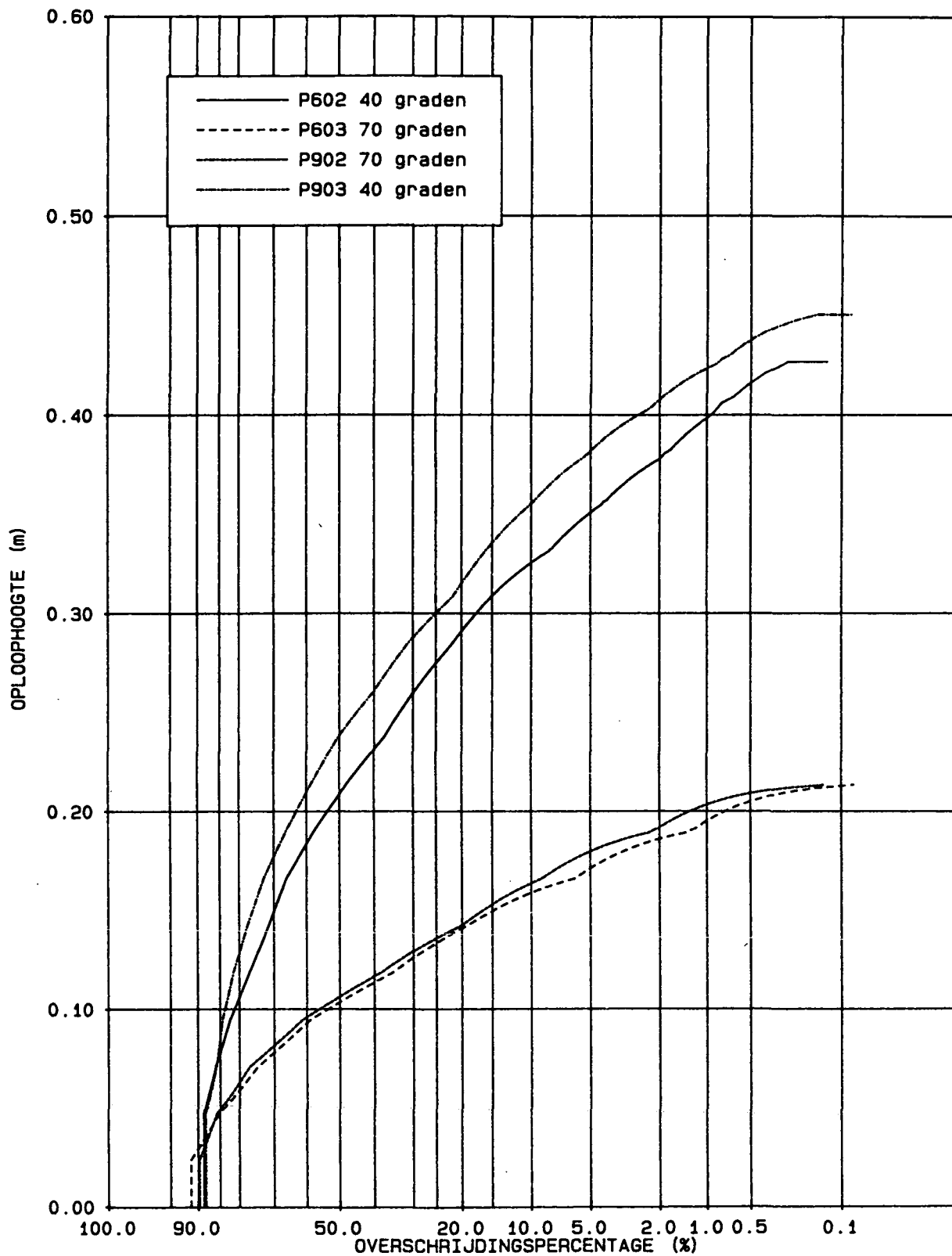
- GAT1 → 0,01m² onder water
- GAT2 → 0,01m² boven water
- GAT4 → 0,06m² onder water

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 9,
40° AANVAL



- GAT1 → 0,01m² onder water
- GAT2 → 0,01m² boven water
- GAT4 → 0,06m² onder water

ONDERMIJNING TOPLAAG BIJ PROEF 9,
70° AANVAL



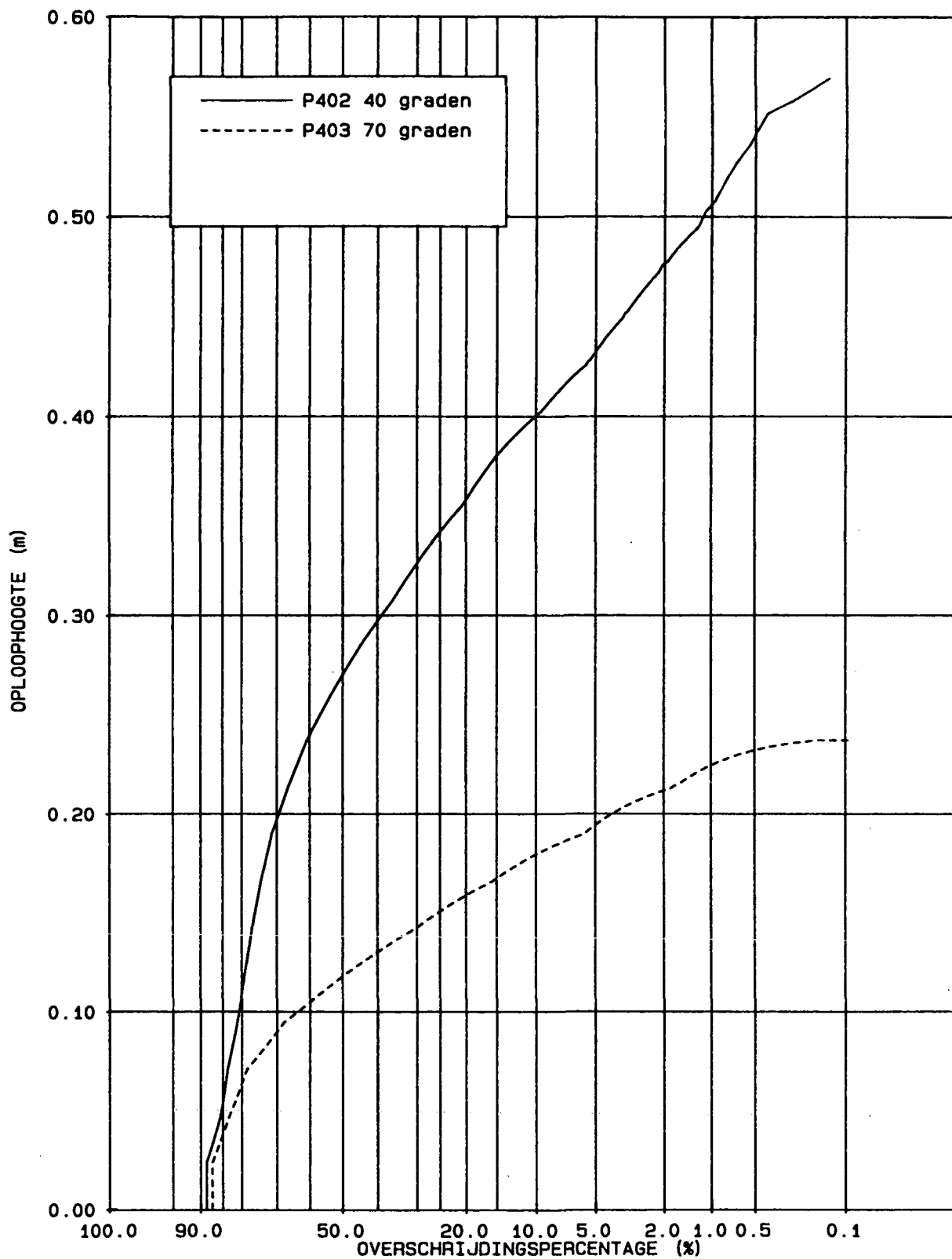
GOLFOPLOOP, HOEK 40 EN 70 GRADEN

$H_s = 0,20m$ $S_{op} = 0,04$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 4.25



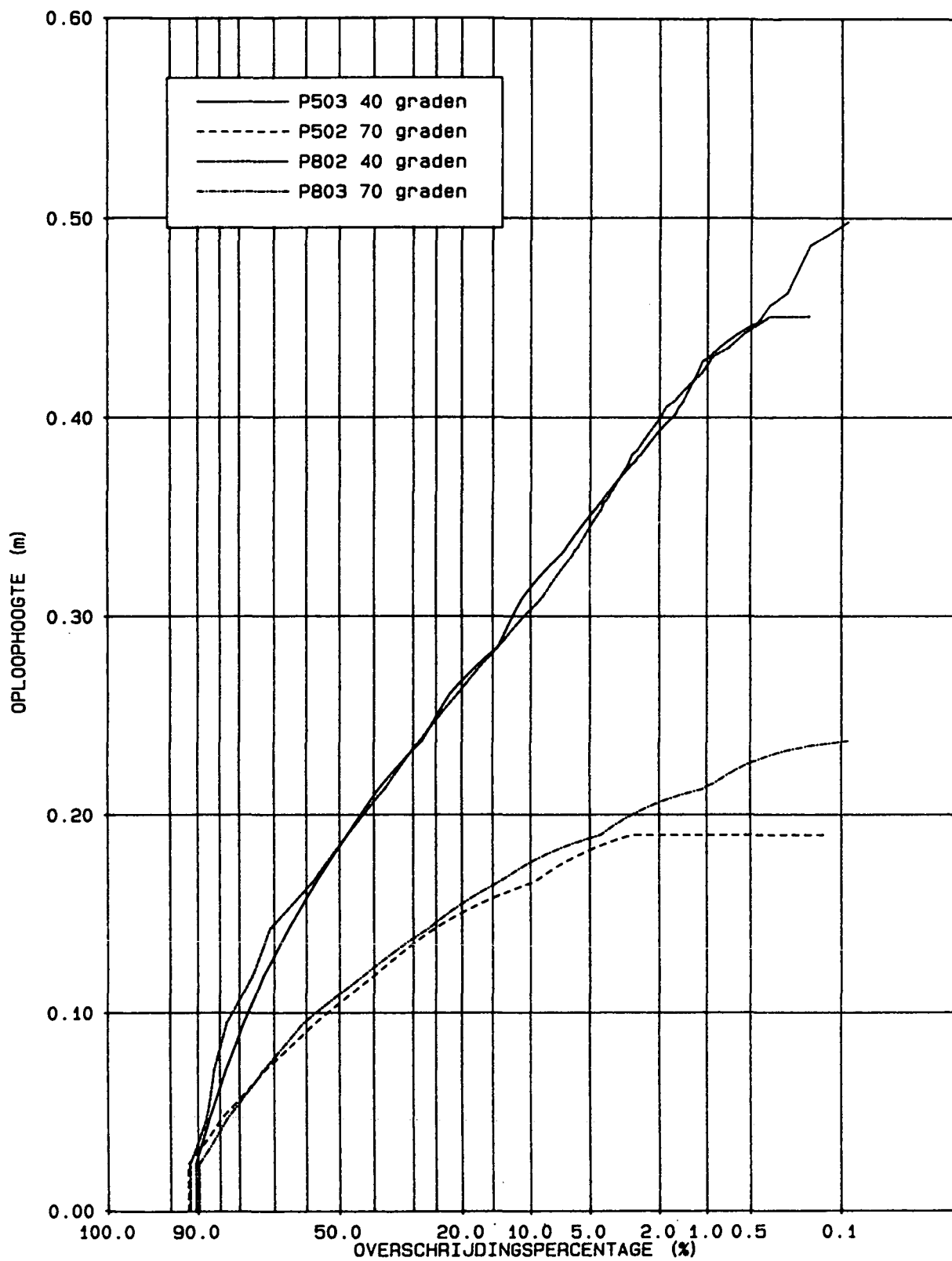
GOLFOPLOOP, HOEK 40 EN 70 GRADEN

$H_s = 0,24m$ $S_{op} = 0,04$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 4.26



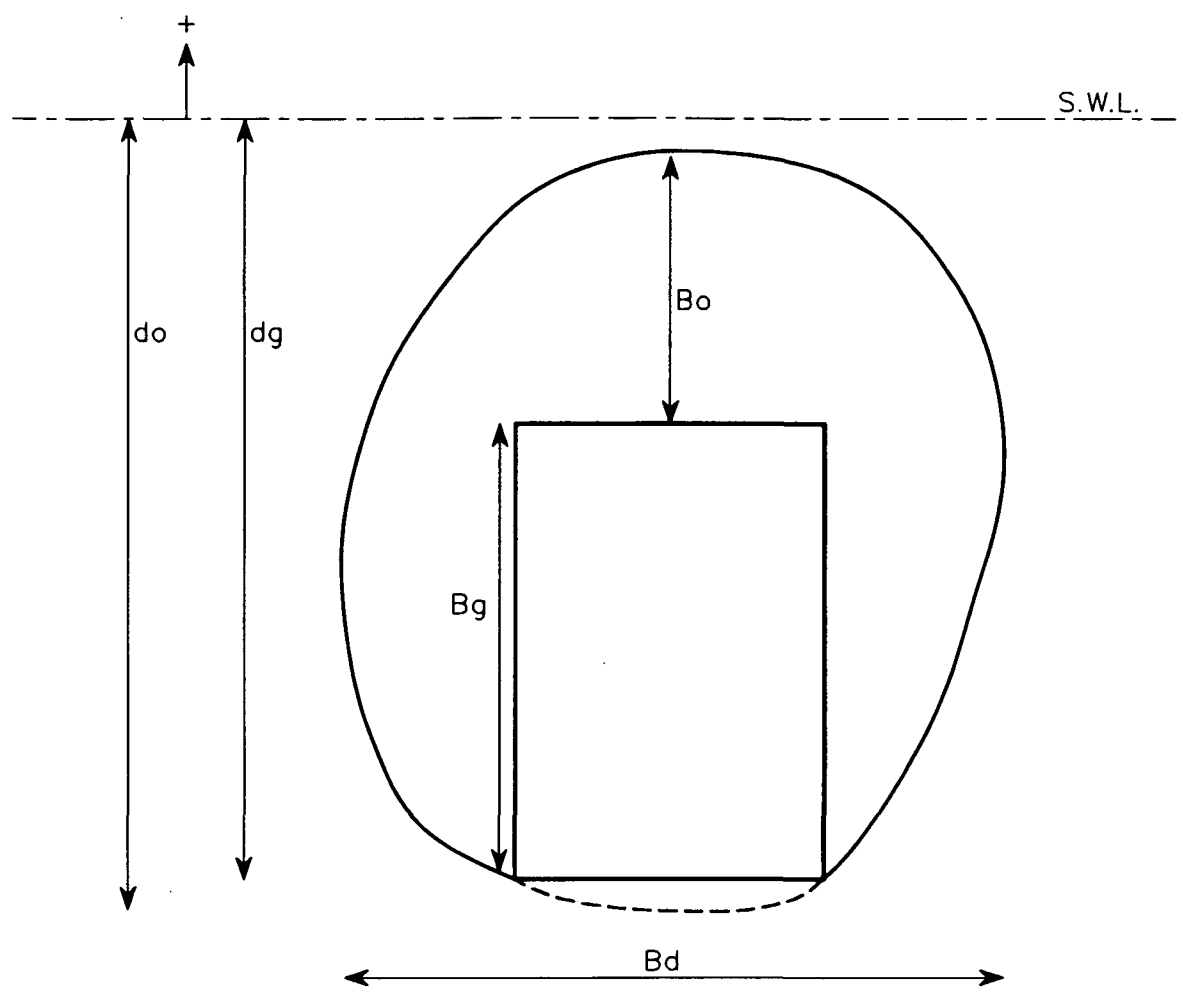
GOLFOPLOOP, HOEK 40 EN 70 GRADEN

$H_s = 0,15m$ $S_{op} = 0.02$

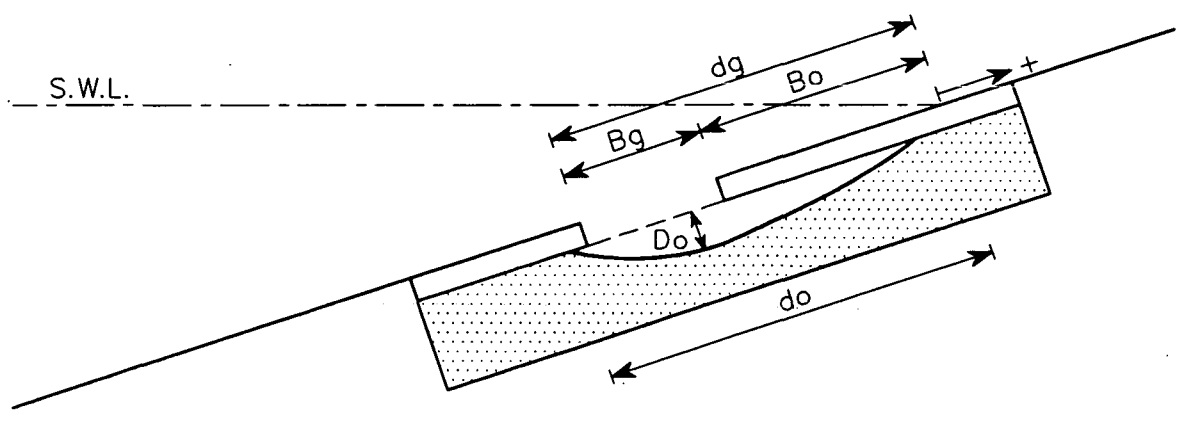
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 4.27



bovenaanzicht

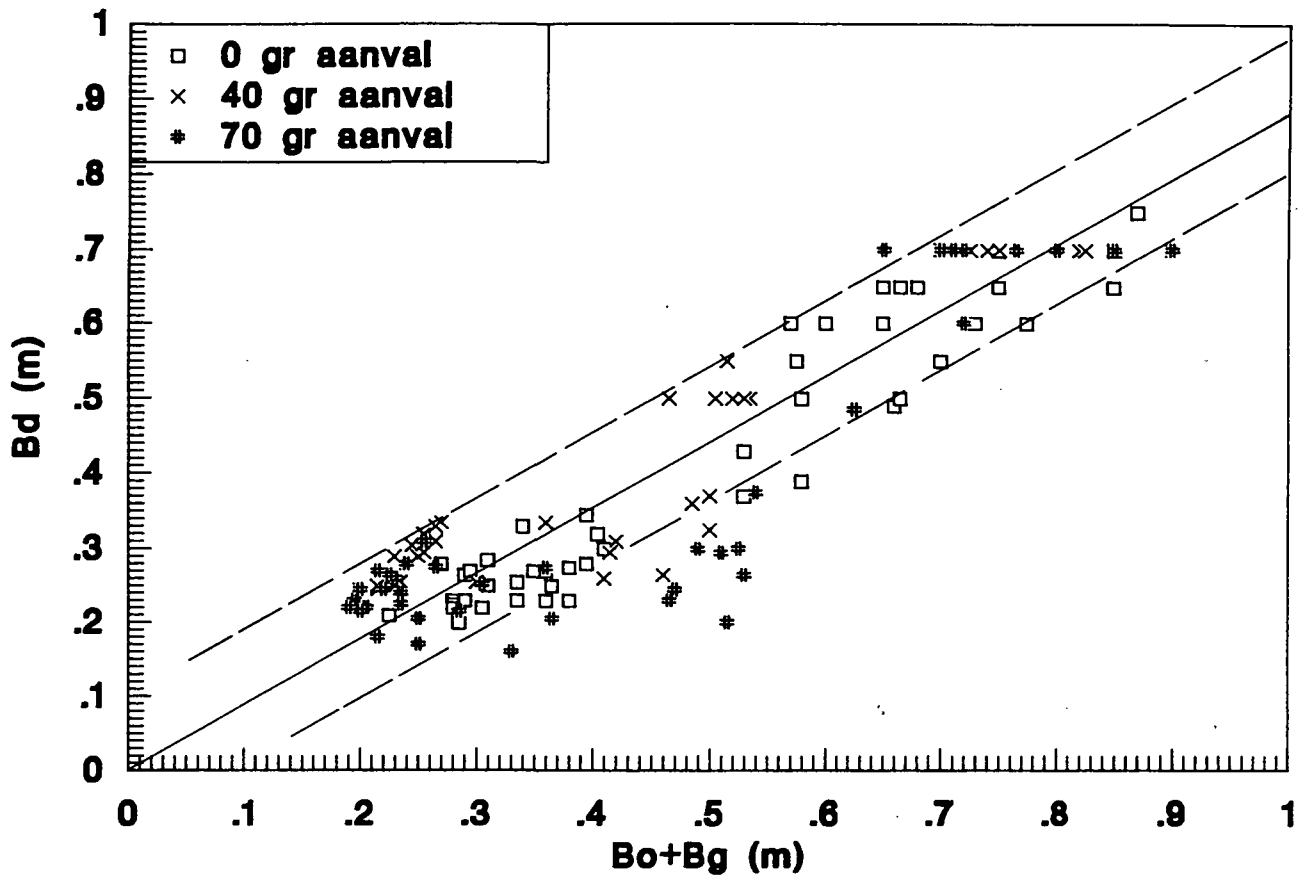


zijaanzicht

ILLUSTRATIE PARAMETERS GEBRUIKT
VOOR MODELLERING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490	FIG. 5.1



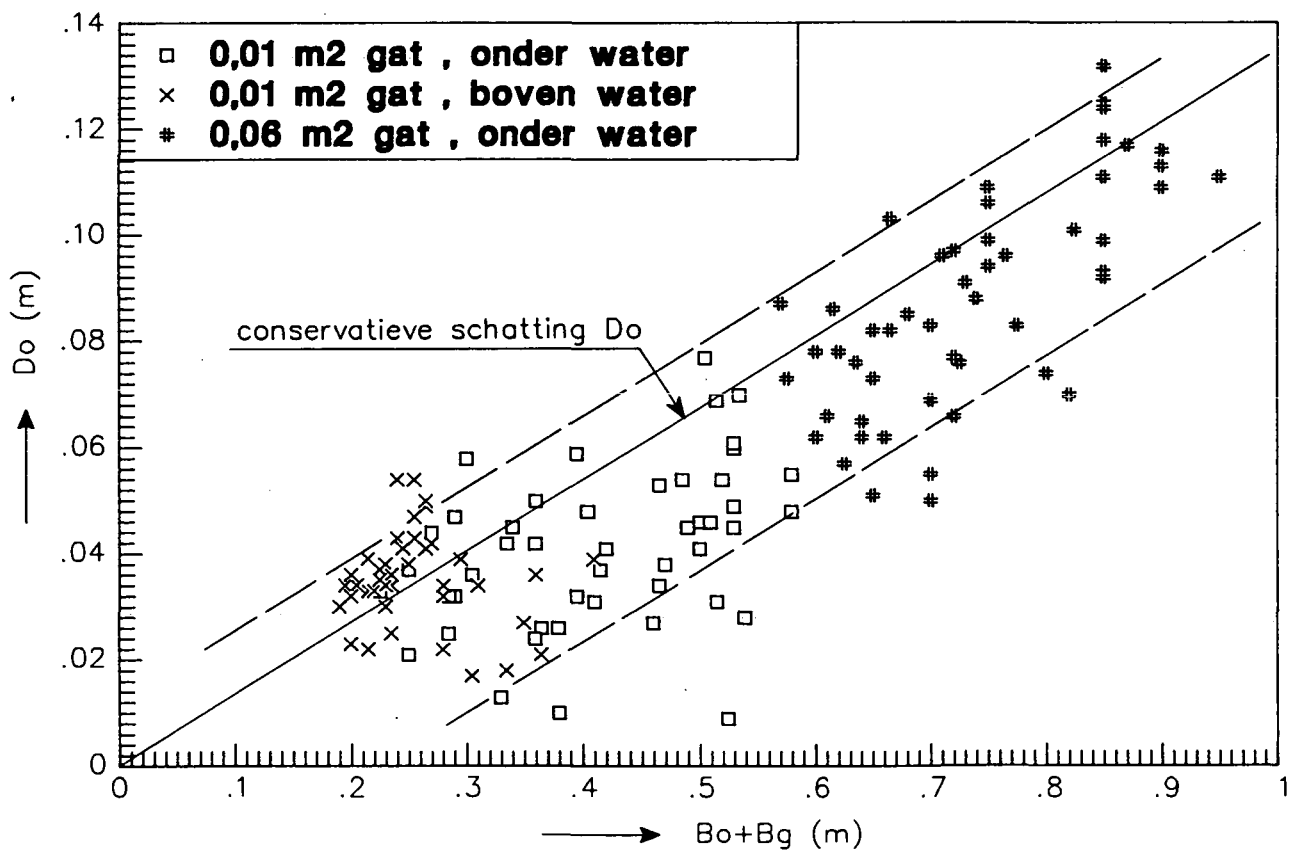
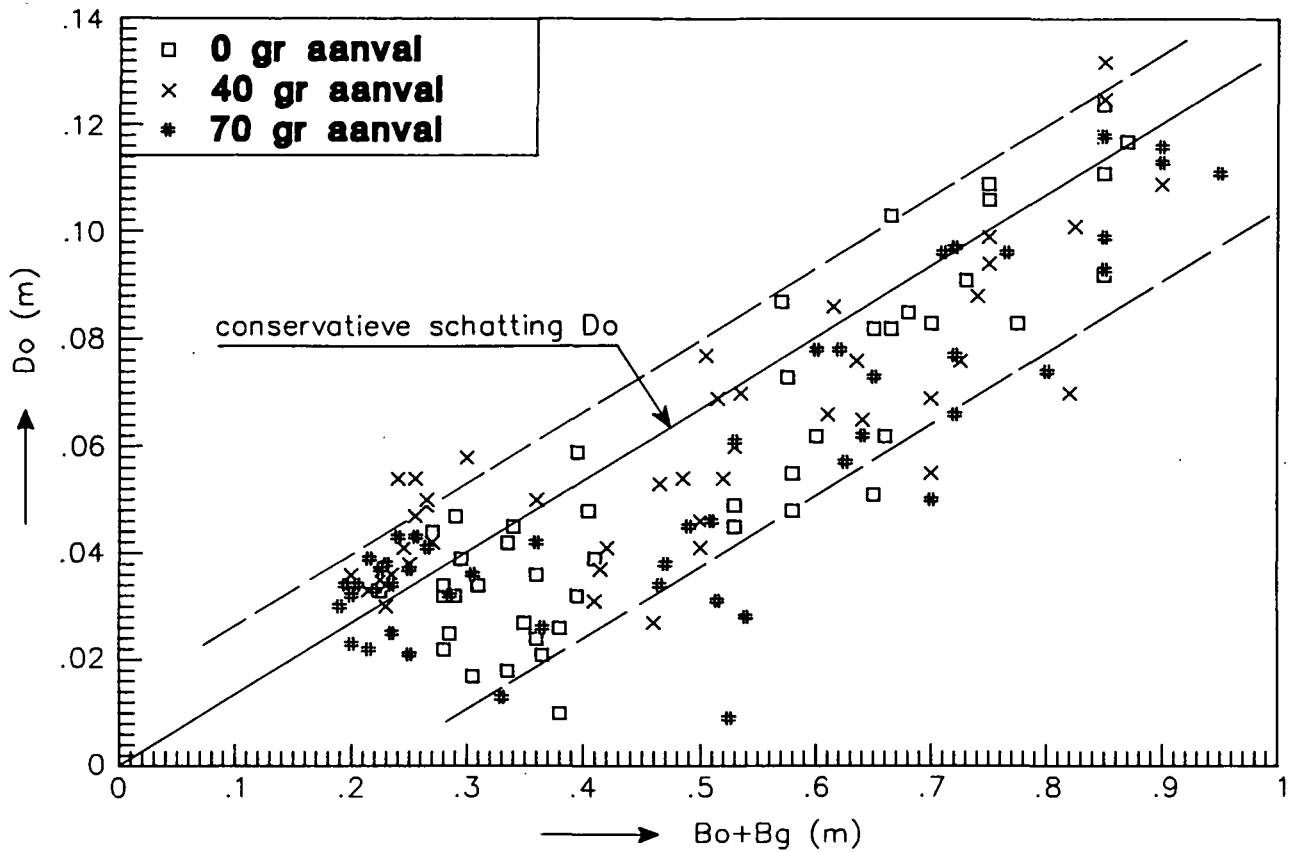
Op basis van proef 2 , 3 , 4 , 5 , 6 , 7

RELATIE TUSSEN Bd EN (Bo+Bg)

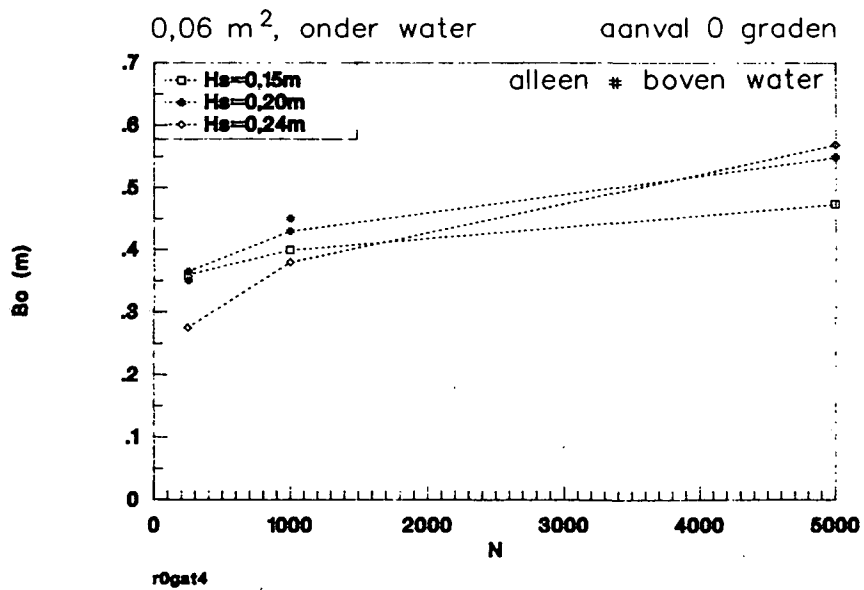
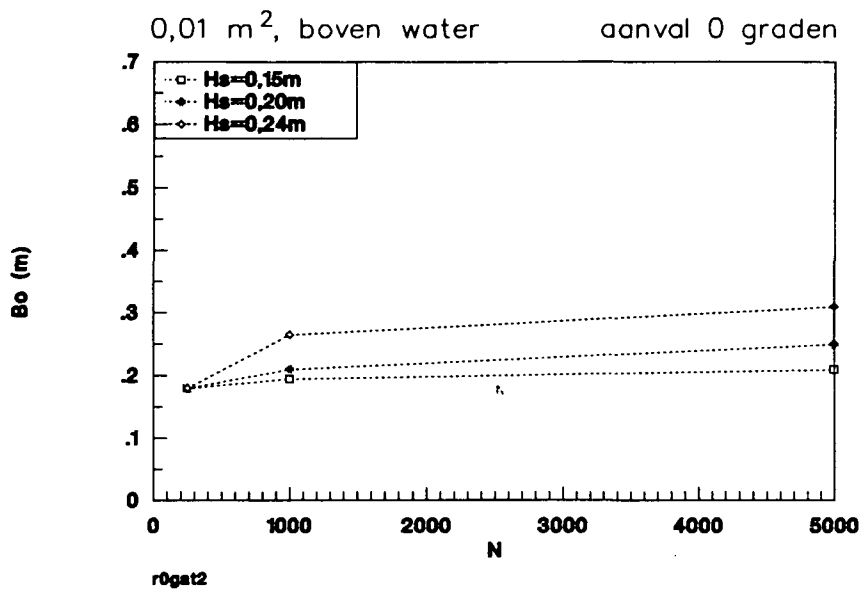
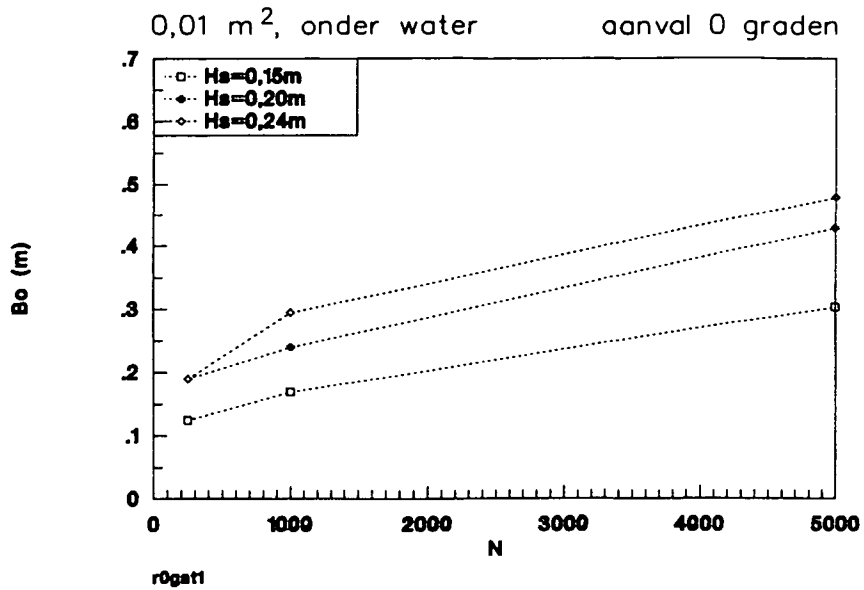
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 5.2



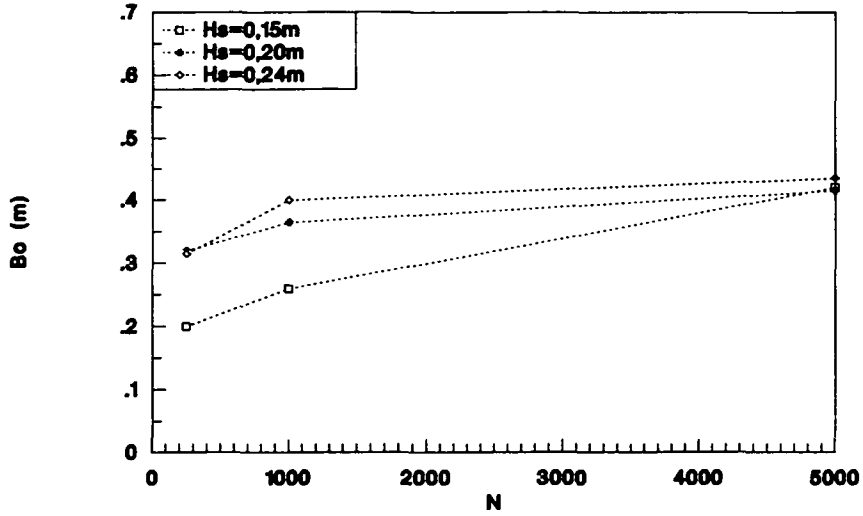
RELATIE TUSSEN Do EN (Bo+Bg)



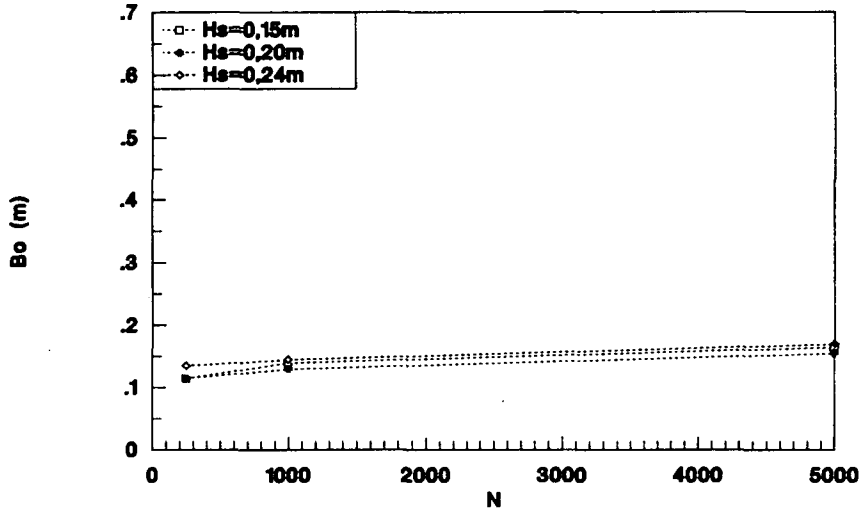
RELATIE Bo-N VOOR VERSCHILLENDE H_s

0°

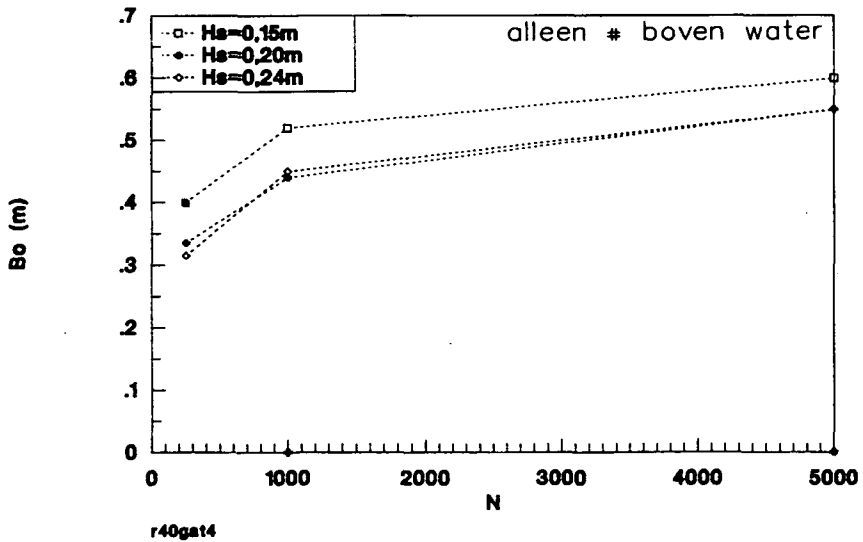
0,01 m², onder water aanval 40 graden



r40gat1
0,01 m², boven water aanval 40 graden



r40gat2
0,06 m², onder water aanval 40 graden



RELATIE B_o - N VOOR VERSCHILLENDE H_s

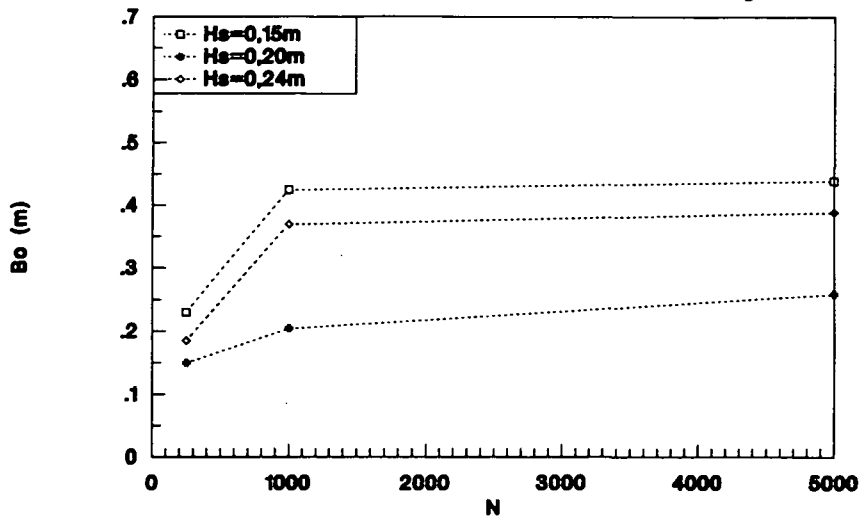
40°

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

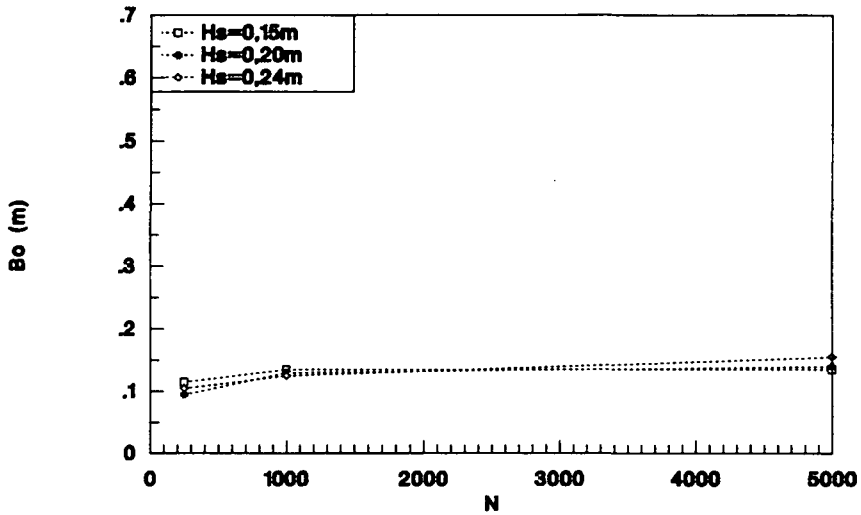
FIG. 5.5

0,01 m², onder water aanval 70 graden



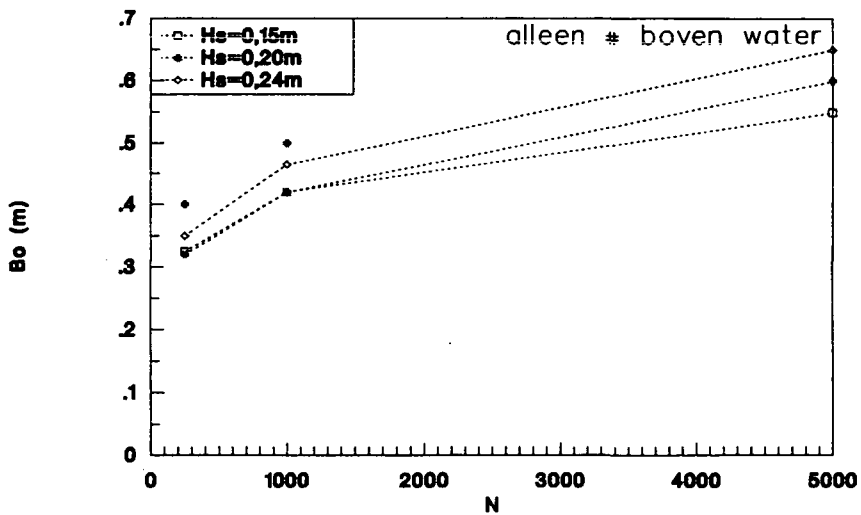
r70gat1

0,01 m², boven water aanval 70 graden



r70gat2

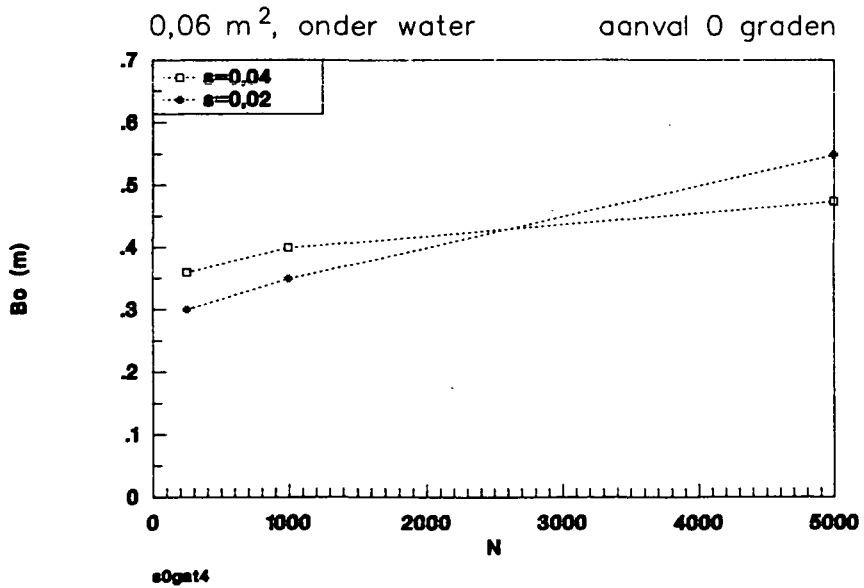
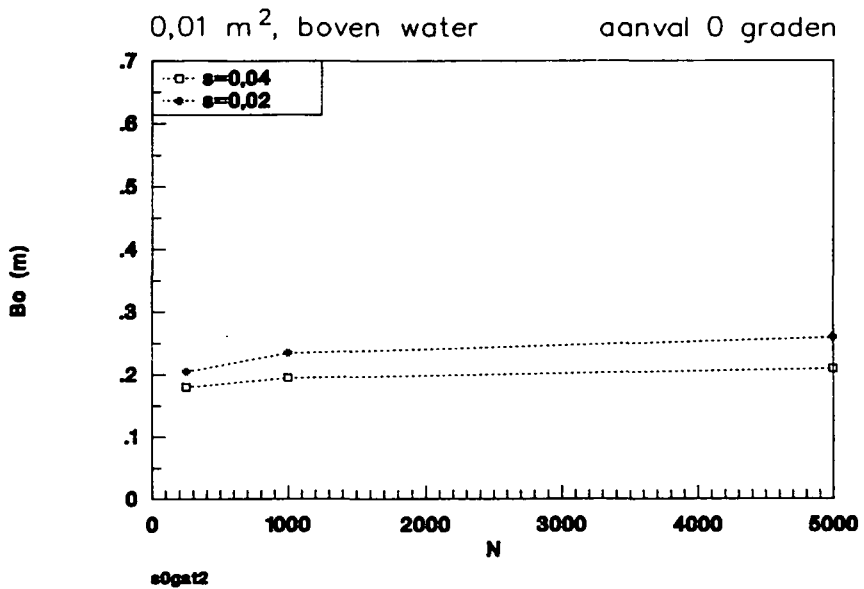
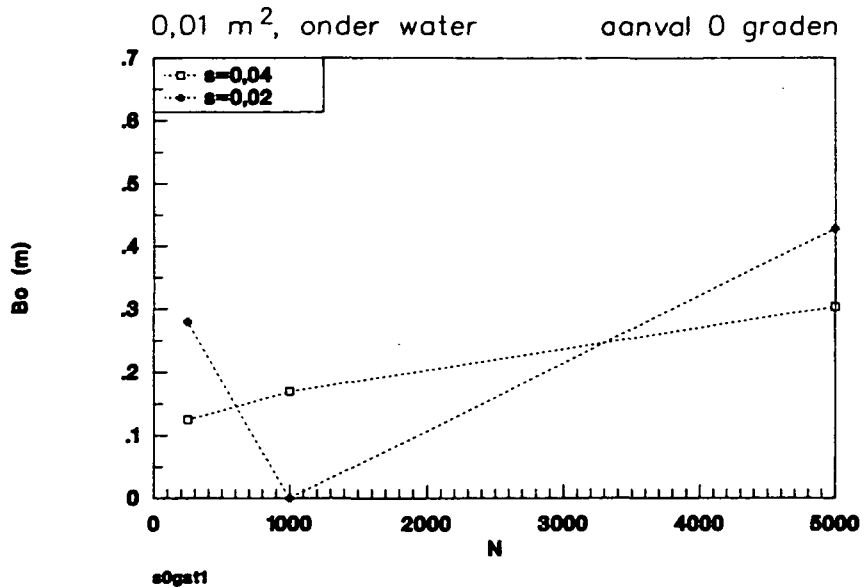
0,06 m², onder water aanval 70 graden



r70gat4

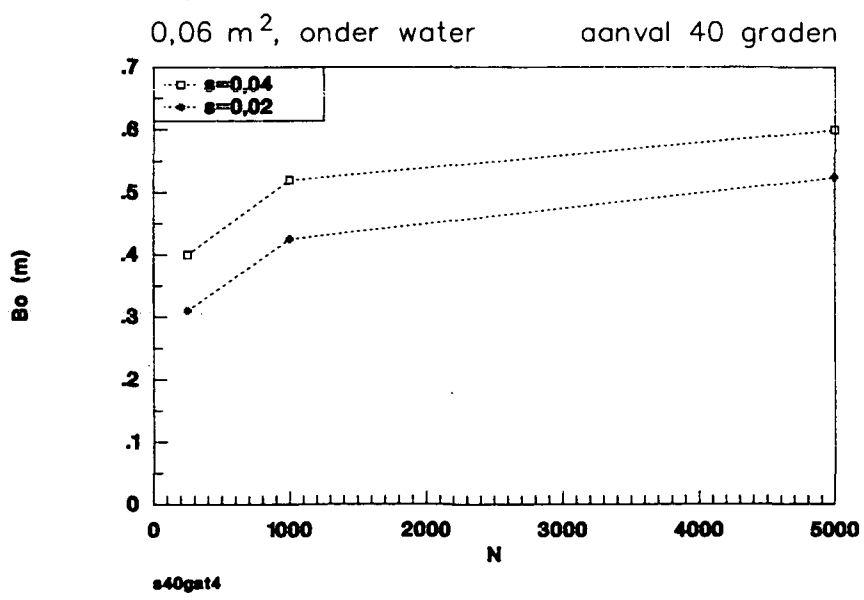
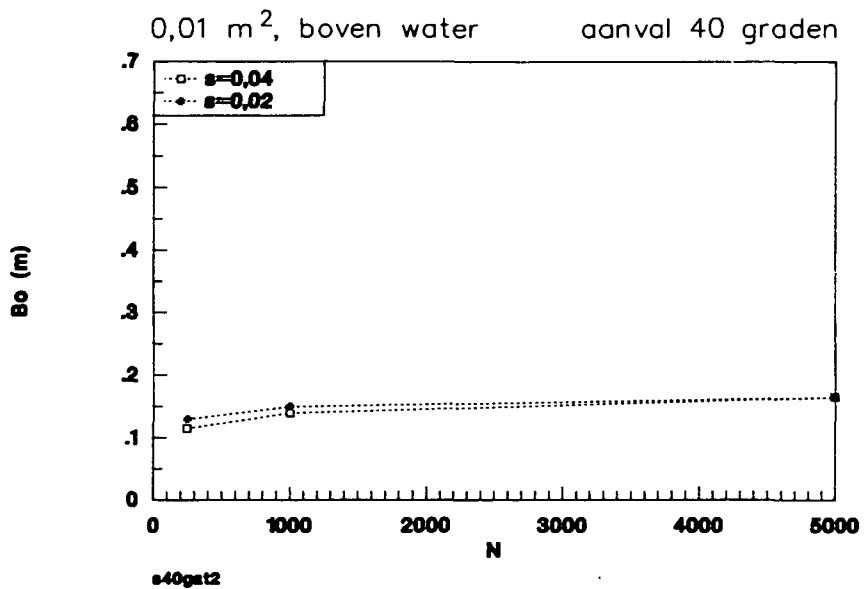
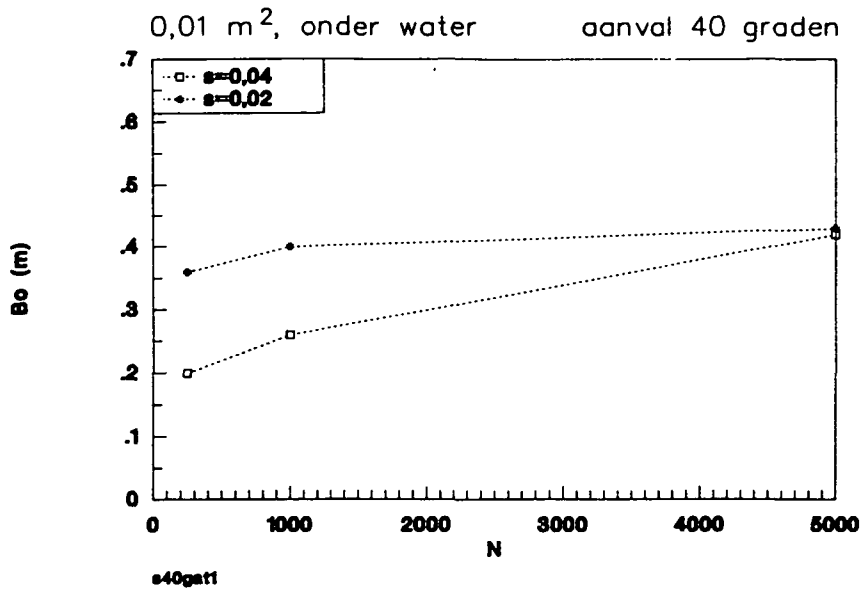
RELATIE Bo-N VOOR VERSCHILLENDE H_s

70°



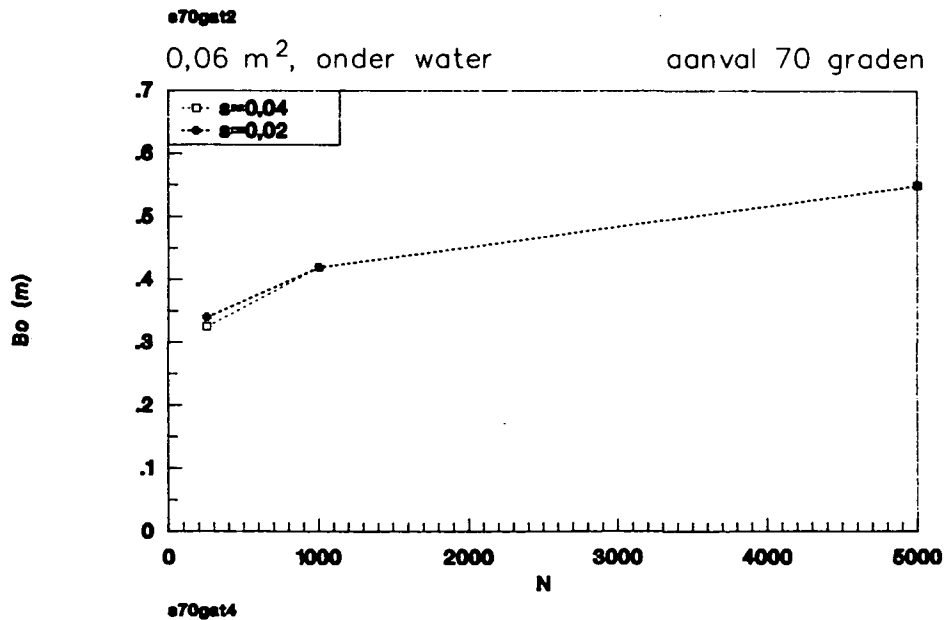
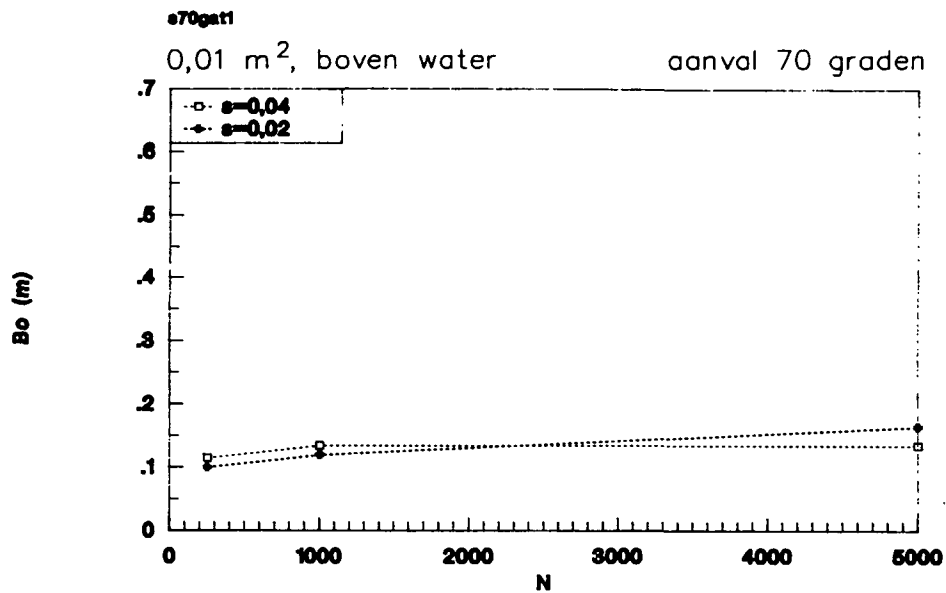
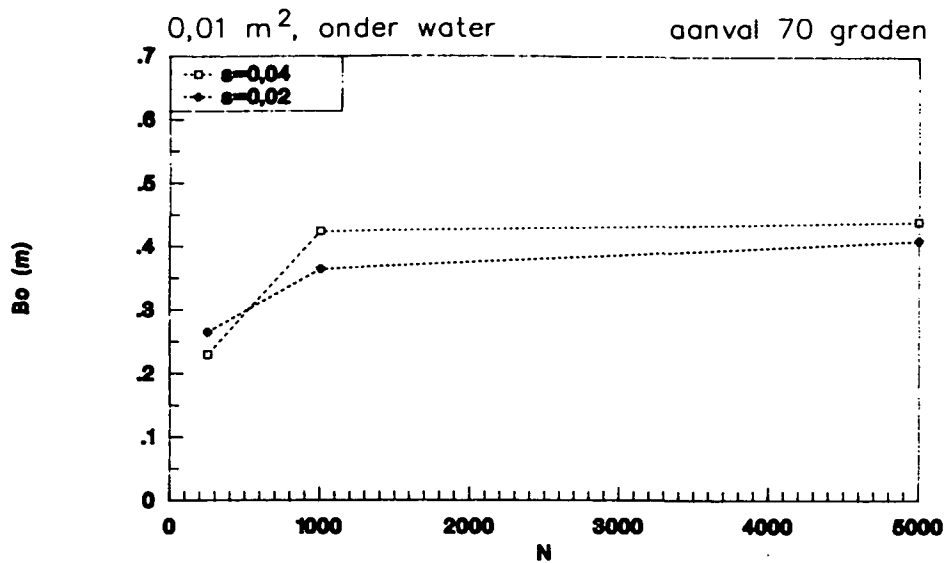
RELATIE Bo-N VOOR VERSCHILLENDE Sop

0°



RELATIE Bo-N VOOR VERSCHILLENDE Sop

40°



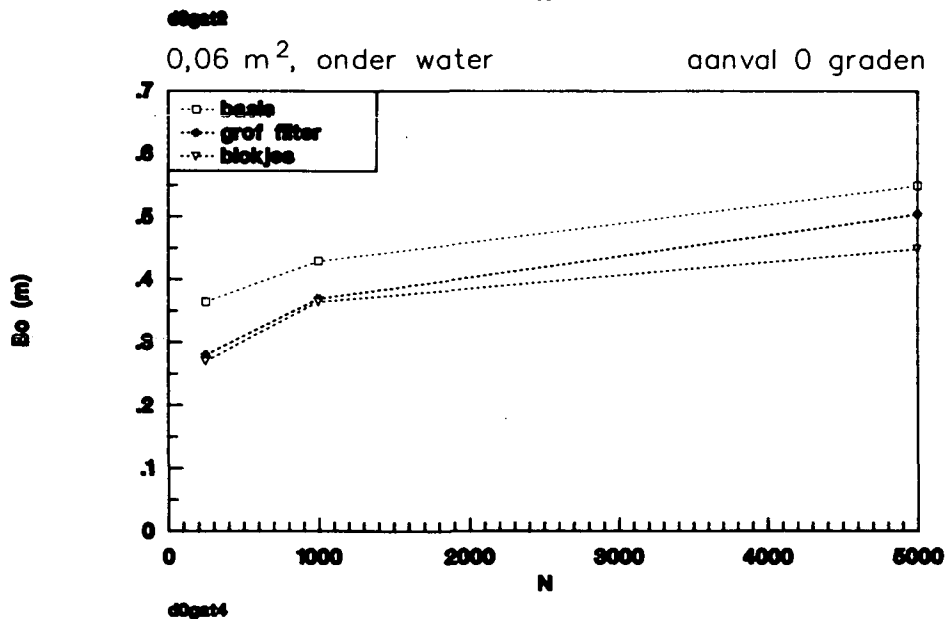
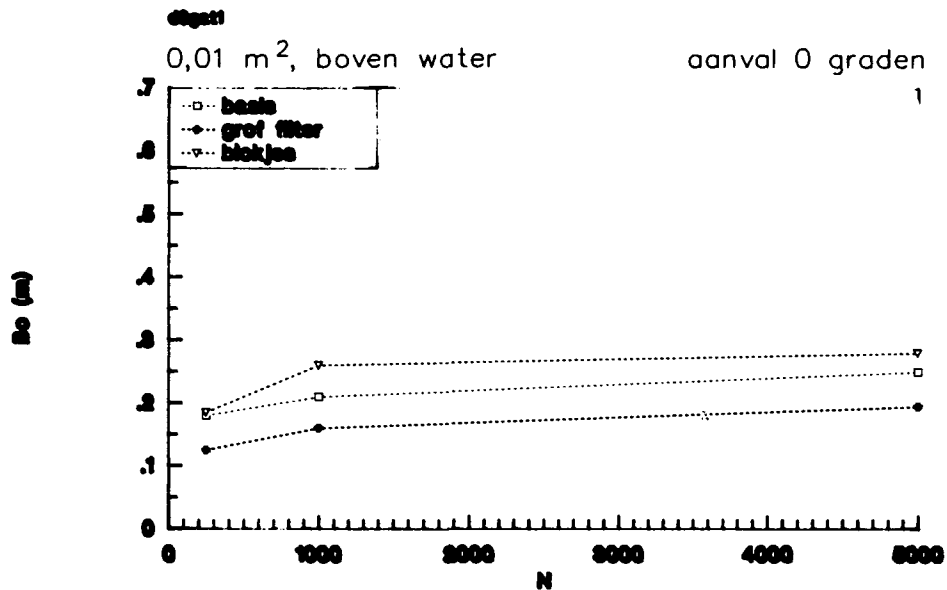
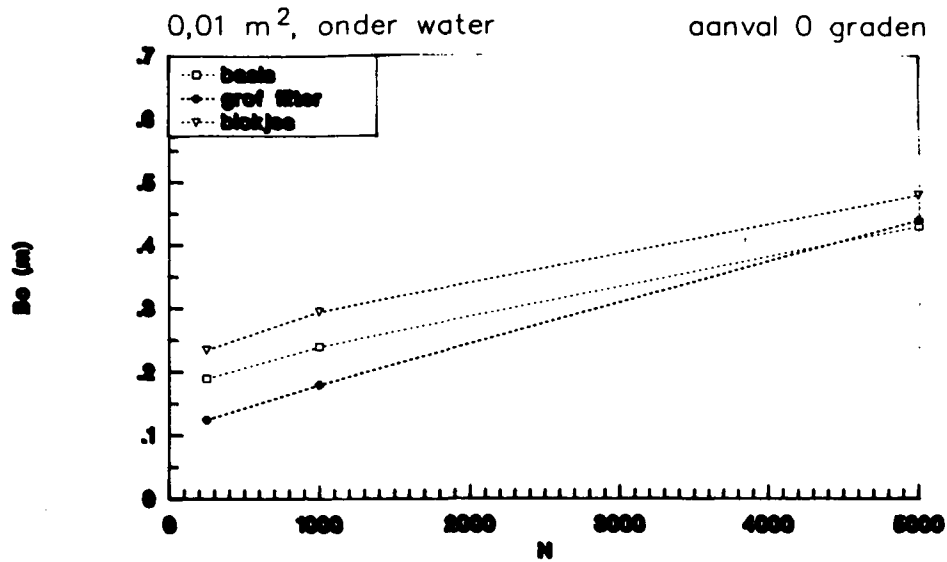
RELATIE Bo-N VOOR VERSCHILLENDE Sop

70°

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

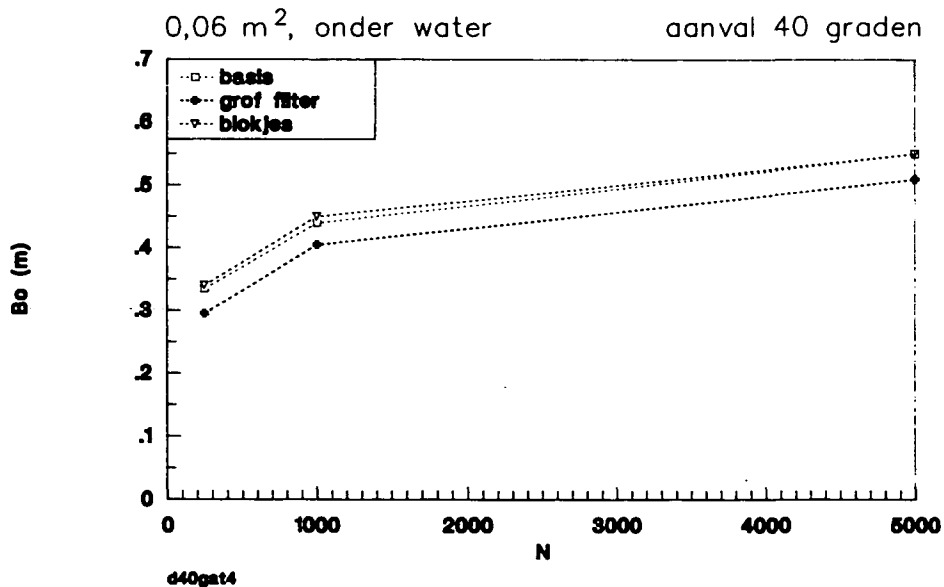
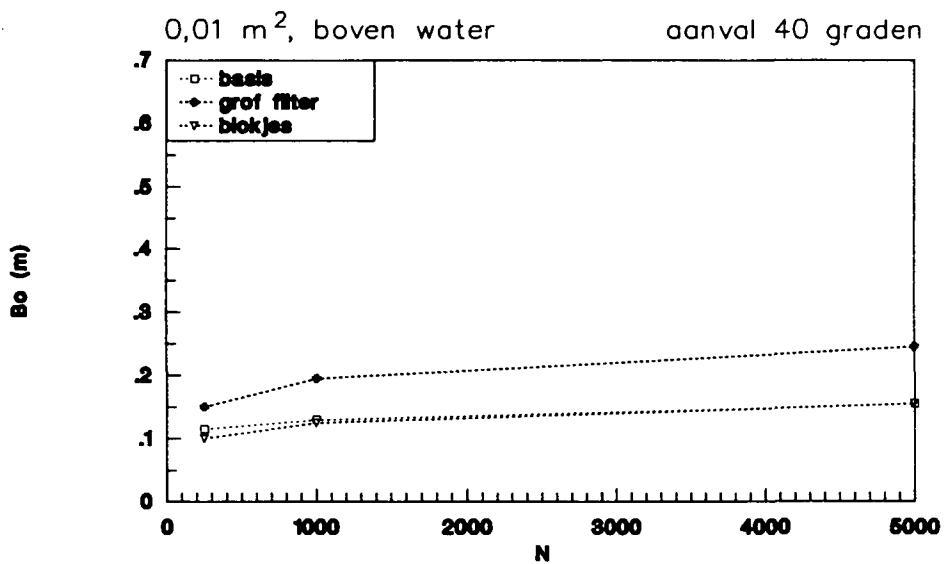
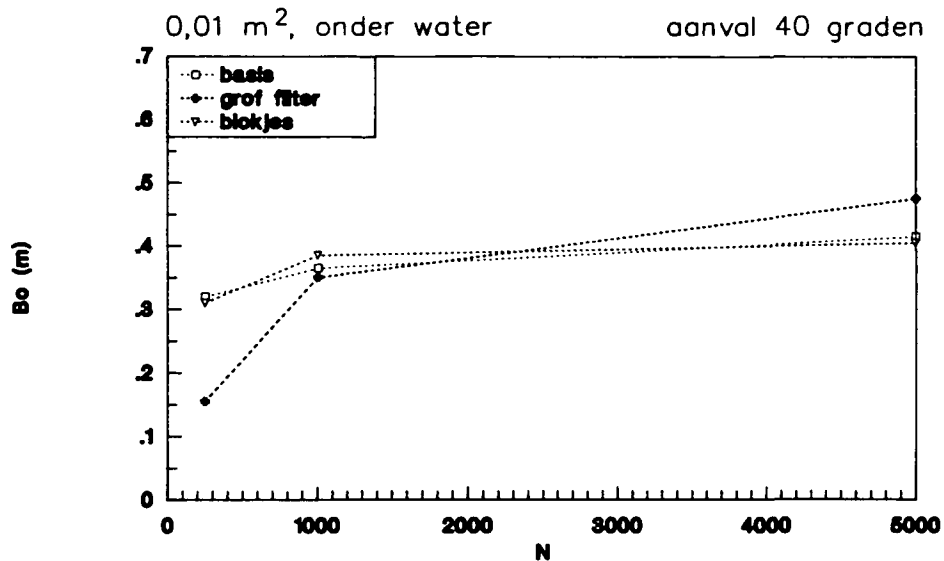
H 1490

FIG. 5.9



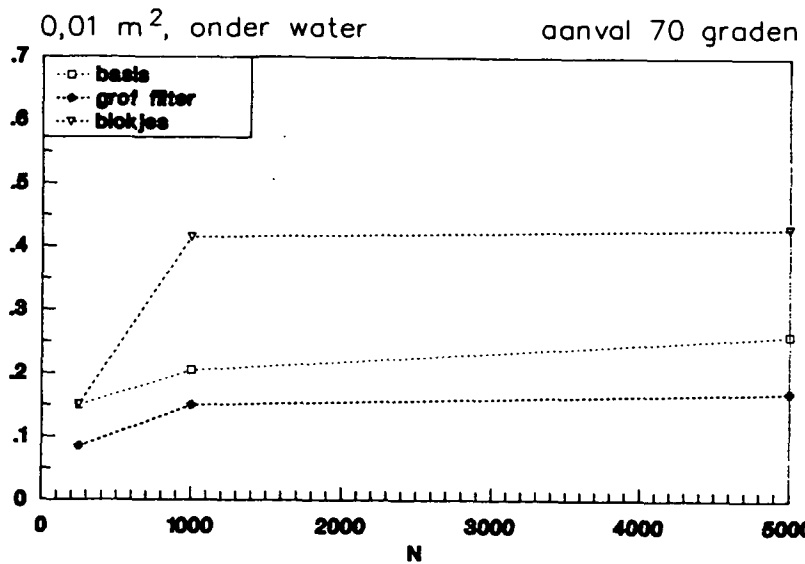
EFFEKT VAN D50 EN LOSSE BLOKJES OP B₀

0°

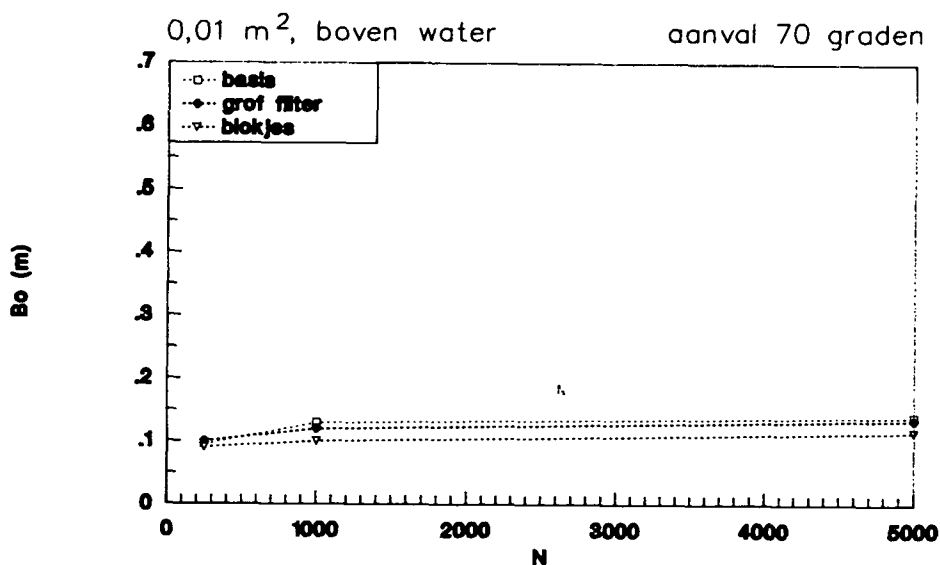


EFFEKT VAN D50 EN LOSSE BLOKJES OP Bo

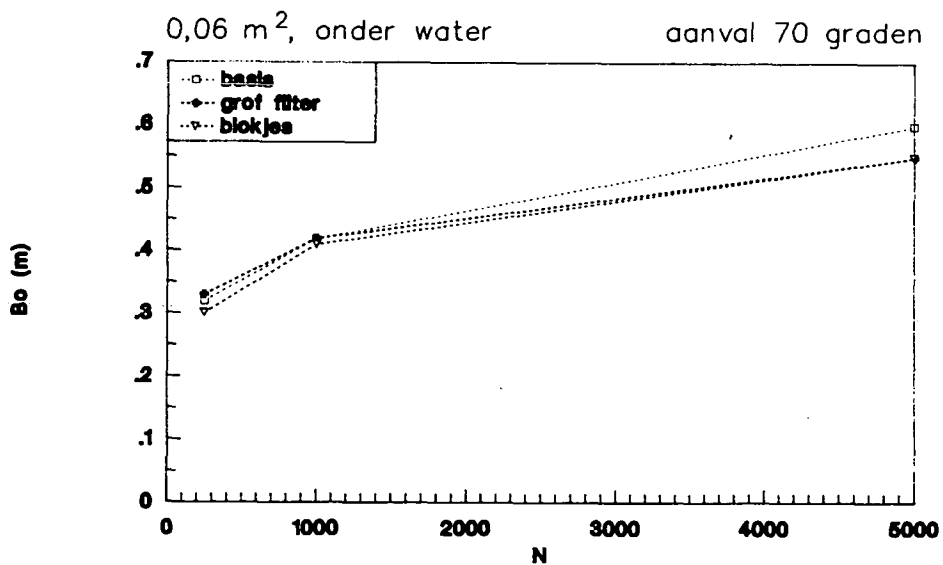
40°



d70gat1



d70gat2



d70gat4

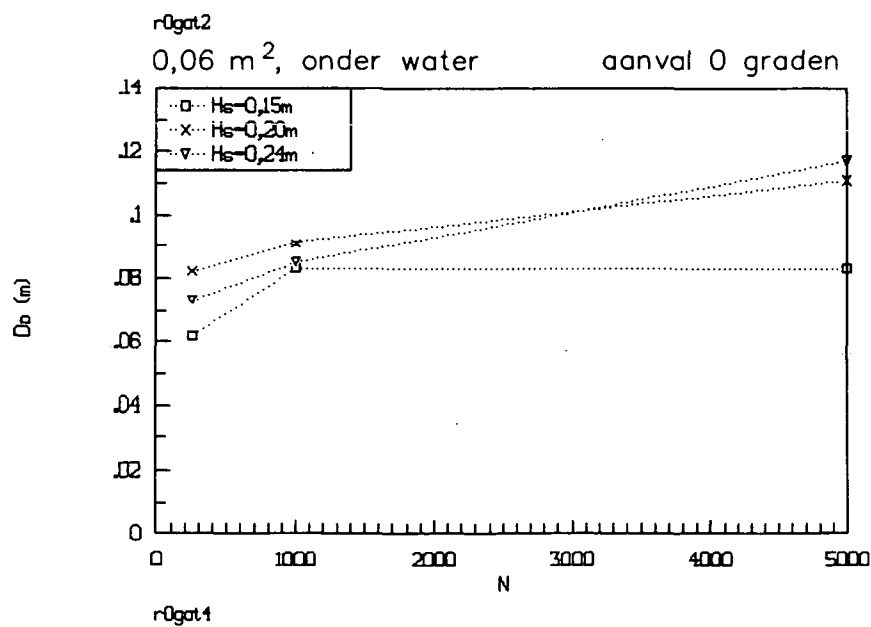
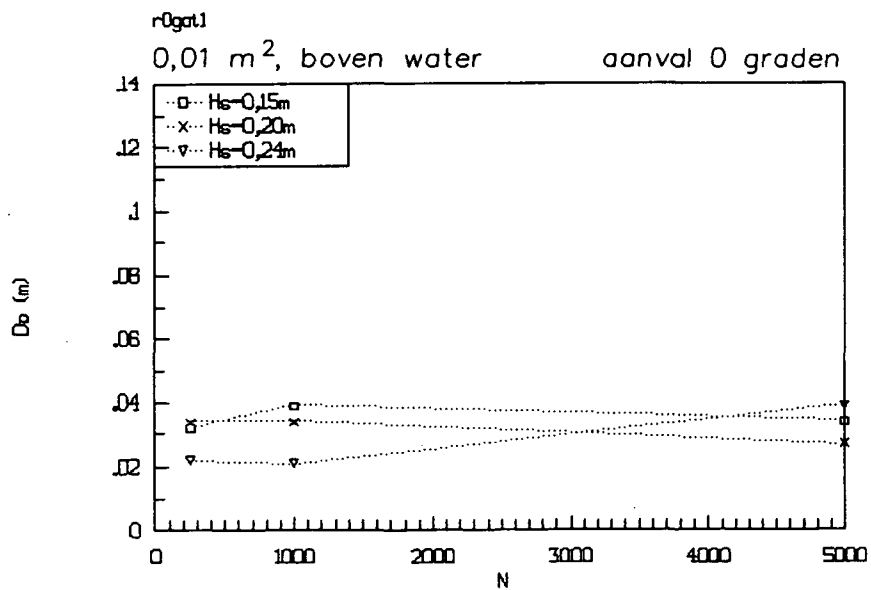
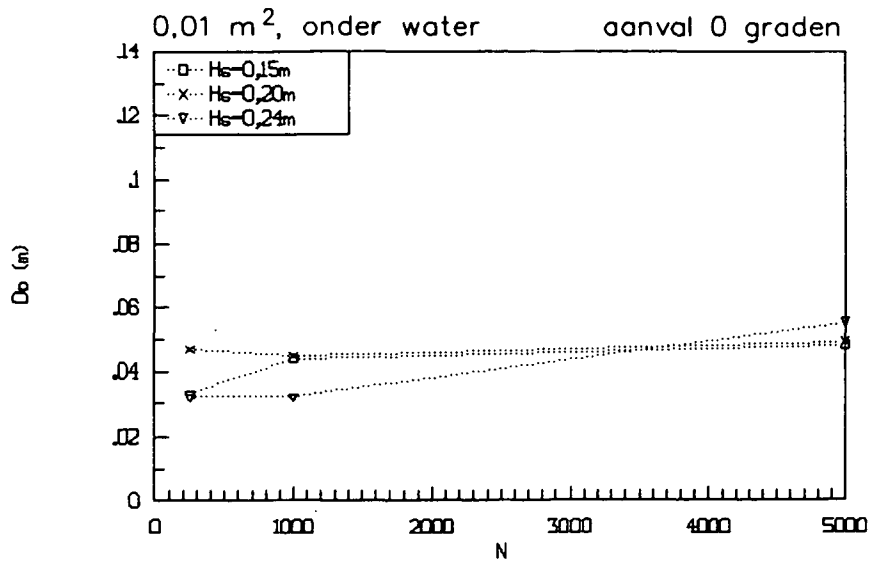
EFFEKT VAN D50 EN LOSSE BLOKJES OP B₀

70°

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

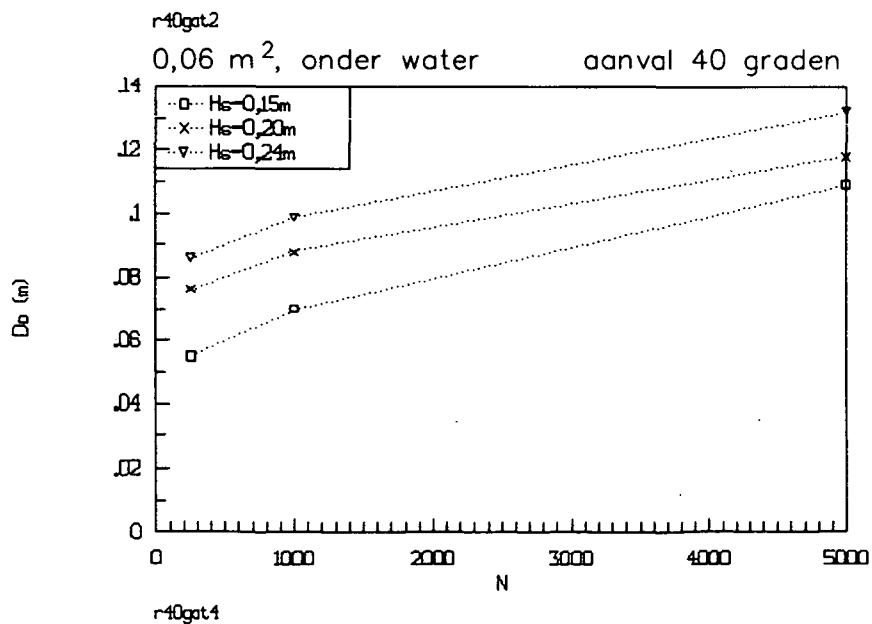
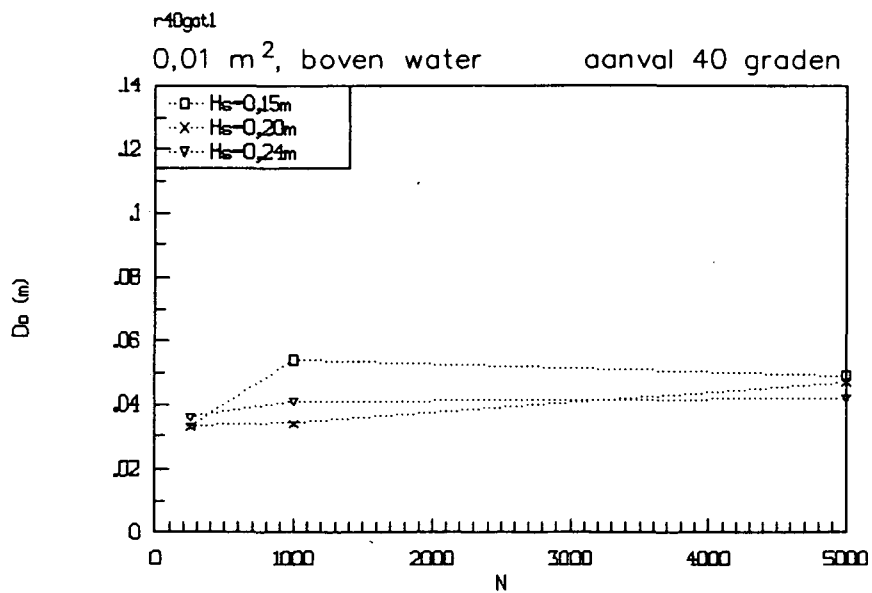
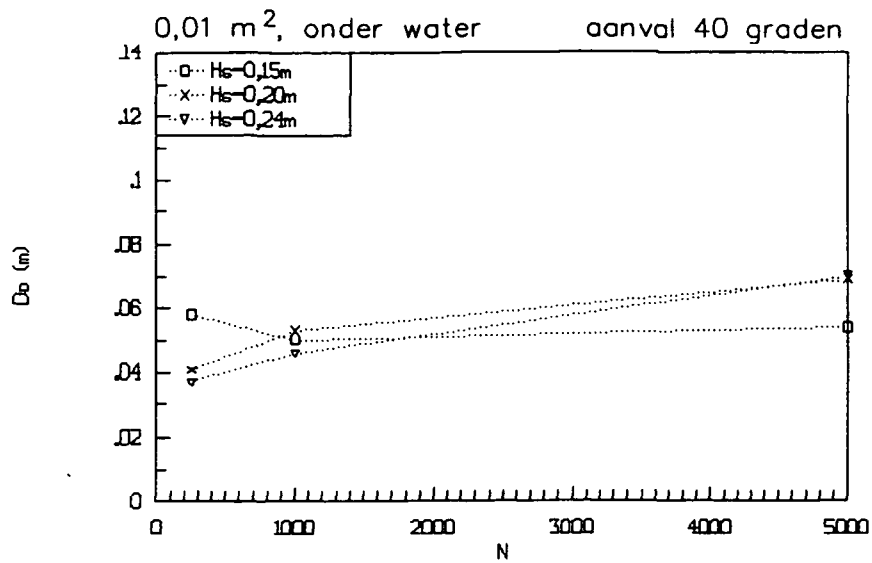
H 1490

FIG. 5.12



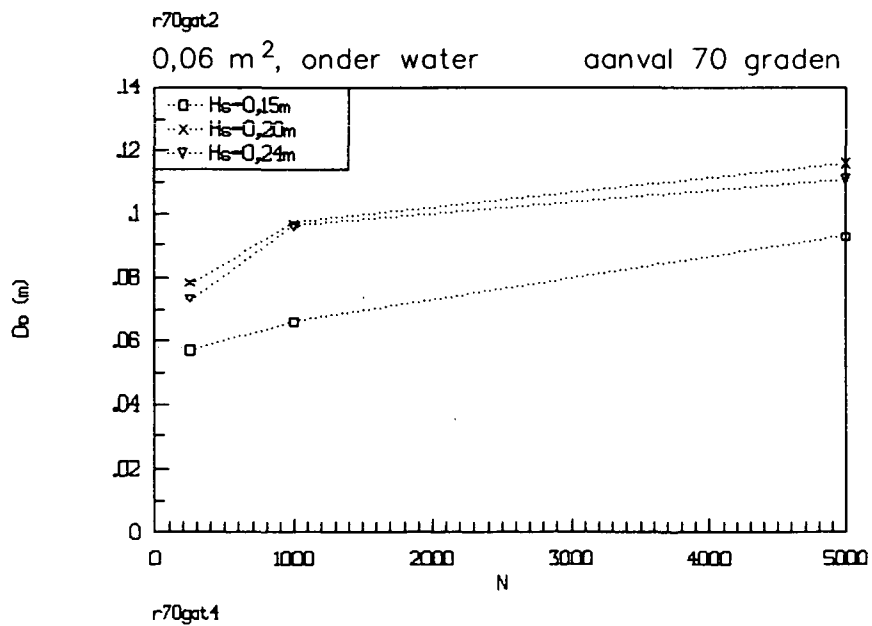
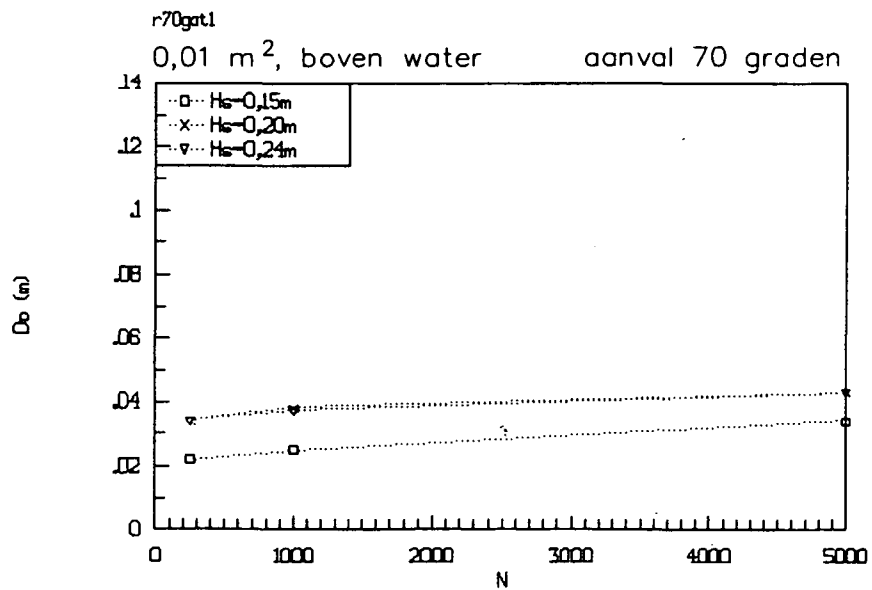
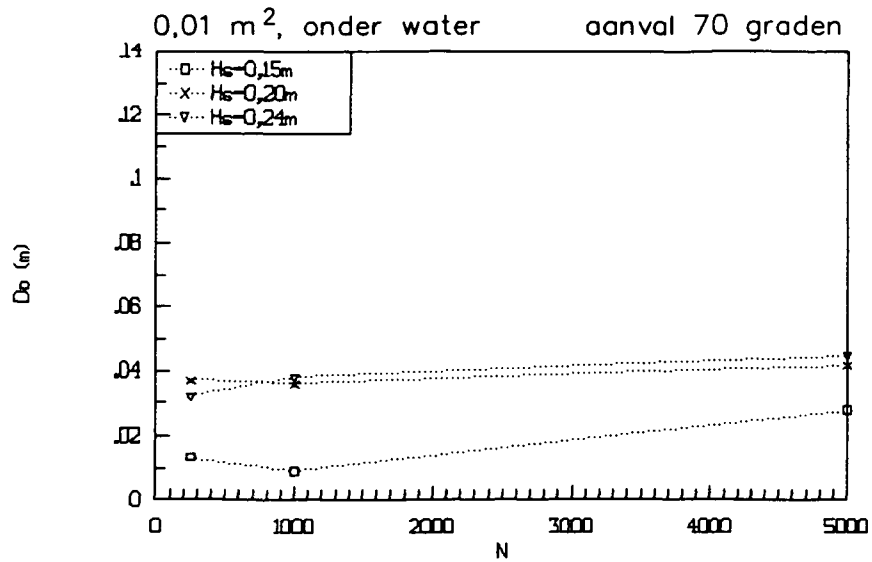
RELATIE D_o - N VOOR VERSCHILLENDE H_s

0°



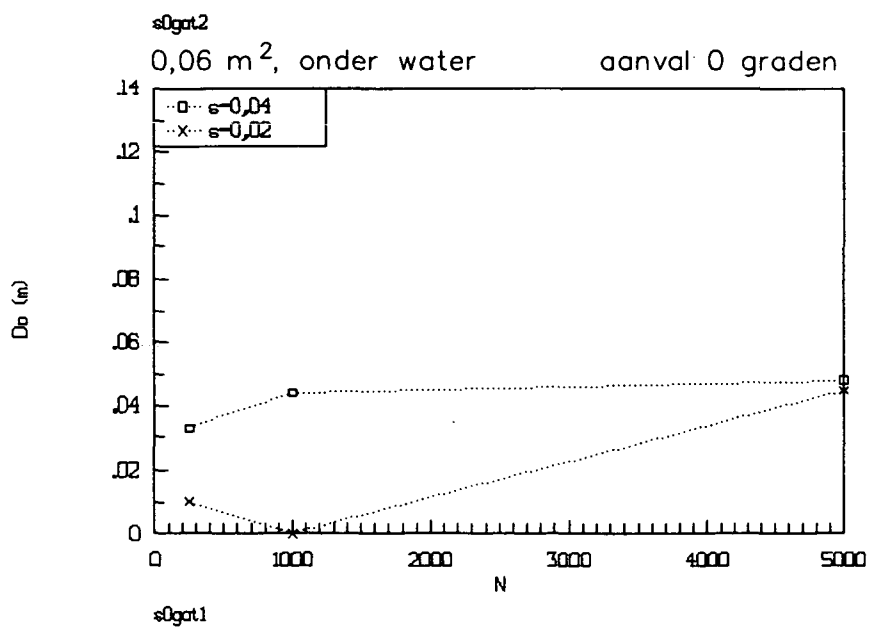
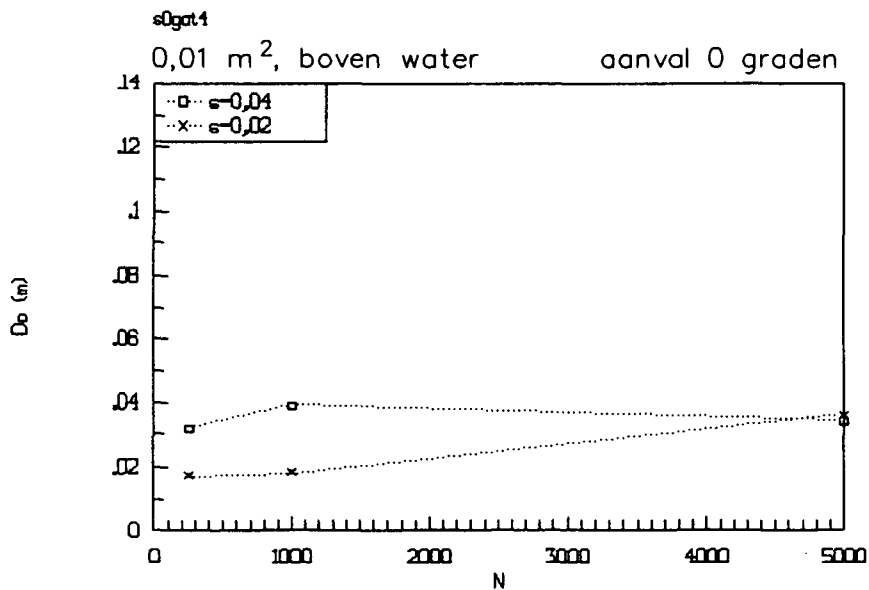
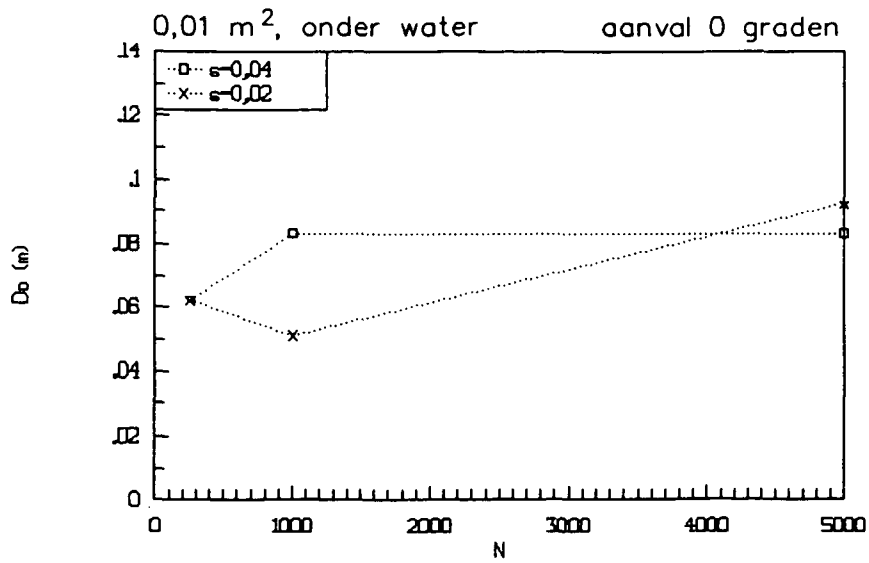
RELATIE D₀-N VOOR VERSCHILLENDE H_s

40°



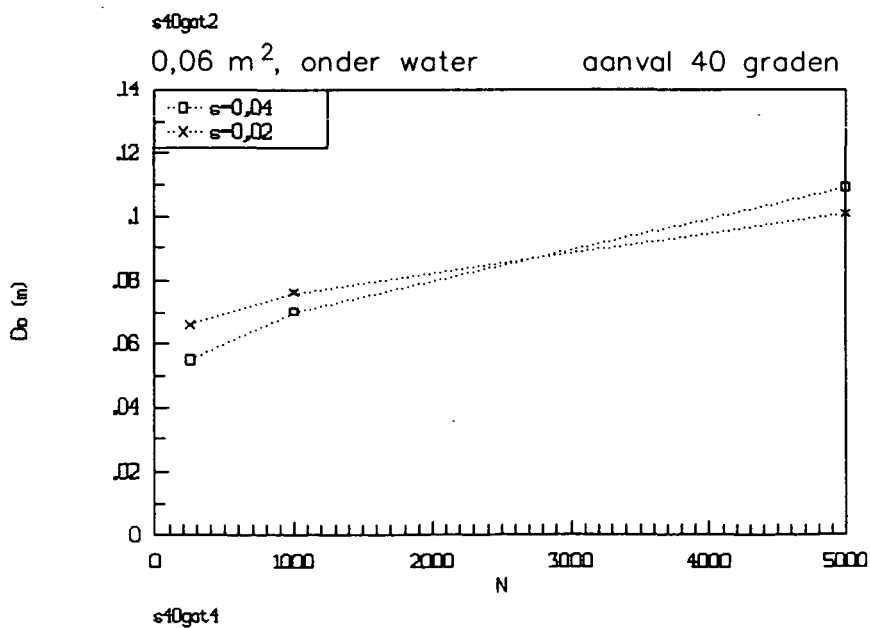
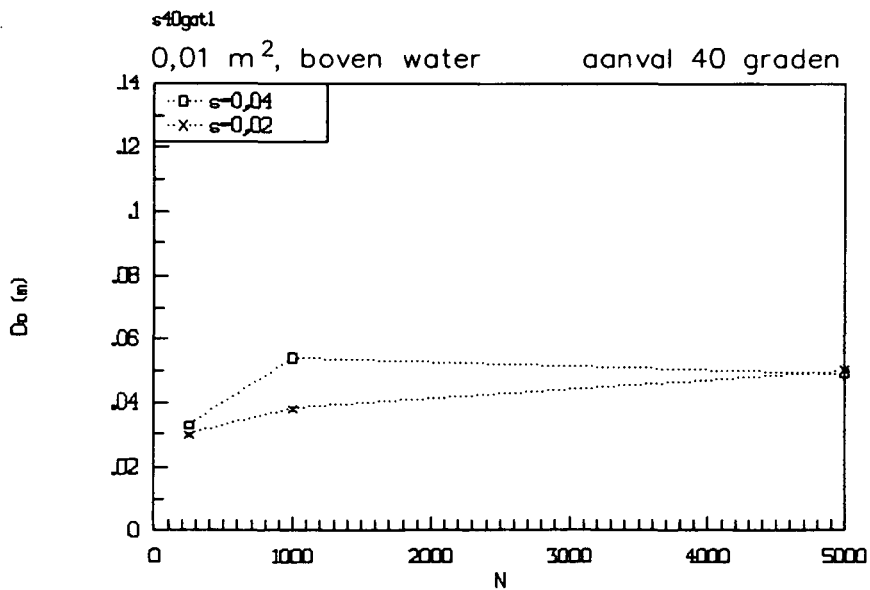
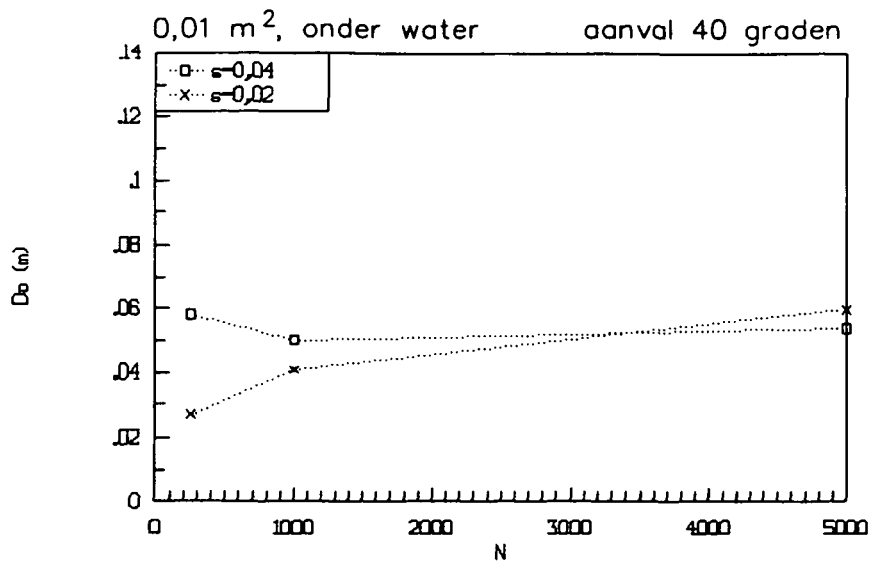
RELATIE D₀-N VOOR VERSCHILLENDE H_s

70°



RELATIE Do-N VOOR VERSCHILLENDE Sop

0°



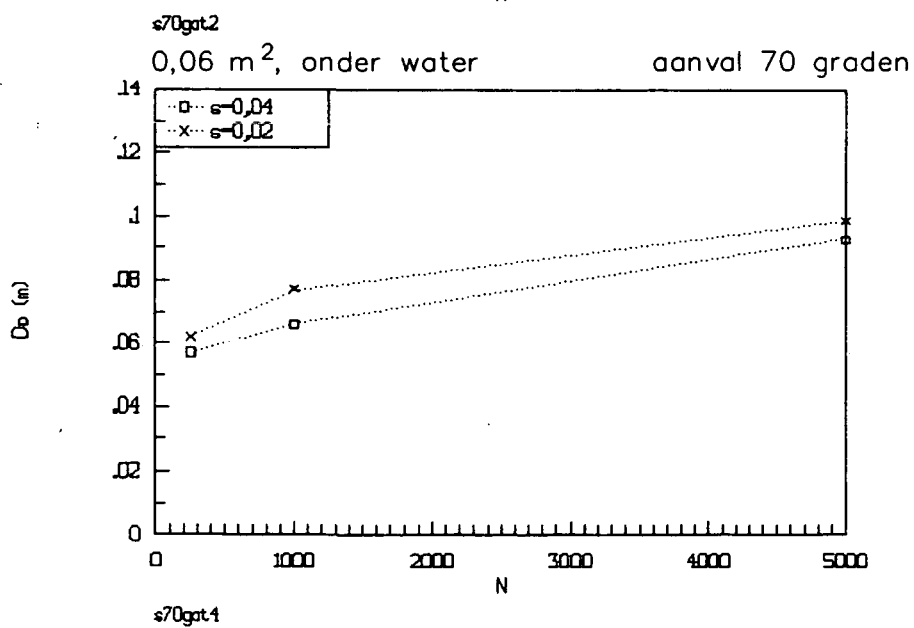
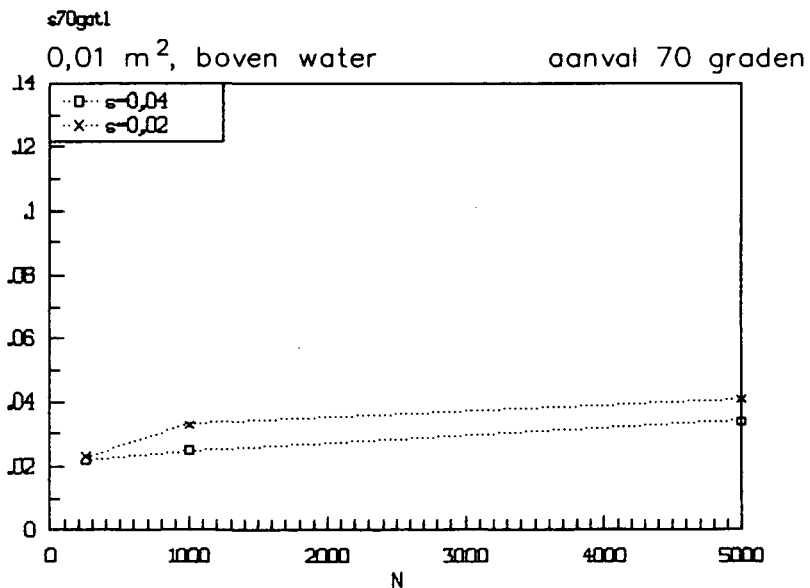
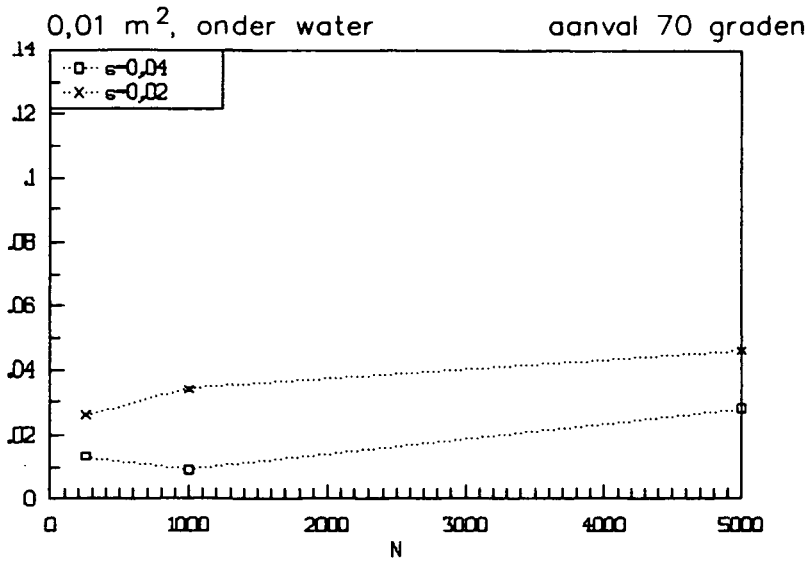
RELATIE D₀-N VOOR VERSCHILLENDE S_{op}

40°

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

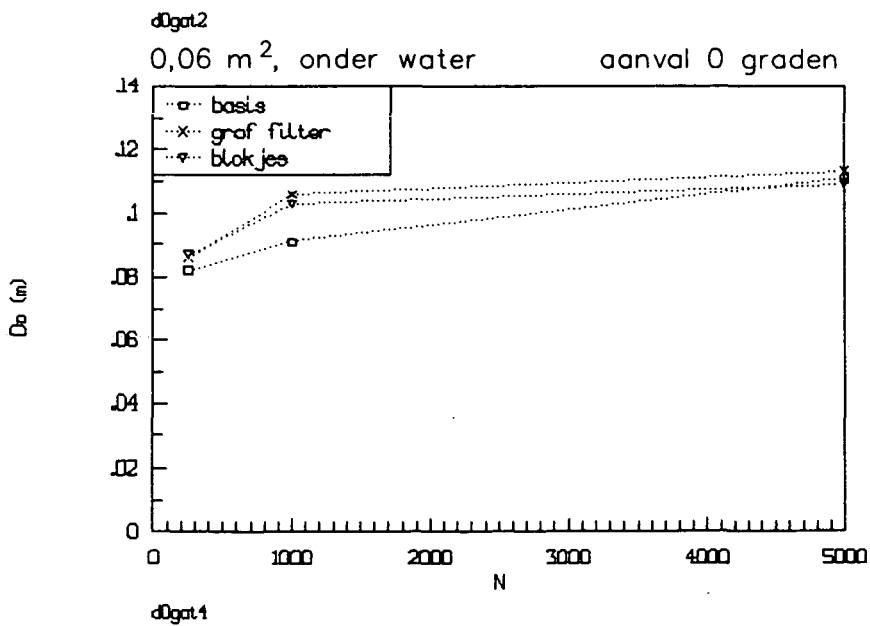
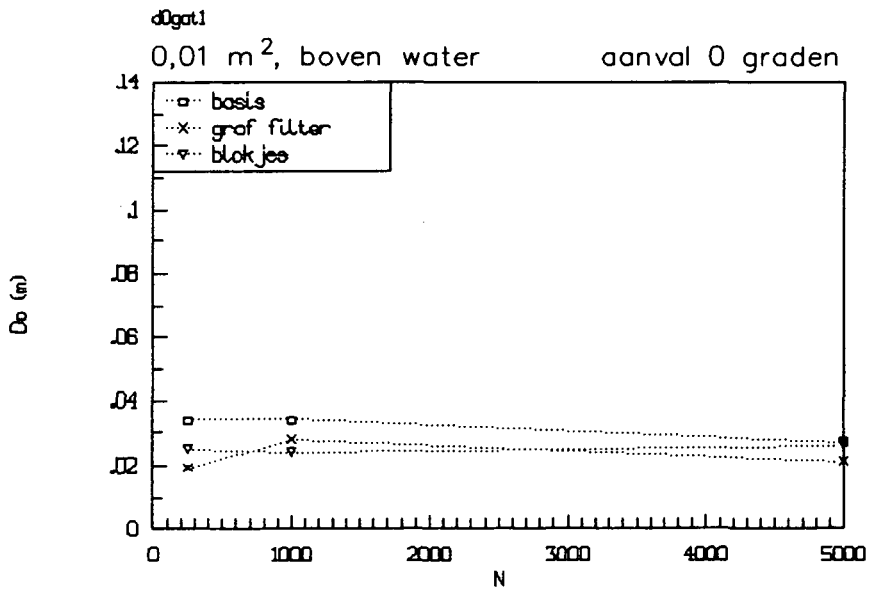
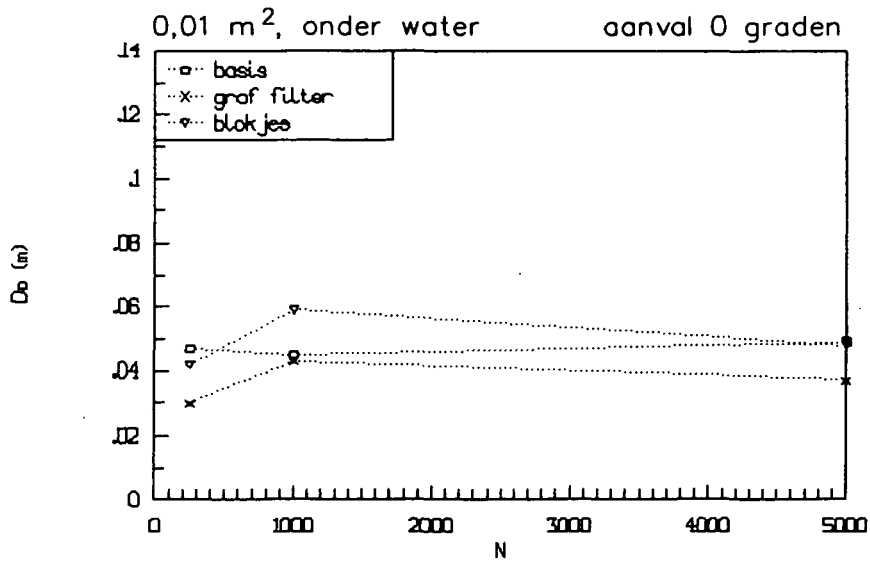
H 1490

FIG. 5.17



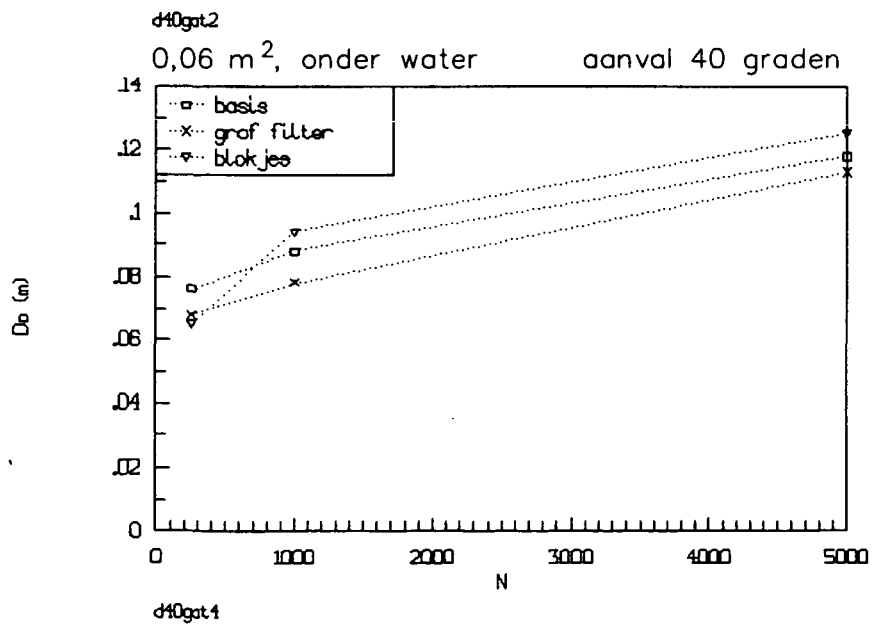
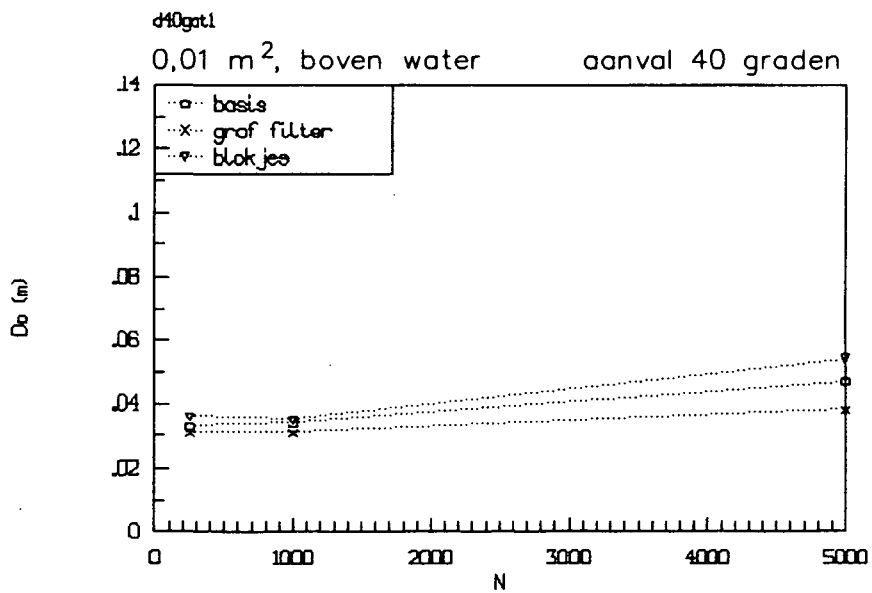
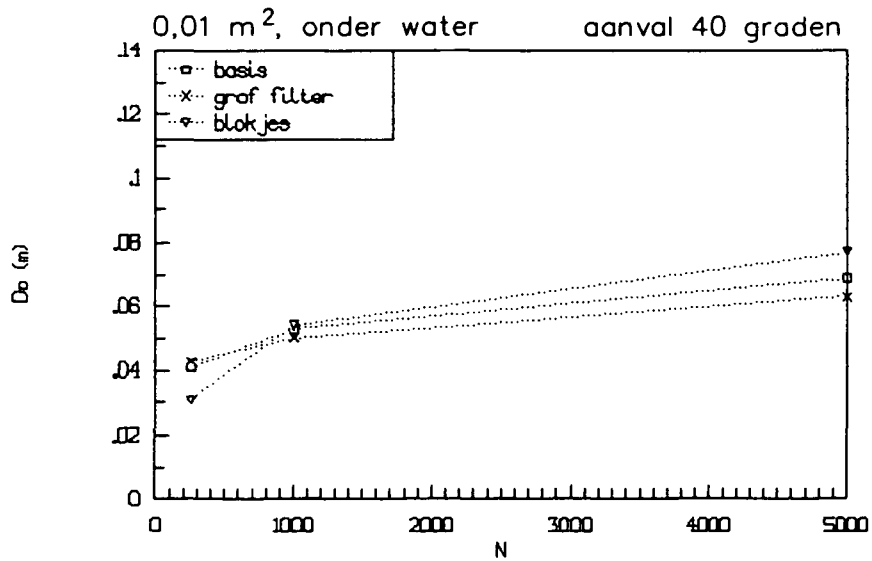
RELATIE D)-N VOOR VERSCHILLENDE Sop

70°



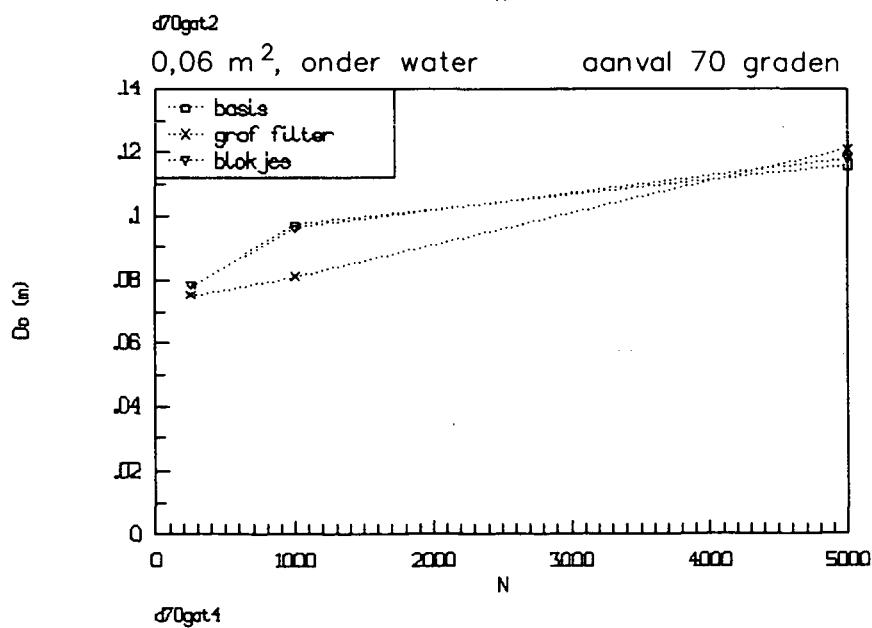
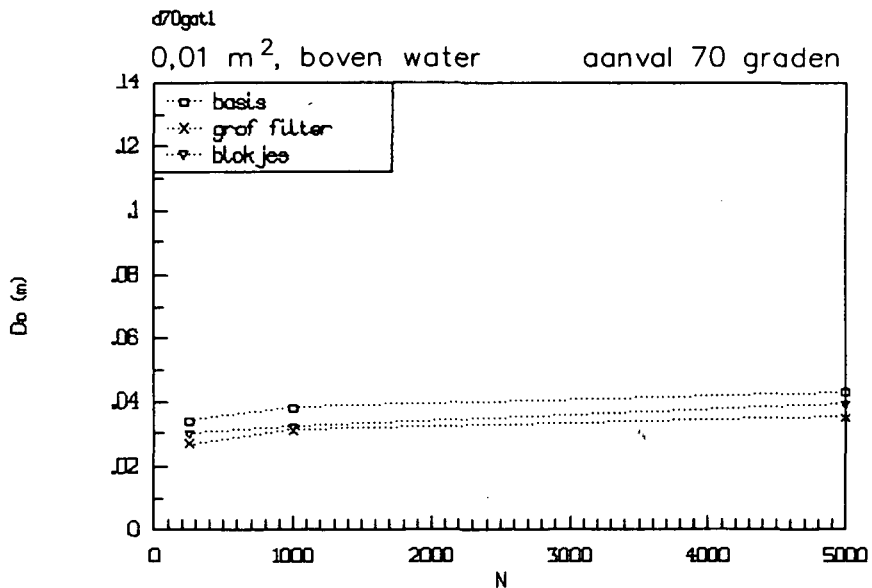
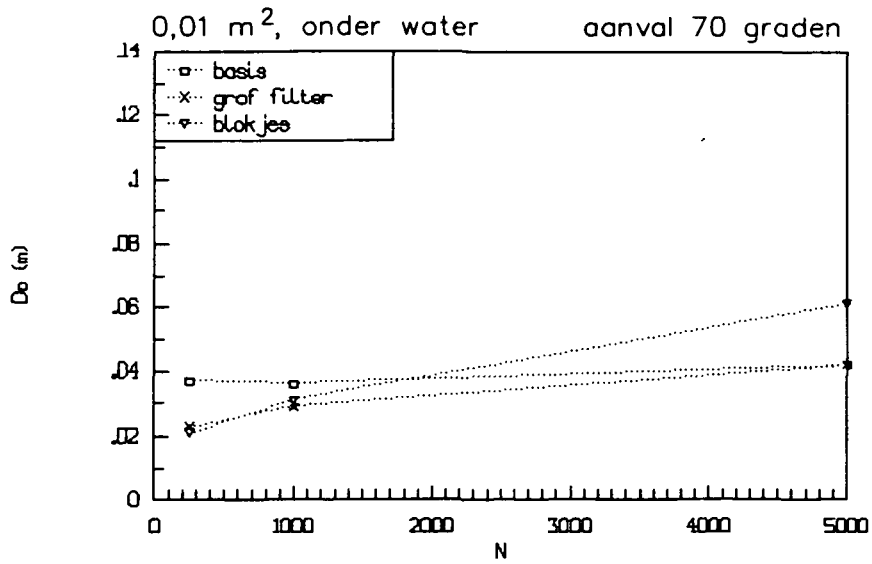
EFFEKT VAN D50 EN LOSSE BLOKJES OP D₀

0°



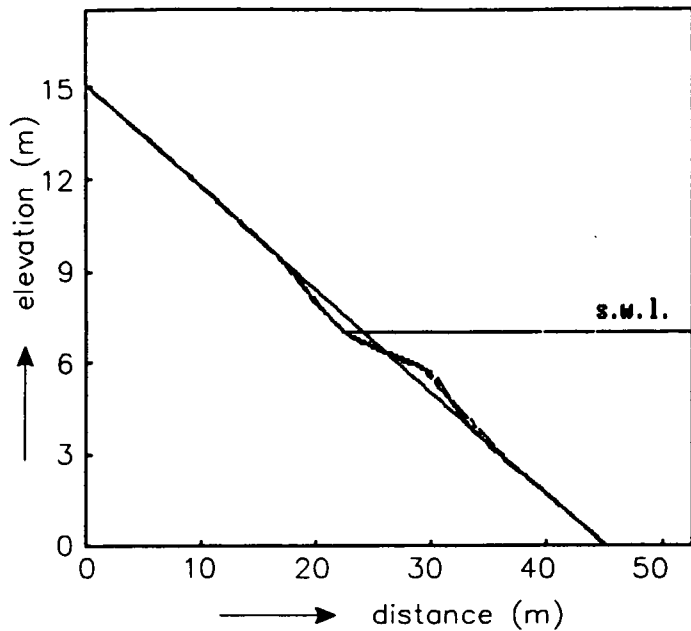
EFFEKT VAN D50 EN LOSSE BLOKJES OP D₀

40°

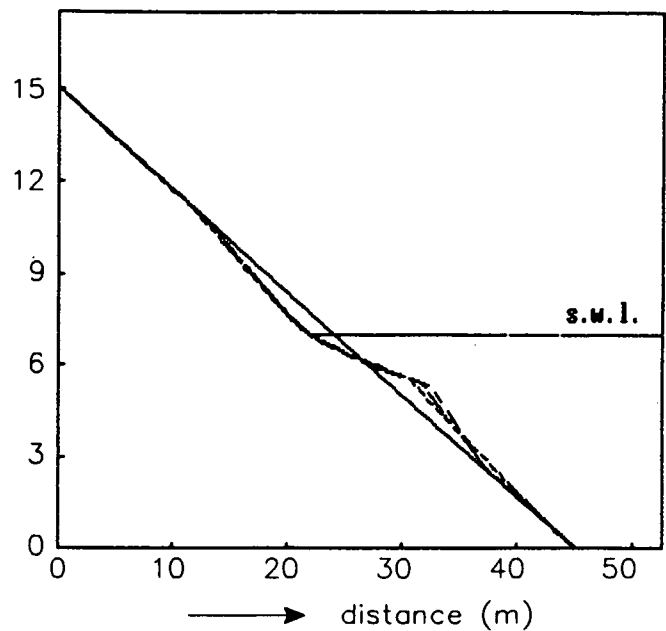


EFFEKT VAN D50 EN LOSSE BLOKJES OP D₀

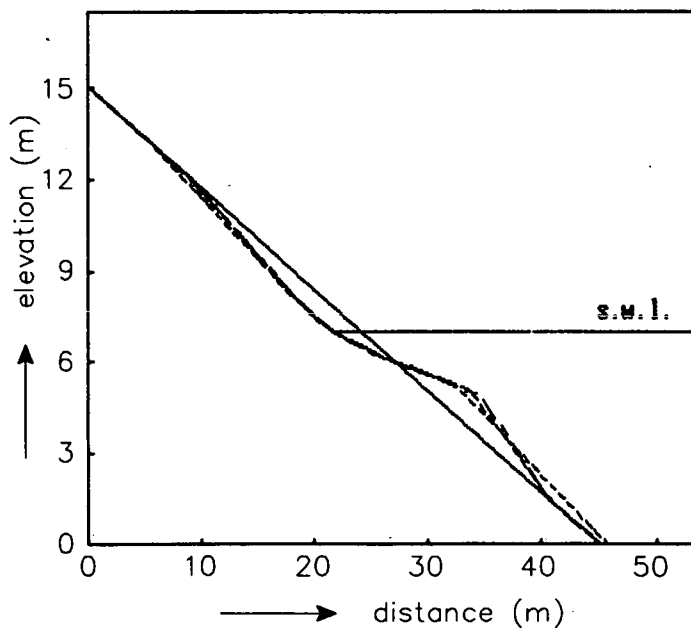
70°



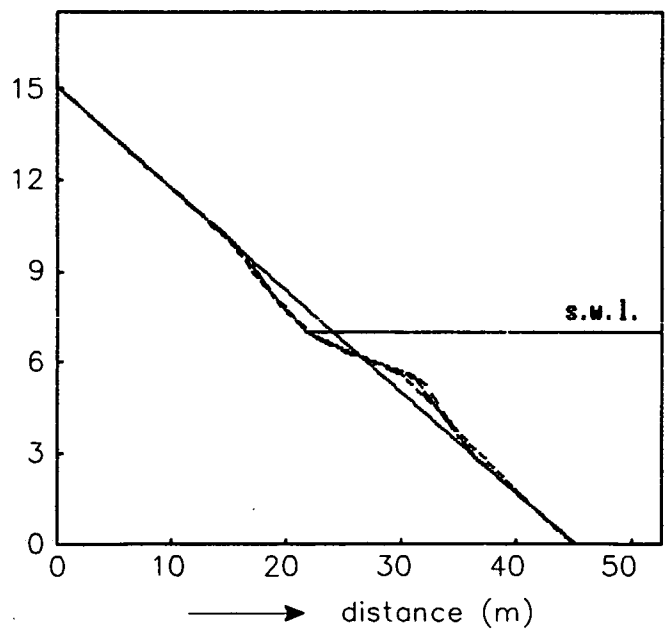
$H_s = 0,15 \text{ m}$
 $s_{op} = 0,04$



$H_s = 0,20 \text{ m}$
 $s_{op} = 0,04$



$H_s = 0,24 \text{ m}$
 $s_{op} = 0,04$



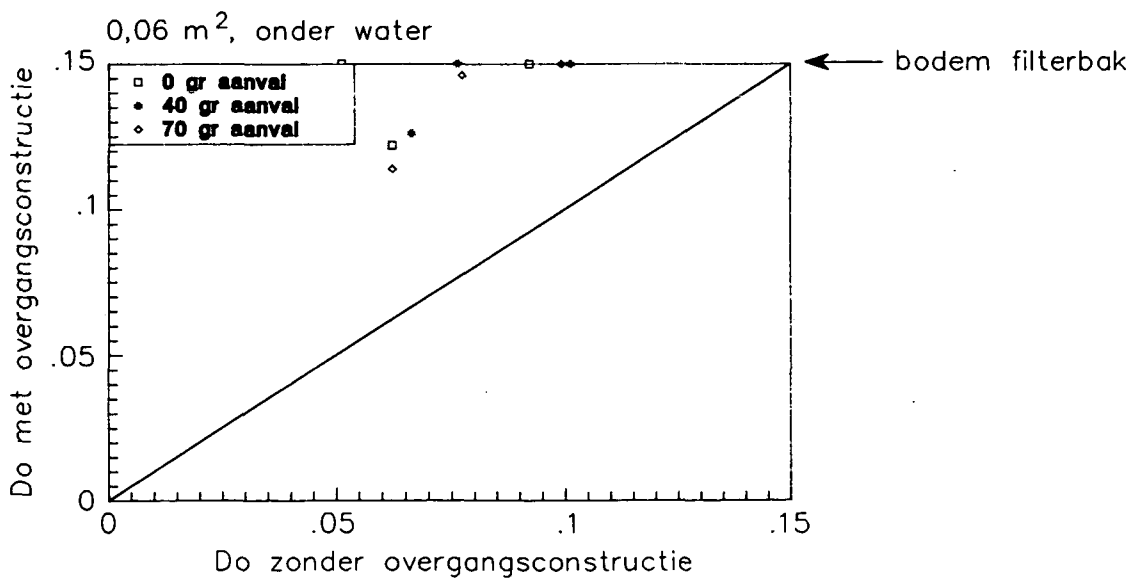
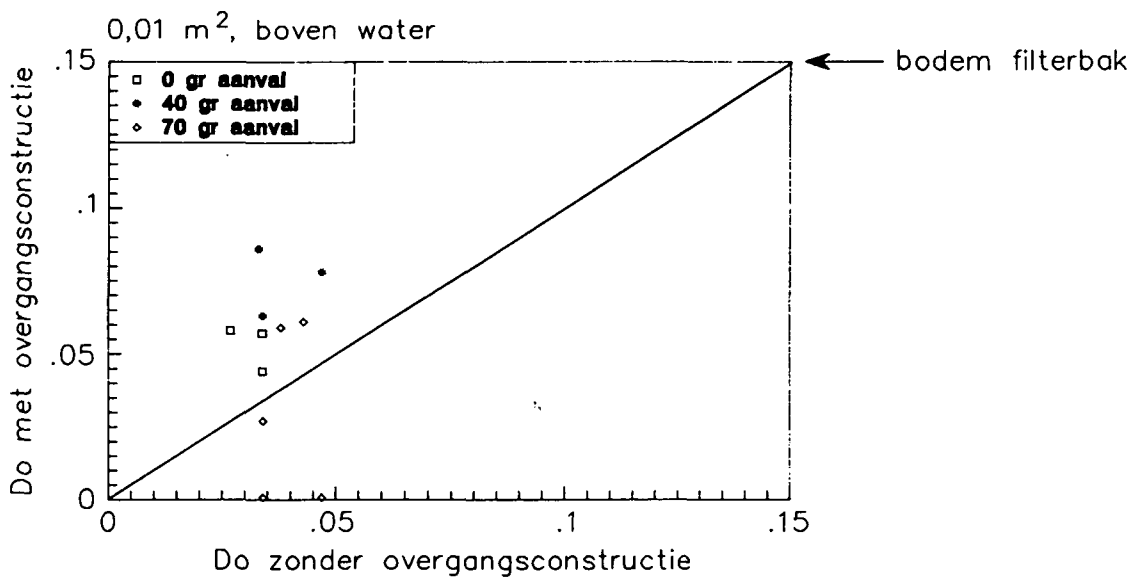
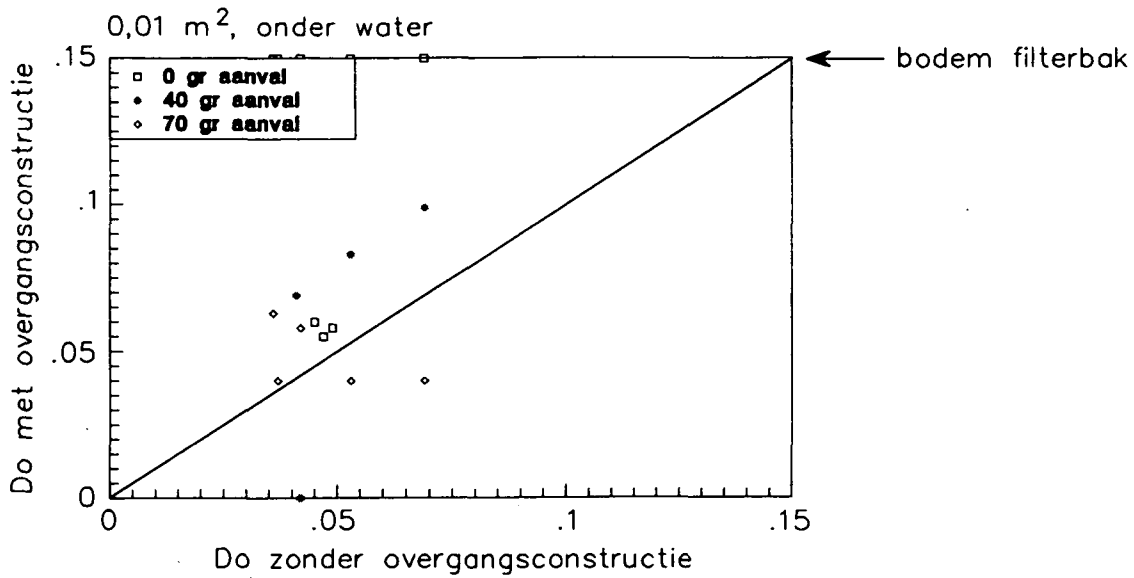
$H_s = 0,15 \text{ m}$
 $s_{op} = 0,02$

GRINDPROFIELEN BEREKEND MET BREAKWAT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

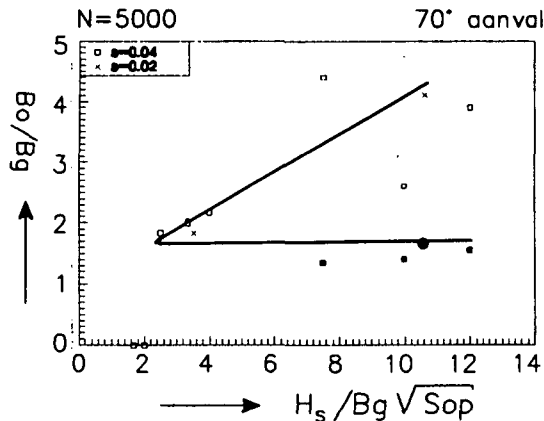
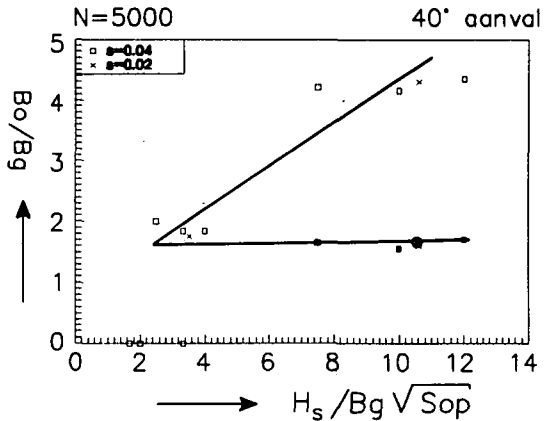
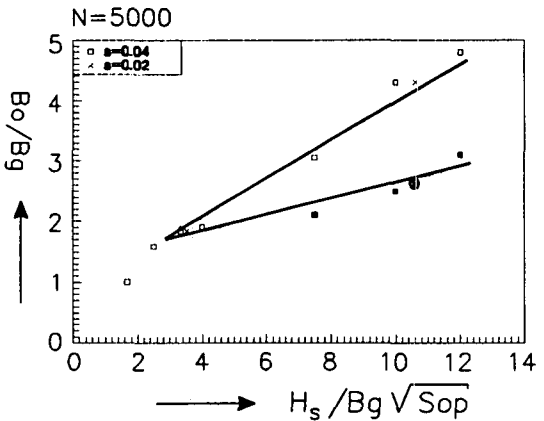
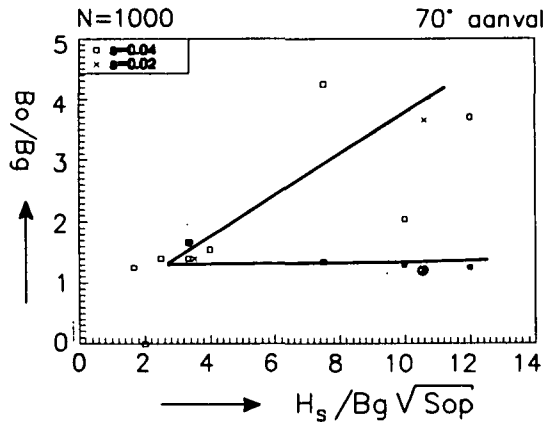
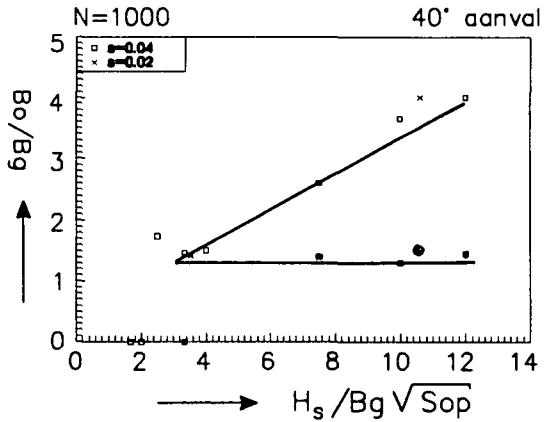
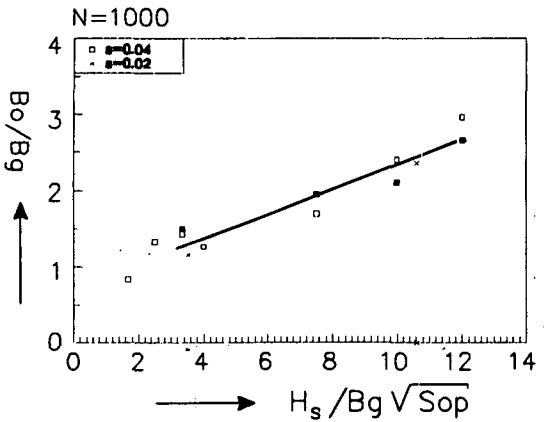
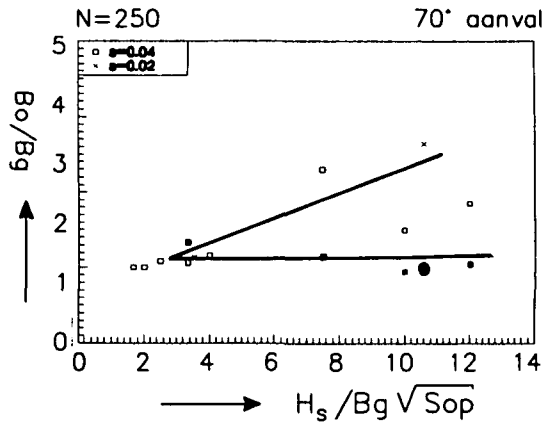
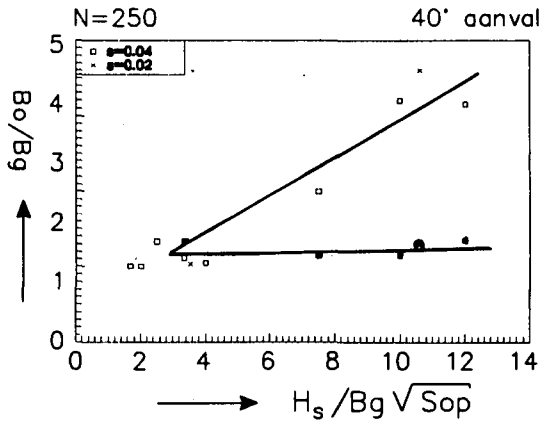
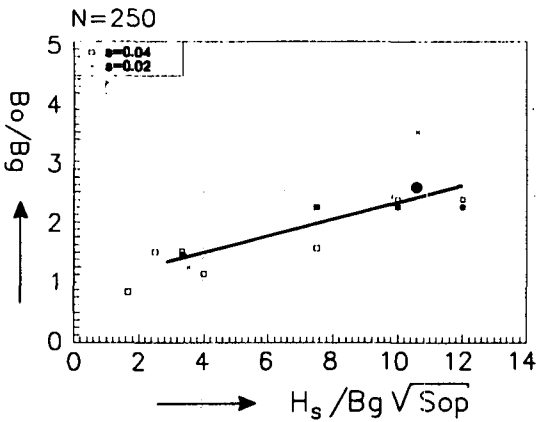
FIG. 5.22



EFFEKT OVERGANGSCONSTRUKTIE
OP EROSIEDIEPTE D_o

RELATIE TUSSEN B_o/B_g EN $H_s/B_g\sqrt{S_{op}}$
 ONDERSCHIED NAAR S_{op}

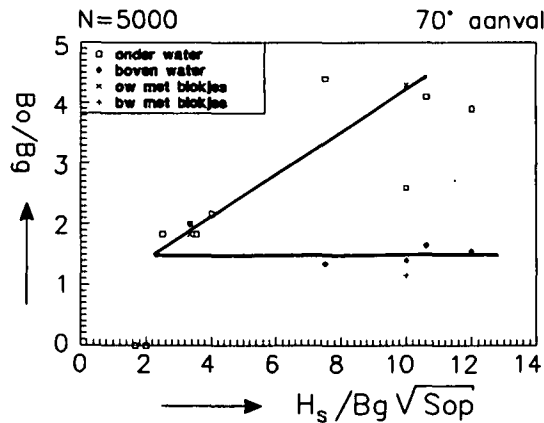
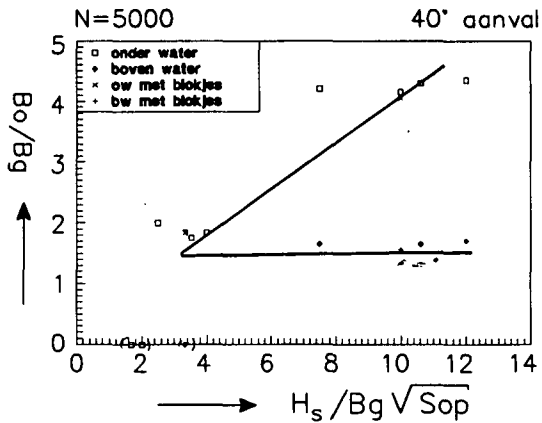
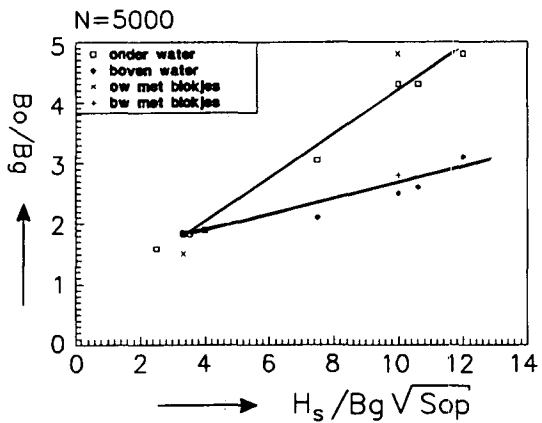
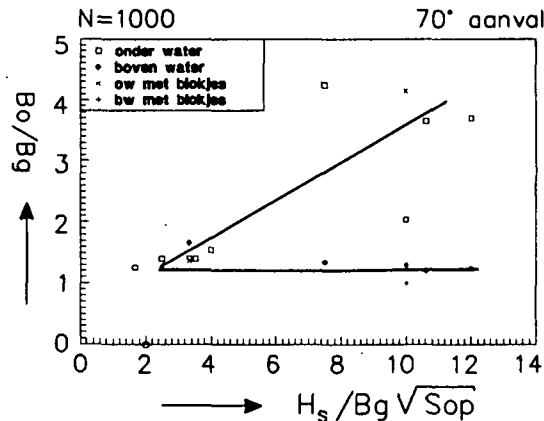
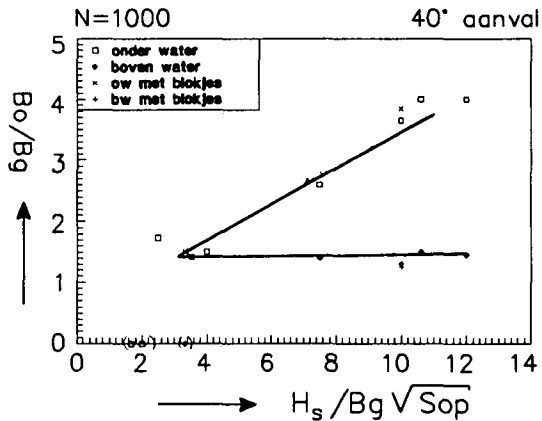
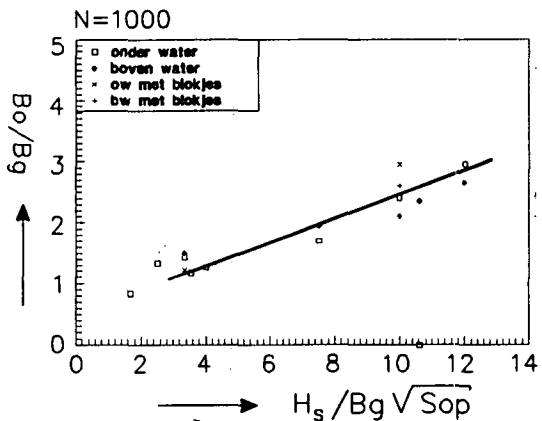
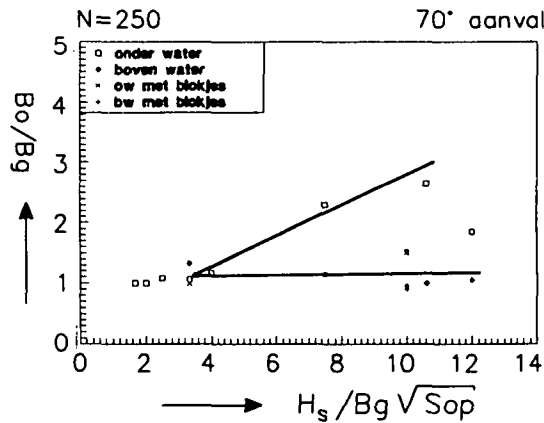
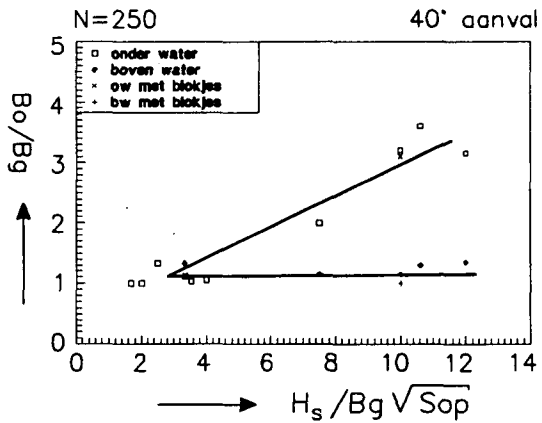
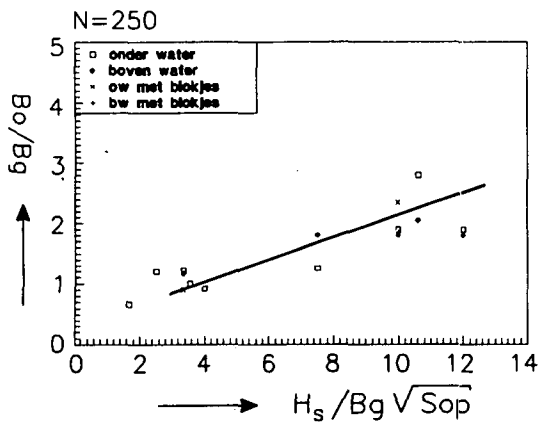
■ ⊙ boven water
 ○ × onder water

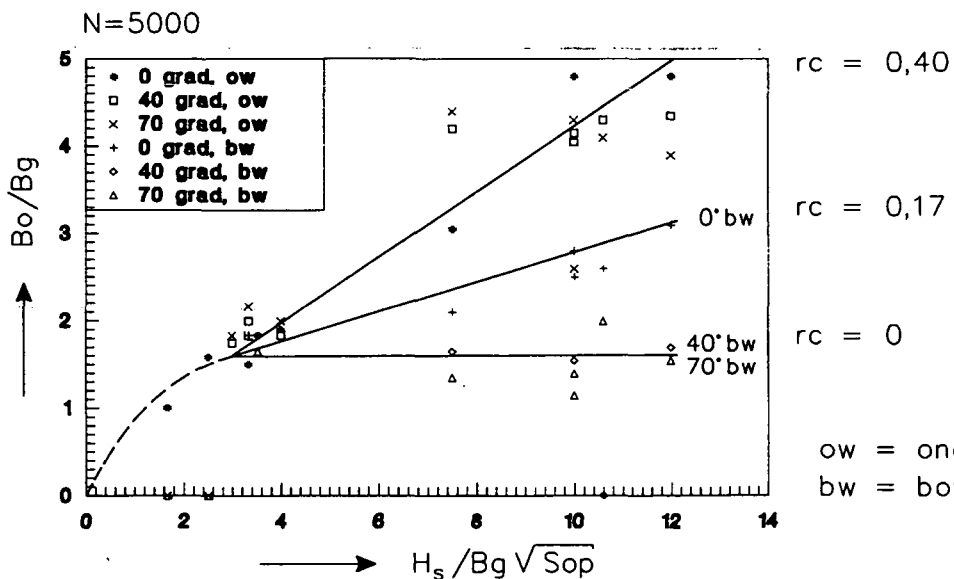
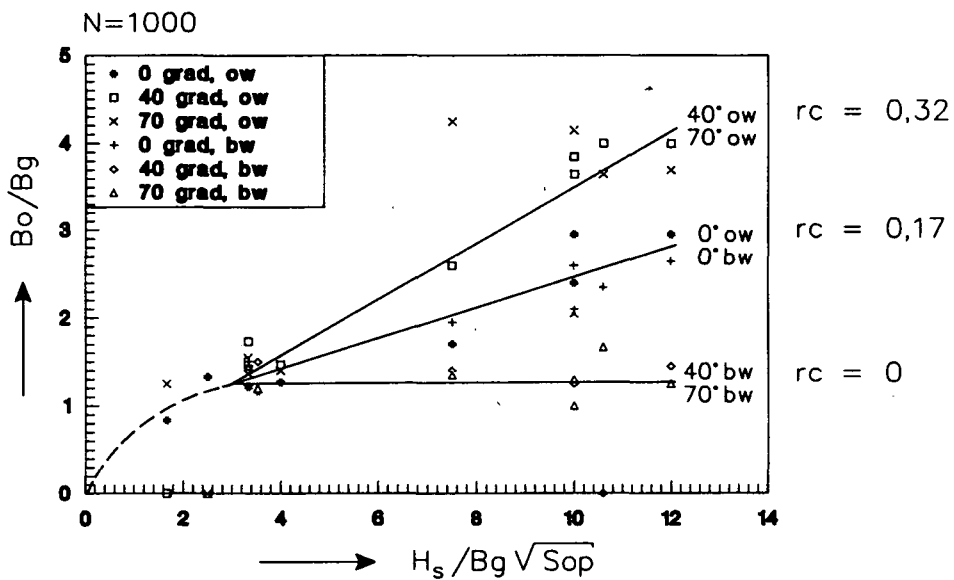
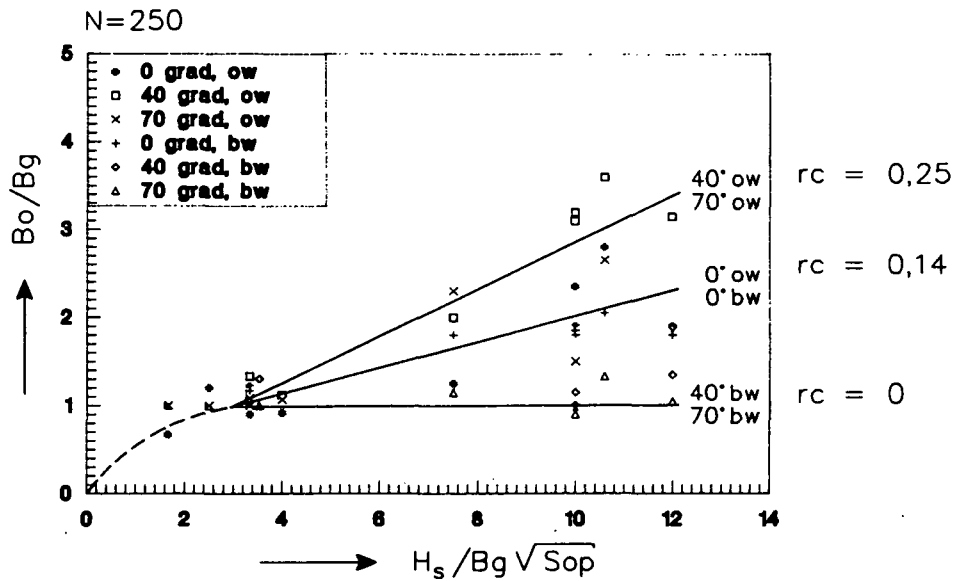


RELATIE TUSSEN B_o/B_g EN $H_s/B_g\sqrt{S_{op}}$ ONDERSCHIED
 NAAR dg INVLOED BLOKJES IN DE GATEN

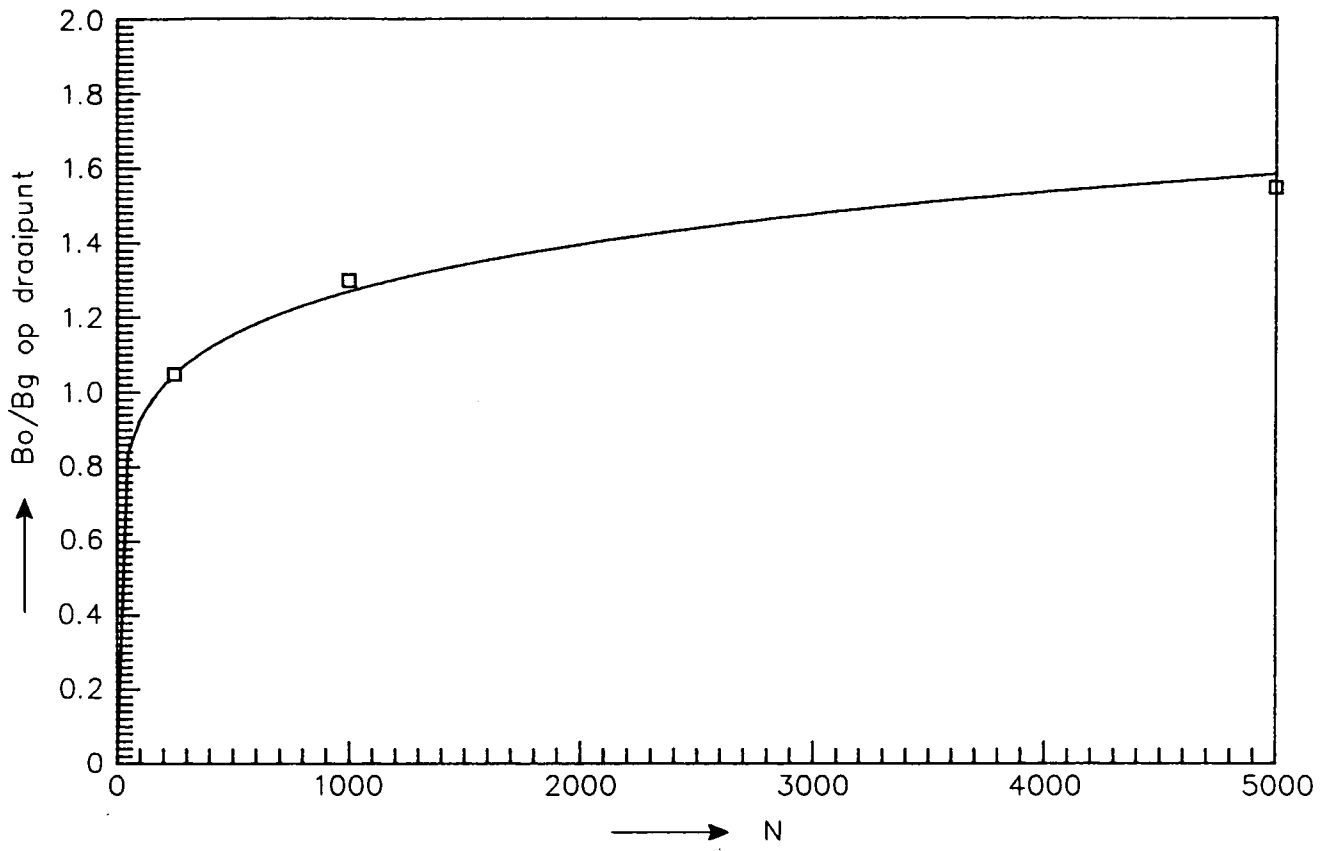
ow = onder water

bw = boven water





GEMETEN PUNTEN MET SCHEMATISATIE VAN GEMETEN
RELATIE TUSSEN B_o/B_g EN $H_s/B_g \sqrt{s_{op}}$

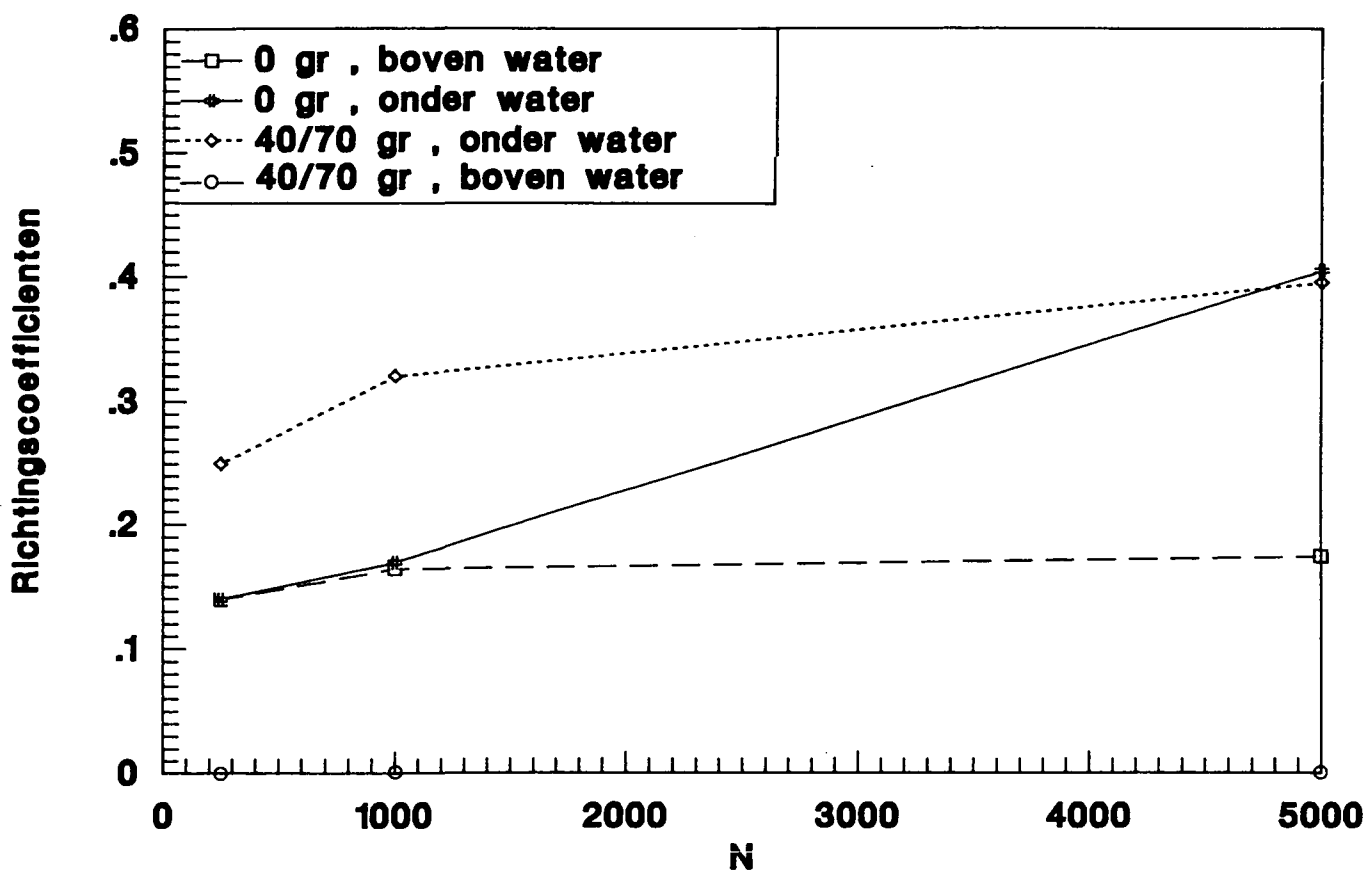


RELATIE TUSSEN LIGGING SNIJPUNT EN AANTAL
 GOLVEN N VOOR $H_s / (Bg\sqrt{s_{op}}) = 3$

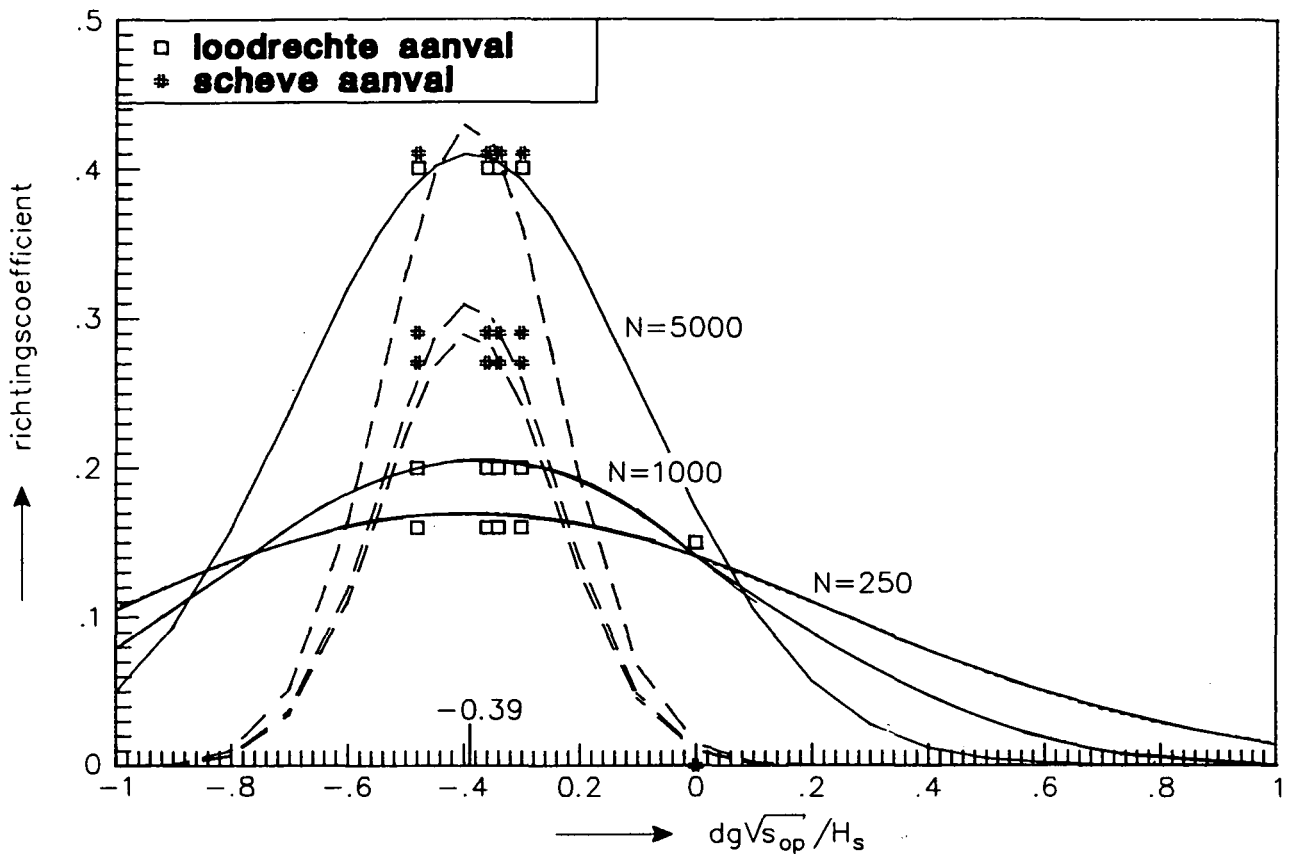
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FIG. 6.4



RELATIE TUSSEN RICHTINGSCOEFFICIENT
EN EEN AANTAL GOLVEN N



voor loodrechte aanval:

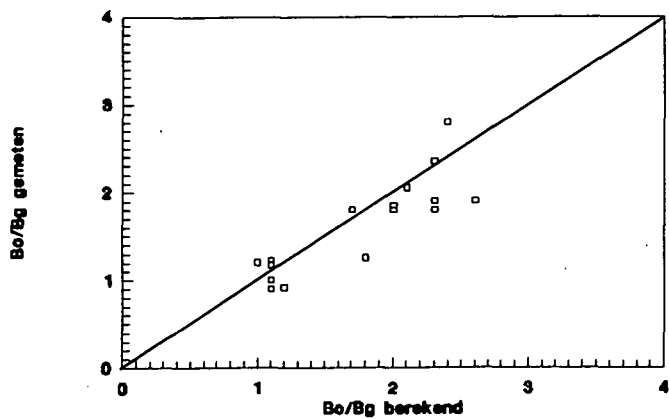
$$\text{richtingscoefficient} = (0,16 + 5 \cdot 10^{-5} N) e^{-0,08 \sqrt{N} \left(\frac{dg\sqrt{V_{s_{op}}}}{H_s} + 0,39 \right)^2}$$

voor scheve aanval:

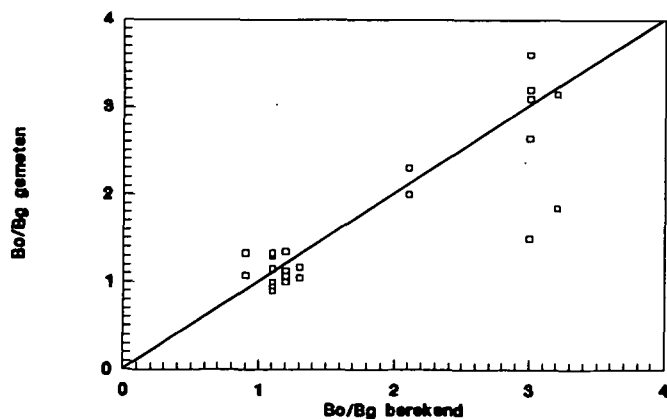
$$\text{richtingscoefficient} = (0,28 + 3 \cdot 10^{-5} N) e^{-22 \left(\frac{dg\sqrt{V_{s_{op}}}}{H_s} + 0,39 \right)^2}$$

RELATIE TUSSEN RICHTINGSCOEFFICIENTEN
EN $dg\sqrt{V_{s_{op}}}/H_s$

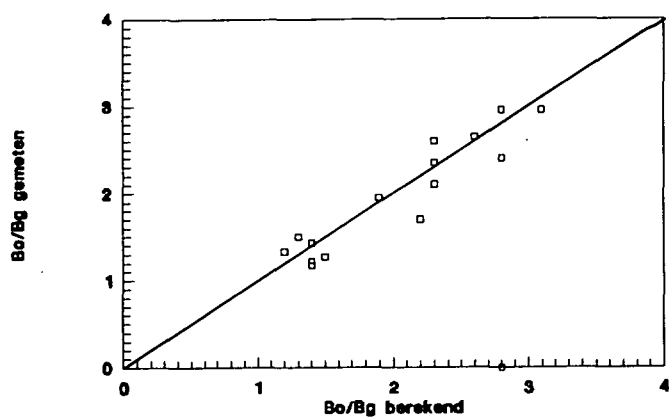
N=250
loodrechte aanval



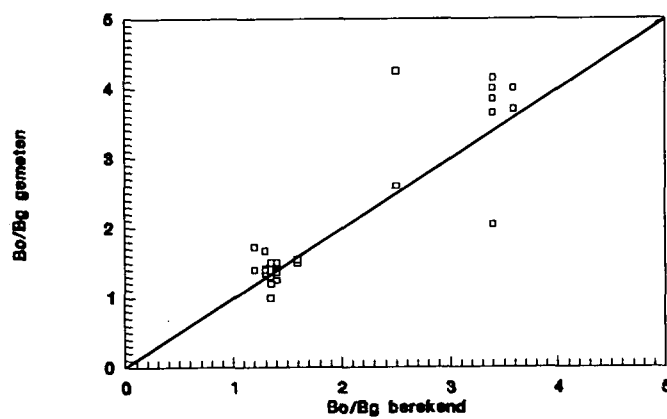
N=250
scheve aanval



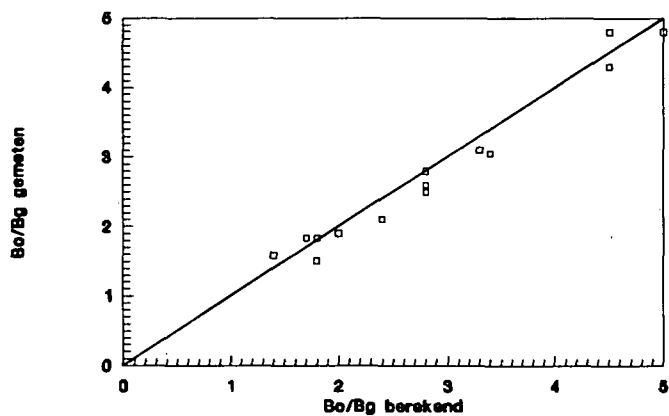
N=1000
loodrechte aanval



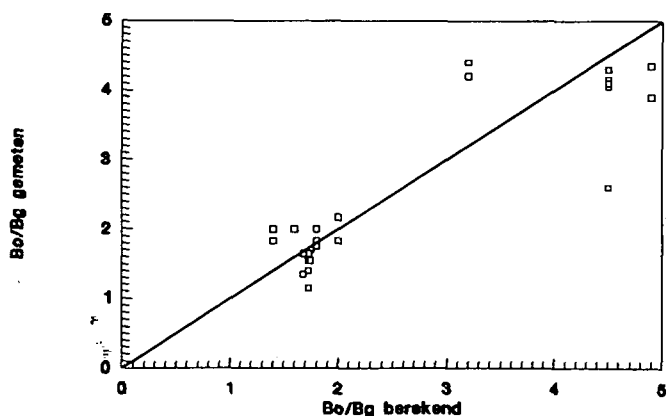
N=1000
scheve aanval



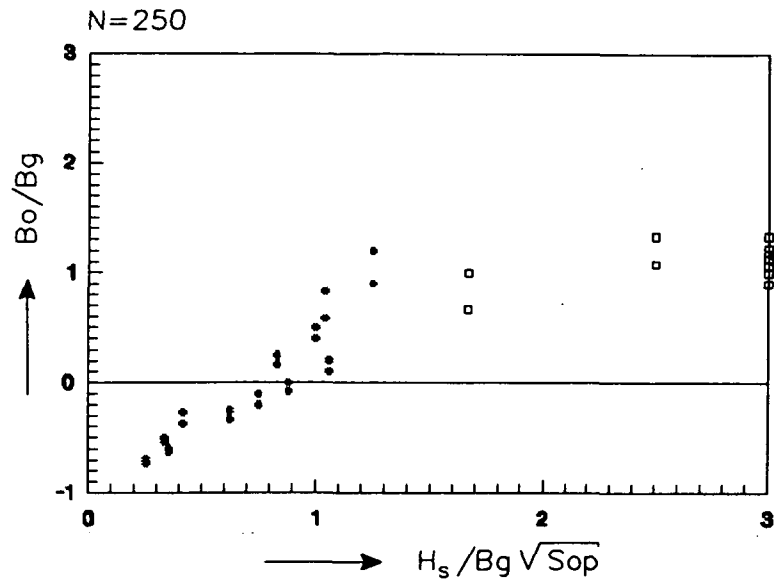
N=5000
loodrechte aanval



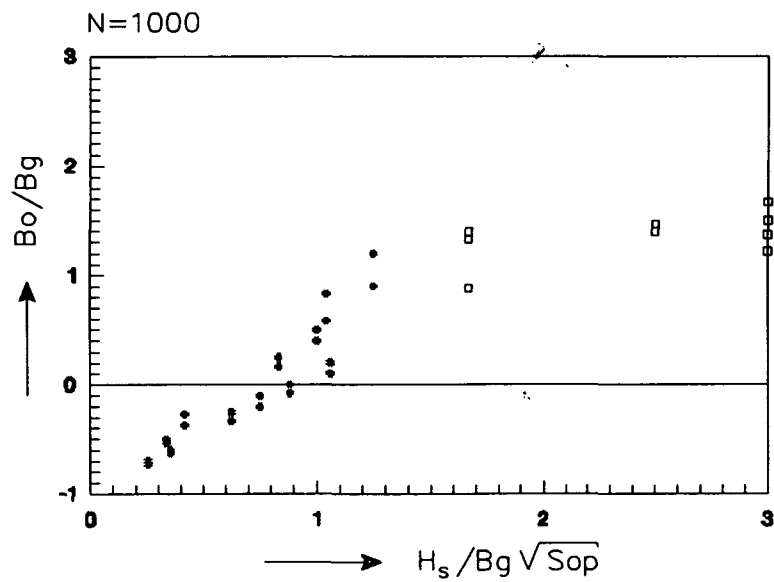
N=5000
scheve aanval



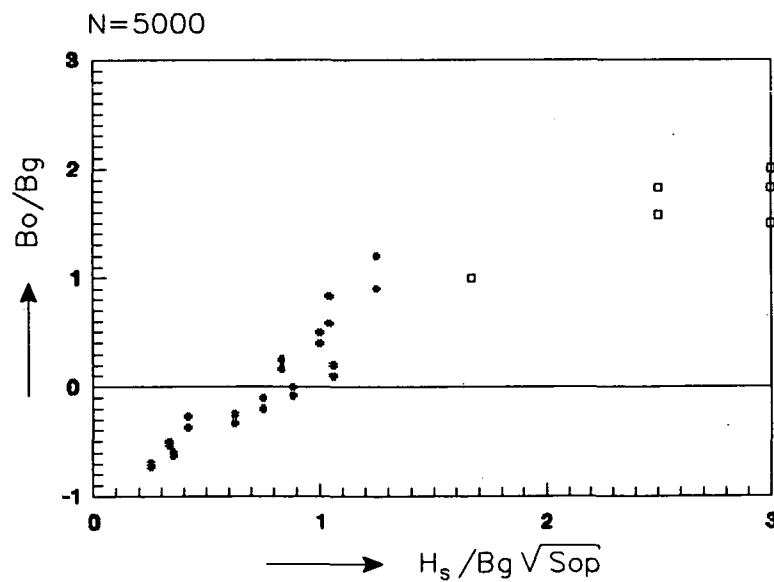
VERGELIJKING GEMETEN EN BEREKENDE
ONDERMIJNINGSDIAMETER



□ = meting
= BREAKWAT
berekening

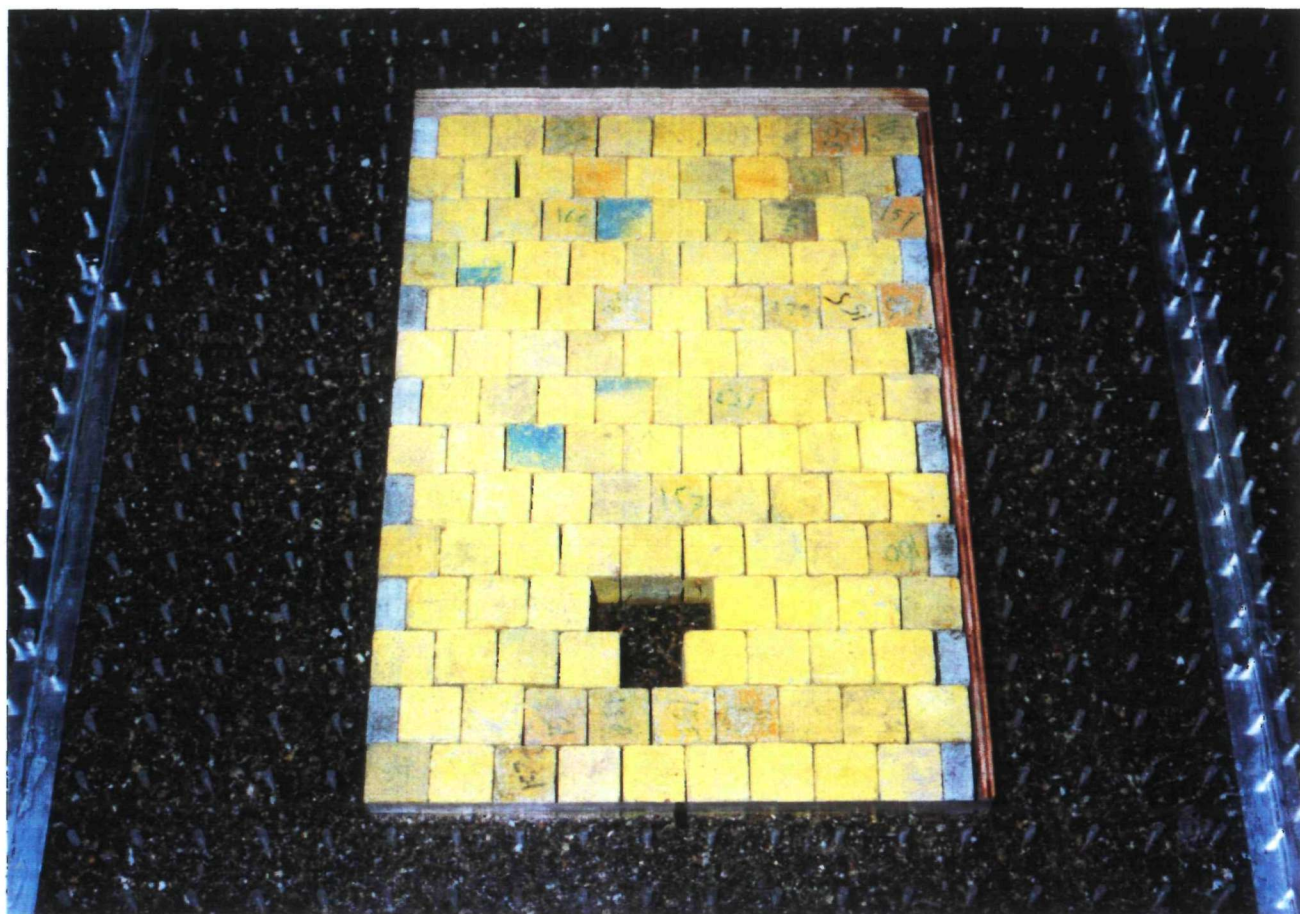


□ = meting
= BREAKWAT
berekening



□ = meting
= BREAKWAT
berekening

AANVULLING VAN METINGEN MET RESULTATEN
VAN BREAKWAT



STEENZETTING MET GAT IN PROEF 5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FOTO 4.1



VERZAKKING TOPLAAG NA 1000 GOLVEN, PROEF 5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FOTO 4.2

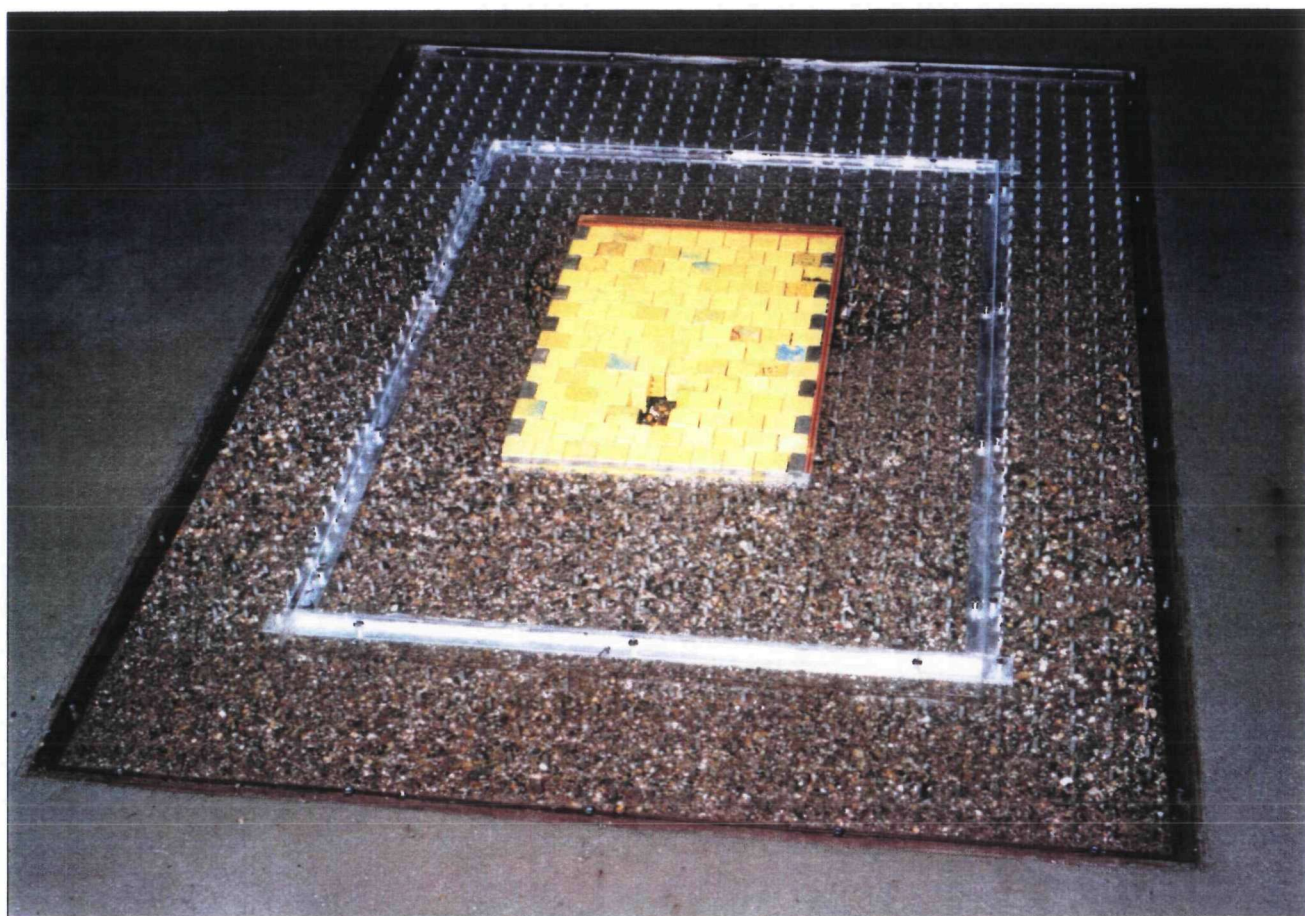


EINDSITUATIE TOPLAAG ONDER 70°, PROEF 5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FOTO 4.3



EINDSITUATIE TOPLAAG ONDER 40°, PROEF 5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FOTO 4.4



LOSSE BLOKKEN IN GAT BIJ PROEF 6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FOTO 4.5a

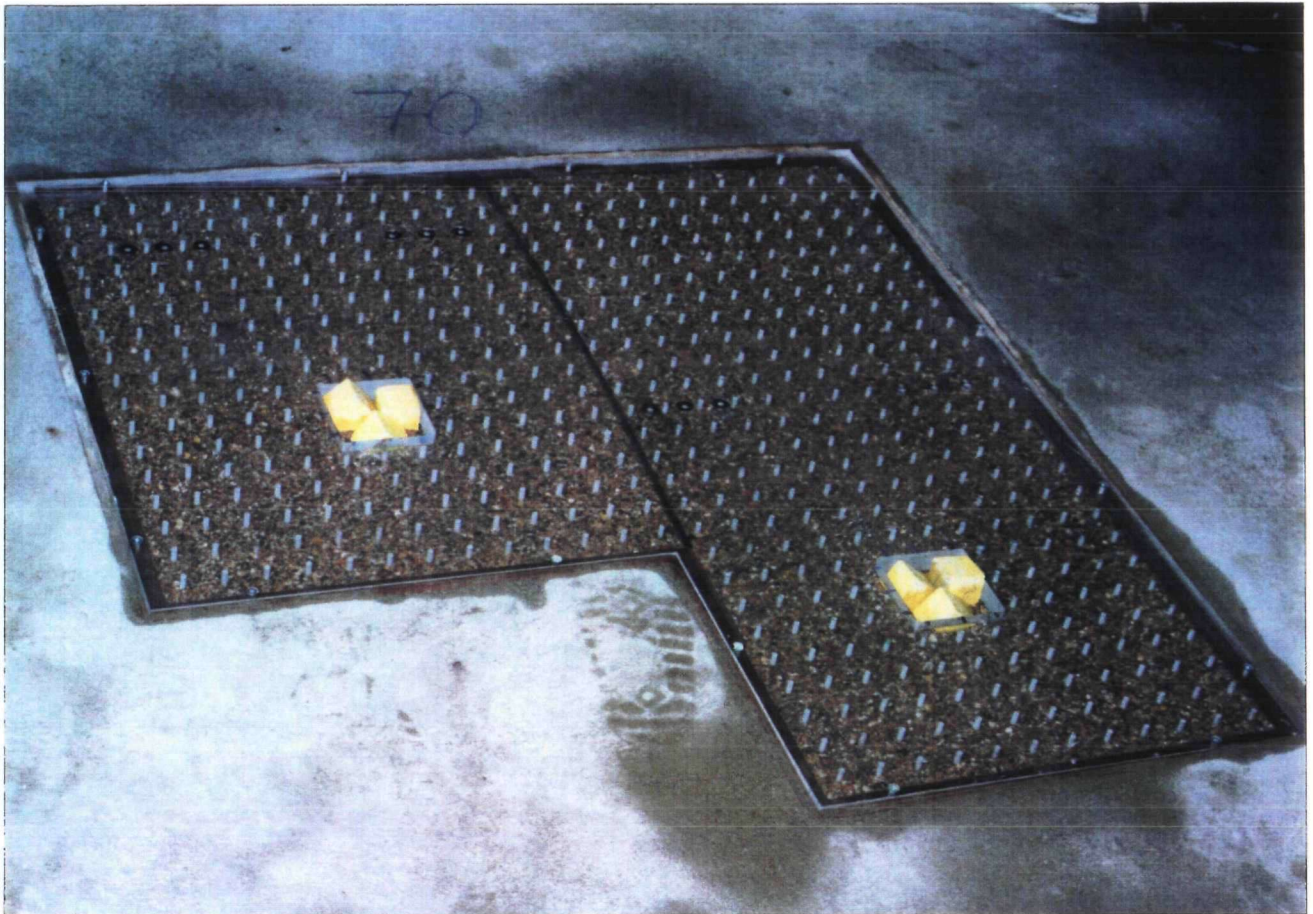


LOSSE BLOKKEN IN GAT BIJ PROEF 6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FOTO 4.5b

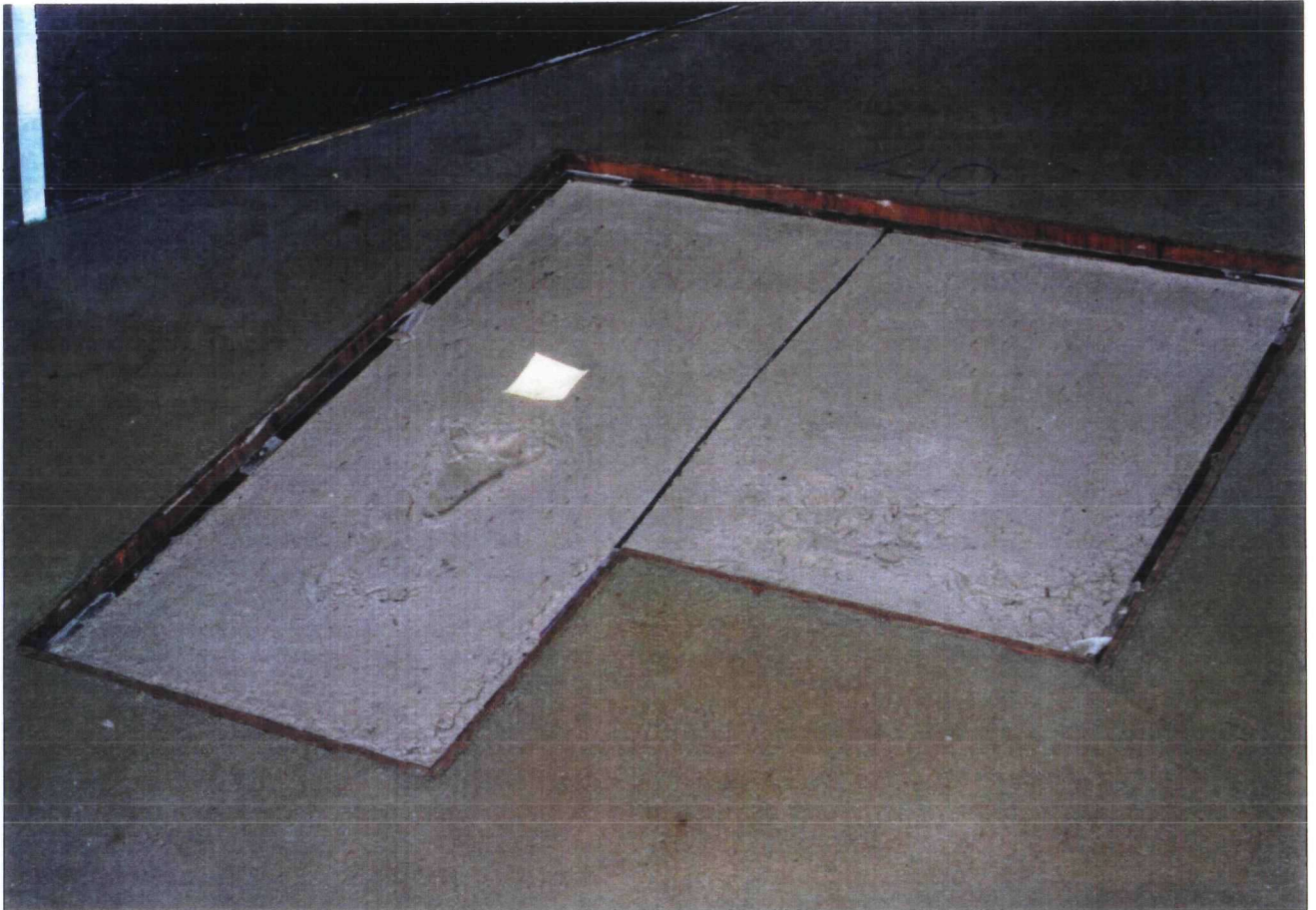


LOSSE BLOKKEN IN GAT BIJ PROEF 6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FOTO 4.5c



UITSPOELING ZAND BIJ 40° AANVAL, PROEF 8

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FOTO 4.6



UITSPOELING ZAND BIJ 70° AANVAL, PROEF 8

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1490

FOTO 4.7

APPENDIX I

(Reken-)voorbeeld reststerktemodel

(REKEN-)VOORBEELD RESTSTERKTEMODEL

Deze Appendix bevat een illustratie van de werking van een eventueel op te zetten numeriek reststerktemodel.

In de vorm van een rekenvoorbeeld is op basis van de in dit rapport afgeleide vergelijkingen het bezwijken van een steenzetting beschouwd.

Hierbij is een kritieke ondermijningsdiameter $B_{o,kr} = 3$ m aangenomen.

Bezwijken is gedefinieerd als het zichtbaar worden van de (zand) kern van de dijk.

De beschouwde condities zijn:

$$H_s = 1,5 \text{ m}$$

$$s_{op} = 0,04$$

$$\beta = 0^\circ$$

$$B_g = 1 \text{ m}$$

$$d_g = -3 \text{ m}$$

Bezwijkcriterium: $D_o = 1$ m (dikte filterlaag)

Stap 1: Bepaal D_o als $B_o = B_{o,kr} = 3$ m.

Antwoord: $D_o = 0,54$ m (vgl. 6.8) (D_o bij $B_g + B_o = 4$ m)

Conclusie: Bezwijkcriterium wordt niet gehaald voor $B_g = 1$ m, top laag zal eerst verder instorten.

Stap 2: Bepaal aantal golven waarvoor $B_o = 3$ m.

Antwoord: $N = 3500$ (vgl. 6.4, want $H_s / (B_g \sqrt{s_{op}}) = 7,5$)

Stap 3: Top laag bezwijkt, en B_g wordt 4 m ($B_o +$ oorspronkelijke B_g).

Nu is $H_s / (B_g \sqrt{s_{op}}) = 1,9$, dus moet verder worden gerekend met vgl. 6.6.

Stap 4: Bepaal weer D_o als $B_o = B_{o,kr} = 3$ m (D_o bij $B_g + B_o = 7$ m).

Antwoord: dan $D_o = 0,95$ m (vgl. 6.8). Dit is nagenoeg het bezwijkcriterium. Op het moment dat nu de kritieke diameter wordt bereikt kan de constructie dus als bezweken worden beschouwd.

Stap 5: Bepaal weer aantal golven waarvoor $B_o = 3$ m.

Antwoord: $N = 90$ (vgl. 6.6, want $H_s / (B_g \sqrt{s_{op}}) = 1,9$).

In dit rekenvoorbeeld is de steenzetting dus bezweken na $3500 + 90$, dus ongeveer 3600 golven.

• locatie 'De Voorst'

• hoofdkantoor

hoofdkantoor
Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon (015) 56 93 53
telefax (015) 61 96 74
telex 38176 hydel-nl

locatie ' De Voorst'
Voorsterweg 28, Marknesse
postbus 152
8300 AD Emmeloord
telefoon (05274) 29 22
telefax (05274) 35 73
telex 42290 hylvo-nl

Noordzee

• Amsterdam

• Londen

Brussel •