

Bresgroei

**Een experimenteel onderzoek naar
de ontwikkeling van de ontgrondingskuil**

C.P. Caan

st.nr: 153835

Afstudeercommissie:

24 augustus 1996

prof. dr. ir. J.A. Battjes
prof. drs. ir. J.K. Vrijling
ir. G.J. Schiereck
ir. P.J. Visser

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde

Voorwoord

Dit rapport is geschreven als afsluiting van mijn afstudeerproject aan de Technische Universiteit Delft.

Het afstudeerwerk omvat een onderzoek naar het bresgroeimechanisme; de groei van het stroomgat in geval van een dijkdoorbraak. De studie is met name gericht op het verkrijgen van gegevens omtrent het ontstaan en de ontwikkeling in ruimte en tijd van de ontgrondingskuil, die in het stroomgat optreedt. Het onderzoek is op experimentele wijze uitgevoerd, door middel van bresgroeiproeven in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TU Delft.

De verslaggeving van het project bestaat uit twee delen. Naast het voorliggende deel, het hoofdrapport, is er een tweede deel waarin de bijlagen bij het hoofdrapport zijn opgenomen. Het tweede deel vermeldt onder andere in grafiekvorm alle meetgegevens van de uitgevoerde experimenten.

De tekst voor beide delen van het rapport is, op enkele wijzigingen na, afgerond op 1 juli 1996. Het is daarom geschreven in de spelling die op die datum geldig was. De nieuwe spelling, die sinds 1 augustus 1996 van kracht is, is niet gebruikt. Tevens zijn eventuele nieuwe inzichten betreffende het onderwerp na deze datum niet meer verwerkt.

Een woord van dank richt ik aan de medewerkers van het Laboratorium voor het met raad en daad terzijde staan bij het voorbereiden van de experimenten; aan allen die tijdens de uitvoering van de proeven geassisteerd hebben; aan de leden van mijn afstudeercommissie voor het geduldig en aandachtig begeleiden van het project en tevens aan alle buitenstaanders die mij terzijde hebben gestaan.

Zonder de adviezen en fysieke hulp van al deze mensen was het onmogelijk geweest het werk tijdig af te ronden.

Christiaan P. Caan

Delft, 24 augustus 1996

Inhoudsopgave

VOORWOORD	iii
SAMENVATTING	ix
LIJST VAN SYMBOLEN	xi
1 INLEIDING	1
2 PROBLEEMBESCHRIJVING	5
2.1 Kort historisch overzicht	5
2.2 Probleemomschrijving	6
2.3 Probleemstelling en doelstelling	7
2.4 Wijze van aanpak	7
3 HET PROCES VAN BRESGROEI	9
3.1 Het onderzoek tot nu toe	9
3.2 Het proces	10
4 HET BRESGROEIMODEL	15
4.1 Het dijklichaam	15
4.2 Het debiet door de bres	16
4.3 Opname en transport van zand	17
4.3.1 Zandtransport volgens Bagnold	17
4.3.1.1 De bodemtransportcapaciteit s_b	18
4.3.1.2 De suspensietransportcapaciteit s_s	19
4.3.2 Zandtransport volgens de methode van Bagnold-Visser	20
4.3.3 De opname van zand	20
4.4 Erosie van het binnentalud - fase I	23
4.5 Versmalling van de kruin - fase II	24
4.6 Verlaging van de kruin - fase III	26
4.7 Gecombineerde diepte- en breedtegroei - fase IV	28
4.8 Afnemende groei van het stroomgat - fase V	29
5 HET VOORONDERZOEK	31
5.1 De uitgangssituatie voor het onderzoek	31
5.2 Globale proefopstelling	32
5.3 Het coördinatenstelsel	32
5.4 Het gebruikte zand	33
5.5 De porositeit van het zandbed	34
5.6 De dikte van het zandbed in het proefbassin	35
5.7 De plaats van de dijk in het proefbassin	37
5.7.1 De plaats van de glaswand	37
5.7.2 Situering van de dijk	38
5.8 De geometrie van de dijkdoorsnede	39
5.9 De lengte van de glaswand	39
5.10 Het maximaal toelaatbare debiet	40

5.11	Detailtering van de proefopstelling	42
5.12	De benodigde hoeveelheid zand	45
5.13	Onderzoek van schaaffecten	46
5.13.1	Schaaffecten in het algemeen	47
5.13.2	Schaaffecten in de proefopstelling	47
6	DE MEETOPSTELLING	51
6.1	Te meten grootheden	51
6.2	De meetinstrumenten	52
6.2.1	Het meetinstrument voor de waterstand	52
6.2.2	Het meetinstrument voor de stroomsnelheid	53
6.2.2.1	De micromolen	53
6.2.2.2	De electromagnetische stroomsnelheidsmeter	53
6.2.3	Het meetinstrument voor de bresgeometrie	54
6.2.3.1	Visuele meting	54
6.2.3.2	De trillingsmeter	54
6.2.3.3	Meting op basis van interne weerstand	55
6.2.3.4	Radar en sonar	56
6.2.3.5	De profielvolger	56
6.2.3.6	Conclusie	57
6.3	De meetopstelling	57
6.4	Verwerking en presentatie van de meetresultaten	60
7	BESCHRIJVING VAN DE EXPERIMENTEN	63
7.1	Het draaiboek voor de uitvoering van de experimenten	63
7.2	De resultaten van het eerste experiment	64
7.2.1	De opstelling	64
7.2.2	De tijdschaal van het eerste experiment	65
7.2.3	De waterstandsmetingen	65
7.2.4	De snelheidsmetingen	67
7.2.5	De breedtegroei	68
7.2.6	De ontgrondingskuil	68
7.2.7	Conclusie	70
7.2.8	Aanpassing van de proefopstelling voor het tweede experiment	71
7.3	De resultaten van het tweede experiment	72
7.3.1	De opstelling	72
7.3.2	De tijdschaal van het tweede experiment	73
7.3.3	De waterstandsmetingen	73
7.3.4	De snelheidsmetingen	74
7.3.5	De breedtegroei	75
7.3.6	De ontgrondingskuil	75
7.3.7	Conclusie	77
7.4	De resultaten van het derde experiment	78
7.4.1	De opstelling	78
7.4.2	De tijdschaal van het derde experiment	79
7.4.3	De waterstandsmetingen	80
7.4.4	De snelheidsmetingen	80
7.4.5	De breedtegroei	81
7.4.6	De ontgrondingskuil	82
7.4.7	Conclusie	83

8	OPSLAG VAN DE MEETGEGEVENS	85
9	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	87
9.1	Conclusies	87
9.2	Aanbevelingen	89
	LITERATUUR	91
BIJLAGEN:	ZIE TWEEDE DEEL “BIJLAGEN”	

Samenvatting

In Nederland wordt, ter vervanging van de huidige ontwerpmethodiek op basis van een overschrijdingskans, gewerkt aan een nieuwe, probabilistische ontwerpnorm voor de zee- en rivierdijken. Deze nieuwe norm wordt gebaseerd op een risicobenadering. Hierbij bestaat het risico uit de kans op een overstroming, gecombineerd met de schade die daardoor ontstaat. Voor het berekenen van de bij een dijkdoorbraak te verwachten schade is het noodzakelijk het verloop van de inundatie van de polder te kennen. Dit inundatieverloop wordt onder andere bepaald door het debiet dat de polder instroomt, en daarmee door de afmetingen van het stroomgat in de dijk. Het is daarom van belang de ontwikkeling van het stroomgat, de bres, te kennen.

Sinds 1986 is onderzoek verricht naar dit proces van bresgroei. Er is een mathematisch model opgesteld, waarin voor de verschillende stadia van het doorbraakproces analytische uitdrukkingen voor de groei van het stroomgat worden gegeven. Dit model is echter nog niet volledig; met name de ontwikkeling van de ontgrondingskuil, die tijdens de doorbraak ontstaat, is nog onzeker, terwijl de uiteindelijke afmetingen van de kuil van belang lijken te zijn in een praktijksituatie.

Dit afstudeerproject omvat een onderzoek naar het ontstaan en de ontwikkeling in ruimte en tijd van deze ontgrondingskuil. Het onderzoek heeft tot doel om het inzicht in het bresgroeiproces te vergroten en tevens uit de resultaten een gegevensbestand voor het proces te genereren.

Het onderzoek heeft op experimentele wijze plaatsgevonden, door middel van een drietal dijkdoorbraakproeven in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TU Delft. In de proefopstelling is een glaswand geplaatst, zodat een in lengterichting gehalveerde dijk ontstaat. Langs de glaswand is, over de kruin van de dijk, een initiële geul gemaakt om de doorbraak op die plaats te laten plaatsvinden. Het doorbraakproces, inclusief de ontwikkeling van de ontgrondingskuil, kon op deze manier met behulp van videocamera's vanaf de zijkant waargenomen worden. Tijdens de experimenten is bovenstrooms van de dijk op drie plaatsen de waterstand gemeten. De stroomsnelheid is op drie punten geregistreerd: in de bres en op twee locaties bovenstrooms. De breedte van het stroomgat is vastgelegd met behulp van een fotocamera recht boven de bres.

In alle experimenten is de ontwikkeling van de ontgrondingskuil beïnvloed door de fysieke begrenzingen van het model. Hierdoor kunnen geen exacte dieptegegevens worden gepresenteerd. Wel sluiten de proefresultaten aan bij de historische praktijksituatie, zoals die aangetroffen wordt ter plaatse van oude dijkdoorbraken langs de rivieren, de zogenaamde "wielen". De dieptemetingen uit een eerder uitgevoerd veldexperiment, het Zwin'94-experiment, vragen om nader onderzoek, aangezien zij duidelijk afwijken van zowel de historische gegevens als de resultaten van dit onderzoek.

Uit de resultaten van de uitgevoerde experimenten lijkt een invloed van de pakking van het bodemmateriaal op het ontgrondingsproces aantoonbaar. Tevens blijkt dat het bestaande bresgroei-model, afhankelijk van de wijze van toestroming naar de bres, goede resultaten geeft.

Al met al kan gesteld worden dat het inzicht in het verloop van een dijkdoorbraak met dit onderzoek vergroot is. Verder zijn drie sets met meetgegevens ontstaan, welke de mogelijkheid bieden, te dienen als hulpmiddel bij het uitbreiden en eventueel verbeteren van het bestaande bresgroei-model.

Lijst van symbolen

A_{kom}	kombergingsoppervlakte	[m ²]
b_{ov}	breedte van de overlaat	[m]
b_{T}	breedte van de bres	[m]
C_f	wrijvingscoëfficiënt	[-]
D	korreldiameter	[m]
d_{B}	dikte van het zandbed in de proefopstelling	[m]
d_e	evenwichtsdiepte	[m]
d_g	grensdiepte	[m]
d_{T}	waterdiepte in de bres	[m]
d_{teen}	waterdiepte aan de teen van het binnentalud	[m]
$e_{\text{b,s}}$	efficiëntiefactoren voor bodem- en suspensietransport	[-]
f_2	vertragsingsfactor voor de dieptegroei door de breedtegroei in fase III	[-]
g	versnelling van de zwaartekracht	[m/s ²]
h_{D}	hoogte van de dijk	[m]
h_{kom}	waterstand in de polder	[m]
h_{ov}	hoogte van de zij-overlaat in de proefopstelling	[m]
$h_{\text{sm}}(t)$	maximale diepte van de ontgrondingskuil	[m]
H_{w}	bovenstroomse energiehoogte	[m]
h_{w}	bovenstroomse waterstand	[m]
k	bodemruwheid	[m]
$k_{0,1,2}$	coëfficiënt ter bepaling van de tijdsduren van de verschillende fasen	[-]
$L_{0,1}$	lengte van het binnentalud op t_0 resp. t_1	[m]
l_a	aanpassingslengte van het zandtransport	[m]
l_e	evenwichtslengte	[m]
L_{kuil}	lengte van de ontgrondingskuil	[m]
l_t	lengte van het binnentalud	[m]
L_t	terugschrijding van de teen van het binnentalud gedurende fase I	[m]
L_{T}	kruinbreedte van de dijk	[m]
m	afvoercoëfficiënt	[-]
p	porositeit	[-]
q_{T}	specifiek debiet door de bres	[m ³ /s/m]
Q_{T}	totale debiet door de bres	[m ³ /s]
r	lineariteitsconstante voor de breedtegroei	[-]
Re_*	Reynoldsgetal, betrokken op de schuifspanningssnelheid	[-]
s_b	bodemtransportcapaciteit	[m ³ /s/m]
s_s	suspensietransportcapaciteit	[m ³ /s/m]
$t_{0,1,2,3,4,5}$	tijdstip van begin en einde van de verschillende fasen in het proces	[s]
$t_{\text{I,II,III,IV,V}}$	tijdsduren van de verschillende fasen van het bresgroeiproces	[s]
u_*	schuifspanningssnelheid	[m/s]
u_b	gemiddelde snelheid van het bodemmateriaal	[m/s]
u_c	kritieke snelheid bij begin van bewegen	[m/s]
u_e	evenwichtsstroomsnelheid	[m/s]
u_{T}	stroomsnelheid in de bres	[m/s]

u_{teen}	stroomsnelheid aan de teen van het binnentalud	[m/s]
u_w	stroomsnelheid bovenstrooms van de bres	[m/s]
V_{kom}	kombergingsvolume	[m ³]
w_s	valsnelheid van het bodemmateriaal ten opzichte van het water	[m/s]
z'_b	plaatscoördinaat van het binnentalud	[m]
$z(x,y,t)$	bodemniveau in de bres als functie van x, y, en t	[m]
z_b	plaatscoördinaat van de bodem	[m]
Z_T	kruinhoogte van de dijk in de bres	[m]

α	parameter voor de berekening van de diepte van de ontgrondingskuil	[-]
α	helling van het buitentalud van de dijk	[°]
β_0	helling van het binnentalud van de dijk op $t = t_0$	[°]
β_1	helling van het binnentalud van de dijk op $t = t_1$	[°]
β_2	bovenstroomse helling van de ontgrondingskuil	[°]
β_3	benedenstroomse helling van de ontgrondingskuil	[°]
β_{IV}	eenzijdige breedtegroeisnelheid in fase IV	[m/s]
Δ	relatieve dichtheid van het bodemmateriaal	[-]
ϕ	hoek van natuurlijk talud van het bodemmateriaal	[°]
κ	constante van Von Karman, $\kappa = 0.4$	[-]
λ	kenmerkende lengte voor de verhanglijn	[m]
θ	mobiliteitsparameter van Shields	[-]

1 Inleiding

Sinds mensenheugenis is het kustgebied van Nederland, en met name het deltagebied van Rijn, Maas en Schelde, geteisterd door watersnoden. Hoe kan het ook anders in een land dat zich grotendeels onder de zeespiegel bevindt en door het inklinken van de bodem en het stijgen van de zee in de loop der tijden daar steeds dieper onder is komen te liggen.

De eerste bewoners van het gebied waren genoodzaakt hun nederzettingen te bouwen op zelf gemaakte hoogten, de zogenaamde terpen. De twaalfde eeuw bracht een keerpunt in de strijd tegen het water. Na de stormvloed van 1134 begint men dijken aan te leggen rond de hoogstgelegen stukken grond. In de eeuwen daarna veroveren de bewoners van de lage landen zelfs nieuwe polders, door schorren en slikken te bedijken.

De veelal (te) lage dijken kunnen niet voorkomen dat ook daarna de zee herhaaldelijk vernietigend toeslaat. Tientallen keren overstromen er polders en soms worden hele eilanden weggevaagd en moeten de bewoners - voorzover zij niet verdronken zijn - toch weer vluchten uit de eerder op de zee veroverde polders. Een bekend voorbeeld hiervan is de St. Elisabethsvloed van 1421 waarbij door een stormvloed op zee en een hoge rivierwaterstand vele hectaren polderland zijn verzwolgen en getransformeerd tot wat we thans kennen als het natuurgebied "de Biesbosch". De geschiedenis van de delta is het verhaal van één lange strijd tegen het water.

Ook de grote rivieren die door het land vloeien, Rijn en Maas, met hun vele kubieke meters regen- en smeltwater uit het uitgestrekte achterland, hebben in het verleden voor de nodige wateroverlast gezorgd. Lijkt het gevaar vanuit de rivieren ondergeschikt aan het geweld van de zee, toch herbergen deze rivieren een gevaarlijk potentieel. Door de expansiedrift van de mens zijn de rivieren gekanaliseerd en hebben deze hun vrije loop verloren. De uitgestrekte winterbeddingen zijn veelal in gebruik voor andere doeleinden dan waarvoor ze feitelijk dienen, namelijk als buffer voor het opvangen van hoge rivierafvoeren.

En nog steeds leven de meeste Nederlanders in het laaggelegen deltagebied en in de polders langs de grote rivieren. Nog steeds zijn zij, in hun strijd tegen zeeën en rivieren, in hun bestaan afhankelijk van de dijken. Echter naarmate de welvaart zich in de loop der tijd ontwikkelt, zijn de eisen die aan de waterkeringen gesteld worden steeds strenger geworden. Vooral de laatste grote watersnood, in 1953, heeft grote gevolgen gehad voor de ontwikkeling van de kustverdediging: de dijken moesten verhoogd en de getijdegeulen in de delta moesten afgesloten worden; dit alles om de kans op herhaling van een dergelijke ramp vele malen te verkleinen.

De hoogwaters op de rivieren in de afgelopen jaren en de overlast die daardoor ontstond in Limburg en Gelderland heeft de mensheid weer eens op het hart gedrukt om niet alleen de zee te beschouwen, maar ook terdege rekening te houden met de door menselijk handelen steeds ingrijpender wordende nukken van de grote rivieren. De rivierdijken worden verzwaaard op de meest kritieke plaatsen, maar eigenlijk zouden de rivieren hun oude, originele bedding terug moeten krijgen, om de kans op grote overstromingen nadrukkelijk te verkleinen.

Tegenwoordig is het, organisatorisch en politiek gezien, veel moeilijker om plannen voor kustverdedigingswerken door te voeren, dan in de periode direct na de watersnood van 1953. De budgetten krimpen en de ingrepen in landschap en persoonlijk leven worden vaak te groot geacht. De totale zorg voor de leefomgeving zal echter naar mijn mening steeds moeten inspireren tot een evenwichtige belangenafweging van milieuzorg, zorg voor ecosystemen en ruimtelijke indeling. De discussies die in deze context gevoerd worden zijn vaak sterk sectoraal bepaald; ieder verdedigt met verve zijn eigen front zonder de moeite te nemen het totale belang te overzien. Gevolg hiervan kan zijn, dat de in het kader van de totale belangenafweging te garanderen veiligheid onder druk komt te staan. Het bewust omgaan met veiligheidscriteria, die aansluiten bij de specifieke omgeving waarop de discussie zich richt, kan wellicht bijdragen aan nuancering van standpunten op verschillende fronten.

De manier waarop de veiligheid van een kustverdediging wordt bepaald, is aan verandering onderhevig. Werd er vroeger gedimensioneerd op een situatie met een vooraf bepaalde overschrijdingskans, tegenwoordig wordt er gewerkt aan een nieuwe norm, gebaseerd op een risicobenadering. Deze probabilistische methode is gebaseerd op een combinatie van een kans van optreden van een gebeurtenis en de gevolgen van die gebeurtenis.

De gebeurtenis is in dit geval het doorbreken van een dijk en de gevolgen bestaan uit de schade die ontstaat door inundatie van het achterliggende gebied.

Deze vorm van risicobenadering houdt in, dat de kans dat een dijk, die een onbewoonde polder omringt, bezwijkt groter mag zijn dan de kans op doorbraak van een dijk rond een stad of een industriegebied.

Voor het berekenen van de schadeverwachting is het noodzakelijk te weten hoe in geval van een dijkdoorbraak de inundatie verloopt en welk effect de doorbraak heeft op de directe omgeving. Het inundatieverloop hangt samen met het debiet dat het bedreigde gebied binnenstroomt en met een aantal karakteristieken van het beschermde gebied zoals de topografie, de loop van wegen en spoorwegen, het bodemgebruik, en dergelijke. Op grond van het geheel van deze kenmerken is bij een gegeven debiet een schatting te maken van het inundatieverloop.

Ter bepaling van het instromende debiet is het nodig, naast natuurlijke en hydraulische randvoorwaarden, de ontwikkeling van het stroomgat of de stroomgaten te kennen.

Om de afmetingen van het stroomgat te bepalen is in de afgelopen jaren door de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) onderzoek gedaan naar de ontwikkeling van een bres in een dijk. Uit dit onderzoek blijkt dat het bresgroeiproces onderverdeeld kan worden in vijf fasen. Tot nu toe is voor de eerste drie fasen van het proces, welke de erosie van het dijklichaam omvatten, een analytische uitdrukking opgesteld voor de diepte- en breedtegroei van de bres. Het procesverloop in de vierde fase, waarin de dijk volledig weggespoeld is en het stroomgat dieper en breder wordt, is nog onzeker. De laatste fase, waarin de groei van de bres afneemt en de uiteindelijke afmetingen worden bereikt, is nog in het geheel niet beschreven, mede doordat het effect van het optreden van de ontgrondingskuil, die tijdens de dijkdoorbraak ontstaat, op het proces onbekend is.

Het onderzoeken van dit effect is het onderwerp van dit afstudeerproject.

Het rapport is als volgt opgezet. De probleemstelling en het doel van het afstudeerproject worden geformuleerd in hoofdstuk 2. Hoofdstuk 3 bespreekt het doorbraakproces en de vijf fasen waarin dit onderverdeeld kan worden. In hoofdstuk 4 wordt het bresgroeimodel, zoals dat tot nu toe ontwikkeld is, besproken. Hierna wordt in hoofdstuk 5 begonnen met de voorbereiding van de in het kader van het onderzoek uit te voeren experimenten om uiteindelijk tot een proefopstelling te komen. In hoofdstuk 6 worden de gemeten grootheden besproken en wordt een meetprogramma opgesteld. Hoofdstuk 7 geeft een beschrijving van de experimenten en commentaar bij de meetgegevens. Vervolgens wordt in hoofdstuk 8 de inhoud van het aangelegde archief aangegeven en de plaats waar dit beschikbaar is. Als laatste volgen in hoofdstuk 9 de conclusies en aanbevelingen.

2 Probleembeschrijving

2.1 Kort historisch overzicht

Er is al veel onderzoek gedaan naar de ontwikkeling van het stroomgat in geval van een dijkdoorbraak. Naast Nederland zijn de belangrijkste landen waar dit gebeurt Japan, de Verenigde Staten en Oostenrijk.

In Japan wordt het onderzoek naar bresgroei verricht door het Research Instituut voor Rampenpreventie van de universiteit van Kyoto. In 1984 zijn door Fujita, Tamura en Muramoto [3] proeven uitgevoerd in een stroomgoot om inzicht te krijgen in de snelheid van een doorbraak in een rivierdijk. Zij gaan uit van een zanddijk met over de kruin een V-vormige groef, de initiële bres. De groei van het stroomgat verloopt in twee stadia, in eerste instantie een snelle erosie en een snelle toename het debiet, en daarna een afnemende groei tot de uiteindelijke afmetingen bereikt zijn.

In de Verenigde Staten is de studie naar bresgroei vooral gericht op doorbraken van stuwdammen. Lange tijd was het onderzoek gericht op de vloedgolf die ontstaat bij een doorbraak. Hierbij werden aannamen gedaan voor de groei van het stroomgat [2,4]. Ralston geeft de eerste aanzet tot de beschrijving van de feitelijke bresgroei [5]. Hij koppelt de erosie aan de turbulentie van de stroming. Als gevolg van de stromingsturbulentie aan de teen van het binnentalud treedt daar veel erosie op waardoor het talud wordt ondergraven.

Door Tinney en Hsu [12] zijn reeds in 1959 proeven uitgevoerd naar de werking van een "fuse plug". Dit is een noodoverlaat in rivieren die in korte tijd geërodeerd wordt zodra de rivierwaterstand een bepaalde hoogte overschrijdt, waardoor een grotere afvoercapaciteit beschikbaar komt. Deze proeven staan bekend als de "Oxbow experiments".

Ook in Oostenrijk wordt studie verricht naar het doorbreken van stuwdammen. Simmler en Samet hebben laboratoriumproeven uitgevoerd om de invloed van de bresgroei op de voortplanting van een vloedgolf te bepalen [8].

Het bresgroei-onderzoek in Nederland is begonnen in 1986 met een studie naar de mogelijke gevolgen van een doorbraak van een hoge dijk rond een pomp-accumulatie-centrale [13]. Hieruit is een eerste aanzet tot een analytisch model voor de ontwikkeling van het stroomgat in de tijd opgesteld. Door de extreme hoogte van de dijk en het doel van de studie is het doorbraakproces hierin geschematiseerd tot drie fasen. In geval van "normale" zee- en rivierdijken bestaat het bresgroei-proces uit vijf stadia [15]. In 1991 is de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) begonnen met het onderzoek ten behoeve van een nieuwe ontwerp-norm voor de zee- en rivierdijken. Zij bouwt daarmee voort op de resultaten van het eerdere onderzoek.

In 1989 is een oriënterende proef op prototypeschaal uitgevoerd in het natuurgebied Het Zwin in Zeeuws Vlaanderen [14]. Het doel van deze proef, het Zwin'89-experiment, was het verkrijgen van inzicht in het proces van bresgroei.

In 1994 is een tweede veldproef uitgevoerd in Het Zwin, ditmaal gericht op het meten van de in het bresgroeiproces van belang zijnde grootheden. Deze proef staat bekend onder de naam Zwin'94-experiment [9,17].

2.2 Probleemomschrijving

Het bresgroeionderzoek in Nederland is van belang omdat er een nieuwe ontwerpnorm voor dijken in ontwikkeling is. Het ontwerp van de dijk wordt daarin bepaald op basis van de kans van overstromen in combinatie met de schade die daardoor ontstaat; een zogenaamde risiconorm. Om de te verwachten schade te kunnen bepalen, is het noodzakelijk inzicht te verkrijgen in de wijze waarop de inundatie zich ontwikkelt. Dit inundatieverloop hangt ondermeer af van het instromende debiet en dus van de afmetingen van het stroomgat.

Het eerste model uit 1986, en de uitbreidingen en verbeteringen daarop, beschrijven tot nu toe de eerste vier fasen van het bresgroeiproces; tot het moment waarop de stroming subkritisch wordt [13].

De dieptegroei in de eerste drie fasen en de breedtegroei in de derde en de vierde fase zijn goed gemodelleerd. Dit blijkt uit de meetresultaten van diverse laboratoriumproeven en veldexperimenten op prototypeschaal (Zwinproeven) [9,17].

Het ontstaan en de ontwikkeling van de ontgrondingskuil, vanaf fase IV, is nog onbekend. In 1994 is in het Zwin'94-experiment wel de diepte van de kuil gemeten door middel van een nieuw ontwikkeld instrument, de trillo, maar deze metingen laten een vrij grote interpretatieruimte open en zijn dus niet nauwkeurig [10,17].

De uiteindelijke afmetingen van de ontgrondingskuil, in drie dimensies, lijken van wezenlijk belang te zijn in een praktijksituatie. Zij bepalen mede de uiteindelijke afmetingen van het stroomgat en tevens de hoeveelheid materiaal die nodig is voor de sluiting van het stroomgat. Tevens lijkt het ontstaan van de ontgrondingskuil invloed te hebben op het debiet door de bres gedurende de doorbraak.

Het is daarom van belang dat er onderzoek gedaan wordt naar de ontwikkeling van de ontgrondingskuil.

Vergelijking van resultaten van eerdere laboratoriumproeven met die van de Zwin'89- en Zwin'94-experimenten toont aan dat het bresgroeiproces in laboratoriumsituatie op vergelijkbare wijze plaatsvindt als in het prototype. Het lijkt daarom verantwoord om de experimenten in een laboratorium uit te voeren. Het voordeel van modelonderzoek in een laboratorium boven metingen in een prototype is, dat het onderzoek uitgevoerd kan worden onafhankelijk van verstoringen door natuurlijke omstandigheden zoals weersinvloeden, getijden, etc. Ook heeft het laboratorium als voordeel dat er nauwkeuriger metingen kunnen worden gedaan, omdat de omstandigheden deels beter controleerbaar zijn.

2.3 Probleemstelling en doelstelling

Het bestaande model, dat het proces van bresgroei mathematisch beschrijft, is nog niet volledig. De ontwikkeling van de ontgrondingskuil die in de bres optreedt is nog onbekend, terwijl de uiteindelijke afmetingen van deze ontgrondingskuil van belang lijken te zijn in een praktijksituatie.

Dit afstudeerproject richt zich op het ontstaan en de ontwikkeling in ruimte en tijd van de ontgrondingskuil in het laatste stadium van de bresvorming. Het onderzoek beoogt het inzicht in het bresgroeiproces te vergroten, en tevens uit de onderzoeksresultaten een gegevensbestand voor het proces te genereren.

2.4 Wijze van aanpak

Het onderzoek heeft op experimentele wijze plaatsgevonden, door middel van laboratoriumproeven in een bassin van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TU Delft.

Eerst zijn de uitgevoerde experimenten voorbereid: er zijn keuzes gemaakt worden voor de afmetingen en geometrie van de te beproeven dijk, de plaats van de dijk in het proefbassin; er moest voorkomen worden dat het geërodeerde zand in het watercirculatiesysteem van het laboratorium terecht kwam; etc.

Vervolgens is een meetprogramma opgesteld: wat moest gemeten worden, op welke plaatsen, hoe, hoe vaak en waarmee?

Na afronding van het vooronderzoek, zodra het meetprogramma opgesteld, en het proefbassin beschikbaar was, kon begonnen worden met het uitvoeren van de proeven.

De meetresultaten hiervan zijn verzameld en geordend, zodat een dataset voor het bresgroeiproces is ontstaan. Aan de hand van deze gegevens wordt een beschrijving van de experimenten gegeven.

Met behulp van de gegevens kan in een later stadium, buiten het bereik van dit afstudeerproject, getracht worden de ontgrondingskuil te modelleren en het bresgroei-model daarmee uit te breiden.

3 Het proces van bresgroei

Het onderzoek naar bresgroei in Nederland is in 1986 begonnen met de studie door Visser, Ribberink en Kalkwijk [13] naar het bezwijken van een hoge dijk rond een bekken met een relatief hoge waterstand, ten behoeve van energieopwekking, een zogenaamde pomp accumulatie centrale. Deze studie staat bekend als de PAC-studie.

Vanaf 1991 is het onderzoek verder verricht voor de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), en toegespitst op zee- en rivierdijken.

De Nederlandse dijken zullen waarschijnlijk in de toekomst ontworpen worden op basis van een maatschappelijk aanvaard risico van inundatie van het achterland. De optredende schade in het achterliggende gebied wordt bepaald door het verloop van de inundatie. Om dit inundatieverloop te bepalen is het belangrijk te weten hoe het instromende debiet, en dus het stroomgat in de dijk zich ontwikkelt in de tijd.

3.1 Het onderzoek tot nu toe

In eerste instantie was de studie naar het proces van bresgroei, zoals gezegd, gericht op een hoge dijk rond een pomp-accumulatie-centrale (PAC-studie).

Dieteren en Pottinga [1] hebben in 1988 een uitgebreid literatuuronderzoek opgezet en alle factoren die van invloed zijn op het dijkdoorbraakproces geanalyseerd. Tevens hebben zij onderzoek gedaan naar de invloed van de geometrie van het dijklichaam.

In 1989 heeft Rijkswaterstaat een oriënterend experiment op prototypeschaal uitgevoerd in natuurgebied Het Zwin, in Zeeuws Vlaanderen. De meetresultaten hiervan zijn beperkt. Er is dan ook besloten tot de uitvoering van nog een praktijkproef, met een goed voorbereid meetprogramma.

In de periode 1991-1994 zijn laboratoriumproeven uitgevoerd en is een eerste versie van een mathematisch model gemaakt. Uit deze studies is duidelijk geworden dat het bresgroei-proces vijf verschillende fasen kent, zie Visser [15]. In het model wordt getracht voor elk van deze fasen een relatief eenvoudige beschrijving van het erosieproces te formuleren. Voor de eerste drie fasen is dit gelukt; het proces in de laatste twee fasen is nog niet voldoende nauwkeurig beschreven. Omdat laboratoriumonderzoek ook grote en dus kostbare faciliteiten vereist, en om de mogelijke schaafeffecten te onderzoeken, is in 1993 besloten tot de uitvoering van een tweede veldexperiment, uitgevoerd in 1994, weer in Het Zwin. De voorbereiding van dit tweede praktijkexperiment is uitgevoerd door Smit en Snip [9].

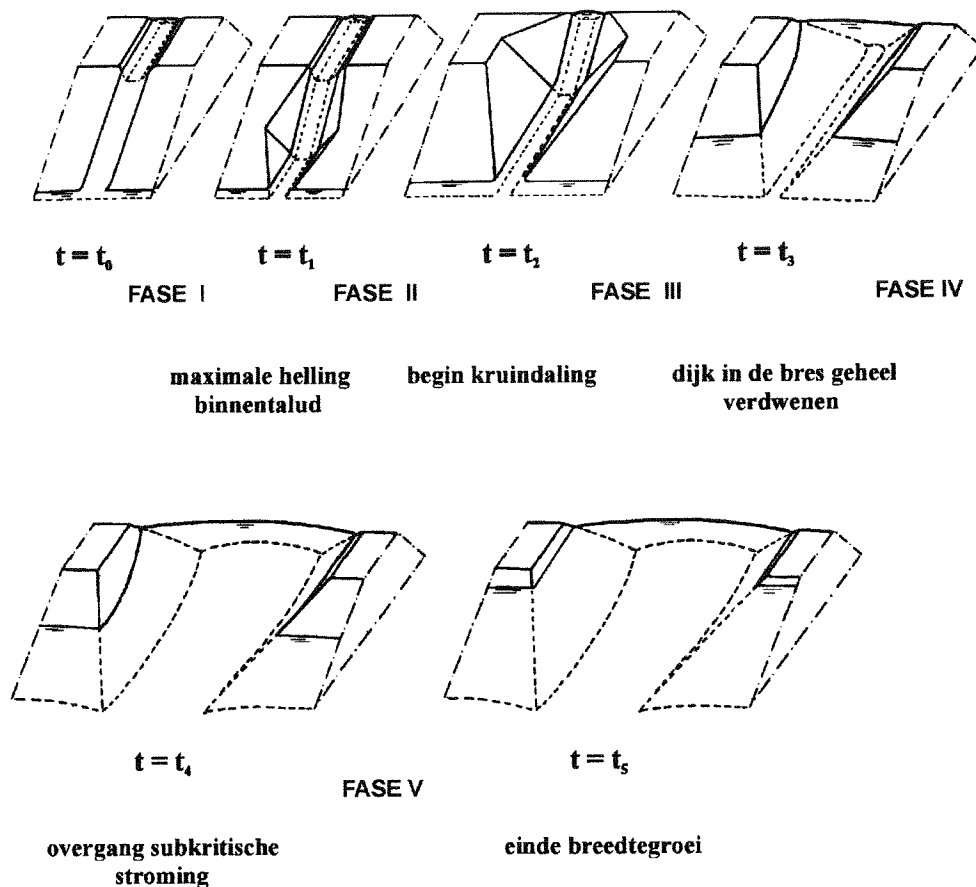
Het bresgroei-onderzoek is tot dusverre beperkt tot homogene zanddijken. Gezien het feit dat de huidige zee- en rivierdijken een forse zandkern hebben, lijkt deze beperking aanvaardbaar. In een later stadium, als het bresgroei-model voor zanddijken gecompleteerd is, kan de invloed van kleilagen in de dijkdoorsnede bestudeerd worden.

3.2 Het proces

Uitgangspunt van het bresgroeiproces is de aanwezigheid van een initiële bres, bestaande uit een geultje door de kruin van de dijk (zie figuur 3.1 [15]). Deze initiële bres kan op verschillende manieren ontstaan. De belangrijkste hiervan zijn:

- overstroming van de kruin;
- golfoverslag;
- afschuiving van het binnentalud;
- erosie van het buitentalud;
- inzakking van de dijk als gevolg van piping.

Welke van deze mogelijkheden tot de initiële bres geleid heeft is voor het proces van bresgroei niet interessant; het belangrijkste is dat er een initiële bres ontstaat. Afhankelijk van het opgetreden bezwijkmechanisme varieert de initiële bres in afmeting.



figuur 3.1: De overgangen tussen de vijf fasen van het bresgroeiproces volgens Visser [15]

Als de initiële bres is ontstaan zal er water door deze bres over de dijk gaan stromen. In eerste instantie zal een groot deel van het door de bres stromende water in het dijklichaam infiltreren, omdat de dijk nog niet met water verzadigd is.

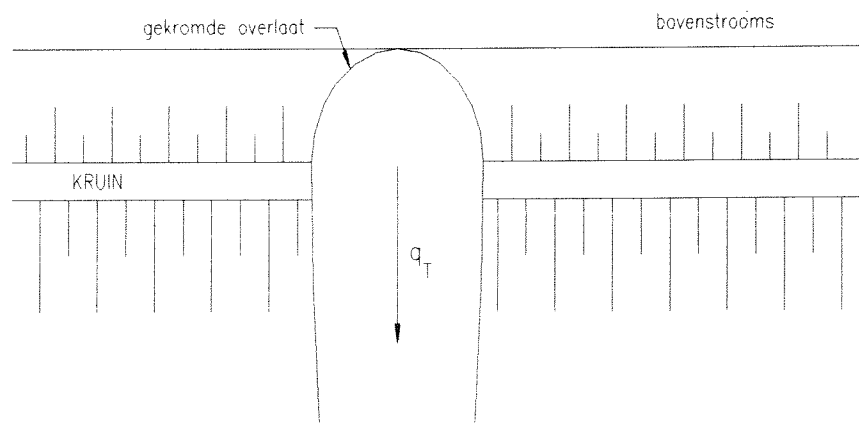
Het bresgroeiproces is door Visser [15] onderverdeeld in vijf stadia. Het begin van de doorbraak is gedefinieerd als het tijdstip waarop het water door de initiële bres over de kruin van de dijk gaat stromen. Dit is het tijdstip $t = t_0$. Ervan uitgaande dat de buitenwaterstand constant is en niet hoger wordt dan de kruin van de dijk, stroomt het water dus alleen door de initiële bres over de dijk en zal de doorbraak daar plaatsvinden. De vijf fasen zijn:

- Fase I** Versteiling van het binnentalud. Onder invloed van de zwaartekracht neemt de stroomsnelheid en de zandtransportcapaciteit langs het talud toe. De erosie aan de teen is daarom groter dan bovenaan het talud. Hierdoor wordt het talud steiler. Dit gaat door totdat, op tijdstip $t = t_1$, de maximale hellingshoek, de kritische waarde β_1 , is bereikt. Aangenomen wordt [15] dat deze kritische waarde gelijk is aan de hoek van inwendige wrijving van het bodemmateriaal.
- Fase II** Achteruitschijding van het binnentalud. Startpunt van deze fase is tijdstip $t = t_1$. De helling van het binnentalud blijft constant op de kritische waarde. De kruinbreedte in de bres neemt af. De geul wordt nu ook breder door het instorten van de zijwanden als gevolg van de ontgrondingen. De bres werkt als volkomen overlaat met superkritische stroming. Aan het einde van deze fase is de breedte van de kruin ter plaatse van de bres tot nul gereduceerd. Het terugschrijdende binnentalud heeft het buitentalud bereikt. Dit is tijdstip $t = t_2$.
- Fase III** Daling van de kruin. In deze fase, beginnend op $t = t_2$, neemt de breedte van de bres en het debiet door de bres toe. Als gevolg van het groter wordende debiet wordt het benedenstroomse talud van de dijk in de bres flauwer. Aan het einde van deze fase is de dijk in de bres volledig verdwenen, dit is tijdstip $t = t_3$.
- Fase IV** Doorgaande groei van het stroomgat. Nadat de dijk in de bres volledig verdwenen is blijft het stroomgat groeien in zowel verticale (ontgrondingskuil) als horizontale richting. De benedenstroomse waterstand neemt toe en aan het einde van deze fase ($t = t_4$) gaat de stroming over van superkritisch naar subkritisch. De afvoer wordt gestuwd. De duur van deze fase is ondermeer afhankelijk van de kombergingsoppervlakte.
- Fase V** Doorgaande breedtegroei met afnemende groeisnelheid. De stroming is in deze fase subkritisch. De groei van het stroomgat stopt op tijdstip $t = t_5$, wanneer de stroomsnelheid in de bres te klein geworden is om nog zand in beweging te brengen.

Het breedtegroeiproces is een discontinu proces. De erosie wordt in eerste instantie aangestuurd door de groei van de bres in de diepte. Als de dieptegroei is gestopt wordt de erosie van de zijtaluds veroorzaakt door de wrijving van de stroming langs de zijtaluds. Door deze wrijving wordt sediment getransporteerd. Hoger op het talud is de stroomsnelheid kleiner dan aan de teen van het talud, door de grotere bodemwrijving. De erosie aan de teen van het talud is daarom groter dan hoger op het zijtalud. Het talud wordt dus ondergraven door de stroming. Het wordt daardoor steeds steiler, totdat instabiliteit optreedt en het talud deels afschuift. Hierbij komt een hoeveelheid zand in de stroming terecht die eerst afgevoerd moet worden voordat de erosie van het talud verder gaat.

Als gevolg van dit discontinue breedtegroeiproces moet de initiële bres een voldoende grote beginbreedte krijgen. Als de beginbreedte te klein is kan het zijn dat de afschuivende zijtaluds de gehele initiële bres opvullen, zodat er geen water meer door de bres kan stromen en het doorbraakproces voortijdig stopt.

De erosie begint ter plaatse van de initiële bres en breidt zich in twee richtingen uit, zowel in breedterichting als in bovenstroomse richting (terugschrijding). In de as van de initiële bres is de erosie in beide richtingen het verst gevorderd. De bres vormt hierdoor een in het horizontale vlak gekromde overlaat, zie figuur 3.2. De kromming van de overlaat is afhankelijk van de verhouding tussen de breedte-erosie en de terugschrijding.



figuur 3.2: Beginstadium van de breedtegroei, met gekromde overlaat

De stroming over deze overlaat is in de eerste drie fasen van het bresgroeiproces ook in het verticale vlak sterk gekromd. Er treden langs de gekromde stroomlijnen onderdrukken op, zodat de taluds van de overlaat onder een grote hoek kunnen blijven staan, zelfs groter dan de hoek van inwendige wrijving.

De gekromde overlaat ontstaat in eerste instantie aan benedenstroomse zijde van de bres, en "wandelt" door de terugschrijding van de kruin van de dijk in bovenstroomse richting. Met deze terugschrijding wordt ook de breedte groter.

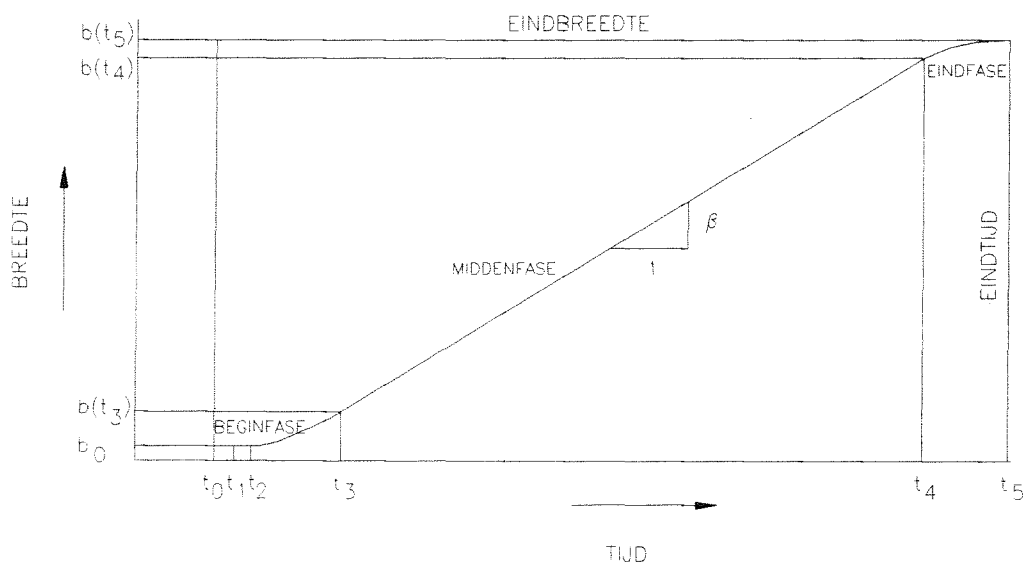
De groei van de bres in de breedte kan volgens Steetzel [11] onderverdeeld worden in drie stadia, zie figuur 3.3.

De aanloophase omvat de eerste drie fasen van het bresgroeiproces volgens Visser [15], zie pagina 11. In dit stadium neemt de breedtegroei toe van nul naar een constante waarde. De breedtegroei is gerelateerd aan de diepte van de bres: $b_T = r \cdot d_T$. Deze koppeling is reeds in 1986 door Visser et al. [13] vastgesteld. Zij vonden voor de evenredigheidsconstante r , bij een maximale helling van de zijtaluds gelijk aan de hoek van natuurlijk talud ($\phi \approx 32^\circ$), een waarde $r \approx 2.2$ [13].

Deze fase duurt slechts kort in vergelijking tot het gehele proces. Omdat het totaal instromende debiet de optredende komberging in deze fase zeer klein is, en daardoor de invloed op het gehele proces, kan deze fase volgens Steetzel [11] buiten beschouwing blijven.

In de middenfase is de breedtegroei constant, en gelijk aan waarde aan het einde van de aanloophase. Deze fase komt overeen met de vierde fase van het bresgroeiproces volgens Visser [15].

De eindfase van Steetzel toont een tot nul afnemende breedtegroei. Dit komt overeen met fase V van het bresgroeiproces, waarin de stroming subkritisch wordt en de snelheid in het stroomgat afneemt naar nul.



figuur 3.3: Schematisering van de breedtegroei volgens Steetzel [11]

4 Het bresgroeimodel

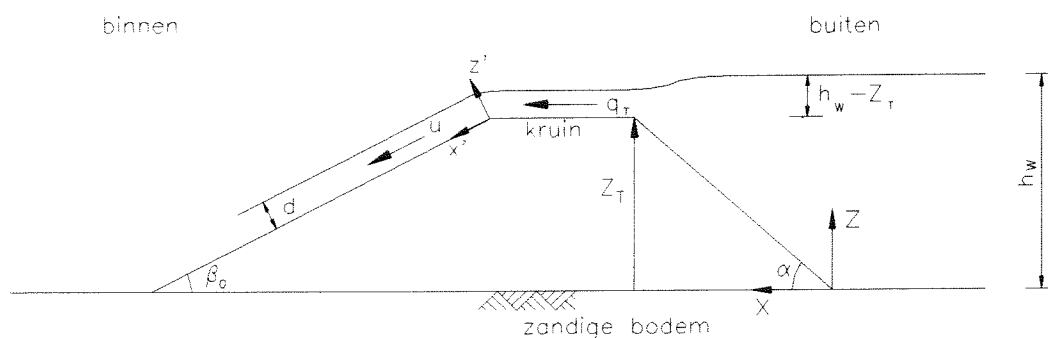
Het bresgroeimodel omvat tot nu toe de fasen I tot en met IV van het bresgroeiproces, zoals dat in hoofdstuk 3 is beschreven. Bij de ontwikkeling van het model is het van belang zicht te hebben op het zandtransport tijdens de bresgroei, het debiet door de bres, de erosie van het binnentalud en het gedrag van de kruin. In dit hoofdstuk wordt het bestaande model, zoals dat is ontwikkeld van 1986 tot heden, besproken. De hierin gegeven omschrijving is ontleend aan Visser [15].

4.1 Het dijklichaam

Uitgangspunt voor de systeembenadering is een uit zand opgebouwd dijklichaam met zowel binnen- als buitendijks een uit hetzelfde soort zand bestaand achter-, respectievelijk voorland. Onderstaande figuur (figuur 4.1) geeft een doorsnede van het te hanteren zandlichaam. Deze doorsnede ligt langs de as van de initiële bres in de beginfase van het doorbraakproces. Het bestaande model gaat uit van een constante buitenwaterstand h_w , dus zonder getij of golven.

In de beschrijving van het model wordt gewerkt met twee coördinatenstelsels, een lokaal stelsel (x', z') en een globaal stelsel (x, y, z). Deze afzonderlijke stelsels worden gehanteerd om in een later stadium, bij de beschrijving van de experimenten, verwarring te voorkomen. De x' -as van het stelsel (x', z'), dat gehanteerd wordt voor de beschrijving van de erosie van het dijklichaam, ligt langs het binnentalud, met $x' = 0$ aan de kruin, en de z' -as staat loodrecht daarop. Dit coördinatenstelsel (x', z') wordt per fase van het bresgroeiproces aangepast aan de beginsituatie van die fase. Op deze wijze kan de erosie van het talud worden uitgedrukt ten opzichte van de beginsituatie van de betreffende fase.

Van het globale stelsel (x, y, z) ligt de oorsprong aan de buitenteen van de dijk, met de positieve x -as in benedenstroomse richting, de y -as langs de buitenteen en de positieve z -as loodrecht omhoog.



figuur 4.1: Kenmerkende doorsnede van een homogene zanddijk ter plaatse van de initiële bres met situering van de coördinatenstelsels

In deze figuur is:

- α, β_0 hellingshoek van resp. buiten- en binnentalud [$^\circ$];
- d dikte van de laag water op het binnentalud, gemeten in z' -richting [m];
- h_w buitenwaterstand t.o.v. maaiveld ($z = 0$) [m];
- q_T specifiek debiet door de bres [m^2/s];
- u stroomsnelheid op binnentalud [m/s];
- Z_T kruinhoogte in de bres t.o.v. maaiveld ($z = 0$) [m].

4.2 Het debiet door de bres

Tijdens de eerste vier fasen van het bresgroeiproces is de stroming door de bres ongestuwd en fungeert de bres als een volkomen overlaat. Het specifieke debiet q_T door de bres over de kruin, voor de fasen I t/m IV, wordt beschreven door de formule van de volkomen overlaat:

$$q_T = m \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{g} \cdot (h_w - Z_T)^{\frac{3}{2}}$$

In plaats van de bovenstroomse waterstand h_w dient eigenlijk H_w , de bovenstroomse energiehoopte, gebruikt te worden. Hiervoor geldt:

$$H_w = h_w + \frac{u_w^2}{2g}$$

Omdat de bovenstroomse stroomsnelheid u_w niet bekend is, wordt het debiet benaderd door h_w te gebruiken. Ver genoeg bovenstrooms van de bres is de stroomsnelheid te verwaarlozen en geldt: $H_w \approx h_w$.

Deze formule voor het debiet geldt zolang de stroming door de bres ongestuwd is. Dat wil zeggen, zolang de stroming niet beïnvloed wordt door de benedenstroomse waterstand.

In fase V is de benedenstroomse waterstand dusdanig ver gestegen dat de stroming subkritisch wordt. Er geldt: $h_{kom} \geq 2/3 h_w$. Het debiet door de bres wordt bepaald door de benedenstroomse waterstand en het waterstandsverschil:

$$q_T = h_{kom} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_w - h_{kom})}$$

Ook hier wordt het debiet aangestuurd door het verschil in energiehoopte over de bres zodat eigenlijk de bovenstroomse energiehoopte moet worden gebruikt en niet de waterstand.

Beide formules voor het debiet gelden per eenheid van breedte, in een tweedimensionale stroming. De stroming door de bres is duidelijk driedimensionaal van karakter, door de convergentie van de stroming. Dit driedimensionale karakter van de stroming is echter moeilijk in een formule te vatten. Daarom worden bovenstaande formules gebruikt voor de berekening van het debiet door de bres.

4.3 Opname en transport van zand.

De keuze van zand als materiaal voor het dijklichaam betekent dat tijdens de doorbraak een nadrukkelijk zandtransport ontstaat, waarop een zandtransportformule van toepassing moet worden verklaard.

Uit de verscheidenheid aan beschikbare zandtransportformules moet er derhalve één gekozen worden die toepasbaar is op het bresgroeiproces. Kenmerk van deze formules is hun beperkte theoretische basis. De coëfficiënten en exponenten in de formules zijn vaak bepaald aan de hand van meetresultaten. Hierdoor is het toepassingsgebied begrensd en de nauwkeurigheid beperkt.

In het bresgroeimodel wordt gebruik gemaakt van de methode van Bagnold, met een aanpassing door Visser [15]. Bagnold bepaalt het sedimenttransport aan de hand van het door de stroming geproduceerde vermogen. Zo is het transport direct gerelateerd aan de stroomsnelheid en worden irreële uitkomsten voorkomen, doordat er in het model niet meer vermogen voor het transport aangewend wordt dan er feitelijk door de stroming geleverd kan worden. Dieteren en Pottinga [1] onderschrijven de keuze voor deze methode. Zij hebben proeven uitgevoerd waarbij verschillende zandtransportformules getoetst zijn aan gemeten zandtransporten.

Ook de gegevens van het Zwin'89-experiment en de proeven van Visser en Steetzel in 1992 tonen aan dat de methode van Bagnold verreweg de beste resultaten geeft van een vijftiental geteste transportformules [16].

4.3.1 Zandtransport volgens Bagnold

De methode van Bagnold bevat uitdrukkingen voor de bodemtransportcapaciteit s_b en de suspensietransportcapaciteit s_s . Het bodemtransport treedt op dicht langs de bodem, in een dunne laag met een dikte van enkele malen de diameter van het bodemmateriaal.

De formules van Bagnold voor de bodemtransportcapaciteit en de suspensietransportcapaciteit zijn afgeleid voor een evenwichtstransport van bodemmateriaal, dat wil zeggen voor een stationaire situatie op een hellende bodem met een lokaal evenwicht tussen erosie en sedimentatie.

Het sedimenttransport wordt uitgedrukt in het door de stroming geleverde vermogen per eenheid van bodemoppervlakte. Dit vermogen is gelijk aan de in de stroming gedissipeerde energie ω per eenheid van oppervlakte en per eenheid van tijd.

Voor een uniforme stroming met waterdiepte d , een logaritmisch verloop in z' -richting van de snelheid $u(z')$ langs de helling en een gemiddelde bodemschuifspanning τ_b :

$$\tau_b = C_f \cdot \rho \cdot U^2$$

waarin U de dieptegemiddelde snelheid:

$$U = \frac{1}{d} \cdot \int_0^d u(z') dz'$$

is deze energie gelijk aan:

$$\omega = C_f \cdot \rho \cdot U^3$$

Hierin is C_f de dimensieloze wrijvingscoëfficiënt en ρ de dichtheid van het water.

4.3.1.1 De bodemtransportcapaciteit s_b

De bodemtransportcapaciteit geeft de maximale hoeveelheid sediment aan die door de stroming per eenheid van breedte als bodemtransport kan worden getransporteerd. De capaciteit wordt door Bagnold uitgedrukt in het door de stroming geleverde vermogen en is daarnaast afhankelijk van de bodemhelling en de hoek van natuurlijk talud van het bodemmateriaal.

Bagnold beschouwt een kolom water in een stroming op een helling met hoek β . De hoogte van de kolom is loodrecht op het talud gelijk aan de waterdiepte d ; de lengte en breedte van de kolom zijn gelijk aan de lengte-eenheid. G_b is het ondergedompelde gewicht van dat gedeelte van het sediment in de kolom dat als bodemtransport wordt getransporteerd.

De verrichte arbeid per eenheid van oppervlakte en per eenheid van tijd V_b is gelijk aan het product van de kracht F_b die door de stroming op het langs de bodem bewegende sediment wordt uitgeoefend en de snelheid waarmee het sediment beweegt u_b , en wordt tevens gelijkgesteld aan een fractie e_b van ω :

$$V_b = e_b \cdot \omega = F_b \cdot u_b = (G_b \cdot \cos \beta \cdot \tan \phi - G_b \cdot \sin \beta) \cdot u_b$$

Hierin is ϕ hoek van natuurlijk talud van het bodemmateriaal [$^\circ$].

De efficiëntiefactor e_b geeft aan welk deel van het door de stroming geleverde vermogen gebruikt wordt voor het bodemtransport. Bagnold stelt $e_b = 0.13$.

Bagnold definieert de bodemtransportcapaciteit s_b als:

$$s_b = (G_b \cdot \cos \beta) \cdot u_b = \frac{e_b \cdot \omega}{\tan \phi - \tan \beta} \quad [s_b] = \frac{N}{ms}$$

Na invullen van ω en het gewicht van 1 m^3 zand onder water gelijk aan $(1-p)(\rho_s-p)g$ levert dit:

$$s_b = \frac{e_b \cdot C_f}{\tan \phi - \tan \beta} \cdot \frac{U^3}{(1-p) \cdot \Delta \cdot g} \quad [s_b] = \frac{m^3}{s \cdot m}$$

Met deze laatste uitdrukking wordt de bodemtransportcapaciteit s_b uitgedrukt in volume-eenheden per tijdseenheid en per eenheid van bresbreedte ($m^3/s/m$). De transportcapaciteit s_b geeft in deze uitdrukking het bulktransport weer, dat is inclusief de poriën van het bodemmateriaal

4.3.1.2 De suspensietransportcapaciteit s_s

De suspensietransportcapaciteit s_s geeft de maximale hoeveelheid sediment aan die door de stroming in suspensie kan worden getransporteerd. Naast het door de stroming geleverde vermogen, de bodemhelling en de hoek van natuurlijk talud is de suspensietransportcapaciteit nog afhankelijk van de valsnelheid van het sediment.

Voor het suspensietransport zet Bagnold een soortgelijke beschouwing op als voor het bodemtransport. Hij gaat uit van dezelfde kolom water. G_s is nu het ondergedompelde gewicht van dat gedeelte van het sediment in de kolom dat in suspensie getransporteerd wordt. Het vermogen P , benodigd om de korrels in suspensie te houden is:

$$P = (G_s \cdot \cos \beta) \cdot w_s$$

Hierin is w_s de valsnelheid van de korrels ten opzichte van het omringende water.

Bij suspensietransport in een stroming evenwijdig aan de bodem komt een hoeveelheid energie vrij die gelijk is aan:

$$(G_s \cdot \sin \beta) \cdot u_s$$

De arbeid V_s die per eenheid van tijd en per eenheid van oppervlakte door de turbulente stroming aan het suspensietransport verricht wordt, is gelijk aan:

$$V_s = e_s \cdot \omega = (G_s \cdot \cos \beta) \cdot w_s - (G_s \cdot \sin \beta) \cdot u_s$$

Analoog aan e_b voor het bodemtransport, geeft de efficiëntiefactor e_s aan welk gedeelte van het door de stroming geleverde vermogen gebruikt wordt voor het suspensietransport. Bagnold stelt $e_s = 0.01$.

Bagnold neemt aan dat de korrels in suspensie dezelfde snelheid hebben als de omringende vloeistof, dus $u_s = U$. Hij stelt dan voor de suspensietransportcapaciteit s_s :

$$s_s = (G_s \cdot \cos \beta) \cdot U = \frac{e_s \cdot \omega}{\frac{w_s}{U} - \tan \beta} \quad [s_b] = \frac{N}{ms}$$

Na invullen van ω en het gewicht van 1 m^3 zand onder water gelijk aan $(1-p)(\rho_s-p)g$ levert dit:

$$s_s = \frac{e_s \cdot C_f}{\frac{w_s}{U} - \tan \beta} \cdot \frac{U^3}{(1-p) \cdot \Delta \cdot g} \quad [s_b] = \frac{m^3}{s \cdot m}$$

Ook de suspensietransportcapaciteit s_s wordt hiermee uitgedrukt in volume-eenheden per tijdseenheid en per eenheid van bresbreedte ($m^3/s/m$). De uitdrukking geeft het bulktransport, dat is inclusief de poriën van het bodemmateriaal.

4.3.2 Zandtransport volgens de methode van Bagnold-Visser

In de PAC-studie [13] is gewerkt met een enigszins aangepaste Bagnold-formule voor het zandtransport.

Het bodemtransport wordt hier gedefinieerd zonder de term $\cos\beta$. Dit leidt tot:

$$s_b = G_b \cdot u_b$$

Het is dus de massa G_b/g , met het gewicht G_b , die getransporteerd wordt, en niet de gewichtcomponent ($G_b \cdot \cos\beta$).

Voor de bodemtransportcapaciteit volgt dan:

$$s_b = \frac{e_b \cdot C_f}{(\tan\phi - \tan\beta) \cdot \cos\beta} \cdot \frac{U^3}{(1-p) \cdot \Delta \cdot g}$$

Het suspensietransport wordt gedefinieerd als: $s_s = G_s \cdot u_s$

Het benodigde vermogen om de korrels in suspensie te houden wordt, in afwijking van de methode van Bagnold, gesteld op:

$$P = e_s \cdot \omega = (G_s \cdot \cos\beta) \cdot w_s \cdot \cos\beta$$

De vrijkomende hoeveelheid energie bij suspensietransport in een stroming evenwijdig aan de bodem, groot $(G_s \cdot \sin\beta) \cdot u_s$, wordt hier niet van belang geacht voor het in suspensie houden van deeltjes.

Er volgt dan voor de suspensietransportcapaciteit:

$$s_s = \frac{e_s \cdot C_f}{\frac{w_s}{U} \cdot \cos^2\beta} \cdot \frac{U^3}{(1-p) \cdot \Delta \cdot g} = \frac{e_s \cdot C_f \cdot U^4}{(1-p) \cdot \Delta \cdot g \cdot w_s \cdot \cos^2\beta}$$

Het elementaire verschil tussen de methode van Bagnold en de aangepaste methode van Bagnold-Visser, zoals die in de PAC-studie gebruikt is, ligt in het weglaten van de term $(G_s \cdot \sin\beta) \cdot u_s$ in de energiebeschouwing. Het effect hiervan komt vooral tot uiting in geval van relatief steile hellingen. Bagnold geeft voor een helling met $\tan\beta = w_s/U$ een oneindig groot suspensietransport terwijl in de formule van Bagnold-Visser het transport nog beperkt blijft.

4.3.3 De opname van zand

In deze paragraaf wordt een beschrijving gegeven van de opname van zand in suspensie in een tweedimensionale situatie, per eenheid van breedte. De kruin van de dijk werkt als een overlaat, de stroming er over is kritisch. Op het binnentalud is de stroming superkritisch, en versneld onder invloed van de zwaartekracht tot op een afstand l_c vanaf de kruin.

Voor de waterdiepte op het binnentalud geldt de vergelijking van Bélanger. Deze luidt in tweedimensionale vorm:

$$\frac{dd}{dx'} = \frac{d^3 - d_e^3}{d^3 - d_g^3} \cdot \sin \beta$$

Hierin is d_g de grensdiepte voor de stroming en d_e de evenwichtsdiepte, waarvoor geldt:

$$d_g = \sqrt[3]{\frac{q_T^2}{g}}$$

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{q_T^2 \cdot C_f}{g \cdot \sin \beta}}$$

Aan de kruin ($x' = 0$) is de stroming kritisch en geldt dus $d(0) = d_0 = d_g$.

Voor kleine afwijkingen van de evenwichtsdiepte, dus $d \approx d_e$, geldt:

$$d^3 - d_e^3 = (d - d_e) \cdot (d^2 + d \cdot d_e + d_e^2) \approx 3d_e^2 \cdot (d - d_e)$$

$$d^3 - d_g^3 \approx d_e^3 - d_g^3$$

Ingevuld in de vergelijking van Bélanger geeft dit:

$$\frac{dd}{dx'} = \frac{3 \cdot (d_e - d)}{\lambda}$$

waarin:

$$\lambda = \frac{d_g^3 - d_e^3}{d_e^2 \cdot \sin \beta}$$

Integratie van deze vergelijking geeft, met als randvoorwaarde $d = d_0$ als $x' = 0$:

$$d - d_e = [d_0 - d_e] \cdot e^{\frac{-3x'}{\lambda}}$$

De grootte λ is een kenmerkende lengte van dit type verhanglijn; voor $x' = \lambda$ is de afwijking $d - d_e$ ongeveer 5% van de afwijking $d_0 - d_e$ op $x' = 0$.

Visser [15] stelt de z.g. aanpassingslengte gelijk aan $l_e = 1.5 \cdot \lambda$. Op deze afstand is de afwijking tussen de werkelijke diepte en de evenwichtsdiepte nog circa 1% van het verschil op $x' = 0$.

Op $x' = l_e$ bereikt de stroming de evenwichtsstroomsnelheid u_e :

$$u_e = \sqrt{\frac{g \cdot d_e \cdot \sin \beta}{C_f}}$$

Voor de aanpassingslengte l_e van de stroming geldt:

$$l_e = \frac{d_g^3 - d_e^3}{d_e^2 \cdot \sin \beta}$$

Voor de diepte d tussen $x' = 0$ en $x' = l_e$ volgt nu:

$$d(x') = d_e + (d_g - d_e) \cdot e^{\frac{-3x'}{l_e}} = d_e + (d_g - d_e) \cdot e^{\frac{-4.5x'}{l_e}}$$

Voor $x' > l_e$ geldt $d(x') = d_e$.

Het bodemtransport treedt op dicht langs de bodem, in een laag water met een dikte van enkele malen de D_{90} van het bodemmateriaal. Het suspensietransport treedt op over de gehele diepte.

Bij aanstroming van schoon water, zonder sediment, is vrijwel direct de bodemtransportcapaciteit bereikt, terwijl het suspensietransport pas na een afstand l_a zijn maximum, de suspensietransportcapaciteit bereikt.

Uit de laboratoriumproeven van de PAC-studie [13] en van Dieteren en Pottinga [1], en uit de veldmetingen in Het Zwin [17] is gebleken dat het zandtransport op de kruin te verwaarlozen is ten opzichte van het transport op het binnentalud. De opname van zand begint dus bovenaan het binnentalud, vlak onder de kruin, op $x' = 0$. De suspensietransportcapaciteit wordt bereikt op $x' = l_a$, de aanpassingslengte van het sedimenttransport.

De aanpassingslengte van het suspensietransport l_a is altijd groter dan de aanpassingslengte l_e voor het bereiken van een evenwichtsstroming, vanwege het aanpassingsproces van het suspensietransport aan de stromingssituatie en de daarbij behorende transportcapaciteit.

Voor de aanpassingslengte l_a geldt:

$$l_a = \frac{u \cdot d}{w_s \cdot \cos \beta} = \frac{q_T}{w_s \cdot \cos \beta}$$

Voor grote waarden van u/w_s is het suspensietransport veel groter dan het bodemtransport en kan het bodemtransport derhalve verwaarloosd worden. De opname van zand in suspensie kan volgens Galappatti en Vreugdenhil benaderd worden met [15]:

$$s(x') = \frac{x'}{l_a} \cdot s_s \quad (0 \leq x' \leq l_a)$$

Deze formule beschrijft, samen met de uitdrukking van Bagnold-Visser voor het suspensietransport s_s het zandtransport op het binnentalud.

De hoeveelheid in suspensie getransporteerd zand neemt dus lineair toe van nul op $x' = 0$ tot de suspensietransportcapaciteit s_s op $x' = l_a$, de aanpassingslengte van het sedimenttransport.

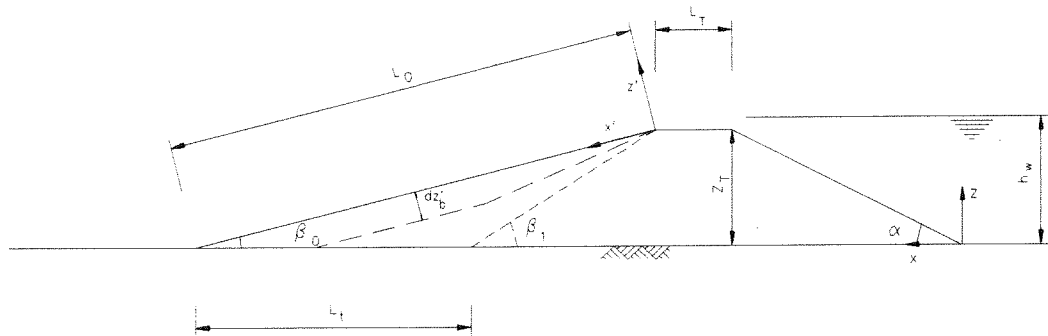
4.4 Erosie van het binnentalud - fase I

In fase I neemt de helling van het binnentalud, onder invloed van de versnellende stroming over het talud, toe van de beginwaarde β_0 tot de kritische waarde β_1 .

De behoudsvergelijking voor het sediment van het binnentalud is:

$$\frac{\partial z'_b}{\partial t} + \frac{\partial s(x')}{\partial x'} = 0$$

Hierin is z'_b de plaatscoördinaat van de bodem ten opzichte van de situatie op $t = t_0$, aan het begin van fase I. Gedurende fase I ligt het lokale coördinatenstelsel (x', z') vast, met de oorsprong op het oorspronkelijke binnentalud, aan de kruin van de dijk, de x' -as langs het oorspronkelijke binnentalud en de z' -as loodrecht erop, zie figuur 4.2.



figuur 4.2: Fase I - Taludversteiling

Substitueren van $s(x')$ en s_s geeft, onder aanname dat de wrijvingscoëfficiënt C_f constant is:

$$\frac{\partial z'_b}{\partial t} = - \frac{e_s \cdot C_f}{(1-p) \cdot \Delta \cdot g} \cdot \frac{\partial}{\partial x'} \left\{ \frac{x' \cdot U^4}{q_T \cdot \cos \beta} \right\} \quad \text{voor } 0 \leq x' \leq l_s$$

Als q_T constant is, zoals in het model wordt verondersteld, en als $0 < \cos \beta < 1$, dan volgt hieruit, omdat de snelheid langs het talud toeneemt tot $x' = l_e$:

$$\frac{\partial}{\partial x'} \left| \frac{\partial z'_b}{\partial t} \right| > 0 \quad \text{voor } 0 \leq x' \leq l_e$$

De erosie van het binnentalud neemt dus toe in positieve x' -richting, langs het talud. Het binnentalud wordt daardoor steiler voor toenemende x' .

Op $x' = l_e$ bereikt de stroomsnelheid de evenwichtswaarde u_e voor uniforme stromen:

$$u_e = \sqrt[3]{\frac{g \cdot q_T \cdot \sin \beta}{C_f}}$$

Substitueren van de uitdrukkingen voor u_e en s_s in de transportformule voor $s(x')$ levert:

$$\frac{\partial z'_b}{\partial t} = - \frac{e_s}{(1-p) \cdot \Delta} \cdot \frac{\partial}{\partial x'} (x' \cdot u_e \cdot \tan \beta) \quad \text{voor } x' \geq l_e$$

Voor constante q_T en β (en dus constante u_e) is de erosie van het binnentalud constant voor deze waarden van x' :

$$\frac{\partial}{\partial x'} \left| \frac{\partial z'_b}{\partial t} \right| = 0 \quad \text{voor } x' \geq l_e$$

Het binnentalud wordt dus steiler voor $0 \leq x' < l_e$; voor $x' > l_e$ is de taludhoek constant. Voor de kritische waarde β_1 van de taludhelling wordt de hoek van inwendige wrijving ϕ van het bodemmateriaal aangenomen [15]. Deze hoek wordt bereikt op $t = t_1$, het begin van fase II (zie figuur 4.2).

Een analytische oplossing voor fase I is mogelijk op het traject $l_e \leq x' \leq l_a$, waar de erosie van het talud constant is. In de PAC-studie [13] wordt ervan uitgegaan dat $l_a > L_0$ (de lengte van het binnentalud op t_0). De horizontale verplaatsing L_t van de teen van het binnentalud kan worden uitgedrukt in de erosie dz'_b :

$$\frac{dL_t}{dt} = \frac{1}{\sin \beta_0} \cdot \frac{dz'_b}{dt} = -k_0 \cdot \sqrt{g \cdot (h_w - Z_{T,0})}$$

$$k_0 = \frac{e_s \cdot \sqrt{\frac{2}{3}}}{(1-p) \cdot \Delta} \cdot m^{\frac{1}{3}} \cdot C_f^{-\frac{1}{3}} \cdot \frac{(\sin \beta_0)^{\frac{1}{3}}}{\cos \beta_0}$$

Integratie van deze vergelijking geeft de tijdsduur van fase I:

$$t_1 - t_0 = \frac{L_t}{k_0 \cdot \sqrt{g \cdot (h_w - Z_{T,0})}}$$

In fase I groeit de bres op de kruin vrijwel niet in breedterichting. Op het binnentalud wordt de stroomgeul door instorting van de zijwanden wel breder, maar het doorstroomoppervlak over de kruin blijft bij benadering gelijk.

4.5 Versmalling van de kruin - fase II

In fase II van het bresgroeiproces is de taludhelling van het binnentalud constant op de kritische waarde β_1 . De kruinbreedte wordt nu kleiner doordat de bres zich achterwaarts door het dijklichaam vreet (zie figuur 3.1).

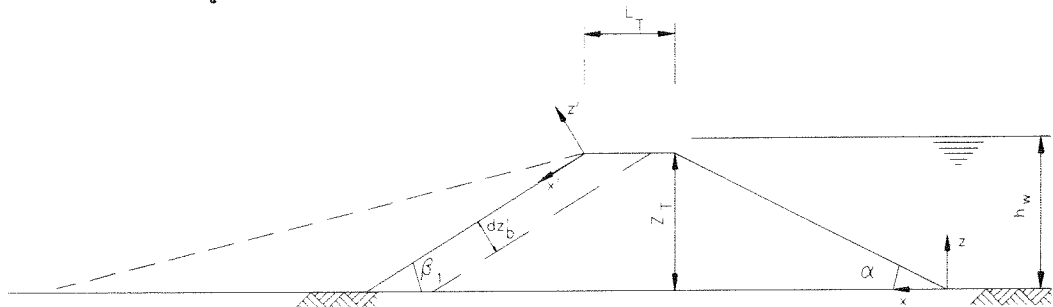
Op het tijdstip $t = t_1$ bereikt het binnentalud de maximale hellingshoek $\beta_1 = \phi$; de hoek van natuurlijk talud van het bodemmateriaal (zie figuur 4.3). Het talud is bij deze helling in dynamisch evenwicht.

Voor $t \geq t_1$ wordt de erosie van het binnentalud voor $0 \leq x' \leq l_a$ constant. De erosie in deze fase wordt dus volledig bepaald door de erosie van de teen van het binnentalud ($x' = L_1$). Uitgaande van de behoudsvergelijking voor het sediment

$$\frac{\partial z'_b}{\partial t} + \frac{\partial s(x')}{\partial x'} = 0$$

en met substitutie van $s(x')$ en $x' = L_1$ wordt de uitdrukking voor de erosie van het binnentalud in fase II:

$$-L_1 \cdot \frac{dz'_b}{dt} = \frac{L_1}{l_a} \cdot s_s(L_1)$$



figuur 4.3: Fase II - Kruinversmalling

Substitutie van de formule van Bagnold-Visser voor het suspensietransport, $\beta = \beta_1$ en $u = u_e$ en de uitdrukking voor l_a geeft:

$$\frac{dz'_b}{dt} = -\frac{e_s}{(1-p) \cdot \Delta} \cdot u_e \cdot \tan \beta_1 \quad \text{voor } 0 \leq x' \leq L_1$$

De relatie tussen de versmalling van de kruin en de erosie van het talud is:

$$\frac{dL_T}{dt} = \frac{1}{\sin \beta_1} \cdot \frac{dz'_b}{dt} = -k_1 \cdot \sqrt{g \cdot (h_w - Z_{T,0})} \quad \text{voor } t_1 \leq t \leq t_2$$

$$k_1 = \frac{e_s \cdot \sqrt{\frac{2}{3}}}{(1-p) \cdot \Delta} \cdot m^{\frac{1}{3}} \cdot C_f^{-\frac{1}{3}} \cdot \frac{(\sin \beta_1)^{\frac{1}{3}}}{\cos \beta_1}$$

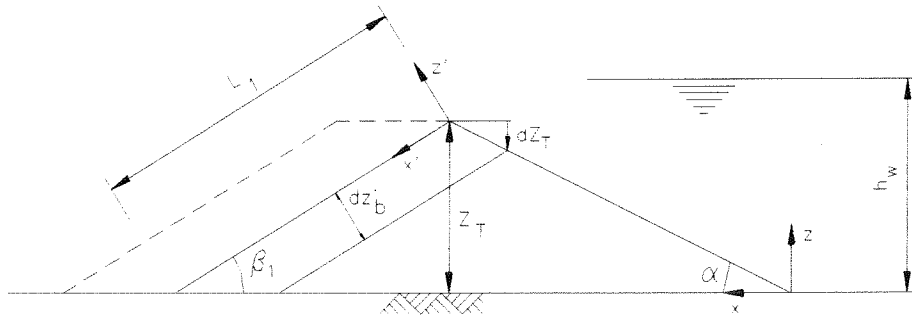
De duur van fase II volgt uit integratie van bovenstaande vergelijking:

$$t_{II} = t_2 - t_1 = \frac{L_T}{k_1 \cdot \sqrt{g \cdot (h_w - Z_{T,0})}}$$

De breedtegroei in fase II is minimaal. Dit komt door de lineariteit tussen de breedtegroei en de dieptegroei [13]. De breedte begint door deze lineariteit pas toe te nemen als de bres een bepaalde diepte heeft bereikt, gelijk aan $d_T = b_{T,0} / r$, met r de lineariteitsconstante. Dit is pas het geval in fase III.

4.6 Verlaging van de kruin - fase III

Fase III begint op het moment dat de kruinbreedte tot nul gereduceerd is, zie figuur 3.1. Het erosieproces is hetzelfde als in fase II: het binnentalud staat onder de maximale helling en de erosie van het talud wordt bepaald door de erosie aan de binnenteen. Doordat het erosieproces voortgaat wordt nu de kruinhoogte kleiner (zie figuur 4.4).



figuur 4.4: Fase III - Kruindaling

De relatie tussen de daling van de kruin en de erosie van het binnentalud is:

$$\frac{dZ_T}{dt} = \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta_1)} \cdot \frac{dz'_b}{dt} = -f_2 \cdot k_2 \cdot \sqrt{g \cdot (h_w - Z_T)} \quad \text{voort } t_2 \leq t \leq t_3$$

$$k_2 = \frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta_1}{\sin(\alpha + \beta_1)} \cdot k_1$$

Integratie geeft, met $Z_T = 0$ op $t = t_3$:

$$Z_{T,III}(t) = h_w - \left[\frac{1}{2} \cdot f_2 \cdot k_2 \cdot \sqrt{g} \cdot (t - t_3) + \sqrt{h_w} \right]^2 \quad \text{voort } t_2 \leq t \leq t_3$$

Hierin is f_2 de vertragsfactor voor de dieptegroei als gevolg van de breedtegroei. Doordat de breedtegroei discontinu verloopt, komen er grote hoeveelheden zand tegelijk van het zijtalud in de stroming terecht. Dit zand moet eerst afgevoerd worden voordat de dieptegroei verder kan gaan. Visser [15] stelt voor de vertragsfactor f_2 :

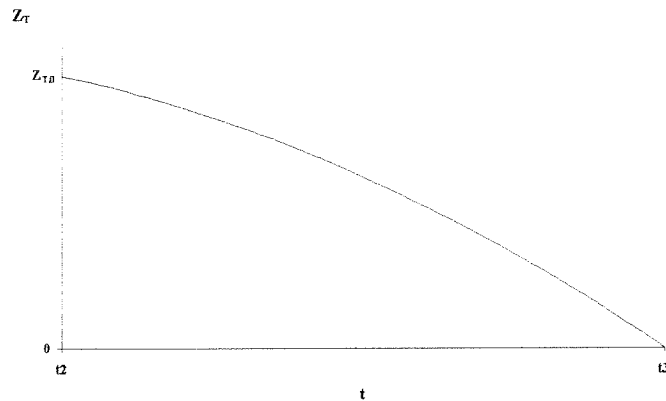
$$f_2 = \frac{b_T + 2d_T}{2b_T}$$

Hierin is:

b_T de bresbreedte en

$d_T = \frac{q_T}{u_c}$ de diepte in de bres.

Het verloop van de kruindaling, volgens bovenstaande relatie, is gegeven in figuur 4.5.



figuur 4.5: Kruindaling in fase III

Substitutie van $Z_T = Z_{T,0}$ op $t = t_2$ in de formule voor de kruindaling $Z_T(t)$ geeft de tijdsduur van fase III:

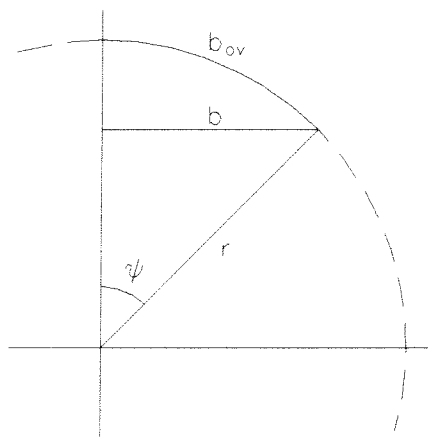
$$t_{III} = t_3 - t_2 = \frac{2}{f_2 \cdot k_2} \cdot \left[\sqrt{\frac{h_w}{g}} - \sqrt{\frac{h_w - Z_{T,0}}{g}} \right] \approx \frac{2}{f_2 \cdot k_2} \cdot \sqrt{\frac{h_w}{g}}$$

In fase III begint de bres te groeien in breedterichting. Deze breedtegroei verloopt lineair met de diepte in de bres [13], volgens de relatie:

$$b_T(t) = r \cdot d_T = r \cdot [h_w - Z_T(t)]$$

waarin r een evenredigheidsconstante, $r \approx 2,2$ [13].

In fase III treedt een cirkelvormige overlaat op, doordat de bresgroei in de as van de initiële bres het verst gevorderd is. De breedte waarover het specifiek debiet door de bres stroomt, is daardoor groter dan de bresbreedte, zie figuur 4.6.



figuur 4.6: Principe van een cirkelsegment voor de breedte van de overlaat

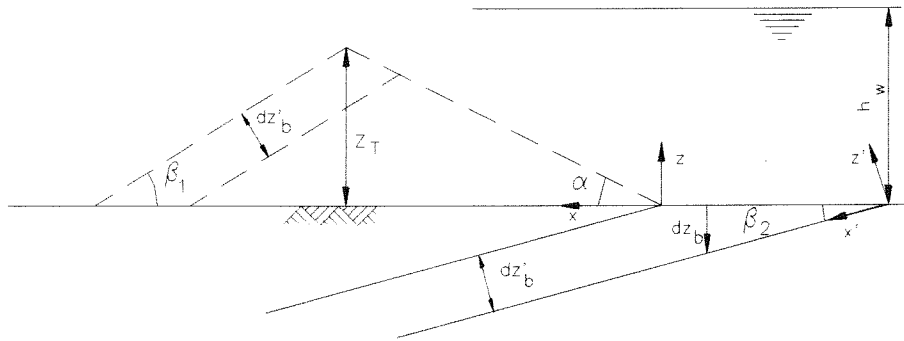
Voor de straal r geldt:
$$r = \frac{b}{\sin \psi}$$

Voor de breedte van de overlaat geldt in geval van een zuivere cirkel ($\psi = \frac{1}{2}\pi$):

$$b_{ov}(t) = \psi \cdot r = \frac{\pi}{2} \cdot r = \frac{\pi}{2} \cdot b_T$$

4.7 Gecombineerde diepte- en breedtegroei - fase IV

Op het tijdstip $t = t_3$ is de dijk in de bres volledig verdwenen ($Z_T = 0$). Het stroomgat blijft groeien in zowel horizontale als verticale richting. Het debiet neemt sterk toe en er ontstaat een ontgrondingskuil, zodat geldt: $z_b < 0$ (zie figuur 4.7). Deze fase is het meest interessant uit oogpunt van overstromingsproblemen, omdat de stroomsnelheid in de bres gedurende deze fase zeer groot wordt.



figuur 4.7: Fase IV - Ontstaan van de ontgrondingskuil

De stroming in de bres is nog steeds superkritisch. Fase IV duurt tot het moment waarop de benedenstroomse waterstand dusdanig ver gestegen is dat de afvoer gestuwd wordt en er een onvolkomen overlaat optreedt. Op $t = t_4$ geldt daarom:

$$h_{kom}(t_4) = \frac{2}{3} \cdot h_w$$

De ontgrondingskuil heeft een bovenstroomse helling onder de hoek β_2 .

Aangenomen wordt dat de bresgroei bepaald wordt door de erosie van deze bovenstroomse helling van de ontgrondingskuil [15]. De dieptegroei wordt dan gegeven door:

$$\frac{dz_b}{dt} = \frac{1}{\cos \beta_2} \cdot \frac{dz'_b}{dt} = -f_3 \cdot k_3 \cdot \sqrt{g \cdot h_w} \quad \text{voor } t_3 \leq t \leq t_4$$

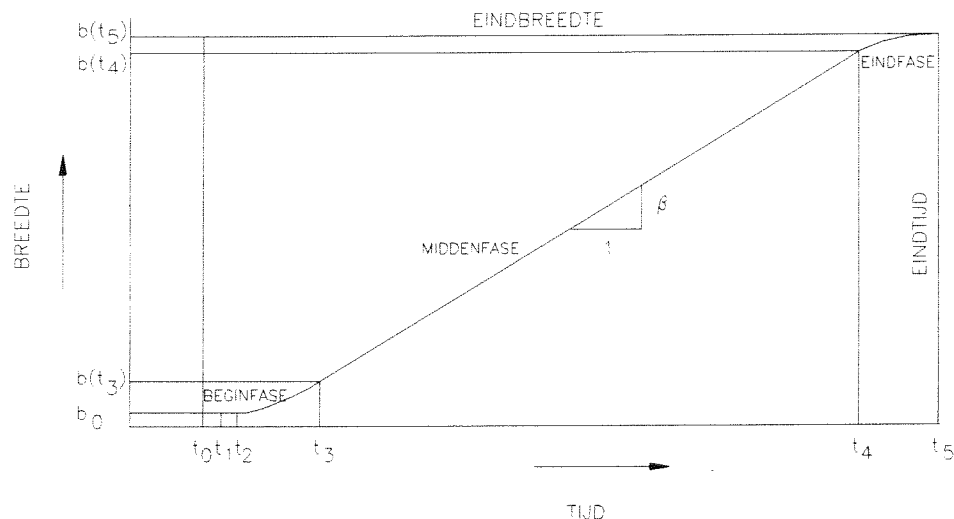
$$k_3 = \frac{e_s \cdot \sqrt{\frac{2}{3}}}{(1-p) \cdot \Delta} \cdot m^{\frac{1}{3}} \cdot C_f^{-\frac{1}{3}} \cdot \frac{(\sin \beta_2)^{\frac{4}{3}}}{(\cos \beta_2)^2}$$

Integratie geeft voor de bodemligging $z_b(t)$:

$$z_b(t) = -f_3 \cdot k_3 \cdot \sqrt{g \cdot h_w} \cdot (t - t_3) \quad \text{voor } t_3 \leq t \leq t_4$$

Omdat voor de vertragsingsfactor f_3 en de hellingshoek β_2 geen uitdrukkingen bekend zijn, zijn de uitkomsten van bovenstaande relaties niet te bepalen.

Volgens Steetzel [11] behoort fase IV tot de middenfase van het breedtegroeiproces, zie figuur 4.8. De breedtegroeisnelheid is in deze fase constant, omdat de dieptegemiddelde snelheid in de bres constant is. Aangenomen wordt dat de breedtegroei gelijk is aan de groeisnelheid in fase III [15].



figuur 4.8: Modellerings breedtegroei volgens Steetzel [11]

4.8 Afnemende groei van het stroomgat - fase V

In fase V is de stroming subkritisch en neemt de benedenstroomse waterstand toe. De bres blijft groeien in diepte en breedte tot het moment waarop de snelheden in de bres zo klein geworden zijn, dat er geen zand meer getransporteerd kan worden. Op dat moment stopt de groei, en zijn de einddiepte en eindbreedte bereikt.

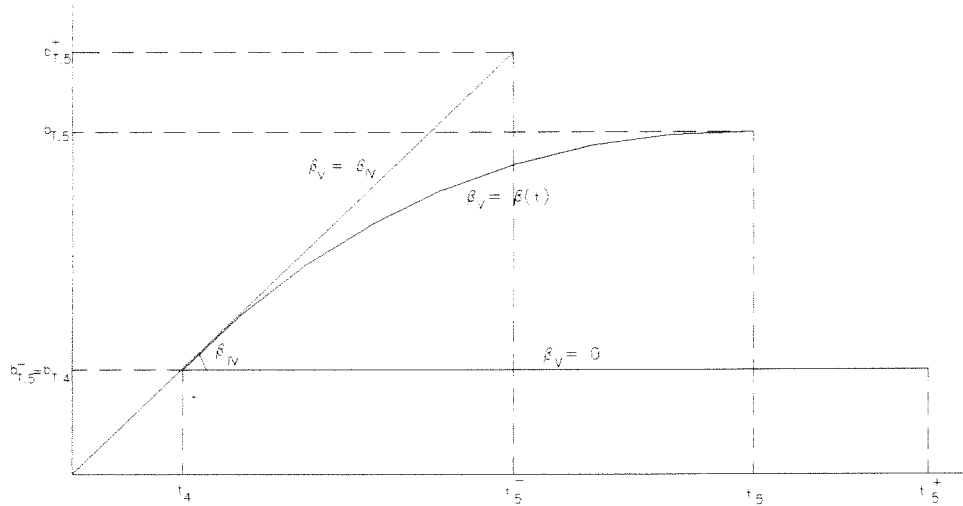
In fase V is de afvoer gestuwd:

$$q_{T,V} = h_{\text{kom}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_w - h_{\text{kom}})}$$

De breedtegroei van de bres neemt in deze fase af naar nul. Het exacte verloop van de breedtegroei is niet bekend. Wel is door Steetzel een onder- en een bovengrensbepaling opgesteld [11], waarmee een schatting kan worden gemaakt van het verloop van de breedtegroei in fase V, zie figuur 4.9.

De bovengrens aan de tijdsduur van fase V ($t_{V,\text{max}}$) wordt bepaald door ervan uit te gaan dat de bres in het geheel niet groeit in breedterichting. Door het kleinere doorstroomprofiel duurt het langer voordat de polder geheel gevuld is, deze tijdsduur is dus groter dan de werkelijke duur van fase V.

Voor de ondergrens aan de tijdsduur ($t_{V,\min}$) wordt de breedtegroeisnelheid van fase III en IV aangehouden, zie figuur 4.9. De uiteindelijke breedte wordt hierbij groter dan in werkelijkheid het geval is en de polder is eerder gevuld.



figuur 4.9: Benaderingen voor de breedtegroei in fase V [11]

Voor de bovengrens aan de tijdsduur geldt: $t_{V,\max} = t_* \cdot \ln\left(\frac{1}{c}\right) \approx 1.317 \cdot t_*$

Hierin is:

$$t_* = \frac{A_{\text{kom}}}{2 \cdot b_{T,4} \cdot m \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot d_{\text{eind}}}}$$

c constante, volgens Steetzel [11]: $c \approx 0.2679$

De ondergrens aan de tijdsduur is:

$$t_{V,\min} = \left(\frac{2 \cdot b_{T,4}}{2 \cdot \beta_{IV} \cdot t_*} \right) \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot \beta_{IV} \cdot t_*}{2 \cdot b_{T,4}} \right) \cdot 2 \cdot \ln\left(\frac{1}{c}\right)} - 1 \right] \cdot t_*$$

Hierin is:

β_{IV} éézijdige groeisnelheid in fase III en IV [m/s];

$b_{T,4}$ bresbreedte aan het begin van fase V, op $t = t_4$ [m];

d_{eind} einddiepte benedenstrooms; gelijk aan $d_{\text{eind}} = h_w$ [m].

Voor de bovengrens aan de breedte geldt: $\Delta b_{V,\max} = \beta_{IV} \cdot t_{V,\min}$

Voor de ondergrens aan de breedte geldt: $\Delta b_{V,\min} = 0$

In de voorspelling van het proefverloop in bijlage V wordt gerekend met een eindbreedte halverwege deze twee benaderingen, waarbij een vierdegraads machtsfunctie wordt gebruikt voor het breedteverloop in fase V.

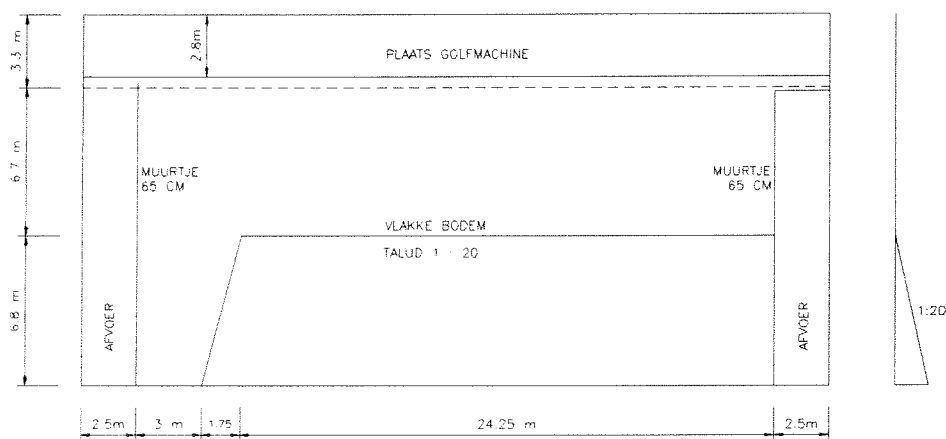
5 Het vooronderzoek

In hoofdstuk 4 is een beschrijving gegeven van het bestaande bresgroeimodel volgens Visser [15]. Dit hoofdstuk handelt over de voorbereiding van de uitgevoerde experimenten. De voorbereiding leidt tot de geometrie van de te beproeven dijk en de lay-out van het proefbassin waarin de experimenten zijn uitgevoerd.

5.1 De uitgangssituatie voor het onderzoek

In paragraaf 2.4 is reeds vermeld dat het onderzoek naar het ontstaan en de ontwikkeling van de ontgrondingskuil op experimentele wijze is uitgevoerd, aan de hand van een aantal laboratoriumproeven in een bassin (hierna proefbassin genoemd) van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TU Delft. In het onderzoek ligt de nadruk op de vierde en vijfde fase van het bresgroeiproces. Deze fasen zijn het meest interessant met het oog op overstromingsproblemen omdat de bresbreedte, en daarmee het debiet door de bres in deze fasen sterk groeit.

In figuur 5.1 is een plattegrond getekend van het proefbassin. Het heeft een lengte van 34 m, een breedte van 16.8 m en een diepte van 68 cm. In het bassin is een betonnen talud aanwezig met een taludhelling van 1:20. Dit talud beslaat een oppervlakte van $6.8 \times 26 \text{ m}^2$. Tevens is in het proefbassin een golfmachine aanwezig. Deze golfmachine is niet van belang voor de uitvoering van de experimenten.



figuur 5.1: Plattegrond proefbassin met huidige indeling

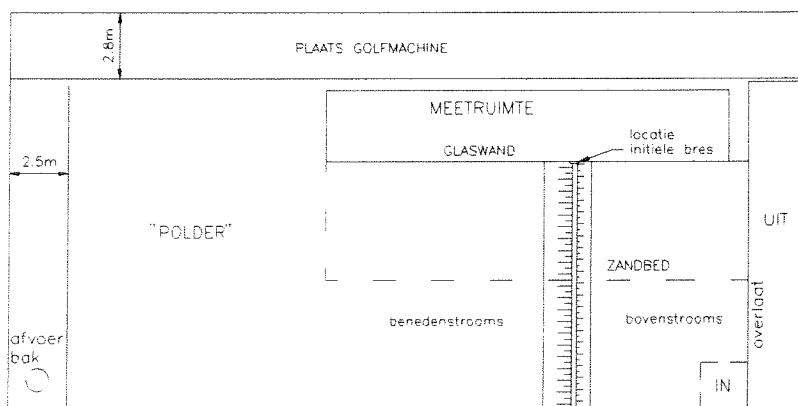
5.2 Globale proefopstelling

In figuur 5.2 is een globale opzet van de proefopstelling geschetst. In de in het kader van het onderzoek uitgevoerde experimenten is gewerkt met een in lengterichting gehalveerde dijk, door in de as van de geplande bres een glaswand te plaatsen en aan één zijde daarvan de dijk aan te leggen. Op deze manier kon het dieptegroeiproces vanaf de zijkant waargenomen worden.

De waterstand op het voorland is zoveel mogelijk constant gehouden door toepassing van een overlaat en door het variëren van het toevoerdebiet. Gedurende de dijkdoorbraak daalde de waterstand in het bovenstroomse gedeelte van het proefbassin enigszins, omdat het debiet door de bres sterk toenam. Dit was echter geen probleem omdat de waterstand continu geregistreerd werd.

De zandbodem is slechts over een gedeelte van het oppervlak van het proefbassin aangebracht om een zo groot mogelijke komberging te realiseren en tevens de benodigde hoeveelheid zand te beperken. De grootte van het kombergingsvolume is bepalend voor de duur van de proef. Hoe meer water de polder kan bevatten, hoe langer het experiment duurt. Dit vergroot het bereik van de metingen.

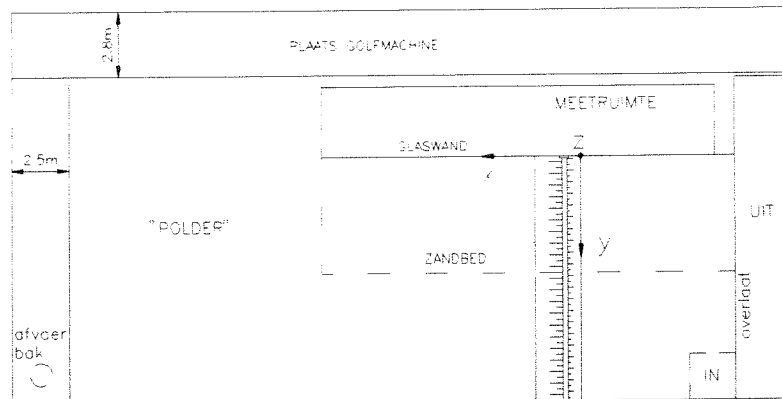
Voor de positie van de dijk in het proefbassin zijn verschillende mogelijkheden; deze worden besproken in paragraaf 5.7.



figuur 5.2: Globale opstelling voor de experimenten in het proefbassin

5.3 Het coördinatenstelsel

In de proefopstelling in het proefbassin is een coördinatenstelsel gehanteerd zoals weergegeven in figuur 5.3. De oorsprong van het coördinatenstelsel ligt aan de buitenteen van de dijk, langs de glaswand. De positieve x-as wijst in benedenstroomse richting, de positieve y-as langs de buitenteen van de dijk van het glas af en de positieve z-as loodrecht omhoog langs de glaswand, met $z = 0$ op het zandbed.



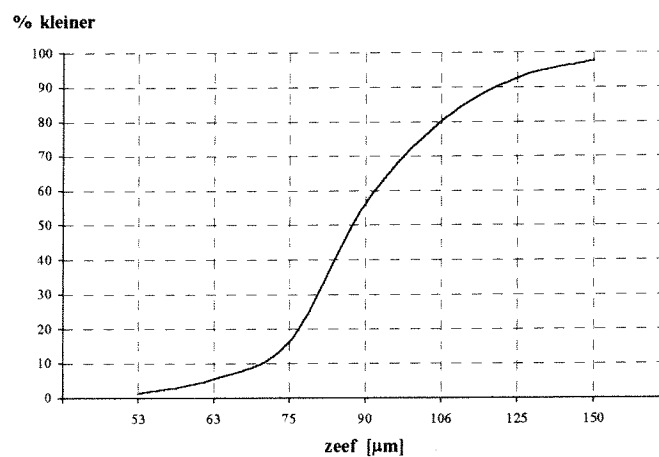
figuur 5.3: Plattegrond van het proefbassin met coördinatenstelsel

5.4 Het gebruikte zand

In het proefbassin was nog zand aanwezig van eerder onderzoek (onderwater-golfbrekers door S.C. van der Biezen). Dit zand was gewassen; het bevatte nauwelijks kleideeltjes of andere verontreinigingen en was geschikt voor de bresgroeiproeven. Van dit zand is ten behoeve van het eerdere onderzoek een zeefanalyse gemaakt. Deze zeefanalyse staat in bijlage I. De zeefkromme die uit deze analyse volgt, staat in figuur 5.4. De karakteristieke korreldiameters zijn vermeld in tabel 5.1.

D_{10}	70 μm
D_{50}	88 μm
D_{90}	120 μm

tabel 5.1: Karakteristieke korreldiameters



figuur 5.4: Zeefkromme van het gebruikte zand

5.5 De porositeit van het zandbed

De porositeit van het bodemmateriaal is van belang voor het verloop van het bresgroeiproces. Een losse pakking van het zand betekent dat de bodemerosie sneller verloopt waardoor wellicht een grotere ontgrondingskuil ontstaat.

De porositeit van de bodem is als volgt te bepalen:

Uit het aangelegde zandbed wordt een zoveel mogelijk ongeroerd monster gestoken. Van dit monster wordt het volume bepaald. Het monster wordt gedroogd in een oven. Hierna wordt de massa gemeten. Vervolgens wordt het monster geheel verzadigd met water en wordt nogmaals de massa bepaald. Het verschil tussen het “natte” en het “droge” massa is gelijk aan de massa van het water in de poriën van het verzadigde monster. Hieruit is het volume van de poriën te berekenen.

Voor de porositeit p geldt dan:

$$p = \frac{V_p}{V_g} = \frac{m_{\text{nat}} - m_{\text{droog}}}{\rho \cdot V_g}$$

Hierin is:

- ρ dichtheid van water [g/ml];
- m_{droog} massa van het gedroogde monster [g];
- m_{nat} massa van het geheel verzadigde monster [g];
- V_g volume van het ongeroerde monster [ml];
- V_p poriënvolume [ml].

In alle proeven is het zandbed op dezelfde manier aangebracht, namelijk door zand in kleine laagjes aan te brengen en zo gelijkmatig mogelijk te verdichten. Zodoende kon de porositeit in de verschillende proeven ongeveer constant zijn.

De porositeit is bepaald aan de hand van drie gesimuleerde monsters. In een pot is het zandbed nagebootst. De pot met zand is achtereenvolgens gedroogd, gewogen, met water verzadigd en weer gewogen. De porositeit van deze monsters staat in tabel 5.2. De massa's die in deze tabel staan zijn bruto massa's, dus inclusief pot. De gemiddelde porositeit bedraagt ongeveer 35%.

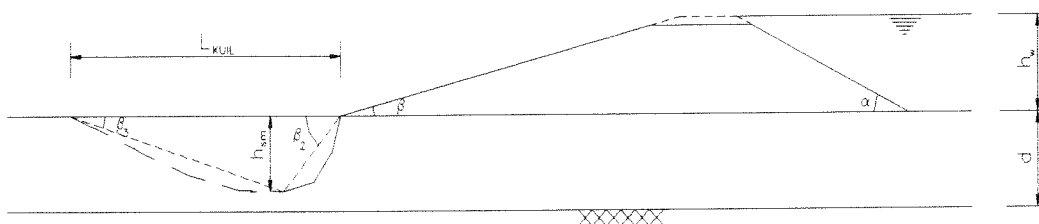
Monster	V_g	m_{nat}	m_{droog}	V_p	p
	[ml]	[g]	[g]	[ml]	[%]
1	1500	2999	2492	507	33.8
2	700	1418	1167	251	35.8
3	850	1596	1303	293	34.5

tabel 5.2: Berekening van de porositeit van het bodemmateriaal

5.6 De dikte van het zandbed in het proefbassin

Om de afmetingen van de ontgrondingskuil te kunnen meten is het noodzakelijk dat de dikte van het zandbed in het proefbassin onder de dijk groter is dan de grootste diepte van de ontgrondingskuil (zie figuur 5.5). Het erosieproces wordt dan niet beïnvloed door de aanwezigheid van de bodem.

De maximale diepte van de ontgrondingskuil kan globaal geschat worden met de ontgrondingsrelatie van Breusers [7]. Deze relatie is opgesteld voor de maximale kuildiepte van een ontgroning achter een bodembescherming in een horizontale en uniforme aanstroming en geldt dus niet specifiek voor een bresgroeisituatie. Bij een dijkdoorbraak is de stroming niet horizontaal en uniform en geldt de theorie van Breusers niet.



figuur 5.5: Principe ontgrondingskuil volgens Breusers

Smit en Snip [9] hebben de relatie van Breusers toegepast bij het schatten van de kuildiepte in het Zwin'94-experiment. Uit de resultaten van die proef blijkt dat de werkelijke kuildiepte minder dan 25 % afwijkt van de voorspelde waarde [10]. Gezien deze resultaten is het verdedigbaar de benadering van Breusers te gebruiken voor een schatting van de kuildiepte.

De uitdrukking voor de maximale diepte van de kuil als functie van de tijd $h_{sm}(t)$ luidt:

$$h_{sm}(t) = \frac{(\alpha \cdot u_T - u_c)^{1.7} \cdot h_w^{0.2}}{10 \cdot \Delta^{0.7}} \cdot t^{0.4}$$

Hierin is:

- $h_{sm}(t)$ maximale diepte van de ontgrondingskuil als functie van de tijd [m];
- t tijd [uur];
- u_c kritieke snelheid, snelheid van begin van bewegen [m/s];
- α dimensieloze parameter.

In fase IV van het bresgroei proces, waarin de ontgrondingskuil ontstaat, is de stroming superkritisch, met kruinhoogte $Z_T = 0$:

$$q_T = m \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot h_w\right)^{\frac{3}{2}} = 1 \cdot \sqrt{g \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot h_w\right)^3}$$

Voor de dieptegemiddelde snelheid u_T in die fase van het proces geldt:

$$u_T = \frac{q_T}{d_g} = \frac{q_T}{\frac{2}{3} \cdot h_w} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot g \cdot h_w}$$

De kritieke snelheid u_c kan worden bepaald met de methode van Shields. Deze berekening is uitgewerkt in bijlage II. De kritieke snelheid van het zand bedraagt $u_c = 0.23$ m/s.

De parameter α van Breusers is ondermeer afhankelijk van de turbulentie. Voor zeer turbulente stromingen, zoals hier het geval is, ligt α in de orde van grootte van $\alpha = 3$, of zelfs groter. In de berekening van de kuildiepte wordt $\alpha = 3$ aangenomen.

Omdat het debiet afhangt van de waterhoogte, is ook de diepte van de kuil daarvan afhankelijk. De berekening is gemaakt voor een dijk van $h_w = 0.30$ m hoog op een zandbed van $d_B = 0.35$ m dik. Het criterium voor de diepte van de kuil is dan $h_{sm}(t) < d_B = 0.35$ m, omdat anders de stroming beïnvloed wordt door de bodem van het proefbassin en de ontwikkeling van de kuil niet representatief is voor een praktijksituatie.

In de formule van Breusers komt de tijd t voor (in uren). Er moet dus een schatting gemaakt worden van de tijd die nodig is om de maximale diepte van de kuil te bereiken. Uit een eerste globale berekening met het bestaande model blijkt dat de gehele dijkdoorbraak ongeveer een kwartier duurt, dus $t = \frac{1}{4}$ uur.

De parameters zijn:

D	88 μ m dus $u_c = 0.23$ m/s
h_w	0.30 m
t	0.25 uur
u_T	$2.55 \sqrt{h_w} = 1.40$ m/s
α	3
Δ	1.65

Als deze parameters ingevuld worden, wordt de verwachte diepte van de ontgrondingskuil:

$$h_{sm}\left(t = \frac{1}{4}\right) = \frac{(3 \cdot 1.40 - 0.25)^{1.7} \cdot (0.30)^{0.2}}{10 \cdot (1.65)^{0.7}} \cdot \left(\frac{1}{4}\right)^{0.4} = 0.33 \text{ m} = 1.1 \cdot h_D$$

Uitgaande van een dijk van 0.30 m hoog ontstaat er dus een ontgrondingskuil van ongeveer 33 cm diepte. Dit voldoet aan het gestelde criterium dat $h_{sm}(t) + h_w < 0.65$ m.

Uit de trilloregistraties die gemaakt zijn tijdens de Zwinproef van 1994 [10] zijn twee schattingen voor de werkelijke bodemligging gemaakt, een diepe en een ondiepe. De diepe schatting geeft een kuildiepte van circa $1.25 \cdot h_D$. Dit is hier gelijk aan $1.25 \cdot 0.30 = 0.375$ m, en dus groter dan de dikte van de zandlaag.

Echter, Somers [10] en Visser et al. [17] concluderen dat de diepe schatting niet realistisch is en een te grote waarde geeft, en dat de werkelijke (gemiddelde) diepte van de ontgrondingskuil ongeveer $0.7 \cdot h_D$ bedraagt. Dit is hier gelijk aan $0.7 \cdot 0.30 \text{ m} = 0.21$ m, en dus duidelijk kleiner dan de dikte van het zandbed.

Indien voor de parameter α een grotere waarde wordt ingevuld dan de hier gebruikte $\alpha = 3$, bijvoorbeeld $\alpha = 4$ of 5, volgt uit de berekening een grotere kuildiepte:

$\alpha = 4$:	$h_{sm}(t) = 0.55 \text{ m} = 1.83 h_D$
$\alpha = 5$:	$h_{sm}(t) = 0.82 \text{ m} = 2.73 h_D$

De uitkomst van de formule is dus sterk afhankelijk van de gekozen waarde voor α . Omdat in het Zwin'94-experiment een vrij kleine diepte (t.o.v. de berekende waarden) is geregistreerd, is het zandbed in het eerste experiment aangelegd met een dikte van $d_B = 35$ cm. Omdat uit de eerste proef bleek dat in de ontgrondingskuil de stroming toch de bodem raakte en derhalve, zo dit mogelijk zou zijn, tot een diepere kuil zou hebben geleid, is voor de tweede en derde proef alsnog een dikker zandpakket aangebracht.

5.7 De plaats van de dijk in het proefbassin

In de experimenten is gewerkt met een in lengterichting gehalveerde dijk. Ter plaatse van de as van de initiële bres is een glaswand geplaatst. Op deze manier is de ontwikkeling van de ontgrondingskuil in de as van de bres goed te volgen vanaf de zijkant.

5.7.1 De plaats van de glaswand

De grootste diepte van de ontgrondingskuil ontstaat in de as van de initiële bres, vlak langs de glaswand. De dikte van het zandpakket onder de dijk dient hier voldoende groot te zijn om de ontgrondingskuil ongestoord te laten ontstaan, dat wil zeggen, zonder dat de bodem in zicht komt. De initiële bres, waar de ontgrondingskuil ontstaat, mag daarom niet boven het in de bodem van het proefbassin aanwezige betonnen talud liggen, omdat dan wellicht te weinig diepte beschikbaar is.

Er zijn voor de plaatsing van de glaswand twee mogelijkheden:

- plaatsing halverwege het proefbassin in breedterichting en het gedeelte met taludhelling als meetruimte gebruiken;
- plaatsing op enkele meters afstand van de golfmachine waardoor het grootste gedeelte van het proefbassin beschikbaar is als komberging.

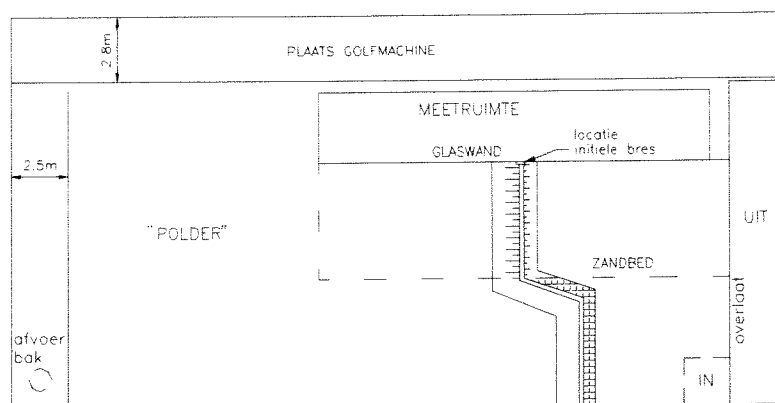
De nadelen van plaatsing van de glaswand halverwege zijn de kleine kombergingsoppervlakte benedenstrooms, die daardoor beschikbaar is en het praktische gegeven dat de in het proefbassin aanwezige golfmachine waterdicht gemaakt moet worden om achterloopsheid te voorkomen.

Beide nadelen gelden niet voor de tweede optie. Hierbij wordt de glaswand op enkele meters van de golfmachine geplaatst, waardoor een ruimte beschikbaar komt waar de instrumenten opgesteld kunnen worden. Het grote voordeel van deze optie is de grote kombergingsoppervlakte die gebruikt kan worden. Een groot kombergingsvolume betekent een langere tijdsduur van de doorbraak, waardoor het bereik van de metingen wordt vergroot.

Gekozen is voor de tweede optie, namelijk de scheidingswand langs het golfschot, zie figuur 5.6. De komberging is dan circa anderhalf maal zo groot als bij de andere mogelijkheid.

5.7.2 Situering van de dijk

Ook voor de plaatsing van de dijk in het proefbassin zijn verschillende mogelijkheden. Enerzijds moet het gebied achter de dijk, de polder, zo groot mogelijk zijn, om een zo groot mogelijke komberging te verkrijgen. Anderzijds moet ook het voorland niet te klein zijn zodat de waterstand bovenstrooms zo constant mogelijk kan worden gehouden. Een andere reden om het voorland niet te klein te nemen is de meer “gestroomlijnde” aanstroming die daardoor wordt bereikt.



figuur 5.6: Plaats van de glaswand en de dijk in het proefbassin

Het (vrijwel) constant houden van het bovenstroomse waterpeil lijkt realiseerbaar als de dijk op circa 8 m van de instroming wordt gelegd, en een lange overlaat wordt toegepast om het overtollige water af te voeren. Tijdens de eerste proef is deze aanname redelijk gebleken (hierover meer in hoofdstuk 7).

Tijdens het doorbraakproces ontstaat een naar verwachting cirkelvormige ontgrondingskuil vóór de bres. Als een zuivere cirkelvorm wordt aangenomen, begint de ontgrondingskuil op een afstand gelijk aan de bresbreedte bovenstrooms van de dijk. Om deze erosie zichtbaar te laten zijn door de glaswand dient de afstand van het begin van de glaswand tot de buitenste van de dijk de te verwachten maximale bresbreedte te bedragen.

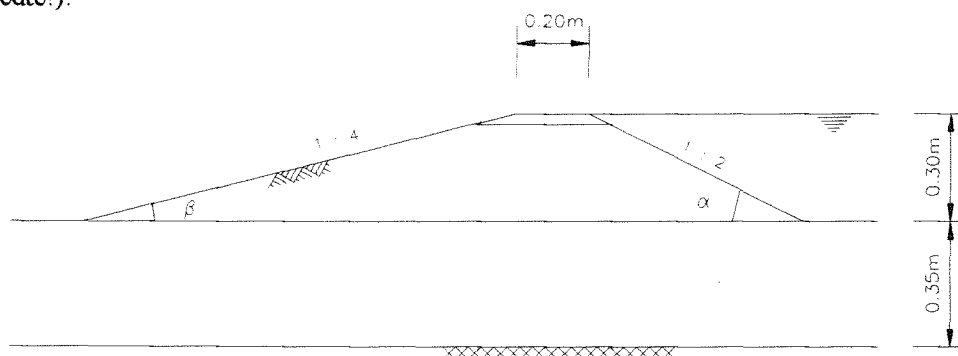
Bijlage V bevat een voorspelling van het verloop van de experimenten, waaruit een breedte van het stroomgat van circa 2.5 m volgt. De dijk is derhalve 2.5 m benedenstrooms van het begin van de glaswand aangelegd, zie figuur 5.6. Omdat een gedeelte van de dijk (op het betonnen talud) reeds aangelegd was vóór het belang van de cirkelvorm werd onderkend lag de dijk in de experimenten in twee bochten.

5.8 De geometrie van de dijkdoorsnede

Gekozen is voor een klassieke dijkdoorsnede. Veel voorkomende afmetingen van een zeedijk zijn een kruinhoogte van $Z_T \approx 12$ m en een kruinbreedte van $L_T \approx 8$ m. De maximale dijkhoogte in het proefbassin is in de voorgaande paragraaf bepaald aan de hand van de optredende ontgrondingskuil en de beschikbare hoogte in het proefbassin. De kruinhoogte in het model is bepaald op $Z_T = 0.30$ m, bij een onderliggende zandlaag van $d = 0.35$ m dik. De kruinbreedte is met dezelfde factor verschaald: $L_T = 8\text{ m} * 0.30\text{ m}/12\text{ m} = 0.20$ m.

Voor de taludhellingen is gekozen voor $\tan \beta_0 = 1/4$ voor het binnentalud en $\tan \alpha = 1/2$ voor het buitentalud. Ook dit zijn in de praktijk veel voorkomende waarden.

De doorsnede van het te beproeven dijklichaam is weergegeven in figuur 5.7. De initiële bres heeft een diepte van $d_{T,0} = 0.03$ m ($= 0.1 Z_{T,0}$) en een breedte $b_{T,0} = 0.10$ m (halve breedte!).

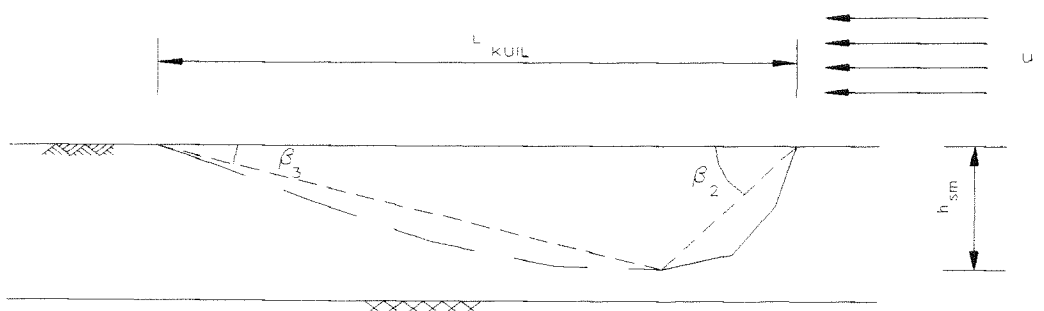


figuur 5.7: Doorsnede van het dijklichaam in het eerste experiment

5.9 De lengte van de glaswand

De lengte van de in de as van de bres geplaatste glaswand is bepaald aan de hand van de te verwachten lengte van de ontgrondingskuil.

In figuur 5.8 is een doorsnede van de ontgrondingskuil over de lengteas geschetst.



figuur 5.8: Taludhellingen van de ontgrondingskuil

De lengte van de ontgrondingskuil kan worden berekend met behulp van de twee taludhoeken β_2 en β_3 en de kuildiepte $h_{sm}(t)$.

Voor de lengte van de ontgrondingskuil geldt:

$$L_{kuil} = h_{sm}(t) \cdot (\cot \beta_2 + \cot \beta_3)$$

Voor de hoek van het bovenstroomse talud bestaat de relatie [7]:

$$\cot \beta_2 = 2.3 + (\alpha - 1.3)^{-1} = 3 - 4.$$

De bovenstroomse helling van de ontgrondingskuil is dus 1:3 à 1:4, dus $\beta_2 = 14$ à 18° .

De benedenstroomse helling van de ontgrondingskuil is minder gemakkelijk te bepalen. Uit de praktijk blijkt dat de benedenstroomse taludhelling veel flauwer is dan de bovenstroomse. Geschat wordt dat de helling 1:15 à 1:30 bedraagt, ofwel $\beta_3 = 2$ à 4° .

Uitgaande van $\beta_2 = 14$ à 18° en $\beta_3 = 2$ à 4° , heeft de ontgrondingskuil een lengte van $L_{kuil} = 6$ à 11 m.

Uit de metingen van de Zwinproef uit 1994 [10] blijkt dat de lengte van de kuil daar beperkt bleef tot enkele malen de basislengte van de dijk (van binnenteen tot buitenteen). Dit komt overeen met een lengte van de kuil in het proefbassin van 4 à 6 m.

De lengte van de glaswand is bepaald op 10 m (van $x = -2.5$ m tot $x = +7.5$ m), zodat de volledige (verwachte) kuil zichtbaar is met behulp van de video-apparatuur. Zodoende kon de ontwikkeling van de ontgrondingskuil nauwkeurig gevolgd worden.

5.10 Het maximaal toelaatbare debiet

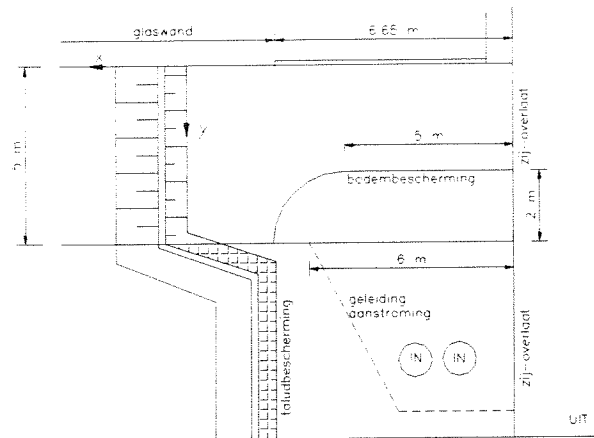
Indien het debiet dat het proefbassin wordt ingepompt te groot is, overschrijden de stroomsnelheden boven het zandbed de kritische waarde u_c . Er treedt dan zandtransport op en er ontstaat al ver bovenstrooms van de bres een ontgrondingskuil. Om dit te voorkomen is het debiet dat in het bassin gepompt wordt aan een maximum gebonden. Bij debieten lager dan dit maximum ontstaat de ontgrondingskuil vlak vóór en in de bres, in het versnellingsgebied.

De grootte van het doorstroomprofiel en de kritieke snelheid u_c bepalen het maximale debiet dat over het zandbed kan stromen zonder erosie te veroorzaken.

Het doorstroomprofiel wordt hoofdzakelijk bepaald door de breedte waarover de stroming zich kan spreiden. Deze breedte kan vergroot worden door het toepassen van een bodembescherming op een gedeelte van het zandbed (zie figuur 5.9).

In de situatie zonder bodembescherming is de doorstroomoppervlakte bij het begin van het zandbed $A_s = 0.30 \text{ m} \cdot 6 \text{ m} = 1.80 \text{ m}^2$ (zie figuur 5.9).

Als de stroomsnelheid kleiner moet blijven dan de kritieke snelheid $u_c = 0.23 \text{ m/s}$ is het maximale debiet bij benadering gelijk aan: $Q_{\max} \approx 1.80 \text{ m}^2 \cdot 0.20 \text{ m/s} = 0.36 \text{ m}^3/\text{s}$.



figuur 5.9: Detail van de instroming met bodembescherming

Als een bodembescherming wordt aangelegd, zoals aangegeven in figuur 5.9, is het doorstroomprofiel groter. De stroming zal zich echter niet over de gehele lengte van de bodembescherming spreiden. Als wordt aangenomen dat de stroomvoerende breedte van de bodembescherming zo'n 7 m bedraagt, geldt: $A_s \approx 7\text{ m} \cdot 0.30\text{ m} = 2.10\text{ m}^2$.

Het maximaal toelaatbare debiet is dan gelijk aan $Q_{\max} \approx 2.1\text{ m}^2 \cdot 0.20\text{ m/s} = 0.42\text{ m}^3/\text{s}$.

Dit berekende debiet zal ook het maximale debiet zijn dat door de bres stroomt. Waarschijnlijk is het bresdebiet zelfs nog kleiner, omdat ook de zij-overlaat boven het zandbed nog water uit de bak zal afvoeren. Door deze beperking aan het debiet door de bres zal de waterstand in het versnellingsgebied vóór en in de bres dalen.

De daling van de waterstand vóór de bres kan worden berekend uit de overlaatformule. Deze is maximaal op het moment dat in een ongestoorde toestand (zonder debietbeperking) het debiet maximaal is, dus aan het einde van fase IV. Als ervan uitgegaan wordt dat het debiet door de bres gelijk is aan het berekende maximale debiet op de rand van de bodembescherming, daalt de waterstand bovenstrooms van de bres tot:

$$\text{rechte overlaat: } h_w = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{Q_{T,\max}}{b_T \cdot \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{3}} = 0.21\text{ m}$$

$$\text{cirkelvormige overlaat: } h_w = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{Q_{T,\max}}{f_b \cdot b_T \cdot \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{3}} = 0.18\text{ m}$$

Door de debietbeperking daalt de waterstand in de bres dus met 9 à 12 cm.

5.11 Detaillering van de proefopstelling

In figuur 5.10 is de indeling van het proefbassin voor de experimenten getekend. In deze figuur zijn ook de afmetingen van de muurtjes in het proefbassin aangegeven.

Het water werd het proefbassin ingepompt met behulp van twee buizen, aangesloten op het watercirculatiesysteem van het laboratorium. De buizen waren zó geplaatst dat, wanneer het proefbassin gevuld was, de uitmonding van de buizen zich onder water bevond. Iedere toevoerbuiss had een diameter van 35 cm en was voorzien van een handbediende afsluiter. Op iedere buis konden in principe vier pompen geschakeld worden, waarbij iedere pomp een capaciteit van 200 à 220 l/s had. In paragraaf 5.10 is beredeneerd dat het instroomdebiet beperkt moest worden. Dit is gerealiseerd door drie pompen stand-by te houden en de overige af te zetten. Er zijn op de ene buis twee pompen geschakeld, en op de andere buis één pomp.

Met deze drie pompen kon maximaal zo'n 650 l/s in het proefbassin gepompt worden. Van deze hoeveelheid water verdween tijdens de proef een gedeelte over de zij-overlaat. De kruin van deze overlaat bevond zich op $z = 0.24$ m. Er werd, als het proefbassin geheel gevuld was ($h_w = 30$ cm), over de overlaat een debiet afgevoerd van:

$$Q_{ov} = q_{ov} \cdot b_{ov} = \sqrt{g} \cdot \left[\frac{2}{3} (h_w - h_{ov}) \right]^{3/2} \cdot b_{ov} = 0.260 \text{ m}^3 / \text{s} = 260 \text{ l/s}$$

Zodoende was het debiet door de bres in eerste instantie niet veel groter dan het berekende maximaal toelaatbare debiet van 420 l/s.

Het criterium voor de bediening van de twee afsluiters in de toevoerbuizen was om de waterstand in het bovenstroomse gedeelte op peil te houden. Zodra het maximale debiet bereikt werd (de afsluiter volledig open) bleef dit constant. Als gevolg hiervan daalde de waterstand in het bovenstroomse gedeelte van het proefbassin. Hierdoor nam het debiet over de zij-overlaat af en stroomde een steeds groter deel van het ingepompte water door de bres. Zodra de waterstand tot onder het niveau van de kruin van de zij-overlaat daalde, ging al het ingepompte water door de bres. Er ontstond erosie van het zandbed bovenstrooms van de dijk, omdat het debiet groter was dan de 420 l/s, die berekend is uit de kritieke snelheid.

In het laatste stadium van de bresvorming wordt de stroming subkritisch en neemt het debiet door de bres af. De waterstand bovenstrooms steeg toen weer. Vanaf dat moment konden de afsluiters langzaam dichtgedraaid worden.

De berekening van het proefverloop in bijlage V is gemaakt voor een situatie met drie pompen, waardoor het debiet door de bres beperkt wordt tot 650 l/s.

De stroomsnelheid in de buis waarop twee pompen zijn geschakeld bedraagt maximaal:

$$u = \frac{Q}{A} = \frac{0.44 \text{ m}^3 / \text{s}}{\frac{\pi}{4} \cdot 0.35^2 \text{ m}^2} \approx 4.5 \text{ m/s}$$

Een instroming in de vorm van een straal met deze snelheid, die op enkele decimeters van de bodem plaatsvindt, gaat gepaard met grote turbulentie. Om de instroming te geleiden en tevens de dijk naast het zandbed te beschermen tegen erosie zijn stalen bakken, gevuld met stenen, rond de instroombuizen geplaatst.

Verder is, om de turbulentie in de instroming te breken, op de overgang naar het zandbed een als diffusor werkende constructie, in de vorm van een muurtje van holle-gaten-stenen en roosters van drielaags draadgaas gebouwd.

Aan de bovenstroomse zijde van het zandbed is een drain ingegraven en een afsluiter in de muur gemetseld, om het leeglopen na afloop van een proef van het gedeelte van het proefbassin bovenstrooms van de dijk, dat geen zandbodem bevat, te bespoedigen.

5.12 De benodigde hoeveelheid zand

Het zand dat in het proefbassin aanwezig was van voorgaand onderzoek, zo'n 90 m³, had een gemiddelde diameter van $D_{50} = 88 \mu\text{m}$. Dit was gewassen zand, dus zonder kleideeltjes. Het kon gebruikt worden voor de bresgroei-experimenten.

De voor de proefopstelling benodigde hoeveelheid zand is als volgt te berekenen:

Voor het volume van het dijklichaam geldt:

$$V_D = h_D \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot h_D \cdot \cot \beta_0 + \frac{1}{2} \cdot h_D \cdot \cot \alpha + L_T \right) \cdot L_D$$

Hierin is:

h_D dijkhoogte; $h_D = 0.30 \text{ m}$;

L_D lengte van de dijk [m];

V_D volume van het dijklichaam [m³];

De dijkhoogte bedraagt $h_D = 0.30 \text{ m}$; de dikte van het zandbed $d_B = 0.35 \text{ m}$. De gemiddelde dijkhoogte naast het zandbed bedraagt:

$$\frac{1}{2} \cdot \left[0.35 \text{ m} + \left(0.35 \text{ m} + \frac{1}{20} \cdot 5.5 \text{ m} \right) \right] = 0.49 \text{ m}$$

De hoeveelheid zand die nodig is voor de experimenten bedraagt:

- Zandbed: $V_B = 18 \text{ m} \cdot 5 \text{ m} \cdot 0.35 \text{ m} = 31.5 \text{ m}^3$

- Dijk boven zandbodem:

$$V_{D,1} = 0.30 \text{ m} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 0.30 \text{ m} \cdot 4 + \frac{1}{2} \cdot 0.30 \text{ m} \cdot 2 + 0.20 \text{ m} \right) \cdot 5 \text{ m} = 1.65 \text{ m}^3$$

- Dijk naast zandbodem:

$$V_{D,2} = 0.49 \text{ m} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 0.49 \text{ m} \cdot 4 + \frac{1}{2} \cdot 0.49 \text{ m} \cdot 2 + 0.20 \text{ m} \right) \cdot 5.5 \text{ m} = 4.5 \text{ m}^3$$

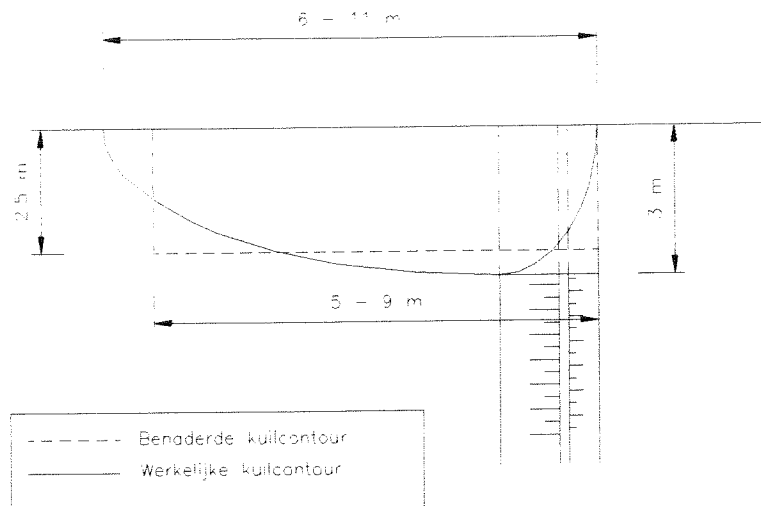
Het totaal benodigd volume aan zand voor de proefopstelling bedraagt dan $V_{\text{ZAND}} \approx 38 \text{ m}^3$.

Dit is de hoeveelheid verdicht zand. In geval van droog, losgestort zand neemt tijdens het verdichten het volume af met bijna de helft. Het zand dat in het proefbassin aanwezig was, is losgepakt en niet geheel droog. Uitgaande van 40 % volumevermindering bij verdichten is zo'n 60 à 65 m³ los zand nodig.

Verder spoelt gedurende een proef een hoeveelheid zand weg uit de dijk en de zandbodem. Deze hoeveelheid is bij benadering gelijk aan (zie figuur 5.11):

$$3 \text{ m} \cdot 0.30 \text{ m} \cdot \left(0.20 \text{ m} + \frac{1}{2} \cdot 0.30 \text{ m} \cdot 4 + \frac{1}{2} \cdot 0.30 \text{ m} \cdot 2 \right) + 2.5 \text{ m} \cdot 9 \text{ m} \cdot 0.30 \text{ m} \approx 8 \text{ m}^3.$$

Hierbij is de ontgrondingskuil als een rechthoekige kuil geschematiseerd met een diepte van 0.30 m, een lengte van 7 m en een breedte van 2.5 m.



figuur 5.11: Benadering van de kuilontrek

Dit zand dient na ieder experiment opgeveegd te worden om weer gebruikt te worden in de volgende proef. Bij dit wegspoelen en opvegen gaat iedere keer een deel verloren. Uitgaande van een verlies van 10% per cyclus is de hoeveelheid zand die per experiment extra benodigd is bij benadering gelijk aan:

$$V_{\text{extra}} \approx 1 \text{ m}^3$$

De totaal benodigde hoeveelheid zand bedraagt dan, uitgaande van maximaal vijf proeven:

$$V_{\text{totaal}} \approx 70 \text{ m}^3.$$

De resterende 20 m^3 zand die in het proefbassin aanwezig was, is afgevoerd.

5.13 Onderzoek van schaalecten

De opstelling waarin de experimenten worden uitgevoerd is een schaalmodel van de werkelijkheid. Schaalecten treden op indien een model de werkelijkheid niet goed weergeeft, waardoor processen in het model niet op gelijke wijze plaatsvinden als in het prototype (werkelijkheid). Deze paragraaf onderzoekt in hoeverre schaalecten een rol kunnen spelen in de proefopstelling voor de bresgroei-experimenten.

5.13.1 Schaaleffecten in het algemeen

De schaal van een fysische grootte is gedefinieerd als de waarde van de grootte in het prototype, gedeeld door de waarde in het model. Zo geldt voor de schaal n_x van een grootte x :

$$n_x = \frac{x_p}{x_m}$$

Voor het bepalen van de schaalfactor van een uit meer dan één parameter opgebouwde grootte bestaan rekenregels.

Voor het product (of het quotiënt) van twee parameters x en y geldt:

$$n(x \cdot y) = \frac{(x \cdot y)_p}{(x \cdot y)_m} = \frac{x_p \cdot y_p}{x_m \cdot y_m} = n_x \cdot n_y$$

Met andere woorden: de schaalfactor van een product is gelijk aan het product van de afzonderlijke schaalfactoren. Als dus n_x en n_y worden gekozen, ligt de schaal van $(x \cdot y)$ vast. Dit is een schaalwet; hier kan niet van afgeweken worden.

Voor de som (of het verschil) van twee parameters x en y geldt:

$$n(x + y) = \frac{x_p + y_p}{x_m + y_m} = \frac{n_x + \frac{y_p}{x_m}}{1 + \frac{y_m}{x_m}} = \frac{n_x + n_y \cdot \frac{y_m}{x_m}}{1 + \frac{y_m}{x_m}}$$

Als nu geldt $n_x = n_y$, dan is de schaal van de som gelijk aan de som van de afzonderlijke schalen en wordt dus elke lengtemaat in het model op dezelfde schaal weergegeven. Er is dan meetkundige gelijkvormigheid.

Als echter $n_x \neq n_y$, is de schaal van de som niet alleen afhankelijk van de afzonderlijke schalen, maar ook van de parameters in het model. Er treden dan schaaleffecten op.

Er is nu sprake van een schaalvoorwaarde $n_x = n_y$. Hiervan kan worden afgeweken, maar dit gaat gepaard met schaaleffecten.

5.13.2 Schaaleffecten in de proefopstelling

In de proefopstelling is sprake van meetkundige gelijkvormigheid: alle lengte- en hoogtematen worden op dezelfde lengteschaal weergegeven. Voor deze lengteschaal geldt:

$$n_L = \frac{(h_D)_p}{(h_D)_m} = \frac{0.30\text{m}}{12\text{m}} = 40$$

Voor gelijkvormigheid van de stroming moet de snelheidshoogte met dezelfde factor worden verschaald, dus:

$$n \left(\frac{u^2}{2g} \right) = n_L \Leftrightarrow n_u = \sqrt{n_L} \approx 6.3$$

Dit is de Froude-voorwaarde voor gelijkvormigheid van stromingen.

Het grootste probleem in een schaalmodel is het verscalen van de diameter van het bodemmateriaal. Voor volledige meetkundige gelijkvormigheid moet de korreldiameter van het zand met dezelfde factor worden verschaald als het gehele model. In dit geval zou dat betekenen dat er in het model met een korreldiameter van $D_{50} \approx 300 \mu\text{m}/40 = 7.5 \mu\text{m}$ moet worden gewerkt. Er is dan sprake van zeer cohesieve grond (klei, silt) waardoor het bresgroeiproces geheel anders zal verlopen dan in het prototype en er geen getrouwe weergave van de werkelijkheid (zanddijk) blijft bestaan.

In het model is zand gebruikt met een diameter van $D_{50} = 88 \mu\text{m}$. Uitgaande van een korreldiameter in het prototype van $300 \mu\text{m}$ bedraagt de schaalfactor: $n_D \approx 300 / 88 = 3.41$, een afwijkende verscaling. Dit behoeft echter geen probleem te geven. Om dit vast te stellen, wordt nagegaan in welke grootheden de korreldiameter een rol speelt.

Voor het sedimenttransport wordt de formule van Bagnold-Visser gebruikt (zie paragraaf 4.2). Hiervoor geldt:

$$s(x') = \frac{x'}{l_a} \cdot s_s = \frac{w_s \cdot \cos \beta}{q_T} \cdot \frac{e_s \cdot U^4 \cdot C_f}{(1-p) \cdot \Delta \cdot g \cdot w_s \cdot \cos^2 \beta}$$

De enige grootheden die afhankelijk lijken te zijn van de korreldiameter zijn hierin de valsnelheid w_s en de wrijvingscoëfficiënt C_f . De valsnelheid w_s verdwijnt uit de formule na het uitwerken van de vermenigvuldiging. De wrijvingscoëfficiënt C_f verdient nadere aandacht, deze volgt uit:

$$C_f = \frac{\kappa^2}{\ln^2 \left(\frac{12 \cdot d}{k} \right)}$$

Hierin is k de ruwheid volgens Van Rijn [6] waarvoor geldt:

$$k = 3 \cdot \theta \cdot D_{90} \quad (\theta \geq 1)$$

$$k = 3 \cdot D_{90} \quad (\theta \leq 1)$$

Voor θ geldt:

$$\theta = \frac{C_f \cdot U^2}{\Delta \cdot g \cdot D_{50}}$$

Bij het substitueren van θ in de uitdrukking voor k in het geval $\theta \geq 1$, blijkt dat de diameter D wegvalt. De ruwheid k en daarmee de wrijvingscoëfficiënt C_f is dus onafhankelijk van de diameter van het bodemmateriaal.

In hoofdstuk 4 zijn de formules voor de beschrijving van de dieptegroei van het stroomgat gegeven. In deze formules komt naast constanten (g , m , p en Δ) en geometrische parameters (h_w , Z_T en β) alleen de wrijvingscoëfficiënt C_f voor.

De erosie in breedterichting wordt bepaald door de diepte-erosie van de teen van het zijtalud. Een verlaging z_b van de teen van het zijtalud betekent tegelijkertijd een evenredige erosie $z_b \cdot \cos \gamma$ loodrecht op het talud, als γ de helling van het zijtalud is. Deze erosie treedt op langs het gehele zijtalud omdat het talud onder de maximale, kritieke helling staat. Voor de erosie aan de teen van het zijtalud gelden dezelfde formules als voor de dieptegroei. Hieruit volgt dat de breedtegroei van het stroomgat van dezelfde parameters afhankelijk is als de dieptegroei.

Uit deze beschouwing blijkt dat het bresgroeiproces in het model vrij is van schaaleffecten zolang de mobiliteitsparameter van Shields (θ) groter is dan 1. Uit de berekening van het proefverloop (zie bijlage V) blijkt dat aan deze voorwaarde wordt voldaan tot halverwege de laatste fase (circa $\frac{1}{2}$ minuut voor het einde van het bresgroeiproces).

In de laatste 30 s van het proces waarin er op basis van bovenstaande beschouwing wel schaaleffecten kunnen optreden zijn de snelheden in het stroomgat relatief klein ($u_T \leq 0.5$ m/s) ten opzichte van de eerdere fasen van het proces. De ontgronding in deze laatste periode is daardoor relatief klein, en de effecten van de verschaling erop worden als verwaarloosbaar aangenomen.

6 De meetopstelling

In hoofdstuk 5 is de opstelling in het proefbassin besproken. Dit hoofdstuk gaat in op wat er gemeten dient te worden om een goede dataset voor het bresgroeiproces te verkrijgen. Ook wordt bekeken hoe de van belang zijnde grootheden gemeten kunnen worden en hoe de meetopstelling kan worden ingepast in de proefopstelling.

6.1 Te meten grootheden

De volgende grootheden zijn van belang voor een goede beschrijving van het bresgroeiproces:

- bovenstroomse waterstand h_w ;
- benedenstroomse waterstand h_{kom} ;
- bovenstroomse stroomsnelheid u_w ;
- stroomsnelheid in de bres u_T ;
- bresafmetingen $b_T(t)$ en $z_b(x,y,t)$.

De bovenstroomse waterstand h_w is mede bepalend voor het debiet door de bres, zowel in volkomen als in onvolkomen overlaat situatie. Omdat in geval van een dijkdoorbraak de buitenwaterstand (zee- of rivierwaterstand) in de relatief korte tijd die de doorbraak duurt niet zo sterk zal variëren, is h_w tijdens de experimenten zoveel mogelijk constant gehouden. Het laboratorium beschikt niet over een elektronisch regelbare watertoevoer naar het proefbassin. Bij het uitvoeren van de proeven is de constante waterstand daarom bewaakt door het aflezen van enkele in het bovenstroomse gedeelte van het bassin geplaatste peilschalen. Bij het handmatig bedienen van de afsluiters van de toevoerbuizen werden deze peilschalen in het oog gehouden.

De meting van h_w diende voldoende ver bovenstrooms van de bres plaats te vinden, buiten het versnellingsgebied. Hier wordt de waterstand niet beïnvloed door de aanwezigheid van de bres.

In fase V is de stroming subkritisch en wordt het debiet door de bres bepaald door zowel de bovenstroomse waterstand h_w als de benedenstroomse waterstand h_{kom} . In de eerste twee fasen (taludversteiling en achteruitschrijding) is de waterstand in de polder zeer klein en daardoor, praktisch gezien, niet te meten. Pas in de derde fase, wanneer het debiet door de bres toeneemt, wordt de komberging meetbaar.

De kombergingswaterstand h_{kom} diende gemeten te worden buiten de te verwachten ontgrondingskuil, zodat de meting niet beïnvloed werd door de aanwezigheid van de kuil.

Via de glaswand kon de waterstand in de as van de bres met behulp van videocamera's gevolgd worden tot circa 6.5 m benedenstrooms.

De bovenstroomse stroomsnelheid u_w is gemeten omdat in de meeste berekeningen de waterstand h_w gebruikt wordt, terwijl dit feitelijk het energieniveau, $H_w = h_w + u_w^2/2g$ dient te zijn.

De stroomsnelheid in de bres u_T en de bresafmetingen b_T en $z_b(t)$ zijn gemeten om daaruit het debiet door de bres te kunnen berekenen. Uit de bresbreedte b_T en de diepte z_b in de as van de bres kan een doorstroomprofiel worden bepaald. Samen met de gemeten stroomsnelheid geeft dit (een schatting voor) het debiet door de bres Q_T .

In zowel fase I als fase II bedroeg de diepte in de bres slechts enkele centimeters. De stroomsnelheid in de bres is dan, praktisch, niet te meten. Pas ergens in fase III werden de diepte en de breedte van de bres dusdanig groot dat een meetinstrument voor de stroomsnelheid geplaatst kon worden.

6.2 De meetinstrumenten

Voor het meten van de genoemde grootheden zijn over het algemeen verschillende meetinstrumenten toepasbaar. In deze paragraaf worden verschillende mogelijkheden voor de meetinstrumenten met elkaar vergeleken. Voor iedere grootheid is het instrument gekozen dat voldoende nauwkeurig en, praktisch gezien, toepasbaar is.

6.2.1 Het meetinstrument voor de waterstand

Voor het meten van niet constante waterstanden op elektronische wijze is de golfhoogtemeter het meest geëigende instrument.

De probe van de golfhoogtemeter bestaat uit twee evenwijdige metalen elektroden, die verticaal in het elektrisch geleidende water worden geplaatst. Door een stroom te sturen tussen de meetelektroden via het water, kan een elektrische weerstand worden gemeten die afhankelijk is van de hoogte van de kolom water tussen de elektroden, het geleidingsvermogen van het water en de onderlinge afstand tussen de elektroden. Om de invloed van het niet constante geleidingsvermogen van het water uit te schakelen is een kleine referentie-elektrode, die altijd onder water blijft, in de probe verwerkt, zodat de elektrische weerstand vrijwel alleen afhankelijk is van de indompelingsdiepte.

De meetelektroden hebben een lengte van 59 cm en zijn 23 mm uit elkaar geplaatst. Het bereik van de golfhoogtemeter is instelbaar op 5, 10, 20 en 50 cm.

IJking van het instrument geschiedt door de probe circa een half uur in stilstaand water te plaatsen, en de uitgangsspanning op een constante waarde in te stellen. Door de probe een aantal centimeters naar boven of beneden te verstellen en de uitgangsspanning te noteren kan een calibratie gemaakt worden.

6.2.2 Het meetinstrument voor de stroomsnelheid

Om stroomsnelheden te meten zijn de volgende instrumenten mogelijk: een micromolen en een electromagnetische stroomsnelheidsmeter.

6.2.2.1 De micromolen

Een micromolen bestaat uit een klein propellertje dat onder water geplaatst wordt en door de stroming wordt aangedreven. De schoepen van de propeller zijn geperforeerd met kleine gaatjes. Het aantal omwentelingen van de propeller is een maat voor de stroomsnelheid van de vloeistof. Het nadeel van een micromolen is dat deze erg gevoelig is voor verontreinigingen in het water. De gaatjes in de schoepen slibben dan dicht, waardoor de meting onbetrouwbaar wordt. Aangezien er gedurende de proeven veel zand in suspensie kwam, was toepassing van een micromolen geen goede optie.

6.2.2.2 De electromagnetische stroomsnelheidsmeter

Een andere mogelijkheid voor het meten van stroomsnelheden is een electromagnetische stroomsnelheidsmeter, afgekort een e.m.s.

Een e.m.s. bestaat uit een sensor die in de stroming geplaatst wordt en via kabels verbonden is aan een zgn. "control unit". Het is in feite de omgekeerde versie van de pijpstroommeter, die gebruik maakt van de inductiewet van Faraday voor snelheidsmetingen van een geleidende vloeistof door een magnetisch veld. Dit veld wordt opgewekt door een wisselstroom door een kleine spoel in de sensor. Twee paar haaks op elkaar geplaatste elektroden geven de spanningen af die overeenkomen met de snelheid van de vloeistof langs de sensor. De spanningen zijn evenredig met de x- en y-componenten van de vloeistofsnelheid parallel aan het oppervlak van de elektroden. De kleine signalen worden door de toegevoegde elektronica versterkt tot relatief hoge uitgangsspanningen, waarna via goniometrie de vloeistofsnelheid en stroomrichting kunnen worden verkregen.

De e.m.s. is toepasbaar in zowel schoon als troebel water met een maximale temperatuur van 50 °C. De nulstabiliteit, de afwijking van het nulpunt in de tijd, bedraagt minder dan 1 cm/s per 24 uur. De sensor kan geplaatst worden tot 0.5 cm van de bodem of een wand. De maximaal meetbare stroomsnelheid is instelbaar en bedraagt 1 m/s, 2.5 m/s of 5 m/s.

Voordat met de meting wordt begonnen dient de e.m.s. geijkt te worden, door het uitgangssignaal in stilstaand water op 0 Volt in te stellen. De sensor dient voor gebruik minimaal een half uur ingeschakeld te zijn om nulpuntsverschuivingen te voorkomen.

Vertaling van de uitgangsspanning naar snelheden geschiedt door toepassing van de empirische ijkingsformules, die door het Waterloopkundig Laboratorium voor ieder instrument afzonderlijk zijn opgesteld.

Gezien de gevoeligheid van een micromolen, en de hoeveelheid zand die in suspensie getransporteerd werd, is gekozen voor toepassing van een electromagnetische stroomsnelheidsmeter, e.m.s.

6.2.3 Het meetinstrument voor de bresgeometrie

Het lengteprofiel van de ontgrondingskuil in de as van de bres is vastgelegd op de video-beelden. Voor het meten van de afmetingen van de ontgrondingskuil buiten de as van de bres zijn verschillende alternatieve meetmethoden bedacht:

- visuele meting;
- trillingsmeter;
- meting op basis van interne weerstand;
- radar of sonar;
- elektronische profiel indicator of profielvolger.

6.2.3.1 Visuele meting

Een visuele meetmethode is bijvoorbeeld het toepassen van verschillend gekleurde laagjes zand op de plaats waar de ontgrondingskuil verwacht wordt. Met behulp van een camera boven de kuil kan de kleur van het getransporteerd zand en de kleur van de bodem ter plaatse worden geregistreerd. Uit de kleur kan afgeleid worden hoe diep de kuil bij benadering is.

Een nadeel van zo'n methode is dat er, om voldoende nauwkeurigheid te bereiken, veel verschillende, dunne laagjes zand met ieder hun eigen, duidelijk te onderscheiden kleur aangelegd moeten worden.

Een ander nadeel is dat het zand gedurende de proef wegspoelt en door elkaar in de bak benedenstrooms van de dijk terechtkomt. Dit zand wordt opgeveegd om in de volgende proef gebruikt te worden. Het zand is nu qua kleur gemengd. De oplossing van dit probleem zou kunnen zijn het toepassen van een kleurstof die in enkele uren oplost in water. Het zand is dan "schoon" voor een nieuwe kleuring en gebruik in de volgende proef.

Het grootste probleem bij een visuele meetmethode is het feit dat gedurende de dijkdoorbraak grote hoeveelheden zand in suspensie getransporteerd worden. Het water is daardoor troebel, en er kan zeer waarschijnlijk niet met behulp van een camera doorheen gekeken worden. De bodem zelf kan dus niet visueel geregistreerd worden. Tevens is van het zand dat getransporteerd wordt niet de plaats van oorsprong bekend. Zodoende is uit de kleur van het in beweging zijnde zand wel de diepte op een zekere locatie bekend, maar de coördinaten van die locatie niet.

Deze methode geeft dus hoogstens een grove schatting van de kuilafmetingen.

6.2.3.2 De trillingsmeter

Het idee van een trillingsmeter is al in 1994 in de Zwinproef toegepast. Er is toen door Smit en Snip [9] een nieuw meetinstrument ontwikkeld, de trillo. Deze trillo geeft een continu signaal van de spanning die door de stroming op de trillo wordt uitgeoefend. Het is hierbij echter onduidelijk welke signaalsterkte het feitelijke "begin van bewegen" aangeeft.

Een variant op de trillo is een soortgelijke trillingsmeter, met een binair signaal (ja/nee). Op het moment dat de trillingsmeter in de dijk begraven ligt, geeft hij een signaal “nee”, en zodra de meter in de stroming terechtkomt, wordt het signaal “ja”. De drempelspanning waarbij het uitgangssignaal overgaat van “nee” naar “ja” komt overeen met de kracht die door de stroming op de meter wordt uitgeoefend.

Om voldoende nauwkeurig te kunnen meten in een laag zand van circa 35 cm dik, moet het instrument zeer klein zijn, in de orde van grootte van 1 cm. De stromingsweerstand is dan ook zeer klein. De kracht, die door de stroming op een cilinder, met een diameter van 1 cm en een lengte van 1 cm wordt uitgeoefend, is gelijk aan:

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 \cdot A \approx 0.12 \text{ N}$$

Hierin is A het aanstroomoppervlak ($A = 1 \cdot 1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$), C_D de sleepcoëfficiënt ($C_D = f(Re) \approx 1.2$) en u de stroomsnelheid ($u_{\max} \approx 1.4 \text{ m/s}$ in fase IV).

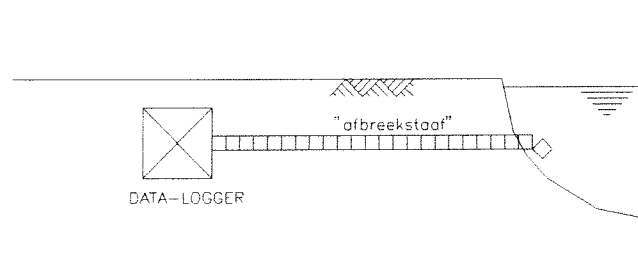
Deze kracht komt overeen met een spanning van $\sigma_D = 0.12 \text{ N} / 10^{-4} \text{ m}^2 = 1200 \text{ N/m}^2$ op het instrument.

De aanstroomkracht, waarbij de trillo “af moet gaan” is dus erg klein. Het gevolg hiervan is dat de dijk zeer voorzichtig over de trillo’s aangelegd moet worden, om te voorkomen dat de trillo’s al bij voorbaat een ja-signaal geven. De meting is dan mislukt.

Het is praktisch niet uitvoerbaar om een dijklichaam aan te leggen, zonder spanningen groter dan 1200 N/m^2 op de ondergrond uit te oefenen.

6.2.3.3 Meting op basis van interne weerstand

Een andere methode om de bresgeometrie te meten is gebaseerd op de interne weerstand van een meetstaaf die in de dijk is ingegraven (zie figuur 6.1). De meetstaaf bestaat uit kleine segmentjes (in de orde van 1 cm) die onder invloed van de stroming afbreken. De datalogger meet continu de interne weerstand van de staaf en registreert zo de overblijvende lengte van de staaf.



figuur 6.1: Principe van een afbreekstaaf voor het meten van de bresgeometrie

De datalogger en de meetstaaf worden in de dijk ingegraven. Voor deze methode geldt hetzelfde nadeel als voor de mini-trillo, namelijk de zeer kleine stromingskracht die op een elementje wordt uitgeoefend, en waarbij het elementje moet afbreken.

6.2.3.4 Radar en sonar

Een ander alternatief is het toepassen van radar boven de te verwachten ontgrondingskuil. De grote vraag bij deze methode is of de reflectie van het wateroppervlak niet te sterk is, zodat de reflectie van de bodem niet meer te onderscheiden is.

Ook is het in principe mogelijk sonar te gebruiken. Het nadeel van dit instrument is echter dat het alleen werkt als het onder water geplaatst is. Dit kan pas ergens in fase III, wanneer de diepte zich voldoende ontwikkeld heeft. Ook sonar is dus niet zo'n goede keuze.

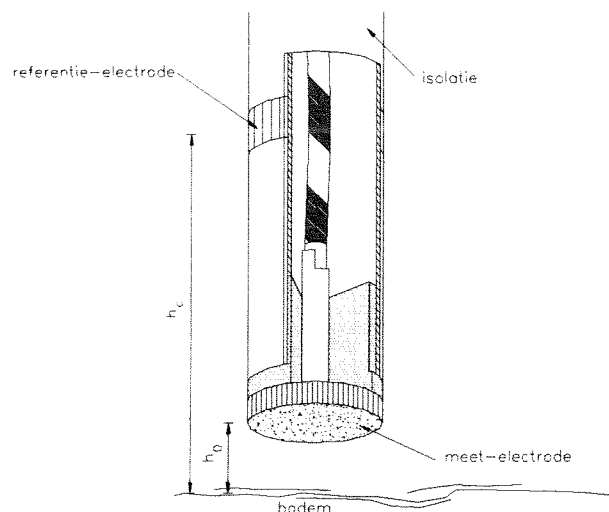
Bovendien is zowel radar als sonar een zeer dure methode, die specialistische apparatuur vereist, die niet in het laboratorium voorradig is.

6.2.3.5 De profielvolger

Het laatste alternatief is de elektronische profiel indicator, of profielvolger.

De profielvolger is ontwikkeld door het Waterloopkundig Laboratorium om in hydraulische modellen onafgebroken beweegbare beddingen en bodems te volgen.

Het instrument bestaat uit een sonde, een naald die verticaal in het water geplaatst wordt, zie figuur 6.2. Een servomechanisme zorgt ervoor dat de top van de probe steeds op constante afstand van de bedding blijft. Deze afstand is instelbaar van 0.5 tot 2.55 mm. Als het gehele instrument in horizontale richting verplaatst wordt, zal de probe continu het profiel van de bodem volgen.



figuur 6.2: Probe van de profielvolger

Het principe van de werking is gebaseerd op het merkbaar verschil tussen het elektrisch geleidingsvermogen van water en dat van het beddingmateriaal. Op de top van de probe bevindt zich de meetelectrode, zo'n 5 mm vanaf de top de referentie-electrode. Geplaatst in een vloeistof ontstaat een elektrische weerstand tussen deze elektroden, welke een functie is van het geleidingsvermogen van de vloeistof en de plaats waar de meetelectrode zich be-

vindt. Als de meetelectrode in de buurt komt van een minder geleidende bodem neemt de weerstand snel toe. De weerstand van de referentie-electrode blijft vrijwel gelijk. Een potmeter, gemonteerd aan de motor van de probe, geeft de verticale positie van de probe aan. De profielvolger kan toegepast worden in water van 3 tot 108 cm diep. De gevoeligheid van de sonde ligt in de orde van 0.2 mm.

De profielvolger wordt geijkt met behulp van een standaard-ijkblokje, dat in hoogte een bekend aantal centimeters verloopt. Door de profielvolger onder water over het horizontaal geplaatste ijkblokje te laten lopen kan het verband tussen de uitgangsspanning en de hoogte van de probe worden vastgesteld.

Bij toepassing van de profielvolger in de bresgroei-experimenten is het de vraag of de sonde reageert op de onderste laag van de stroming (met een relatief grote zandconcentratie), of op de "echte" bodem (de bovengrens van het niet getransporteerde bodemmateriaal). In eerdere toepassingen van de profielvolger, in minder turbulente stromingen, zijn bevredigende resultaten behaald. Toch blijft het de vraag of het instrument ook in deze specifieke situatie, met de grote stroomsnelheden, voldoet.

6.2.3.6 Conclusie

Uit bovenstaande beschouwingen omtrent een mogelijk meetinstrument voor de bresgeometrie kan geconcludeerd worden dat:

- visueel meten vrijwel onmogelijk is;
- de mini-trillo en de afbreekstaaf te gevoelig zijn voor het ingraven in de dijk;
- radar en sonar te duur en niet voorradig zijn;
- de profielvolger wellicht toepasbaar is.

Op basis van deze overwegingen is gekozen voor toepassing van de profielvolger om de bresgeometrie te meten. Omdat tijdens de eerste proef bleek dat de resultaten van de profielvolger niet bevredigend waren, zijn in de tweede en derde proef geen profielvolgers meer gebruikt.

6.3 De meetopstelling

In figuur 6.3 is de opstelling van de meetinstrumenten gegeven. In tabel 6.1 zijn de plaatscoördinaten van de meetinstrumenten gegeven, zoals ze in het eerste experiment gelden.

Bovenstrooms van de dijk zijn drie golfhoogtemeters (G) geplaatst. In de polder benedenstrooms is een golfhoogtemeter geplaatst om de komberging te registreren. In de bres was geen golfhoogtemeter nodig omdat de waterstand op de videobeelden kan worden afgelezen.

Zowel bovenstrooms als in de bres is een stroomsnelheidsmeter (E) geplaatst. De meter in de bres is tijdens fase III geplaatst, zodra voldoende waterdiepte aanwezig was.

Instrument	x	y	Meting
	[m]	[m]	
G 1	-6.50	0.70	$h_{w,1}$
G 2	-4.60	0.70	$h_{w,2}$
G 3	-3.70	2.90	$h_{w,3}$
G 4	-8.10	-3.45	h_{kom}
E 1	-6.50	1.40	$u_{w,1}(x,y)$
E 2	-4.60	1.40	$u_{w,2}(x,y)$
E 3	0.80	0.45	$u_T(x,y)$
P 1	3.55	0.75	$z_b(P1)$
P 2	3.55	1.75	$z_b(P2)$
P 3	2.30	1.75	$z_b(P3)$
P 4	2.30	0.75	$z_b(P4)$
P 5	2.00	0.05	$z_b(P5)$

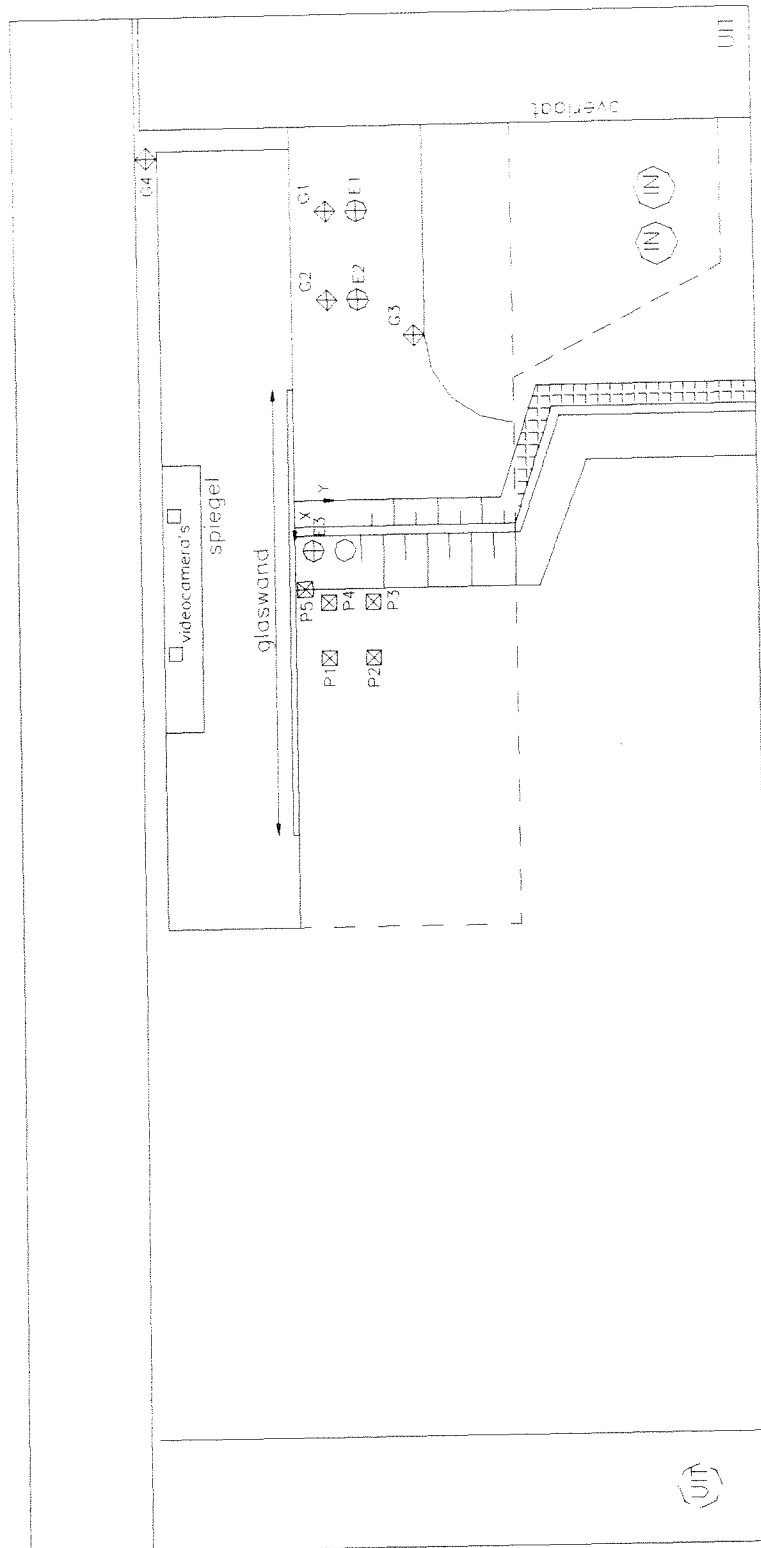
tabel 6.1: Plaatscoördinaten van de meetinstrumenten in het eerste experiment

In totaal zijn vijf profielvolgers (P) gebruikt. Vier profielvolgers (P1 - P4) dienden om de kuilafmetingen in twee dwarsraaien te meten. De vijfde profielvolger (P5) is in de meetopstelling van figuur 6.3 aangegeven op enkele centimeters van de glaswand. Deze diende als controle op de werking van de profielvolgers. Langs de glaswand is de diepte vastgelegd op video. De uitkomsten van deze profielvolger (P5) kunnen worden vergeleken met de video-opnames. Indien deze twee niet met elkaar overeenkomen, zijn de uitkomsten van de overige profielvolgers “verdacht”.

In de meetruimte zijn twee videocamera's en twee spiegels opgesteld. De spiegels zijn onder 45° geplaatst en de videocamera's hingen erboven. Op deze wijze kon met de twee beschikbare videocamera's vrijwel de gehele lengte van de glaswand in beeld worden gebracht. Zodoende kon de diepte van de ontgrondingskuil in de as van de bres worden geregistreerd.

Loodrecht boven de bres (in de portaalkraan van het laboratorium) hing een fotocamera om de breedtegroei van het gat in de dijk om de 20 à 30 s op dia vast te leggen.

Voorafgaande aan de experimenten is in een klein glazen bakje uitgetoetst hoe dicht de profielvolger bij het glas geplaatst kan worden terwijl het uitgangssignaal betrouwbaar blijft. De minimale afstand bleek ongeveer één centimeter te bedragen en kwam eerder voort uit het criterium dat de probe vrij moet kunnen bewegen dan dat het signaal onbetrouwbaar werd. Als de afstand kleiner werd dan één centimeter werd het risico dat de probe de wand raakte bij het volgen van de bodem te groot. Om zeker te zijn dat de probe het glas niet raakte en toch een vrijwel gelijke diepte te krijgen als direct langs het glas, is de controle-profielvolger in de meetopstelling op circa 5 cm uit de wand geplaatst.



figuur 6.3: Opstelling van de meetinstrumenten in het proefbassin

De uitgangsspanning van de profielvolger is begrensd tot + of - 10 Volt. Vóór de metingen is daarom gecontroleerd of de uitgangsspanning van de profielvolgers te allen tijde kleiner blijft dan deze 10 V. In tabel 6.2 zijn de uitgangssignalen van de vijf gebruikte profielvolgers in de uiterste standen aangegeven: de probe geheel omhoog en de probe geheel omlaag. Uit deze tabel blijkt dat alle profielvolgers over het gehele bereik van de probe een meetbaar signaal gaven.

nr. provo	hoog [V]	laag [V]
P 1	4.50	0.03
P 2	4.58	0.06
P 3	7.06	2.53
P 4	8.37	4.02
P 5	4.53	8.24

tabel 6.2: Uitgangsspanning van de profielvolgers in extreme stand

De meetinstrumenten zijn via een DAP-kaart op een meetcomputer aangesloten. Deze DAP-kaart beschikte over zestien invoerkanalen. Hiervan zijn er vijftien gebruikt, vier voor de golfhoogtemeters, zes voor de snelheidsmeters (drie meters, in twee richtingen) en vijf voor de profielvolgers.

6.4 Verwerking en presentatie van de resultaten

De meetgegevens van de golfhoogtemeters, de electromagnetische stroomsnelheidsmeters en de profielvolgers zijn opgeslagen in een meetcomputer. Hiervoor is het softwarepakket DasyLab gebruikt. Dit programma schrijft de gegevens weg in een tabel met voor iedere meting een aparte kolom. De tabel met meetgegevens is in ASCII-formattering opgeslagen op de harde schijf van de computer, en is zonder problemen te converteren naar een spreadsheet in Excel. In deze spreadsheet zijn de gemeten voltages omgerekend naar dieptematen en snelheden.

De resultaten van de waterstandsmetingen en de snelheidsmetingen worden gepresenteerd in de vorm van een grafiek, met het verloop van de waterstand en de stroomsnelheid ter plaatse van het instrument. De drie bovenstroomse waterstanden zijn in één figuur geplott om onderlinge vergelijking te vereenvoudigen. Van iedere e.m.s. is één plot gemaakt waarin zowel de snelheid in x-richting als die in y-richting staan.

Uit de metingen van de profielvolgers is de diepte van de ontgrondingskuil ter plaatse berekend. Hieruit kunnen, in combinatie met de diepte in de as van het stroomgat die uit de videobeelden volgt, dwarsprofielen van de ontgrondingskuil voor verschillende tijdstippen tijdens het bresgroeiproces worden geconstrueerd.

De breedte van het stroomgat is opgemeten uit de dia's. De dia's zijn in eerste instantie iedere twintig seconden genomen en later iedere dertig seconden. Van deze breedtemeting is een grafiek gemaakt, waarin tussen deze discrete meetpunten is geïnterpoleerd.

De videobeelden zijn gedigitaliseerd op dezelfde tijdstippen waarop een dia van de breedte van de bres gemaakt is en in de computer opgeslagen met behulp van het computerprogramma OAK MediaCapture. Vervolgens zijn kleur, scherpte en contrast van de beelden zoveel mogelijk verbeterd in het programma PaintShop Pro. Tenslotte is met behulp van het programma ScanPlus de bodemligging en de waterlijn gescand. Het resultaat hiervan was per gedigitaliseerd beeld een tabel met de coördinaten van de bodem en de waterlijn in termen van pixels. Deze tabel is ingelezen in Excel en omgerekend naar lengte- en hoogtematen in meters.

De gegevens van de verschillende videobanden zijn aan elkaar "geplakt," waardoor om de 20 à 30 s een langsdoorsnede van de ontgrondingskuil in de as van de bres ontstond.

Na afloop van iedere proef is de vorm van de uiteindelijke ontgrondingskuil bepaald met behulp van een waterpassing, in combinatie met het fotograferen van de dieptelijnen van de kuil. Deze gegevens worden gepresenteerd in de vorm van een contourplot met dieptelijnen van de ontgrondingskuil in de eindsituatie.

7 Beschrijving van de experimenten

De voorgaande hoofdstukken (H.5 en H.6) handelen over de voorbereiding van de experimenten, de proefopstelling en het meetprogramma. In dit hoofdstuk wordt verslag gedaan van de uitvoering van de drie experimenten. Tevens wordt per experiment een vergelijking gemaakt met het bresgroeimodel van Visser [15].

7.1 Het draaiboek voor de uitvoering

De activiteiten vóór, tijdens en direct na de uitvoering van een experiment verliepen volgens onderstaand schema.

Vooraf:

- zandbed aanleggen;
- dijk bouwen op het zandbed;
- initiële bres graven en tijdelijk afdichten met behulp van een zandzakje;
- lengteschaal aanbrengen boven de kruin van de dijk;
- bovenstroomse afvoerput openzetten en benedenstroomse put afdichten;
- probes van de meetinstrumenten reinigen;
- golfhoogtemeters opstellen;
- stroomsnelheidsmeters opstellen, inclusief één snelheidsmeter boven de initiële bres om tijdens de proef te laten zakken;
- profielvolgers opstellen in ruststand;
- videocamera's opstellen;
- meetinstrumenten aansluiten op de meet-pc;
- ingangssignalen in de meet-pc controleren;
- tijdsaanduiding in beeld van de videocamera's en de fotocamera aanbrengen;
- experimentnummer in beeld zichtbaar maken;
- pc-klok, horloge en "fotoklok" gelijkzetten;
- nulpunt digitale videoklok opnemen;
- belichting van de fotocamera instellen en nieuw diarolletje inleggen;
- alle meetinstrumenten in een emmer water hangen en laten opwarmen;
- meetbereik van de golfhoogtemeters afregelen;
- nulpunt van de stroomsnelheidsmeters afregelen.

Uitvoering:

- fotograaf in de kraan sturen;
- video-opnames starten;
- meet-pc starten;
- proefbassin bovenstrooms vullen tot de gewenste hoogte;

- zandzakje uit initiële bres verwijderen;
- aanwijzingen geven aan de mensen aan de afsluiters omtrent het debiet;
- per 20 à 30 s een dia laten nemen vanuit de kraan;
- e.m.s. in het stroomgat plaatsen zodra de bres voldoende breed en diep is;
- profielvolgers starten zodra benedenstrooms voldoende waterdiepte aanwezig is.

Na afloop:

- constant waterniveau laten instellen met stroomsnelheid $u = 0$;
- referentiewaarde van de golfhoogtemeters opnemen bij dit waterpeil;
- golfhoogtemeters ijken;
- profielvolgers ijken;
- ontgrondingskuil meten;
- proefbassin laten leeglopen.

Tijdens de uitvoering van een experiment moesten verschillende activiteiten tegelijkertijd plaatsvinden. Hierbij hebben de volgende mensen geassisteerd:

- | | |
|---------------------------------|---------------------------|
| • K. de Bruin en J.A. van Duijn | bediening afsluiters; |
| • J. Tas en A.M. den Toom | controle videocamera's; |
| • R.J.M. Lemmens | bediening fotocamera; |
| • F. Adriaens | bediening profielvolgers. |

7.2 De resultaten van het eerste experiment

De eerste proef is uitgevoerd op donderdag 25 april 1996. In deze paragraaf wordt een beschrijving gegeven van het verloop van dit experiment aan de hand van persoonlijke waarnemingen en de resultaten van de metingen. Per paragraaf wordt een vergelijking gemaakt met het bresgroeimodel van Visser [15]. De resultaten van de meetinstrumenten staan in grafiekvorm in bijlage VI, samen met de langsdoorsneden van de ontgrondingskuil die uit de videobeelden zijn geconstrueerd. De getalswaarden van de metingen staan, gemiddeld over 5 s, in bijlage IX.1.

7.2.1 De opstelling

In het eerste experiment is een dijk met een hoogte $h_D = 0.30$ m op een zandbed met een dikte $d_B = 0.35$ m beproefd.

Tijdens de proef is bovenstrooms van de bres op drie locaties de waterdiepte ($h_{w,1}$, $h_{w,2}$ en $h_{w,3}$) en op twee plaatsen de stroomsnelheid ($u_{w,1}$ en $u_{w,2}$) gemeten. In de bres is alleen de stroomsnelheid gemeten (u_T), de waterdiepte in de bres is op de videobeelden af te lezen. De plaats van de meetinstrumenten is weergegeven in paragraaf 6.3, tabel 6.1 en figuur 6.3.

De golfhoogtemeters waren ingesteld op een bereik van 20 cm, met als nulpunt het niveau van de kruin van de zij-overlaat, $z = +24$ cm. Het meetbereik van de meters ligt dus tussen 14 en 34 cm.

De electromagnetische stroomsnelheidsmeters bovenstrooms van de dijk waren ingesteld op een meetbereik van 5 m/s. De e.m.s. in de bres kon snelheden tot 2.5 m/s meten.

Met de beschikbare videocamera's (2 stuks) is via twee spiegels de glaswand in de as van de bres van $x = -2.5$ m (begin van de glaswand) tot $x = +5$ m in beeld gebracht.

Tijdens het experiment heeft er op de afvoerput aan de benedenstroomse zijde van het proefbassin een stalen deksel gelegen met een slechte pakking. Deze afsluiting bleek niet waterdicht. Er is dan ook water, met zand in suspensie, uit het proefbassin gelekt en in het watercirculatiesysteem van het laboratorium terechtgekomen, met als gevolg dat het water in de opslagbunkers troebel werd. Tijdens het tweede experiment moest de afsluiting van het proefbassin worden verzekerd.

7.2.2 De tijdschaal van het eerste experiment

Uit de videobeelden zijn de tijdstippen van de overgangen tussen de verschillende fasen van het doorbraakproces afgelezen. Het tijdstip waarop het zandzakje uit de initiële bres werd genomen, is $t = t_0 = 0$ s. Op het moment dat, aan het einde van het proces, de stroomsnelheid (vrijwel) nul werd, sloeg een groot deel van het sediment in suspensie neer, of stroomde terug als gevolg van de traagheid. Dit is tijdstip $t = t_5$. Uit de videobeelden volgt:

t_0	0 s
t_1	38 s
t_2	82 s
t_3	134 s
t_4	350 s
t_5	448 s

De overgang van fase IV naar fase V, wanneer de stroming gestuwd wordt, is moeilijk uit de beelden vast te stellen. Met behulp van de waterstandsregistraties is dit tijdstip op $t_4 \approx 350$ s gesteld.

7.2.3 De waterstandsmetingen

In de grafiek van de bovenstroomse waterstand $h_{w,1}$, $h_{w,2}$ en $h_{w,3}$ (bijlage VI, figuur VI.1, pagina 34) valt op, dat de waterstand $h_{w,3}$, op $(x,y) = (-3.7\text{m}; 2.9\text{m})$, dicht langs de bodembescherming, structureel lager is dan de andere waterstanden. Blijkbaar zoekt de hoofdstroming de kortste weg naar het gat in de dijk, vanaf het begin van het zandbed diagonaal naar het stroomgat. Op dit traject zijn de stroomsnelheden hoger dan langs de muur van de meetruimte.

Tevens blijkt dat de bovenstroomse waterstand vrijwel constant is, zolang het debiet door de bres niet te groot is. Pas zodra het bresdebiet groter wordt dan het maximaal beschikbare instroomdebiet, daalt de waterstand significant. De aanname in paragraaf 5.7, dat een constante bovenstroomse waterstand realiseerbaar is met de gekozen proefopstelling, blijkt redelijk te zijn.

De opstuwing die optreedt voor $t \leq 150$ s vindt zijn oorzaak in het zeer kleine debiet (orde 10 l/s) dat door de bres stroomt gedurende de eerste fasen van het bresgroeiproces. Zo'n klein debiet kan praktisch niet nauwkeurig geregeld worden met een handbediende afsluiter. Verder is goed te zien dat de waterstand dicht bij de bres lager is als gevolg van de versnelling van de stroming. De meting van $h_{w,2}$ (op $x = -4.6$ m) is te allen tijde lager dan de meting van $h_{w,1}$, op $x = -6.5$ m.

Op het tijdstip $t \approx 300$ s daalt de bovenstroomse waterstand in meetpunt 1 tot onder het niveau van de kruin van de zij-overlaat ($z = 24$ cm). Vanaf dit tijdstip stroomt al het ingepompte water door de bres en voert de overlaat geen water meer af.

Van $t \approx 240$ s tot $t \approx 350$ s neemt het debiet door de bres sterk toe (fase IV van het bresgroeiproces). Het ingepompte debiet is te klein om deze groei op te vangen. Hierdoor daalt de bovenstroomse waterstand. In paragraaf 5.10 is aan de hand van het maximale debiet dat in het proefbassin gepompt kan worden, berekend dat de daling van de waterstand in de bres circa 10 cm zou bedragen. Uit figuur VI.1 blijkt dat de daling iets groter is, ongeveer 10 cm voor $h_{w,2}$, dus meer dan 10 cm in de bres.

Het debiet door de bres is dus groter dan uit de voorspelling in bijlage IV volgt. Een reden hiervoor kan zijn dat de toestroming niet zuiver cirkelvormig plaatsvindt, zoals in de voorspelling is aangenomen, maar meer ellipsvormig, zodat de ontgrondingskuil verder bovenstrooms van de dijk begint dan bij cirkelvormige aanstroming het geval is. De breedte waarover de toestroming plaatsvindt is dan groter, terwijl het debiet per meter breedte gelijk is.

De meetwaarden van $h_{w,3}$ geven van $t \approx 320$ s tot $t \approx 350$ s een constante waterstand van $h_{w,3} = 14$ cm aan. Dit komt overeen met de ondergrens van het meetbereik van de golfhoogtemeters. Blijkbaar is de waterstand ter plaatse van de meter zover gedaald dat de probe geheel droogstaat.

Vanaf $t \approx 350$ s treedt opstuwing van de waterstand bovenstrooms op. Dit is het begin van fase V waarin de stroming subkritisch wordt. Op $t \approx 420$ s zijn de afsluiters dichtgedraaid. Er stond nog een verval over de bres, want in de waterstandsregistratie is te zien dat vanaf dit tijdstip de waterstanden bovenstrooms dalen tot een eindwaarde van circa 18 cm.

Als laatste is het opmerkelijk dat aan het einde van het bresgroeiproces de waterstanden $h_{w,1}$ en $h_{w,2}$ vrijwel exact gelijk zijn terwijl $h_{w,3}$ duidelijk hoger is. Dit duidt erop dat de probe van deze golfhoogtemeter gedurende het experiment verzakt is. De verzakking van de meter heeft waarschijnlijk plaatsgevonden op $t \approx 350$ s, waar een sterke toename van het meetsignaal van meetpunt 3 is waar te nemen. Hiervoor zijn twee mogelijke oorzaken:

- De driepoot waarop de meter was gemonteerd was te kort om door het zandbed heen tot op de betonbodem van het proefbassin te worden geduwd. Het is dus mogelijk dat de gehele driepoot in het zandbed is weggezakt;
- Een andere mogelijkheid is dat de peilnaald waaraan de golfhoogtemeter is bevestigd is gezakt onder het gewicht van de probe.

Het meten van de kombergingswaterstand h_{kom} tijdens de eerste proef is helaas mislukt. Het was de bedoeling om de vierde golfhoogtemeter tussen de meetruimte en de golfmachine te plaatsen, op $(x,y) = (-6.5\text{m}; -3.5\text{m})$. De meter was tijdelijk in het bovenstroomse gebied op het zandbed gezet om in een laagje water op te warmen. Vervolgens is vergeten de meter vóór aanvang van de proef op de juiste plaats te zetten.

7.2.4 De snelheidsmetingen

De snelheidsregistraties in bijlage VI laten vrij grote fluctuaties zien. Deze worden veroorzaakt door de turbulentie van de stroming. Voor de vergelijking met het bresgroeimodel is alleen de gemiddelde snelheid van belang.

Figuur VI.2 in bijlage VI geeft het snelheidsverloop op $(x,y) = (-6.5\text{m}; 1.4\text{m})$. In deze grafiek is te zien dat gedurende de eerste drie fasen van het bresgroeiproces ($t \leq 134$ s) de stroomsnelheid in x-richting zeer klein is. Het debiet door de bres is te klein om grote snelheden bovenstrooms te veroorzaken. In deze periode is de snelheid negatief, het water stroomt over de zij-overlaat weg naar de afvoerput.

Ook in de latere fasen, wanneer het bresdebiet sterk groeit tot het maximum van $Q_{\text{max}} \approx 650$ l/s, blijft de stroomsnelheid op $x = -6.5$ m relatief klein (maximaal 20 cm/s). Dit heeft te maken met het gegeven dat de stroming de kortste weg naar de bres zoekt (zie boven). Slechts een relatief klein gedeelte van het debiet door de bres stroomt door de buitenbocht langs stroomsnelheidsmeter 1.

Hieruit volgt dat het gebruik van de waterstand h_w (in plaats van de energiehogte H_w) in de berekening van het debiet gerechtvaardigd is. De snelheidshogte in meetpunt 1 bedraagt maximaal zo'n 2 mm, zodat geldt: $h_w \approx H_w$.

De snelheid $u_{w,2}(x)$ in $(x,y) = (-4.6\text{m}; 1.4\text{m})$ is gedurende fase I en II ($t \leq 84$ s) vrijwel nul (figuur VI.3). Als in fase III het debiet door de bres als gevolg van de daling van de kruin van de dijk toeneemt, groeit ook de stroomsnelheid $u_{w,2}(x)$. Vanaf halverwege fase III ($t \approx 120$ s) neemt de snelheid vrijwel lineair toe tot een maximum van circa 80 cm/s op $t \approx 350$ s. Dit tijdstip markeert het begin van fase V waarin de stroming door de bres gestuwd wordt en de stroomsnelheid afneemt naar nul.

De snelheid in meetpunt 2 is in fase IV duidelijk groter dan de kritieke snelheid u_c , waardoor ter plaatse van meetpunt 2 ontgrondingen optreden. Meetpunt 2 ligt op 4.6 m vóór de bres; de breedte van de bres bedraagt aan het einde van fase IV zo'n 1.8 m (zie bijlage VI). Hieruit blijkt dat de zuivere cirkelvorm in de toestroming en de ontgrondingskuil, welke aangenomen is in de voorspelling van het proefverloop onjuist is. Een ellipsvorm, met als korte as de breedte van de bres, lijkt een meer getrouwe weergave van de werkelijkheid. De ontgrondingskuil begint dan verder bovenstrooms van de dijk.

In figuur VI.4 is de stroomsnelheid in de bres getekend. De snelheidsmeter hing klaar boven de dijk en is in de stroming geplaatst op $t \approx 240$ s. Dit had waarschijnlijk eerder kunnen gebeuren. Er is getracht hiermee in de volgende proeven rekening te houden.

De maximale snelheid in het stroomgat bedraagt circa 1.5 m/s op $t \approx 280$ s, tegen het einde van fase IV. De snelheid in de bres is niet constant gedurende fase IV, zoals aangenomen in bijlage V.4, zij neemt eerst toe naar het maximum van 1.5 m/s en tegen het einde van fase IV af naar ongeveer 1.2 m/s. De uit de aanname volgende stroomsnelheid, $u_{IV} = 1.4$ m/s, lijkt wel een goede schatting voor de maximale snelheid in de bres.

In alle meetpunten is de snelheid in y-richting, $u_w(y)$ en $u_T(y)$, gedurende het gehele bresgroeiproces negatief, dus naar de wand toe gericht. Dit komt doordat de stroming via een bocht naar de bres toegaat.

7.2.5 De breedtegroei

In figuur VI.5 van bijlage VI is de breedte van de bres middenop de kruin geschetst. In deze figuur is tevens het breedteverloop geschetst zoals dat in bijlage V berekend is met het bresgroeimodel van Visser, gecombineerd met de benaderingen van Steetzel voor de laatste fase, voor het geval van een zuiver cirkelvormige toestroming.

Ieder bolletje in de curve vertegenwoordigt de breedte die van een dia is opgemeten. Duidelijk is te zien dat het breedtegroeiproces een discontinu proces is. Telkens stort het zijtalud in waardoor een relatief grote hoeveelheid zand in de stroming terechtkomt. Deze hoeveelheid zand moet afgevoerd worden voordat de erosie van de zijtaluds verdergaat.

De geschetste breedte is gemeten middenop de kruin. De breedte is aan de bovenstroomse zijde van de kruin echter groter, en aan de benedenstroomse zijde kleiner, dan de weergegeven waarde. Dit komt door de "trechtersvorm" van het stroomgat.

Uit een vergelijking van de meetwaarden met de berekening volgens het bresgroeimodel van Visser [15] blijkt dat het proces korter duurt dan uit de berekening volgt, en de eindbreedte kleiner is. Ook dit duidt erop, evenals bij het debiet en de stroomsnelheden, dat de vorm van de toestroming meer langwerpig dan cirkelvormig is. In het geval van een ellips is de stroomvoerende breedte groter, waardoor de polder sneller gevuld is. De breedte groeit met dezelfde snelheid als bij een cirkelvorm, zodat door de kortere duur van de doorbraak de eindbreedte kleiner is. Dit sluit beter aan bij de meetwaarden.

7.2.6 De ontgrondingskuil

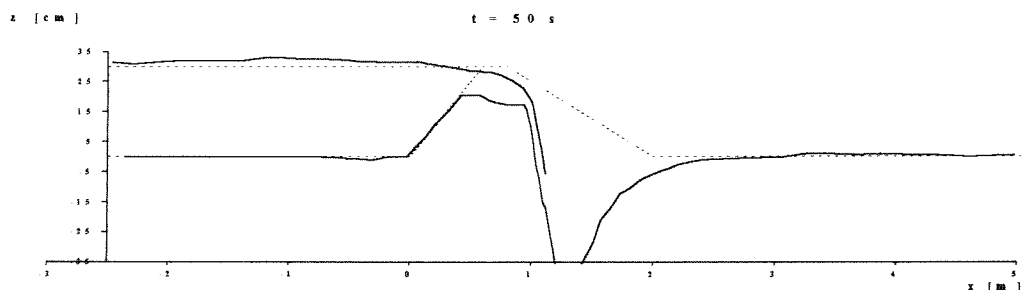
De meetresultaten van de profielvolgers, zie figuur VI.6, zijn niet vertaald naar dieptema-ten omdat uit deze figuur direct al duidelijk is dat de profielvolgers niet aan de verwachtingen hebben voldaan. Op $t \approx 210$ s is de profielvolger langs de glaswand (P5) aangezet. Het instrument geeft vanaf dat moment een andere, constante signaalsterkte. Dit wijst op een bodemligging die niet varieert. Uit de videobeelden blijkt echter dat de bodem van de kuil ook na $t = 210$ s nog daalt.

Op $t \approx 250$ s zijn de voorste profielvolgers (P1 en P4) aangezet. Profielvolger P1 geeft dan een verlopend signaal wat wijst op dieptegroei. Na ongeveer 20 s (op $t \approx 270$ s) raakte profielvolger P4 de bodem van het proefbassin, waardoor de geleidingsrail van de probe verbog. Direct daarna zijn, om de schade zoveel mogelijk te beperken, de profielvolgers P1, P4 en P5 uitgeschakeld, waardoor het signaal van deze instrumenten verder constant is. De achterste profielvolgers op het stalen frame (P2 en P3) zijn pas op $t \approx 330$ s aangezet. Ook deze instrumenten geven vervolgens een constant signaal waaruit geen dieptegroei blijkt. De profielvolgers hebben niet dusdanig gefunctioneerd, dat uit de resultaten ervan een dwarsprofiel van de ontgrondingskuil kan worden geconstrueerd. De instrumenten blijken niet geschikt te zijn in de huidige proefopstelling, zolang de ontgrondingskuil de betonbodem bereikt. Wellicht zijn ook de stroomsnelheden te groot voor de probe van de profielvolger om de bodem nauwkeurig te blijven volgen, alhoewel P1 in ieder geval tijdelijk de bodem geregistreerd heeft.

Uit de videobeelden zijn doorsneden langs de lengteas van de ontgrondingskuil geconstrueerd, zie bijlage VI.2. Deze doorsneden zijn op enigszins vertrokken schaal weergegeven, de totale hoogte bedraagt in de tekeningen 70 cm, de totale lengte 7.5 m.

In de eerste vier doorsneden is de waterstand op het zandbed benedenstrooms van de bres nog te klein om op de videobeelden waar te nemen. Tevens is in deze eerste doorsneden de werkelijke bodemligging nauwelijks te onderscheiden, doordat er zeer veel zand in suspensie is. De bodemligging in deze plaatjes is daarom een schatting van de werkelijke ligging aan de hand van stukjes van de bodem die wel op video zichtbaar zijn en de visuele waarnemingen tijdens de proef. Op de tijdstippen $t = 128$ s en $t = 148$ s, waarop wel een dia van de breedtegroei is genomen, zijn geen langsdoorsneden van de ontgrondingskuil getekend, omdat de bodemligging op deze tijdstippen in de videobeelden in het geheel niet te onderscheiden was.

Zodra het binnentalud steiler wordt, duikt de stroming als een straal over de dijk. De stroming is onder een grote hoek (circa 60° met de horizontaal) omlaag gericht, zie figuur 7.1. Al in een zeer vroeg stadium wordt de bodem van het proefbassin bereikt ($t = 50$ s) Dit is tijdens de proef visueel waargenomen, maar op de videobeelden nauwelijks te onderscheiden.

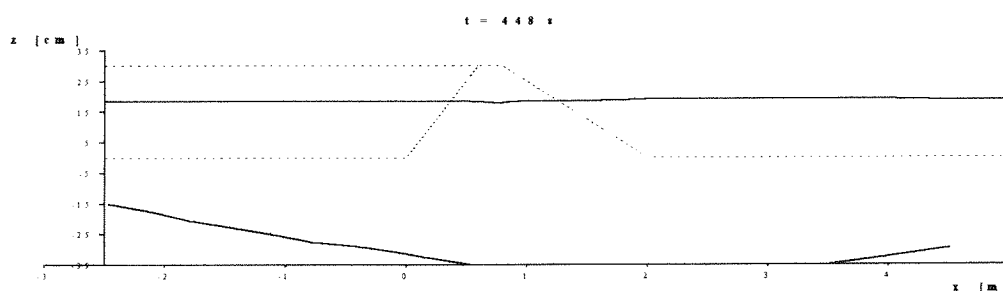


figuur 7.1: Proef 1 - Het bereiken van de betonbodem op $t = 50$ s

In eerste instantie ontstaat een relatief diepe put met steile taluds. Zodra het debiet toeneemt, in fase III, beginnend op $t \approx 70$ s, worden de bovenstroomse en de benedenstroomse helling van de kuil flauwer.

Vanaf dit moment wordt de lengte waarover de betonbodem blootligt alleen maar groter. Aan het einde van het proces, op $t = t_5 = 448$ s is deze lengte circa 3 m (zie figuur 7.2). De bovenstroomse helling van de ontgrondingskuil bedraagt circa 1 : 12, de benedenstroomse circa 1 : 40.

In vergelijking met paragraaf 5.9 blijkt hier dat de werkelijke helling van de ontgrondingskuil een factor 2 (benedenstroomse helling) respectievelijk 3 (bovenstroomse helling) flauwer is dan op basis van de schatting werd verwacht.



figuur 7.2: Proef 1 - De uiteindelijke ontgrondingskuil

Na afloop van de proef is een waterpassing gedaan om de geometrie van de uiteindelijke ontgrondingskuil vast te leggen. Deze gegevens resulteren in de contourplot van figuur VI.7 in bijlage VI. In deze plot zijn de dieptelijnen van $z = 0$ en $z = -5$ cm niet compleet, omdat de waterpassing niet ver genoeg in het bovenstroomse gebied is doorgezet.

Hoewel de vorm van de ontgrondingskuil bovenstrooms van de dijk niet uit deze plot kan worden afgeleid, is het wel duidelijk dat geen cirkelvorm is. De ontgrondingskuil begint op circa 6 m bovenstrooms van de dijk, terwijl de breedte van de bres zo'n 2 m bedraagt.

In de plot is de lengte waarover de betonbodem blootligt slechts 2 m, terwijl uit de langsdorsneden blijkt dat deze lengte circa 3 m bedraagt. Dit is verklaarbaar uit het feit dat de dia's van de dieptelijnen enige tijd na afloop van de proef zijn gemaakt. De taluds van de kuil zijn waarschijnlijk enigszins onderuitgezakt waardoor er weer zand op het beton is komen te liggen.

Uit de geul die langs de kop van de dijk ontstaat blijkt dat de stroomsnelheid daar groter was dan halverwege de bres in breedterichting. De richting van deze geul komt ongeveer overeen met de hoofdstroming van het water. De toestroming van water op het zandbed vond plaats over 6 m breedte tussen de punten $(x,y) = (-9m,5m)$ en $(-3m,5m)$.

7.2.7 Conclusie

De diepte van de kuil is in paragraaf 5.6 met behulp van de relatie van Breusers geschat op 33 cm. Het is gebleken dat de kuil veel dieper wil worden, al vroeg in het proces is de kuil dieper dan de schatting aangeeft. Blijkbaar is deze relatie niet geschikt voor de bresgroeisituatie. Het gegeven dat de diepte van de ontgrondingskuil in het Zwin'94 experiment

slechts weinig afweek van de voorspelling volgens de relatie van Breusers, is waarschijnlijk een “toevalstreffer” geweest. De uiteindelijke diepte van de kuil in ongestoorde toestand is uit de resultaten van dit experiment niet af te leiden, maar wel is duidelijk dat de einddiepte groter is dan 35 cm, met andere woorden $d_{\text{kuil}} > 1.17 h_D$.

De voorspelling van de lengte van de ontgrondingskuil is niet erg nauwkeurig geweest. Uit de voorspelling van paragraaf 5.9 volgt een lengte van 6 à 11 m, terwijl de lengte meer dan 14 m blijkt te worden.

Dit wordt hoofdzakelijk veroorzaakt doordat de taludhellingen van de ontgrondingskuil flauwer zijn dan verwacht (een factor 2 voor de benedenstroomse en een factor 4 voor de bovenstroomse helling). Daarnaast is de werkelijke kuildiepte groter dan vooraf voorspeld, waardoor de lengte van de kuil ook groter wordt.

Wellicht speelt hier ook de invloed van de betonbodem een rol. Waar de betonbodem blootligt ondervindt de stroming minder weerstand terwijl ter plaatse geen zand in suspensie kan worden opgenomen. Hierdoor wordt de erosie van het benedenstroomse talud van de kuil wellicht groter, en de kuil daardoor langer.

Een andere factor die van invloed kan zijn is de glaswand in de as van de bres. Het zand direct langs het glas wordt gemakkelijker geërodeerd omdat het glas zeer glad is. De kuil kan daarom sneller groeien in afmetingen dan in een situatie zonder glaswand het geval zou zijn.

Nog een mogelijkheid is dat de lengte van de ontgrondingskuil gestoord wordt door de aanwezigheid van het muurtje dat rond het zandbed staat, op $x = +9.4$ m. Als gevolg van de afstroming van het zandbed treedt ontgroning op vlak vóór het muurtje. Deze kuil kan zich door achterwaartse erosie in bovenstroomse richting verplaatsen, en zo de ontgrondingskuil als gevolg van de dijkdoorbraak in zijn ontwikkeling storen.

Uit de verschillende resultaten van het eerste experiment blijkt dat de cirkelvormige kuil, die in de voorspelling van bijlage V was aangenomen, niet optreedt. Een ellipsvormige toestroming lijkt een meer getrouwe weergave van de werkelijkheid. Ten behoeve van de vergelijking van het volgende experiment met het bresgroeimodel van Visser [15] is daarom een nieuwe voorspelling gemaakt waarin gerekend wordt met een ellipsvormige toestroming naar de bres. De resultaten van deze berekening staan in bijlage V.7. De verhouding tussen de lange en de korte as van de ellips is in de berekening 2:1, zodat de ontgrondingskuil op twee maal de bresbreedte bovenstrooms van de dijk begint.

7.2.8 Aanpassing van de proefopstelling voor het tweede experiment

In een poging de ontgrondingskuil in het tweede experiment ongestoord te laten ontstaan is de proefopstelling als volgt aangepast.

De hoogte van de dijk is in de volgende proef verkleind tot $h_D = 15$ cm. Hierdoor is het debiet door de bres kleiner waardoor een kleinere, minder diepe kuil ontstaat.

Tevens is het zandbed verhoogd tot een dikte van $d_b = 40$ cm. Deze dikte werd bepaald door de hoeveelheid zand die nog voorradig bleek te zijn. Met deze twee aanpassingen is getracht de betonbodem met zand bedekt te laten.

Verder is een gedeelte van de holle-gaten stenen vervangen door een muurtje van massieve stenen. De stroming wordt zo meer door de buitenbocht langs de wand van de meet-ruimte gedwongen, waardoor de aanstroming meer langs de lengteas van het stroomgat verloopt. De benedenstroomse afvoerput is met een betonnen deksel en een nieuwe rubberen pakking waterdicht gemaakt zodat geen vervuild water in het watercirculatiesysteem terecht kon komen. Tevens is de bovenstroomse put op soortgelijke wijze afgesloten waardoor het gehele proefbassin waterdicht is gemaakt. De zij-overlaat functioneerde niet meer als afvoer van overtollig water. Dit stelde hogere eisen aan de bediening van de afsluiters.

In de volgende proeven zijn geen profielvolgers meer toegepast, omdat vooraf niet gegarandeerd kon worden dat de probes de betonbodem niet konden raken. Op deze manier is met de kostbare profielvolgers een minimaal risico genomen.

Ook is ervoor gezorgd dat de meetinstrumenten niet konden verzakken. Dit is bereikt door langere driepoten te gebruiken en die door het zandbed heen op de betonnen vloer te drukken en tevens door op de peilschalen een klemmetje te zetten, zodat deze niet konden slippen onder het gewicht van de probes.

7.3 De resultaten van het tweede experiment

De tweede proef is uitgevoerd op maandag 13 mei 1996. In deze paragraaf wordt het verloop van dit experiment beschreven aan de hand van visuele waarnemingen, de meetgegevens en de videobeelden. De beschrijving vindt plaats op dezelfde wijze als de beschrijving van het eerste experiment, maar korter omdat veel van de opmerkingen die in de vorige paragraaf zijn gemaakt ook hier gelden. De grafieken van de meetgegevens en de resultaten van het digitaliseren van de videobeelden staan in bijlage VII. De getalswaarden van de metingen staan, per 5 s gemiddeld, in bijlage IX.2.

7.3.1 De opstelling

In de tweede proef is een dijk beproefd met een hoogte $h_D = 0.15$ m. De dikte van het zandbed bedraagt $d_B = 0.40$ m.

De meetinstrumenten zijn op vrijwel dezelfde positie geplaatst als in de eerste proef, zie tabel 7.1. Het meetbereik van de golfhoogtemeters is 20 cm en loopt ongeveer van $z = 0$ cm tot $z = 20$ cm.

In dit tweede experiment is gebruik gemaakt van vier videocamera's die rechtstreeks op de glaswand werden gericht, dus zonder de spiegels te gebruiken. Op deze manier is de ontgrondingskuil over een lengte van 9 m in beeld gebracht, van $x = -2.5$ m tot $x = 6.5$ m.

	x [m]	y [m]
$h_{w,1}$	-6.6	0.50
$h_{w,2}$	-4.4	0.55
$h_{w,3}$	-4.4	2.90
h_{kom}	-6.6	-3.50
$u_{w,1}$	-6.6	1.00
$u_{w,2}$	-4.4	1.05
u_T	0.5	0.50

tabel 7.1: Plaats van de metingen in proef 2

Uit het eerste experiment bleek dat de toestroming naar de bres geen cirkelvorm vertoont, maar meer een ellipsvorm. Ten behoeve van de vergelijking van de resultaten van de tweede proef met het model is daarom een nieuwe berekening gemaakt, uitgaande van een ellipsvormige toestroming met de verhouding 2:1. De resultaten van deze berekening staan in bijlage V.7. Deze berekening is na het uitvoeren van de proef gemaakt. Voor het bepalen van het benodigde instroomdebiet is nog gebruik gemaakt van de berekening voor cirkelvormige toestroming.

Uit deze berekening (met de cirkelvorm) volgt een maximaal debiet door de bres van $Q_{T,max} = 430 \text{ l/s}$. Op basis van dit berekende maximale debiet is tijdens deze proef gebruik gemaakt van twee pompen, bediend door één afsluiter. Het totaal beschikbare debiet is dan $Q_{max} \approx 440 \text{ l/s}$.

7.3.2 De tijdschaal van het tweede experiment

Uit bestudering van de videobeelden volgt voor de tijdstippen van de overgangen tussen de verschillende fasen van het bresgroeiproces:

t_0	0 s
t_1	42 s
t_2	87 s
t_3	137 s
t_4	527 s
t_5	670 s

Het bresgroeiproces duurt nu langer dan in de eerste proef, omdat de polder relatief groter is.

7.3.3 De waterstandsmetingen

De meetwaarden van de waterstand op het voorland, zie figuur VII.1 in bijlage VII, laten hetzelfde beeld zien als in de eerste proef. De waterstand $h_{w,1}$, in meetpunt 1 op $x = -6.6 \text{ m}$, is duidelijk hoger dan de overige waterstanden. Tussen $t \approx 320 \text{ s}$ en $t \approx 340 \text{ s}$ is de waterstand ter plaatse van meter 1 te hoog om te registreren.

Verder valt op dat de meetwaarden van $h_{w,2}$ en $h_{w,3}$ gedurende het gehele proces vrijwel gelijk zijn. Blijkbaar zijn de stroomsnelheden in beide punten vrijwel even groot. Dit wijst erop dat het verkleinen van het doorstroomprofiel ter plaatse van de overgang naar het zandbed het gewenste effect heeft gehad en het water meer langs de as van de bres toestroomt.

Vanaf $t \approx 360$ s neemt het debiet door de bres toe. De waterstand bovenstrooms daalt gedurende circa $2\frac{1}{2}$ minuut tot $z \approx 2$ cm voor de meetpunten 2 en 3 op $t \approx 510$ s. Hierna neemt de waterstand weer toe vanwege de gestuwde afvoer in fase V. Het maximaal beschikbare debiet (440 l/s) is blijkbaar niet voldoende om de waterstand bovenstrooms constant te houden, terwijl een maximum bresdebiet van 430 l/s berekend is met het bestaande bresgroeimodel (voor cirkelvormige toestroming). Dit wijst erop, evenals in de eerste proef, dat de toestroming meer ellipsvormig dan cirkelvormig is. In dat geval is het maximale debiet door de bres ongeveer 540 l/s, zie bijlage V.7.

Golfhoogtemeter 2 heeft tussen $t \approx 500$ s en $t \approx 540$ s drooggestaan. De meetwaarde schiet opeens uit naar een waarde van 0.17 m. Voor $t \geq 540$ s zijn de meetwaarden in punt 2 en 3 weer vrijwel gelijk.

Tijdens de proef is geen van de drie golfhoogtemeters verzakt. Dit kan worden geconcludeerd uit het gegeven dat zowel aan het begin als aan het einde van het bresgroeiproces de drie curves van de waterstanden over elkaar heen liggen.

De meting van de kombergingswaterstand h_{kom} is in dit experiment wel gelukt, zie figuur VII.2. De golfhoogtemeter is ingesteld op het maximale bereik van 50 cm, van $z = -29$ cm tot $z = +21$ cm. Op $t \approx 300$ s is de waterstand in de polder zover gestegen dat de probe van de golfhoogtemeter in het water komt te hangen. Vanaf dit moment neemt de waterstand toe tot de eindwaarde van $h_{kom} = 0.12$ m.

7.3.4 De snelheidsmetingen

In de figuren VII.3 en VII.4 van bijlage VII is het verloop van de stroomsnelheden op het voorland getekend. Het snelheidsverloop is voor beide meetpunten gelijk, met een andere maximumwaarde. In eerste instantie is de snelheid zeer klein, vervolgens neemt deze vrijwel lineair toe tot een maximumwaarde van $u_{w,1,max}(x) \approx 0.6$ m/s voor meetpunt 1 en $u_{w,2,max}(x) \approx 1.2$ m/s voor meetpunt 2. Daarna neemt de snelheid, in fase V, af tot nul.

In meetpunt 1, op $x = -6.6$ m, is de absolute waarde van de snelheid in y-richting ongeveer even groot als die in x-richting. Dit betekent dat de stroomrichting een hoek van ongeveer 45° met de x-as maakt. In de contourplot van figuur VII.7 is te zien dat ter plaatse van meetpunt 1 inderdaad een stroombaan is ontstaan, welke onder deze hoek naar de wand toe is gericht.

In meetpunt 2, op $x = -4.4$ m, vindt de stroming meer in langsrichting plaats. De snelheid in y-richting is duidelijk ondergeschikt aan die in x-richting. De plotselinge fluctuaties in de

registratie van $t \approx 490$ s tot $t \approx 540$ s geven aan dat de snelheidsmeter gedurende dit tijdsinterval heeft drooggestaan. De waterstand is op dat moment enkele centimeters boven het oorspronkelijke zandbed.

Figuur VII.5 geeft het snelheidsverloop in het stroomgat weer. De snelheidsmeter is op $t \approx 290$ s in de stroming geplaatst. De snelheid neemt in fase IV toe tot een maximum van 1.7 m/s op $t \approx 420$ s, en daarna af naar circa 1 m/s aan het begin van fase V, $t = t_4 \approx 530$ s. Gedurende de laatste fase van het proces neemt de snelheid af naar nul. De stroomsnelheid in y-richting is duidelijk ondergeschikt aan die in x-richting, en te allen tijde naar de glaswand toe gericht.

7.3.5 De breedtegroei

In figuur VII.6 is het verloop van de breedte van de bres getekend. De eindbreedte bedraagt ongeveer $b_{T,5} = 2.2$ m, middenop de kruin van de dijk. Tevens is in deze figuur het breedteverloop geschetst dat volgt uit de berekening met het bresgroeimodel van Visser [15], voor een ellipsvormige toestroming (zie bijlage V.7). De berekende breedte wijkt nu minder dan 30 cm af van de gemeten waarde en de tijdsduur van de doorbraak is vrijwel gelijk. Blijkbaar sluit de ellipsvormige toestroming beter aan bij de proefresultaten dan de cirkelvormige.

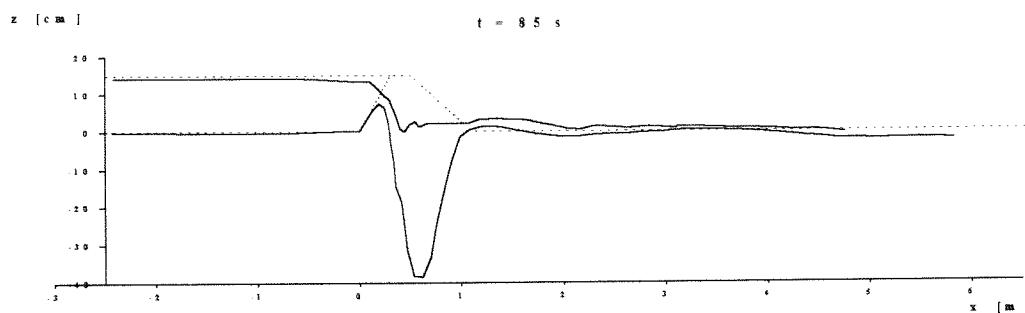
De eindbreedte is groter dan in de vorige proef het geval was, terwijl de dijk nu lager is. Dit is als volgt te verklaren. Door de lagere dijk is het debiet door de bres en de breedtegroei-snelheid kleiner. Het totale doorbraakproces duurt echter langer, omdat de benedenstroomse polder relatief groter is. Hierdoor kan de breedte van het stroomgat groter worden dan in de eerste proef.

In de figuur valt op dat de groei van de bres in de breedte geleidelijker verloopt dan in de eerste proef. Het breedtegroeiproces is discontinu, maar de instabiliteiten van het zijtalud volgen elkaar sneller op, terwijl iedere keer een kleinere hoeveelheid zand in de stroming terechtkomt. De breedte van de bres groeit dus met meer en kleinere stappen.

7.3.6 De ontgrondingskuil

In bijlage VII.2 zijn de langsdoorsneden van de ontgrondingskuil gegeven, die uit de analyse van de videobeelden volgen. De tijdstippen waarop deze doorsneden zijn gemaakt komen overeen met de tijdstippen waarop dia's van de breedtegroei zijn genomen.

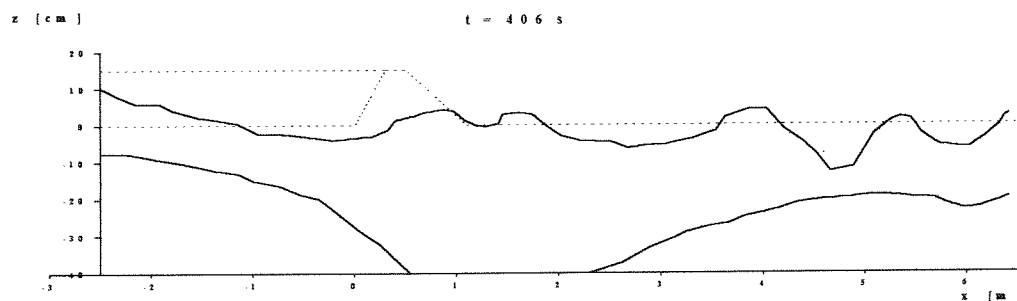
Uit deze doorsneden blijkt dat het proces op vrijwel gelijke wijze verliep als in het eerste experiment. In eerste instantie stroomde het water als een straal over de dijk en ontstond er een relatief diepe kuil met steile taluds. De betonbodem van het proefbassin werd reeds vroeg in het doorbraakproces bereikt, op $t \approx 90$ s, zie figuur 7.3.



figuur 7.3: Proef 2 - Het bereiken van de betonbodem op $t \approx 90$ s

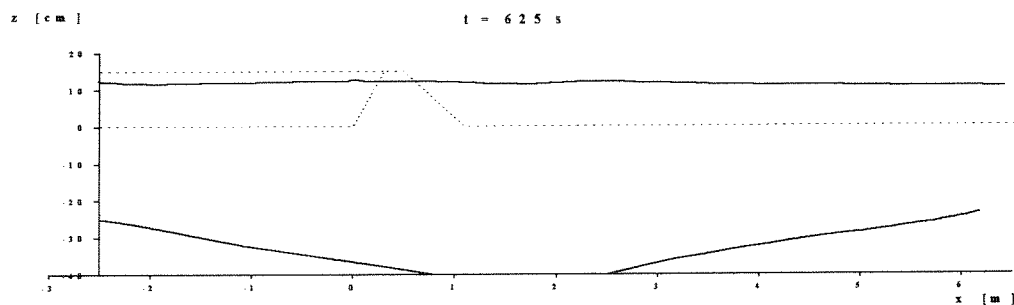
Hierna nam de helling van de taluds van de ontgrondingskuil af en werd de lengte waarover de betonbodem van het proefbassin blootlag groter.

Benedenstrooms van de dijk ontstonden stationaire golven met een hoogte in dezelfde orde van grootte als de hoogte van de dijk, bijvoorbeeld op $t = 406$ s, zie figuur 7.4.



figuur 7.4: Proef 2 - Hoge golven op het benedenstroomse zandbed, $t = 406$ s

De lengte waarover aan het einde van de proef de betonbodem in zicht was, is ongeveer 2 m, 1 m minder dan in de eerste proef. De taludhellingen van de ontgrondingskuil bedroegen respectievelijk 1:22 voor de bovenstroomse en 1:23 voor de benedenstroomse helling, zie figuur 7.5. De bovenstroomse helling van de ontgrondingskuil blijkt dus duidelijk flauwer te zijn dan in het vorige experiment.



figuur 7.5: Proef 2 - De uiteindelijke ontgrondingskuil

In de eindsituatie is de helling van het zijtalud van de bres opgemeten. Deze helling bedroeg ongeveer 31° , vrijwel gelijk aan de hoek van natuurlijk talud van het zand $\phi \approx 32^\circ$.

Na het tweede experiment zijn bij verschillende waterstanden dia's gemaakt van de ontgrondingskuil in plattegrond. Hieruit is de contourplot van figuur VII.7 in bijlage VII geconstrueerd.

In deze plot is goed te zien dat er op het voorland duidelijke stroombanen zijn ontstaan. Hieruit volgt dat het verkleinen van de doorstroomprofiel van de instroming naar het zandbed als resultaat heeft gehad dat het water inderdaad meer langs de muur van de meetruimte stroomde, door de buitenbocht.

Als gevolg van deze stroming zijn geulen langs de muur en de glaswand ontstaan. Blijkbaar is de weerstand langs het beton en het glas inderdaad kleiner, zoals geconcludeerd in paragraaf 7.2.7. Vrijwel iedere dieptelijntje vertoont zo'n geul langs de wand.

Wat tevens opvalt is dat de geul die in proef 1 langs de kop van de dijk lag nu veel minder geprononceerd is. Er is lokaal rond de kop wel sprake van relatief grote erosie en de stroming komt nog steeds onder een hoek de bres in, maar de stroomsnelheid ter plaatse is duidelijk kleiner dan in de vorige proef.

7.3.7 Conclusie

In het tweede experiment zijn de metingen van waterstand en stroomsnelheid goed gelukt, er zijn geen meetinstrumenten verzakt en de resultaten laten geen onverklaarbare situaties zien. Hierin worden dus geen aanpassingen gedaan voor een volgende proef.

Bij de aangepaste proefopstelling, met een dikker zandbed en een lagere dijk, blijkt de ontgrondingskuil echter nog niet ongestoord te kunnen ontstaan. De maximale kuildiepte bedraagt blijkbaar meer dan 35 cm bij een dijkhoogte van 15 cm, ofwel $d_{kuil} > 2.3 h_D$.

In het derde experiment zal getracht worden de ontgrondingskuil wel ongestoord te laten ontstaan door het zandbed nogmaals te verhogen.

De dijk wordt niet verder verlaagd. Naarmate de dijk lager is, is de marge, waarbinnen de bovenstroomse waterstand moet worden geregeld, kleiner. De waterstand moet dan veel nauwkeuriger worden geregeld. Deze nauwkeurigheid kan waarschijnlijk niet worden gerealiseerd in het huidige systeem met handbediende afsluiters.

Uit de resultaten van dit experiment volgt dat de (lage) weerstand van het glas en het beton van de wand van de meetruimte een duidelijke invloed heeft op het ontgrondingsproces. Er ontstaan ontgrondingsgeulen langs de wand bovenstrooms van de dijk, waaruit blijkt dat de erosie langs het beton of glas sneller optreedt dan elders in het zandbed.

Uit de vergelijking van de proefresultaten met de berekening van bijlage V.7 blijkt dat als een ellipsvormige toestroming naar de bres in het model wordt gestopt, dit vrij goed aansluit bij de gevonden resultaten. Met name de breedte-ontwikkeling van de bres komt dan goed overeen met de gemeten waarden. De ellipsvorm met een verhouding 2:1 die in de berekening gebruikt is, is slechts een idee, een "greep in het duister". Toch blijken er, in dit

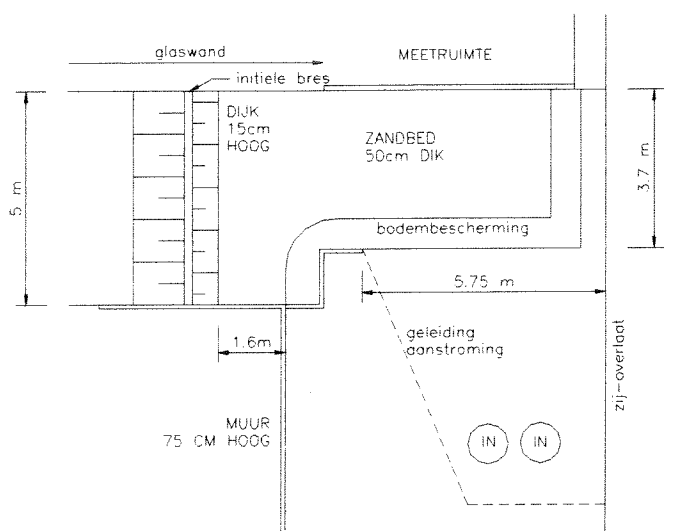
specifieke geval, vrij goede resultaten mee behaald te worden. Hieruit blijkt dat zo'n ellips-vorm een stap in de goede richting is, maar dat er naar de werkelijke vorm van de toestroming wellicht nader onderzoek dient te worden uitgevoerd.

7.4 De resultaten van het derde experiment

In deze paragraaf wordt, analoog aan de paragrafen 7.2 en 7.3, een beschrijving gegeven van het derde experiment, uitgevoerd op maandag 3 juni 1996. De grafieken van de meetgegevens en de langsdoorsneden van de ontgrondingskuil uit de videobeelden staan in bijlage VIII. De getalswaarden van de metingen staan, per 5 gemiddeld, in bijlage IX.3.

7.4.1 De opstelling

In een laatste poging de ontgrondingskuil ongestoord te laten ontstaan is in het derde experiment het zandbed maximaal verhoogd. Het zand dat hiervoor nodig is, is elders uit de opstelling weggehaald. De dijk naast het zandbed is vervangen door een 75 cm hoge muur van betonblokken. Het zand onder de bovenstroomse bodembescherming is over een breedte van 1.3 m afgegraven, en tevens is langs de zij-overlaat een strook zand van 60 cm breed weggehaald. De gewijzigde proefopstelling is weergegeven in figuur 7.6. Met het vrijgekomen zand is het zandbed verhoogd tot een dikte van $d_b = 50$ cm. Hierop is een 15 cm hoge dijk gebouwd.



figuur 7.6: Wijzigingen in de proefopstelling voor het derde experiment

De plaats van de meetinstrumenten was vrijwel gelijk aan die in de vorige experimenten, zie tabel 7.2. De meting van de snelheid in het stroomgat is dichterbij het glas gedaan waardoor het instrument eerder in de bres geplaatst kon worden.

Meting	x [m]	y [m]
$h_{w,1}$	-6.5	0.45
$h_{w,2}$	-4.5	0.35
$h_{w,3}$	-3.5	2.2
h_{kom}	-6.75	-3.5
$u_{w,1}$	-6.5	1.0
$u_{w,2}$	-4.5	1.05
u_T	0.3	0.25

tabel 7.2: Plaats van de metingen in proef 3

Na afloop van de tweede proef is in het benedenstroomse gedeelte van het proefbassin een klein laagje water blijven staan; te klein om met behulp van een klokpomp te verwijderen. Het in de vorige proef uitgespoelde zand was daardoor bij het terugbrengen in het zandbed, benedenstrooms van de dijk, vrijwel geheel verzadigd met water.

Het zand dat gebruikt is om het zandbed te verhogen, is elders in de opstelling weggehaald. Dit zand is vochtig, maar niet verzadigd met water, en daardoor moeilijk “droog” te verdichten. Vóór de proef is het zandbed bovenstrooms, waar dit zand is gebruikt, daarom onder water gezet om het zand te verdichten. Hierdoor was de porositeit van het gehele zandbed in het derde experiment naar verwachting kleiner dan in de voorgaande proeven.

Uit de berekening van bijlage V.7 voor een ellipsvormige toestroming blijkt dat het maximale debiet door de bres zo’n 540 l/s bedraagt. Omdat in de voorgaande proef is gebleken dat in ieder geval het breedteverloop met deze vorm van de toestroming vrij goed wordt beschreven, is het aantal pompen bepaald aan de hand van dit berekende maximale debiet. In de derde proef zijn daarom drie pompen gebruikt, waardoor het maximaal beschikbare debiet zo’n 660 l/s bedraagt. De zij-overlaat functioneerde in het derde experiment niet als afvoer van overtollig water, omdat de bovenstroomse put was afgesloten.

7.4.2 De tijdschaal van het derde experiment

De tijdstippen van de overgangen tussen de verschillende fasen van de dijkdoorbraak zijn afgeleid uit de videobeelden van het experiment. Er geldt:

t_0	0 s
t_1	45 s
t_2	80 s
t_3	135 s
t_4	610 s
t_5	756 s

Het blijkt, dat het totale bresgroeiproces in het derde experiment circa anderhalve minuut langer duurde dan in de tweede proef. Dit is vreemd, daar in beide experimenten een zelfde dijk is beproefd, waardoor de polder benedenstrooms relatief even groot is. De grotere tijdsduur komt vooral tot uiting in de vierde en vijfde fase van het bresgroeiproces.

7.4.3 De waterstandsmetingen

In figuur VIII.1 van bijlage VIII is het verloop van de bovenstroomse waterstand in de drie meetpunten getekend. De waterstand in meetpunt 1, op $x = -6.5$ m, is redelijk constant, tot $t = 540$ s wanneer de waterstand daalt als gevolg van het grote debiet door de bres. De waterstand in meetpunt 2 is duidelijk lager als gevolg van de versnelling van de stroming. In meetpunt 3, langs de bodembescherming op $x = -3.5$ m, is de waterstand te allen tijde lager dan in de overige meetpunten. Blijkbaar vindt de hoofdstroming plaats direct van het begin van het zandbed naar de bres, zoals in de eerste proef, en niet langs de wand van de meetruimte, zoals in het tweede experiment.

Het bestaande bresgroeimodel met ellipsvormige toestroming geeft als maximum debiet door de bres $Q_{T,max} \approx 540$ l/s (zie bijlage V.7). In de proef is een debiet van 660 l/s beschikbaar (3 pompen), waarvan circa 500 l/s daadwerkelijk is gebruikt. Deze 500 l/s is onvoldoende om de bovenstroomse waterstand constant te houden. De waterstand in meetpunt 1, het verst van de bres, daalde aan het einde van fase IV ongeveer 3 cm. Uit deze relatief kleine daling van de waterstand blijkt dat het debiet door de bres, indien het zich volledig had kunnen ontwikkelen, niet veel groter zou zijn geweest dan de 500 l/s waartoe het in de proef was beperkt. Dit betekent dat het resultaat van de berekening met ellipsvormige toestroming redelijk klopt.

De golfhoogtemeter voor de benedenstroomse waterstand was ingesteld op het maximale bereik van 50 cm. Vanaf het moment dat de probe in het water hing, op $t \approx 360$ s, neemt de waterstand vrijwel lineair toe naar de eindwaarde van $h_{kom} \approx 12$ cm.

7.4.4 De snelheidsmetingen

De registratie van de stroomsnelheid in punt 1, figuur VIII.3, laat iets vreemds zien. De stroomsnelheid in x-richting is in de eerste minuten van de proef negatief, dus van de wand af gericht, met een waarde van zo'n -40 cm/s. Op $t = 354$ s wisselt de snelheid binnen één seconde van teken en wordt ongeveer +20 cm/s. Dit is fysisch onmogelijk. Tijdens de proef is er niets met de meters gebeurd, alle instellingen zijn ongewijzigd gebleven. De sprong in de registratie op $t = 354$ s is dan ook onverklaarbaar.

Het verloop van de snelheid voor $t \geq 355$ s ziet er, in vergelijking met de andere proeven, betrouwbaar uit. De metingen voor $t \leq 354$ s zijn zeer onbetrouwbaar en worden derhalve als mislukt beschouwd.

Het verloop van de stroomsnelheid in meetpunt 2 is vrijwel gelijk aan het verloop van de snelheid in de voorgaande proeven. De maximale snelheid bedraagt $u_{w,2,max} \approx 1.4$ m/s.

De snelheidsmeter in de bres is in de stroming geplaatst op $t \approx 260$ s, en heeft op $t \approx 560$ s gedurende enkele seconden drooggestaan als gevolg van de gedaalde waterstand. De snelheid in de bres u_T neemt in fase IV van het bresgroeiproces toe tot maximaal 2.25 m/s.

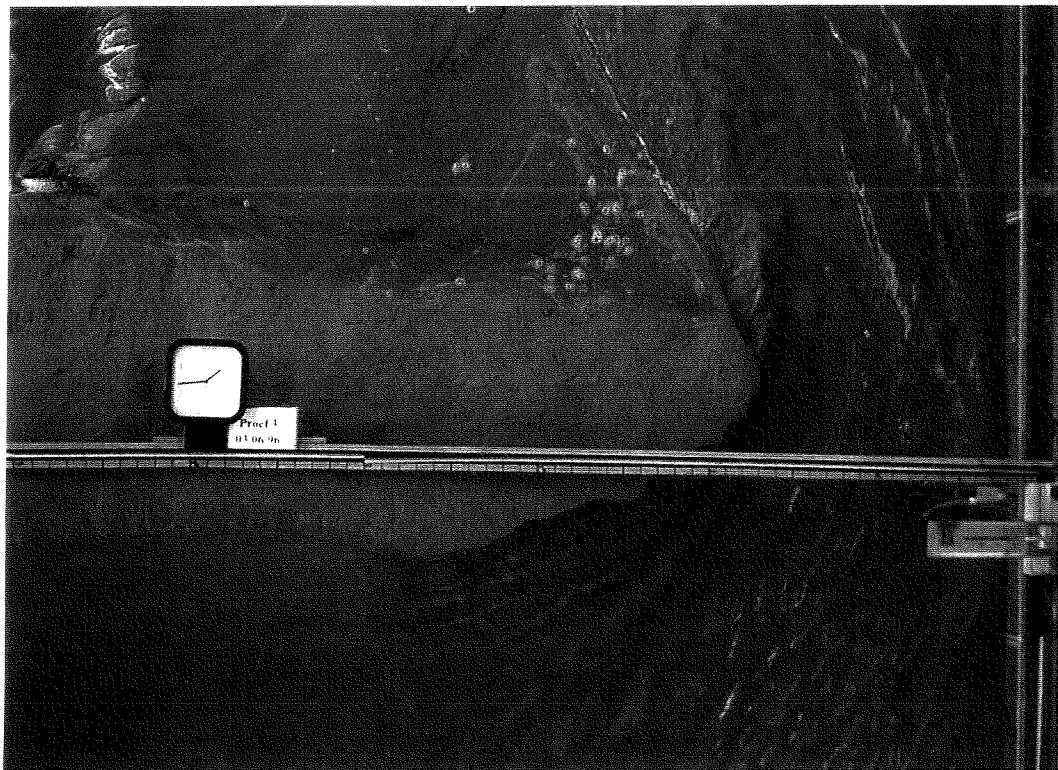
De snelheid in y-richting is zowel voor de beide bovenstroomse meetpunten, als in de bres ongeveer gelijk, met een maximum van 0.25 m/s.

7.4.5 De breedtegroei

In figuur VIII.6 van bijlage VIII is de breedtegroei van de bres getekend. Het laatste meetpunt op de doorgetrokken curve in deze grafiek is $t = 672$ s, terwijl de gehele proef $t_s = 756$ s duurde. De na dit tijdstip genomen dia's zijn mislukt. De grafiek geeft op het tijdstip $t = 672$ s een breedte van 1.88 m. Uit een meting van de breedte na afloop van de proef volgt een eindbreedte van $b_{T,5} \approx 2.2$ m. Deze eindbreedte is met behulp van een stippellijn in de figuur aangegeven.

In vergelijking met de eerste twee experimenten is het breedtegroei-verloop nu nog meer geleidelijk. Tussen vrijwel iedere twee opeenvolgende dia's neemt de breedte van de bres toe. Een mogelijke oorzaak van dit verschil zou kunnen liggen in een afwijkende pakking van het zand in het dijklichaam, of wellicht in een optredend snelheidsverschil. Dit is op het eerste gezicht niet duidelijk. Wellicht is het interessant om verder onderzoek naar dit verschijnsel uit te voeren.

In figuur 7.7 is een bovenaanzicht van de bres gegeven, op $t = 370$ s. Het water stroomt op de foto van onder naar boven. De breedte midden op de kruin is op dit moment circa 1.15 m. Duidelijk is de trechtervorm van het stroomgat en de convergentie van de stroomlijnen te zien. Voor de overige dia's met bovenaanzichten wordt verwezen naar het aangelegde archief (zie hoofdstuk 8).

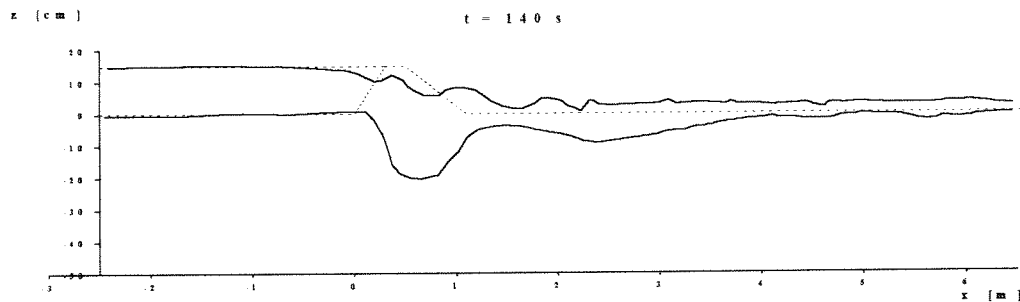


figuur 7.7: Bovenaanzicht van het stroomgat op $t = 370$ s

7.4.6 De ontgrondingskuil

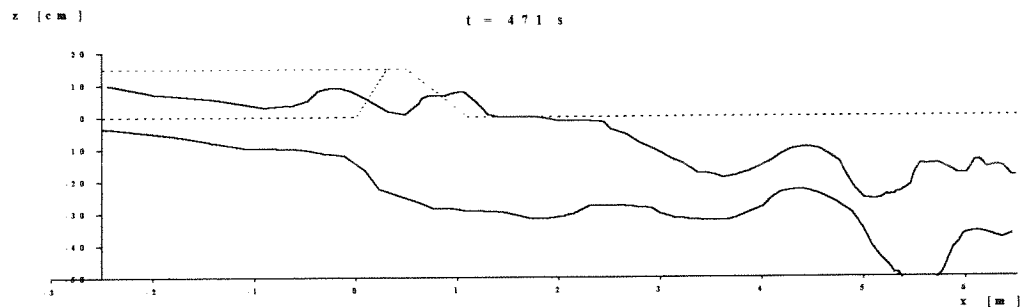
In bijlage VIII.2 zijn de langdoorsneden gegeven welke zijn geconstrueerd uit de video-beelden.

Uit deze langdoorsneden blijkt dat de kuil in het eerste deel van het bresgroeiproces duidelijk minder diep werd dan in de eerdere proeven. Aan het einde van fase III, op $t \approx 140$ s, was de kuil zo'n 20 cm diep, tegen meer dan 40 cm in de tweede proef, zie figuur 7.8.



figuur 7.8: Proef 3 - Ontgrondingskuil aan het einde van fase III, $t = 140$ s

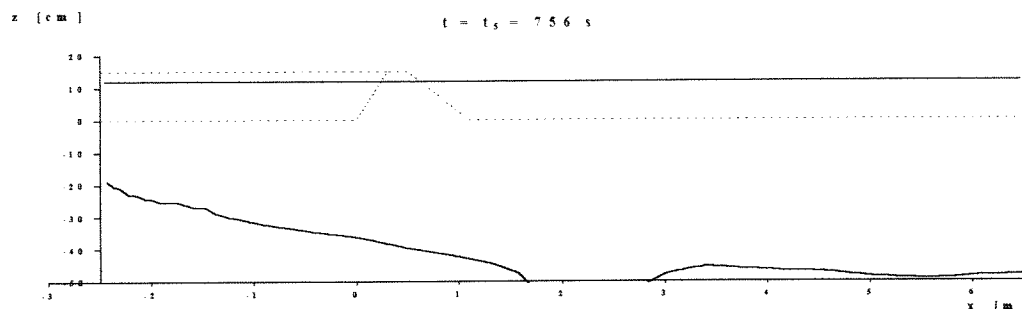
Vanaf $t \approx 360$ s ontstond er benedenstrooms van de dijk, op $x \approx 6$ m, een soort tweede kuil. De bodem van het proefbassin werd op $t \approx 460$ s bereikt op $x = +5.5$ m, zie figuur 7.9.



figuur 7.9: Proef 3 - Betonbodem bereikt, $t = 471$ s

Op $t \approx 570$ s werd ook op $x = +2.5$ m de betonbodem bereikt. De bovenstroomse helling werd nu flauwer. Tussen de twee diepste punten van de kuil bleef een hoeveelheid zand aanwezig.

In de eindsituatie op $t = 756$ s was de betonbodem in zicht van $x = 1.75$ m tot $x = 2.75$ m en was de tweede kuil enigszins dichtgeslibd zodat de betonbodem daar niet langer blootlag, zie figuur 7.10.



figuur 7.10: Proef 3 - De uiteindelijke ontgrondingskuil, $t = 756 \text{ s}$

De bovenstroomse helling van de ontgrondingskuil bedroeg in de eindsituatie circa 1 : 14. De helling van het zijtalud van de bres is na de proef opgemeten en bedroeg 28° , iets kleiner dan de hoek van natuurlijk talud van het zand, $\phi = 32^\circ$.

De twee diepe gedeelten van de kuil zijn ook goed te zien in de contourplot van de ontgrondingskuil, bijlage VIII, figuur VIII.7.

Tevens is hierin een kuil langs de bodembescherming te zien. Deze ontstaat doordat het water met een zekere stroomsnelheid op het zandbed komt zonder dat er zand meegevoerd wordt. Er wordt dus zand in suspensie opgenomen direct achter de bodembescherming, totdat de zandtransportcapaciteit bereikt wordt die bij die stroomsnelheid behoort..

Langs de kop van de dijk is een relatief diepe geul ontstaan, net als in de eerste proef. Blijkbaar was de stroomsnelheid ter plaatse relatief groot.

7.4.7 Conclusie

De belangrijkste conclusie uit de resultaten van het derde experiment is dat de ontgrondingskuil in deze proef op afwijkende wijze is ontstaan, in vergelijking met de twee eerdere experimenten. De configuratie van de proefopstelling was in deze derde proef gelijk aan die in de tweede proef. De enige parameter (behalve de dikte van het zandbed) die in deze proef duidelijk afweek van het tweede experiment, en dus eventueel een oorzaak kan zijn voor de afwijkende ontgrondingskuil, is de pakking van het zand. Deze is in het derde experiment kleiner dan in de voorgaande proeven, omdat het zandbed aangelegd is met vrijwel verzadigd zand en het bovenstroomse gedeelte van het zandbed onder water verdicht is. Hoewel de porositeit van het zandbed niet in de erosieformules voorkomt en in het gehanteerde mechanisme voor de opname van zand geen invloed heeft, is het wellicht toch interessant de invloed ervan te onderzoeken.

Een tweede conclusie betreft de breedtegroei. In vergelijking met de voorgaande experimenten is het breedteverloop in deze proef afwijkend, met kleine tijdsintervallen en kleine toenames in de breedte. Het is wellicht interessant voor het completeren van het bresgroeimodel om nader onderzoek te verrichten naar de oorzaken, dan wel naar de invloedsfactoren van deze verschillen in de wijze van breedtegroei.

Verder is gebleken dat de berekening volgens het bresgroeimodel van Visser [15] redelijk klopt met de proefresultaten, als een ellipsvormige toestroming (met de verhouding lange-korte as gelijk aan 2:1) wordt gebruikt. De keuze voor deze ellipsvorm is zuiver academisch en is alleen bedoeld om aan te tonen dat de aanstroming naar de bres toe niet cirkelvormig is, maar meer “langwerpig”, en dat de ontgrondingskuil reeds op een afstand groter dan de breedte van de bres bovenstrooms van de dijk begint.

8 Opslag van de meetgegevens

Ten behoeve van de beschikbaarheid van de proefresultaten voor eventueel verder onderzoek is een archief aangelegd. Dit archief is beschikbaar in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TU Delft. Het bevat de volgende elementen:

- Dit verslag, inclusief de bijlagen;
- 3 diskettes met de meetgegevens;
- 1 videoband;
- 5 series dia's.

In bijlage X zijn de kenmerken van de verschillende elementen van het archief beschreven.

9 Conclusies en aanbevelingen

9.1 Conclusies

1 *Er zijn drie datasets voor het bresgroeiproces gegenereerd*

In ieder experiment zijn de relevante grootheden gedurende het bresgroeiproces geregistreerd. Hierdoor wordt de mogelijkheid geboden alle drie de proeven te laten dienen als hulpmiddel bij het uitbreiden en eventueel verbeteren van het bestaande bresgroeimodel.

2 *De vierde en vijfde fase van het bresgroeiproces blijken het meest interessant te zijn uit oogpunt van overstromingen*

Omdat de bresbreedte, en daarmee ook het debiet door de bres, in de vierde fase sterk toeneemt, zal in deze fase, in een praktijksituatie de meeste schade ontstaan. De vierde fase is, samen met de vijfde fase waarin de stroomsnelheid van het maximum afneemt naar nul, het meest interessant uit oogpunt van overstromingsvraagstukken.

3 *De “ongestoorde” ontgrondingskuil heeft niet kunnen ontstaan tijdens de proeven*

Tijdens alle drie experimenten is de ontwikkeling van de ontgrondingskuil beïnvloed door de fysieke begrenzingen van de proefopstelling. In het proefbassin was te weinig hoogte aanwezig om bij de beproefde dijkdoorsneden de ontgrondingskuil ongestoord te laten ontstaan. Tevens was het zandbed te kort om de kuil tot volledige ontwikkeling te laten komen.

4.a *De historische dieptegegevens van stroomgaten onderschrijven de proefresultaten*

Langs de rivieren zijn, ter plaatse van oude dijkdoorbraken zogenaamde “wielen” te vinden. Deze oude stroomgaten zijn soms tot 25 m diep. Uitgaande van een rivierdijk van zo'n 7 m hoog komt dit neer op 3.5 maal de dijkhoogte. In de uitgevoerde experimenten is een verhouding van meer dan 3.3 gevonden (proef 3). De resultaten van de uitgevoerde proeven sluiten kennelijk aan bij de werkelijke situatie.

4.b *De dieptegegevens van de ontgrondingskuil in het Zwin'94-experiment vragen om nader onderzoek*

In het Zwin'94-experiment is met behulp van trillo's een kuildiepte van ongeveer $1.25 \cdot h_D$ gemeten. Dit gegeven strookt niet met de resultaten van de laboratoriumproeven. Wat is de oorzaak hiervan? Hebben de trillo's gefaald, is de interpretatie van de signalen onjuist, is er een vaste laag aanwezig in de bodem van Het Zwin, etc.

5 *De invloed van de porositeit van de bodem op de ontgronding lijkt groot te zijn*

De ontgrondingskuil werd tijdens de derde proef in de eerste fasen van het bresgroeiproces minder diep dan in dezelfde periode tijdens de eerste twee experimenten. Naar het zich laat aanzien is de enige parameter die dit heeft kunnen veroorzaken de porositeit van het zandbed. In experiment 3 is het zandbed "natter" aangelegd dan in de overige proeven met als gevolg dat de porositeit van het zandbed in deze proef waarschijnlijk kleiner is geweest dan in de eerste en tweede proef.

6 *De ontgrondingsrelatie van Breusers lijkt niet te voldoen in het geval van bresgroei*

De gemaakte voorspelling van de te verwachten diepte van de ontgrondingskuil met behulp van de relatie van Breusers komt niet overeen met de in de experimenten gevonden kuildieptes. Voor de parameter α die in de formule van Breusers voorkomt is in de voorspelling $\alpha = 3$ aangenomen. Wanneer echter een grotere waarde voor deze parameter wordt aangenomen (bijvoorbeeld $\alpha = 4$ of 5) geeft de formule een grotere diepte van de kuil, welke beter overeenkomt met de gevonden proefresultaten. Voor de lage dijk ($h_D = 15$ cm in proef 2 en 3) volgt uit de berekening een kuildiepte van $h_{sm} = 3 h_D$ bij $\alpha = 4$ en $h_{sm} = 4.75 h_D$ voor $\alpha = 5$. In het derde experiment is een waarde gevonden van $h_{sm} > 3.3 h_D$. Een grotere waarde voor α sluit dus beter aan bij de gevonden resultaten. Er kan dus niet zondermeer gesteld worden dat de relatie van Breusers in de situatie van bresgroei onrealistische uitkomsten geeft, dit hangt sterk af van de waarde voor α . Uit de literatuur blijkt dat $\alpha = 4$ of 5 geen onrealistische waarde is [7].

7 *De aanstroming naar de bres vertoont geen zuivere cirkelvorm*

Uit de vergelijking van de proefresultaten met de berekening volgens het bestaande bresgroeimodel blijkt dat de veronderstelde cirkelvorm niet optreedt.

De erosie van het zandbed begint al ver bovenstrooms van de bres, als gevolg van de versnelling van de stroming. De vorm van de ontgrondingskuil aan de bovenstroomse zijde van de dijk is meer een ellips (met de korte as gelijk aan de bresbreedte) dan een cirkel.

Als in de berekening volgens het model een ellips (verhouding 2:1) wordt gebruikt blijken, in dit specifieke geval, de uitkomsten goed aan te sluiten bij de proefresultaten. Dit is echter geen reden om in elke doorbraaksituatie een ellipsvormige toestroming aan te nemen. De vorm van de toestroming zal afhankelijk zijn van de omgevingskenmerken (zoals bijvoorbeeld een bodembescherming op het voorland).

8 *Het inzicht in het bresgroeiproces is vergroot*

De resultaten van de experimenten wijken hier en daar af van de inzichten die bestonden op basis van eerder onderzoek. De diepte van de ontgrondingskuil verschilt duidelijk van de resultaten van het Zwin'94-experiment. Er lijkt een invloed van geotechnische parameters op het ontgrondingsproces te bestaan, en de bodemerosie begint verder bovenstrooms van de bres dan bij een zuiver cirkelvormige toestroming het geval zou zijn.

Gezien deze resultaten kan mijns inziens gesteld worden dat het inzicht in het bresgroeiproces vergroot is.

9.2 Aanbevelingen

1 *Onderbouwen dan wel aanpassen en uitbreiden van het bresgroeimodel met de resultaten van de experimenten*

Het doel van dit afstudeerproject was het vergroten van het inzicht in, en het genereren van een gegevensbestand voor het bresgroeiproces. De resultaten van de uitgevoerde proeven bieden de mogelijkheid om het bestaande bresgroeimodel te onderbouwen, op eventuele zwakke punten aan te passen en wellicht met nog niet eerder gemodelleerde aspecten uit te breiden.

2 *Fysieke begrenzingen in eventuele volgende experimenten voldoende ruim stellen*

Uit de experimenten is gebleken dat de ontgrondingskuil groter wordt dan vooraf werd verwacht. Hierdoor was het zandbed te kort. Indien er in de toekomst meer proeven uitgevoerd worden, om informatie omtrent de ontgrondingskuil te verkrijgen, is het aan te bevelen de opstelling zó op te zetten dat het volledige stroomgat ongestoord kan ontstaan. Concreet betekent dit: een voldoende lang, breed en dik zandbed.

3 *Onderzoeken van de invloed van geotechnische parameters op het bresgroeiproces*

Tot nu toe is het bresgroeimodel hoofdzakelijk een hydraulisch model, met het accent op de stromingscondities. Uit de resultaten van proef 3 lijkt echter een invloed van de porositeit van het zandbed op het ontgrondingsproces aantoonbaar. Mijns inziens dient onderzoek gedaan te worden naar deze invloed van de porositeit, en tevens naar mogelijke invloeden van overige grondmechanische parameters. Dit kan het uiteindelijke bresgroeimodel ten goede komen.

4 *Onderzoeken van de invloedsfactoren van het breedtegroeiproces*

Uit een vergelijking van de resultaten van de uitgevoerde experimenten blijkt dat er zich verschillende wijzen van breedtegroei voordoen. Met name in het derde experiment is het breedteverloop afwijkend van de andere proeven. Voorlopig is de reden hiervoor niet bekend. Er wordt dan ook aanbevolen onderzoek te doen naar de factoren die het breedtegroeiproces beïnvloeden.

5 *Onderzoeken van de vorm van de toestroming*

De veronderstelde cirkelvorm van de toestroming naar de bres blijkt in de uitgevoerde experimenten niet op te treden. De proefresultaten wijzen meer op een langwerpige toestroming. De berekening op basis van een (2:1) ellips komt goed overeen met de proefresultaten. Deze ellipsvorm is slechts een idee. Om een goede beschrijving van het bresgroeiproces te verkrijgen is het van belang de juiste vorm van de toestroming naar de bres te onderzoeken, in combinatie met de natuurlijke randvoorwaarden van de omgeving.

Literatuur

- [1] Dieteren, J.M.L., en Pottinga, P.H., 1988: Stroomgatontwikkeling tijdens dijkdoorbraak. Concept afstudeerrapport, vakgroep Waterbouwkunde, faculteit der Civiele Techniek, TU Delft.
- [2] Fread, D.L. and Harbaugh, T.E., 1973: Transient hydraulic simulation of breached earth dams. Paper presented at ASCE 1973.
- [3] Fujita, Y., Tamura, T. en Muramoto, Y., 1984: Een experimentele studie naar de ontwikkeling van stroomgaten in rivierdijken. Disaster Prevention Institute, university of Kyoto, Japan.
- [4] Hunt, B., 1984: Dam break solution. ASCE, Journal of hydraulic engineering, vol. 110, no. 6.
- [5] Ralston, D.C., 1987: Mechanics of enbankment erosion during overflow.
- [6] Rijn, L.C. van, 1993: Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications, Amsterdam
- [7] Schiereck, G.J., 1993: Introduction to bed, bank, shore protection; engineering the interface of soil and water. Colledictaat f4, vakgroep Waterbouwkunde, faculteit der Civiele Techniek, TU Delft.
- [8] Simmler, H. and Samet, L., 1982: Dam failure from overtopping studied on a hydraulic model. Paper presented at ICOLD 1982, Rio de Janeiro.
- [9] Smit, M.J., en Snip, D.W., 1995: Voorbereiding van een bresgroei-experiment in het Zwin 1994. Afstudeerrapport, vakgroep Waterbouwkunde, faculteit der Civiele Techniek, TU Delft.
- [10] Somers, C., 1995: Meetverslag bresgroeioproef Zwin, 7 oktober 1994: de trillometingen. vakgroep Waterbouwkunde, faculteit der Civiele Techniek, TU Delft.
- [11] Steetzel, H.J., 1993: Bresgroei, deel IV: Pragmatische modellering breedtegroei. Waterloopkundig laboratorium, Delft.
- [12] Tinney, E.R., and Hsu, H.Y., 1961: Mechanics of washout of an erodible fuse plug. Paper presented at ASCE 1961
- [13] Visser, P.J., Ribberink, J.S. en Kalkwijk, J.P.Th., 1986: Ontwikkeling stroomgat en debiet bij dijkdoorbraak; deelstudie voor een Pomp Accumulatie Centrale. Rapport nr. 8-86, vakgroep Waterbouwkunde, faculteit der Civiele Techniek, TU Delft.
- [14] Visser, P.J., Vrijling, J.K. and Verhagen, H.J., 1990: A field experiment on breach growth in sand-dikes. Proc. 22nd International Conference on Coastal Engineering, Delft, The Netherlands, pp. 2087-2100.
- [15] Visser, P.J., 1994: A model for breach growth in sand-dikes. Proc. 24th International Conference on Coastal Engineering, Kobe, Japan, pp. 2197-2206.
- [16] Visser, P.J., 1994: Bresgroei, deel I: Mathematisch model; band B: Inventarisatie sedimenttransport-formuleringen. Waterloopkundig Laboratorium, Delft.
- [17] Visser, P.J., Smit, M.J. en Snip, D.W., 1996: Zwin'94-experiment; Meetopstelling en overzicht van alle meetresultaten. Rapport no. 4-96, vakgroep Waterbouwkunde, faculteit der Civiele Techniek, TU Delft.

Bresgroei

**Een experimenteel onderzoek naar
de ontwikkeling van de ontgrondingskuil**

Bijlagen

C.P. Caan

st.nr: 153835

Afstudeercommissie:

24 augustus 1996

prof. dr. ir. J.A. Battjes
prof. drs. ir. J.K. Vrijling
ir. G.J. Schiereck
ir. P.J. Visser

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde

Voorwoord

Dit rapport is geschreven als afsluiting van mijn afstudeerproject aan de Technische Universiteit Delft.

Het afstudeerwerk omvat een onderzoek naar het fenomeen bresgroei, de groei van het stroomgat in geval van een dijkdoorbraak. De studie is met name gericht op het verkrijgen van gegevens omtrent het ontstaan en de ontwikkeling in ruimte en tijd van de ontgrondingskuil, die in het stroomgat optreedt. Het onderzoek is op experimentele wijze uitgevoerd, door middel van bresgroeioproeven in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TU Delft.

De verslaggeving van het project bestaat uit twee delen. Het voorliggende deel bevat de bijlagen bij het hoofdrapport, dat als titel heeft "Bresgroei - Een experimenteel onderzoek naar de ontwikkeling van de ontgrondingskuil".

Deze bijlagen zijn in een apart deel gebundeld met het oog op het gemak bij het volgen van de vele verwijzingen in de hoofdtekst.

De tekst voor beide delen van het rapport is, op enkele wijzigingen na, afgerond op 1 juli 1996. Het is daarom geschreven in de spelling die op die datum geldig was. De nieuwe spelling, zoals die sinds 1 augustus 1996 van kracht is, is niet gebruikt. Tevens zijn eventuele nieuwe inzichten betreffende het onderwerp na deze datum niet meer verwerkt.

Christiaan P. Caan

Delft, 24 augustus 1996

Inhoudsopgave

VOORWOORD	iii
LIJST VAN SYMBOLEN	vii
BIJLAGE I ZEEFANALYSE VAN HET GEBRUIKTE ZAND	1
BIJLAGE II DE KRITIEKE SNELHEID VOLGENS SHIELDS	5
BIJLAGE III HET KOMBERGINGSVOLUME	9
BIJLAGE IV DE WRIJVINGSCOËFFICIËNT	13
IV.1 Twee stromingssituaties	15
IV.2 Fase I	17
IV.3 Fase II	18
IV.4 Fase III	18
IV.5 Fase IV	19
IV.6 Fase V	19
IV.7 Totaalbeeld	20
BIJLAGE V VOORSPELLING VAN HET PROEFVERLOOP	21
V.1 Berekening tijdsduur verschillende fasen	23
V.2 Voorspelling fase I en II	24
V.3 Voorspelling fase III	25
V.4 Voorspelling fase IV	26
V.5 Voorspelling fase V	27
V.6 Totaaloverzicht	28
V.7 Resultaten voor een lagere dijk	30
BIJLAGE VI DE RESULTATEN VAN HET EERSTE EXPERIMENT	31
VI.1 Meetresultaten	34
VI.2 Langsdoorsneden van de ontgrondingskuil	42
BIJLAGE VII DE RESULTATEN VAN HET TWEEDE EXPERIMENT	47
VII.1 Meetresultaten	50
VII.2 Langsdoorsneden van de ontgrondingskuil	58
BIJLAGE VIII DE RESULTATEN VAN HET DERDE EXPERIMENT	65
VIII.1 Meetresultaten	68
VIII.2 Langsdoorsneden van de ontgrondingskuil	76
BIJLAGE IX GETALSWAARDEN VAN DE METINGEN	83
IX.1 Meetgegevens van het eerste experiment	85
IX.2 Meetgegevens van het tweede experiment	87
IX.3 Meetgegevens van het derde experiment	90
BIJLAGE X DE INHOUD VAN HET ARCHIEF	93
X.1 Diskettes met meetgegevens	95
X.2 Videoband	96
X.3 Dia's	96
LITERATUUR	97

Lijst van symbolen

A_{kom}	kombergingsoppervlakte	$[m^2]$
b_{ov}	breedte van de overlaat	$[m]$
C_f	wrijvingscoëfficiënt	$[-]$
D	korreldiameter	$[m]$
d_e	evenwichtsdiepte	$[m]$
d_g	grensdiepte	$[m]$
d_T	waterdiepte in de bres	$[m]$
d_{teen}	waterdiepte aan de teen van het binnentalud	$[m]$
f_2	vertragingsfactor voor de dieptegroei a.g.v. de breedtegroei	$[-]$
g	versnelling van de zwaartekracht	$[m/s^2]$
h_{kom}	benedenstroomse waterstand	$[m]$
H_w	bovenstroomse energiehoogte	$[m]$
h_w	bovenstroomse waterstand	$[m]$
k	bodemruwheid	$[m]$
$k_{0,1,2}$	coëfficiënt ter bepaling van de tijdsduur van de verschillende fasen	$[-]$
l_e	evenwichtslengte	$[m]$
l_t	lengte van het binnentalud	$[m]$
L_t	terugschrijding van de teen van het binnentalud gedurende fase I	$[m]$
L_T	kruinbreedte	$[m]$
p	porositeit	$[-]$
q_T	specifiek debiet door de bres	$[m^3/s/m]$
Q_T	totale debiet door de bres	$[m^3/s]$
Re^*	Reynoldsgetal, betrokken op de schuifspanningssnelheid	$[-]$
$t_{0,1,2,3,4,5}$	tijdstip van de verschillende fasen	$[s]$
$t_{I,II,III,IV,V}$	tijdsduur van de verschillende fasen	$[s]$
u^*	schuifspanningssnelheid	$[m/s]$
u_c	kritieke snelheid bij begin van bewegen	$[m/s]$
u_T	stroomsnelheid in de bres	$[m/s]$
u_{teen}	stroomsnelheid aan de teen van het binnentalud	$[m/s]$
u_w	bovenstroomse stroomsnelheid	$[m/s]$
V_{kom}	kombergingsvolume	$[m^3]$
Z_T	kruinhoogte van de dijk in de bres	$[m]$
α	taludhoek van het buitentalud	$[^\circ]$
β_0	taludhoek van het binnentalud op $t = 0$	$[^\circ]$
β_1	maximale taludhoek van het binnentalud	$[^\circ]$
β_{IV}	eenzijdige breedtegroeisnelheid in fase IV	$[m/s]$
Δ	relatieve dichtheid van het bodemmateriaal, $\Delta = 1.65$	$[-]$
κ	constante van Von Karman, $\kappa = 0.4$	$[-]$
ν	dynamische viscositeit	$[m^2/s]$
θ	mobilitetsparameter van Shields	$[-]$

Bijlage I

Zeefanalyse van het gebruikte zand

Bijlage I Zeefanalyse van het gebruikte zand

Ten behoeve van eerder in het laboratorium uitgevoerde experimenten (onderwater-golfbrekers door S.C. v.d. Biezen) is een zeefanalyse van het gebruikte zand gemaakt. Aangezien dit zand in de bres-groei-experimenten wordt gebruikt, wordt deze zeefanalyse overgenomen.

Laboratorium voor Vloeistofmechanica

afd. C.T.

T.U. Delft

Zeefanalyse

nr. 0/1 gewicht voor zeping: 4.97				nr. 0/2 gewicht voor zeping: 4.74			
op zeef	gewicht	%	cum. %	op zeef	gewicht	%	cum. %
150	0.12	2.46	2.46	150	0.12	2.56	2.56
125	0.24	4.92	7.38	125	0.25	5.33	7.89
106	0.61	12.50	19.88	106	0.60	12.79	20.68
90	1.16	23.77	43.65	90	1.12	23.88	44.56
75	1.95	39.96	83.61	75	1.83	39.02	83.58
63	0.53	10.86	94.47	63	0.51	10.87	94.46
53	0.21	4.30	98.77	53	0.20	4.26	98.72
<53	0.06	1.23	100.00	<53	0.06	1.28	100.00
totaal:	4.88	100		totaal:	4.69	100	

nr. 0/3 gewicht voor zeping: 5.17				nr. 0/4 gewicht voor zeping: 5.10			
op zeef	gewicht	%	cum. %	op zeef	gewicht	%	cum. %
150	0.12	2.37	2.37	150	0.12	2.41	2.41
125	0.24	4.74	7.11	125	0.23	4.62	7.03
106	0.65	12.85	19.96	106	0.61	12.25	19.28
90	1.20	23.72	43.68	90	1.21	24.30	43.57
75	2.03	40.12	83.79	75	2.00	40.16	83.73
63	0.54	10.67	94.47	63	0.54	10.84	94.58
53	0.22	4.35	98.81	53	0.22	4.42	99.00
<53	0.06	1.19	100.00	<53	0.05	1.00	100.00
totaal:	5.06	100		totaal:	4.98	100	

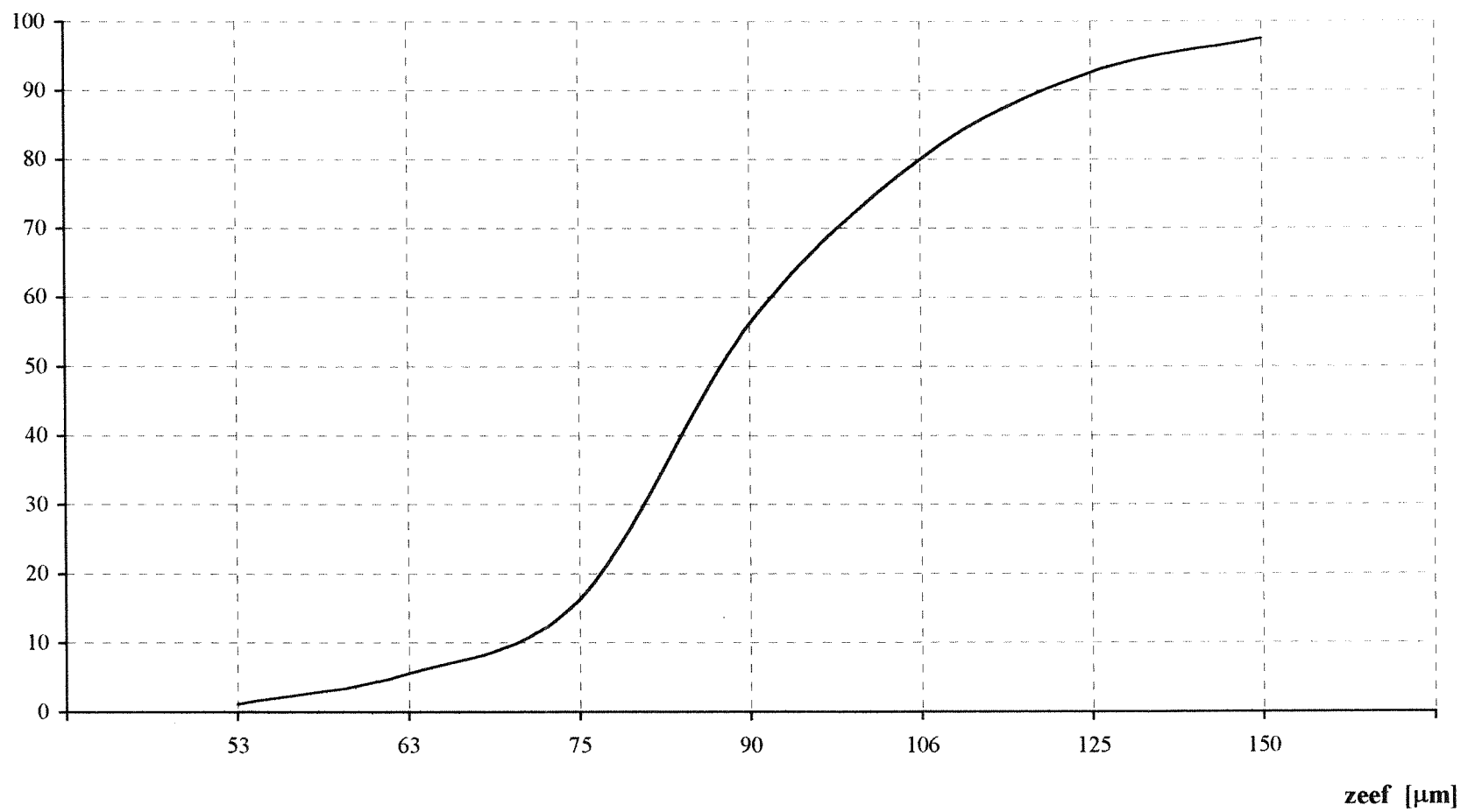
tabel I.1: Zeefanalyse van het gebruikte zand

Uit de zeefkromme van figuur I.1 volgt:

D ₁₀	70 µm
D ₅₀	88 µm
D ₉₀	120 µm

tabel I.2: Karakteristieke korreldiameters

% kleiner



figuur 1.1: Zee/kromme van het gebruikte zand

Bresgroei: Een experimenteel onderzoek naar de ontwikkeling van de omgrondingskuil

Bijlage II

De kritieke snelheid volgens Shields

Bijlage II De kritieke snelheid volgens Shields

De gemiddelde korreldiameter van het gebruikte zand is: $D_{50} = 88 \mu\text{m}$ (zie bijlage I).

De kritieke snelheid behorende bij het begin van bewegen is te berekenen uit een iteratieprocedure volgens de methode van Shields. Deze iteratie verloopt als volgt:

- kies een waarde voor de mobiliteitsparameter θ
- bereken hieruit de schuifspanningssnelheid u_* volgens:

$$\theta = \frac{u_*^2}{\Delta \cdot g \cdot D_{50}}$$

- bereken uit u_* het Reynoldsgetal Re_* volgens:

$$Re_* = \frac{u_* \cdot D_{50}}{\nu}$$

- bepaal met behulp van de kromme van Shields een nieuwe waarde voor θ
- herhaal deze procedure totdat θ constant blijft
- bereken de kritieke schuifspanningssnelheid $u_{*,c}$ uit deze θ
- bereken de kritieke stroomsnelheid u_c uit:

$$u_c = \frac{u_{*,c}}{\sqrt{C_f}}$$

In deze procedure is:

- θ mobiliteitsparameter van Shields [-];
- ν kinematische viscositeit [m^2/s];
- C_f wrijvingscoëfficiënt [-];
- D_{50} gemiddelde korreldiameter [m];
- Re_* Reynoldsgetal betrokken op de schuifspanningssnelheid [-];
- u_c kritieke snelheid bij begin van bewegen [m/s];
- u_* schuifspanningssnelheid [m/s].

In tabel II.1 zijn de resultaten van deze iteratieprocedure gegeven.

$D_{50} = 88 \cdot 10^{-6} \text{ m}$		$\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	
θ	u_*	Re_*	θ
[-]	[m/s]	[-]	[-]
0.03	0.0065	0.575	0.2
0.2	0.0169	1.483	0.08
0.08	0.0107	0.939	0.13
0.13	0.0119	1.050	0.12
0.12	0.0131	1.150	0.12

tabel II.1: Iteratie voor de mobiliteitsparameter θ

Er volgt dan voor de kritieke snelheid:

$$u_c = \frac{u_*}{\sqrt{C_f}} \approx \frac{0.013 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\sqrt{0.0031}} = 0.23 \text{ m/s}$$

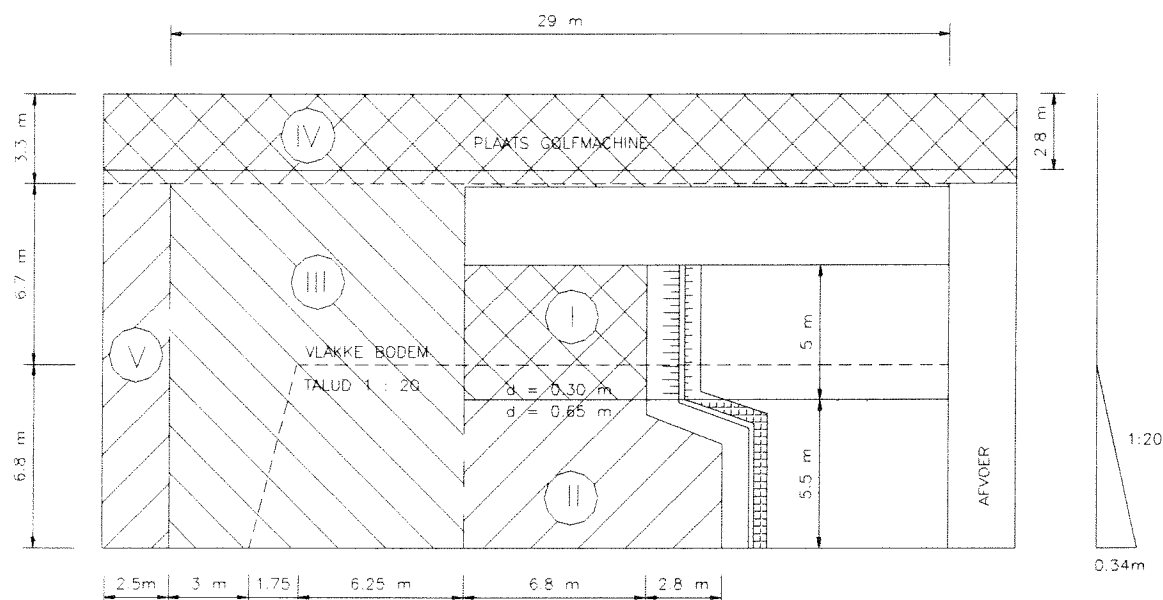
Hierin is voor C_f de waarde gebruikt die in bijlage IV berekend is voor de belangrijkste en overheersende fase (fase IV) van het bresgroeiproces.

Bijlage III

Het kombergingsvolume

Bijlage III Het kombergingsvolume

Het kombergingsvolume V_{kom} en de kombergingsoppervlakte A_{kom} zijn berekend aan de hand van figuur III.1. Omdat er een talud en een gedeeltelijke zandbodem in het proefbassin aanwezig is wordt de berekening van V_{kom} en A_{kom} gesplitst in het onderste deel (35 cm) en het bovenste deel (30 cm) van het proefbassin. In de berekening van het onderste deel wordt dan het volume van de zandbodem en het talud in rekening gebracht. Ter bepaling van het kombergingsoppervlak wordt het onderste gedeelte van de bak geschematiseerd tot een fictieve bak met een vlakke bodem en een equivalent oppervlak A_{eq} . Tevens wordt het volume van de ruimte achter de in het proefbassin aanwezige golfmachine gereduceerd met een factor $\frac{3}{4}$, omdat de constructie van de machine ook volume inneemt.



figuur III.1: Onderverdeling van het proefbassin ter bepaling van de komberging

Voor het kombergingsvolume geldt:

$$V_{\text{kom}} = V_{\text{onder}} + V_{\text{boven}}$$

Hierin is:

V_{boven} volume van de bovenste 30 cm van het proefbassin (met talud) [m^3];

V_{kom} totaal kombergingsvolume [m^3];

V_{onder} volume van de onderste 35 cm van het proefbassin [m^3].

Het oppervlak van het proefbassin is opgedeeld in vijf delen (figuur III.1). Voor het volume van deze vijf gedeelten geldt:

$$V_{I,o} = 0$$

$$V_{I,b} \approx 5\text{m} \cdot 6.8\text{m} \cdot 0.30\text{m} = 10.2 \text{ m}^3$$

$$V_{II,o} \approx 5.5\text{m} \cdot 9.6\text{m} \cdot 0.35\text{m} - \frac{1}{2} \cdot \left(0.34\text{m} + \left(0.34\text{m} - \frac{1}{20} \cdot 5.5\text{m}\right)\right) \cdot 5.5\text{m} \cdot 9.6\text{m} = 7.8 \text{ m}^3$$

$$V_{II,b} \approx 5.5\text{m} \cdot 9.6\text{m} \cdot 0.3\text{m} = 15.8 \text{ m}^3$$

$$V_{III,o} \approx 13.5\text{m} \cdot 11\text{m} \cdot 0.35\text{m} - \frac{1}{2} \cdot 0.34\text{m} \cdot 6.8\text{m} \cdot \left(6.25\text{m} + \frac{1}{2} \cdot 1.75\text{m}\right) = 43.7 \text{ m}^3$$

$$V_{III,b} \approx 13.5\text{m} \cdot 11\text{m} \cdot 0.3\text{m} = 44.6 \text{ m}^3$$

$$V_{IV,o} \approx 0.5\text{m} \cdot 34\text{m} \cdot 0.35\text{m} + 2.8\text{m} \cdot 34\text{m} \cdot 0.35\text{m} \cdot \frac{3}{4} = 30.9 \text{ m}^3$$

$$V_{IV,b} \approx 0.5\text{m} \cdot 34\text{m} \cdot 0.30\text{m} + 2.8\text{m} \cdot 34\text{m} \cdot 0.30\text{m} \cdot \frac{3}{4} = 26.5 \text{ m}^3$$

$$V_{V,o} \approx 13.5\text{m} \cdot 2.5\text{m} \cdot 0.35\text{m} = 11.8 \text{ m}^3$$

$$V_{V,b} \approx 13.5\text{m} \cdot 2.5\text{m} \cdot 0.3\text{m} = 10.1 \text{ m}^3$$

Er volgt:

$$V_{\text{onder}} = V_{I,o} + V_{II,o} + V_{III,o} + V_{IV,o} + V_{V,o} \approx 94 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{boven}} = V_{I,b} + V_{II,b} + V_{III,b} + V_{IV,b} + V_{V,b} \approx 107 \text{ m}^3$$

Voor het equivalente oppervlak van het onderste deel van het proefbassin geldt:

$$A_{\text{eq}} = \frac{V_{\text{onder}}}{d_{\text{onder}}} = \frac{94\text{m}^3}{0.35\text{m}} = 268 \text{ m}^2$$

Voor het kombergingsoppervlak van de bovenste deel van het proefbassin geldt:

$$A_{\text{kom}} = \frac{V_{\text{boven}}}{d_{\text{boven}}} = \frac{107\text{m}^3}{0.30\text{m}} = 355 \text{ m}^2$$

Voor de benedenstroomse waterstand h_{kom} geldt dan:

$$\begin{cases} h_{\text{kom}} = \frac{V_{\text{kom}}}{A_{\text{eq}}} & \text{voor } V_{\text{kom}} \leq 94 \text{ m}^3 \\ h_{\text{kom}} = 0.35\text{m} + \frac{V_{\text{kom}} - 94\text{m}^3}{A_{\text{kom}}} & \text{voor } V_{\text{kom}} \geq 94 \text{ m}^3 \end{cases}$$

Bijlage IV

De wrijvingscoëfficiënt

De waterdiepte aan de teen d_{teen} wordt bepaald met de verhanglijnvergelijking, zie hoofdstuk 4.3.3:

$$d_{\text{teen}} = d(x = l_t) = d_e + (d_g - d_e) \cdot e^{\frac{-4.5 \cdot l_t}{l_e}}$$

Hierin is:

Grensdiepte: $d_g = \sqrt[3]{\frac{q_T^2}{g}}$

Evenwichtsdiepte: $d_e = \sqrt[3]{\frac{q_T^2 \cdot C_f}{g \cdot \sin \beta}}$

Evenwichtslengte: $l_e = \frac{d_g^3 - d_e^3}{d_e^2 \cdot \sin \beta}$

Voor de taludlengte l_t geldt:

$$l_t = \frac{Z_T}{\tan \beta}$$

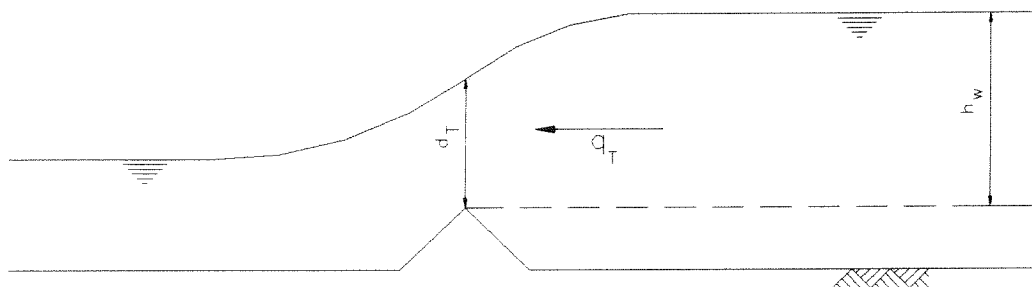
In fase III daalt de kruin van de dijk. De lengte van het talud wordt kleiner, zodat op een gegeven moment de evenwichtsdiepte op het talud niet meer bereikt wordt. De waterdiepte aan de teen van het talud nadert steeds meer tot de grensdiepte. De stroming wordt meer horizontaal (zie figuur IV.2).

De stroomsnelheid in de bres wordt nu bepaald met:

$$u_T = \frac{q_T}{d_T}$$

In geval van een volkomen overlaat (fase III en IV) is de waterdiepte in de bres d_T gelijk aan de grensdiepte d_g . In fase V is de stroming gestuwd. De waterdiepte volgt nu uit een energiebeschouwing:

$$d_T = h_w - \frac{u_T^2}{2 \cdot g}$$



figuur IV.2: Principe van stroming over een overlaat

IV.2 Fase I

In fase I treedt er stroming langs het talud op. De wrijvingscoëfficiënt volgt dan uit een berekening met behulp van het eerste model (figuur IV.1).

Taludhoek op $t = t_0$	β_0	14°	
Taludhoek op $t = t_1$	β_1	32°	
Kruinhoogte	Z_T	0.27 m	
Debiet	q_T	$8.86 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	
Grensdiepte	d_g	0.02 m	
Wrijvingscoëfficiënt	C_f	0.025	schatting!
Evenwichtsdiepte	$d_e(t_0)$	0.01 m	
	$d_e(t_1)$	0.007 m	
Evenwichtslengte	$l_e(t_0)$	0.289 m	
	$l_e(t_1)$	0.295 m	
Taludlengte	$l_t(t_0)$	1.080 m	
	$l_t(t_1)$	0.432 m	
Diepte aan de teen	d_{teen}	$= d_e$	want $l_t > l_e$

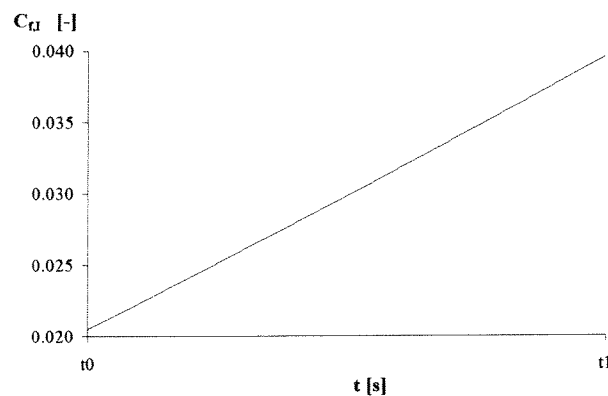
Voor de berekening van de wrijvingscoëfficiënt is de waterdiepte aan de teen van het talud, d_{teen} , maatgevend. Deze diepte is gelijk aan de evenwichtsdiepte d_e , omdat de taludlengte in deze fase steeds groter is dan de evenwichtslengte.

In fase I versteilt het binnentalud van $\beta = \beta_0 = 14^\circ$ op $t = t_0$ tot $\beta = \beta_1 = \phi = 32^\circ$ op $t = t_1$.

De berekening van de wrijvingscoëfficiënt is daarom uitgevoerd voor verschillende waarden voor de taludhoek β . Voor iedere waarde van de taludhoek is de iteratieprocedure doorlopen, zoals die hierboven beschreven is.

In de berekening is uitgegaan van een lineaire toename van de taludhoek β in de tijd.

De uitkomst van de berekening staat in figuur IV.3, de wrijvingscoëfficiënt neemt vrijwel lineair toe van 0.021 tot 0.040. Een steiler talud geeft dus meer wrijving, door de grotere stroomsnelheden.



figuur IV.3: Verloop van de wrijvingscoëfficiënt in fase I

IV.3 Fase II

Ook in fase II treedt stroming langs een talud op (zie figuur IV.1). De hellingshoek van het binnentalud blijft gedurende fase II constant. De wrijvingscoëfficiënt C_f zal daarom een constante waarde hebben.

Taludhelling	β_1	32°	
Kruinhoogte	Z_T	0.27 m	
Wrijvingscoëfficiënt	C_f	0.040	schatting: eindwaarde uit fase I
Debiet	q_T	$8,86 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	
Evenwichtsdiepte	d_e	0.009 m	
Grensdiepte	d_g	0.020 m	
Evenwichtslengte	l_e	0.183 m	
Taludlengte	l_t	0.432 m	
Diepte aan de teen	d_{teen}	$= d_e$	want $l_t > l_e$

Ook hier geldt dat de wrijvingscoëfficiënt bepaald wordt door de stroming aan de teen van het talud.

C_f	d_e	d_g	l_e	d_{teen}	u	θ	k	$C_{f,II}$
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[-]	[m]	[-]
0.030	0.0077	0.02	0.2399	0.0077	1.1500	24.74	0.0123	0.0396
0.0396	0.0084	0.02	0.1970	0.0084	1.0520	27.04	0.0135	0.0396
0.0396	0.0084	0.02	0.1970	0.0084	1.0520	27.04	0.0135	0.0396

tabel IV.1: Iteratie wrijvingscoëfficiënt in fase II

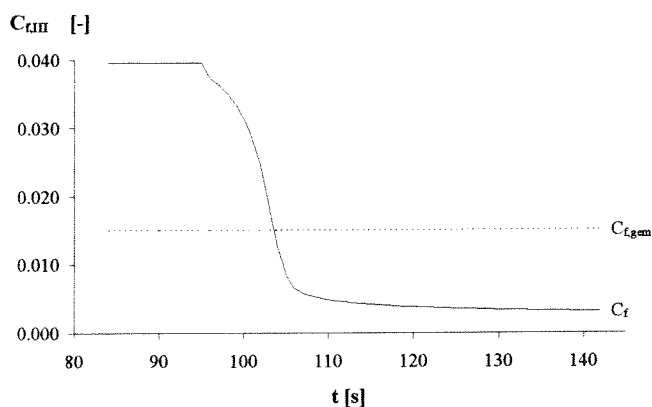
In tabel IV.1 staan de resultaten van de iteratie. In fase II is de wrijvingscoëfficiënt dus constant:

$$C_{f,II} = 0.040.$$

IV.4 Fase III

In fase III vindt de overgang plaats van model 1 naar model 2. De kruinhoogte van de dijk neemt af naar nul, waardoor de taludlengte steeds kleiner wordt. De waterdiepte aan de teen van het talud wordt hierdoor groter en is aan het einde van fase III gelijk aan de grensdiepte.

De wrijving is in een spreadsheet berekend met een tijdstap van 1 s, waarbij de kruinhoogte afneemt naar nul. De ontwikkeling van C_f in de tijd gedurende fase III is grafisch weergegeven in figuur IV.4.



figuur IV.4: Verloop van de wrijvingscoëfficiënt in fase III

IV.5 Fase IV

In fase IV is de stroming nog steeds ongestuwd. De dijk in de bres is volledig verdwenen, dus wordt de wrijving bepaald met behulp van model 2 (zie figuur IV.2).

Er wordt gerekend met een constant debiet $q_T = (2/3)^{1.5} \cdot g^{0.5} \cdot h_w^{1.5} = 0.28 \text{ m}^2/\text{s}$, en een constante diepte, gelijk aan de grensdiepte:

$$d_T = d_g = \sqrt[3]{\frac{q_T^2}{g}} = 0.20 \text{ m}$$

De stroomsnelheid in de bres wordt dan ook constant: $u_T = q_T/d_T = 1.40 \text{ m/s}$.

Met deze gegevens wordt de wrijvingscoëfficiënt uitgerekend, zie tabel IV.2. Doordat zowel d_T als q_T constant zijn, is ook $C_{f,IV}$ een constante, gelijk aan 0.0031.

C_f	θ	k	C_f
[-]	[-]	[m]	[-]
0.010	13.21	0.0066	0.0045
0.0045	5.57	0.0028	0.0035
0.0035	4.25	0.0021	0.0032
0.0032	3.93	0.0020	0.0031
0.0031	3.83	0.0019	0.0031
0.0031	3.83	0.0019	0.0031

tabel IV.2: Iteratie wrijvingscoëfficiënt in fase IV

Voor de wrijvingscoëfficiënt in fase IV geldt dus:

$$C_{f,IV} = 0.0031.$$

IV.6 Fase V

In fase V is de stroming subkritisch. Voor het debiet door de bres geldt:

$$q_T = q_{T, \text{onvolkomen}} = h_{\text{kom}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_w - h_{\text{kom}})}$$

De stroomsnelheid u_T , de diepte d_T en het debiet q_T zijn afhankelijk van elkaar:

$$u_T = \frac{q_T}{d_T} \quad (1)$$

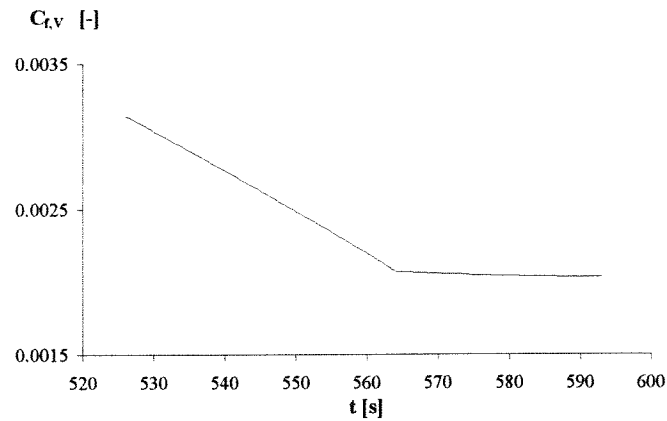
$$d_T = h_w - \frac{u_T^2}{2 \cdot g} \quad (2)$$

Combinatie van vergelijking (1) en (2) geeft:

$$d_T^3 - 2 \cdot g \cdot h_w \cdot d_T^2 + q_T^2 = 0$$

Deze derdegraads vergelijking wordt in een spreadsheetmodel per tijdstap via een iteratieprocedure opgelost.

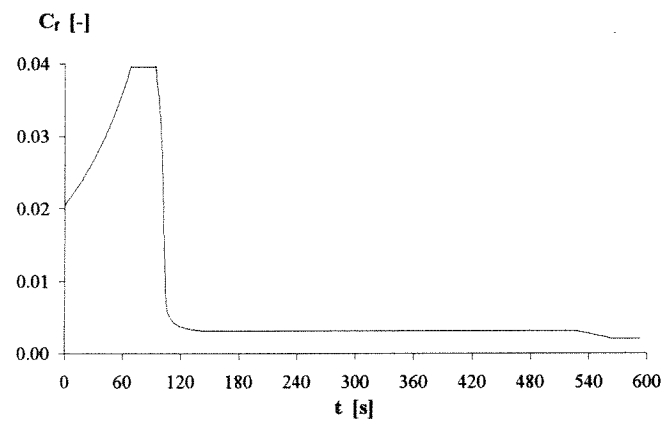
De resultaten van de berekening van de wrijvingscoëfficiënt in fase V is grafisch weergegeven in figuur IV.5.



figuur IV.5: De wrijvingscoëfficiënt in fase V

IV.7 Totaalbeeld

In figuur IV.6 is het verloop van de wrijvingscoëfficiënt C_f gedurende het gehele bresgroeiproces geschetst. In eerste instantie neemt de wrijving toe door het steiler worden van het talud. Met de daling van de kruin in fase III neemt ook de wrijving sterk af. Vervolgens blijft C_f lange tijd constant om aan het einde van het proces, in de subkritische stroming, nog enigszins af te nemen tot de eindwaarde van $C_f = 0.002$.



figuur IV.6: Totaaloverzicht van de wrijvingscoëfficiënt

Bijlage V

Voorspelling van het proefverloop

Bijlage V Voorspelling proefverloop

In bijlage III is voor de proefopstelling, zoals die in hoofdstuk 6 is bepaald, het kombergingsvolume en -oppervlakte berekend. In bijlage IV is de wrijvingscoëfficiënt C_f voor de verschillende fasen van het bresgroeiproces bepaald. In deze bijlage wordt met de formules uit het bestaande bresgroeimodel het te verwachten proefverloop berekend.

De voorspelling wordt gemaakt voor de situatie, waarin drie pompen worden gebruikt om water in het proefbassin te pompen (zie hoofdstuk 5.10). Het debiet door de bres wordt daarom begrensd op 650 l/s. Tevens wordt in deze berekening tegelijkertijd zowel de situatie met rechte overlaatvorm als die met de cirkelvormige toestroming uitgewerkt.

De berekeningen zijn uitgevoerd met behulp van een rekenmodel in het computerprogramma Excel. Hier worden slechts de werkwijze en de resultaten gegeven, en niet de volledige berekening in tijdstappen.

In paragraaf V.7 worden de belangrijkste resultaten van een tweede berekening gegeven, namelijk voor het geval dat de dijkhoogte 15 cm bedraagt. Deze gegevens worden gebruikt bij het bepalen van de proefopstelling van het tweede en derde experiment, en bij de beschrijving van deze experimenten.

V.1 Berekening tijdsduur verschillende fasen

In de uitdrukkingen voor de duur van de verschillende fasen, zoals die in het bestaande bresgroeimodel [2] worden gegeven, worden verschillende coëfficiënten gebruikt. Deze zijn:

$$k_0 = \frac{0.0082}{(1-p) \cdot \Delta} \cdot m^{\frac{1}{3}} \cdot C_{f,I}^{-\frac{1}{3}} \cdot \frac{(\sin \beta_0)^{\frac{1}{3}}}{\cos \beta_0} = 0.0176$$

$$k_1 = \frac{0.0082}{(1-p) \cdot \Delta} \cdot m^{\frac{1}{3}} \cdot C_{f,II}^{-\frac{1}{3}} \cdot \frac{(\sin \beta_1)^{\frac{1}{3}}}{\cos \beta_1} = 0.0231$$

$$k_2 = \frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta_1}{\sin(\alpha + \beta_1)} \cdot k_1 = 0.0064$$

Hierin zijn $C_{f,I}$ en $C_{f,II}$ de dimensieloze wrijvingscoëfficiënten van de fasen I en II zoals die berekend zijn in bijlage IV.

Voor de tijdsduren van fase I, II en III volgt dan, met gebruik van de coëfficiënten [2]:

$$\text{Fase I: } t_I = t_1 - t_0 = \frac{L_t}{k_0 \cdot \sqrt{g \cdot (h_w - Z_{T,0})}} = 68 \text{ s}$$

Hierin is L_t de terugschrijding van de teen van het binnentalud gedurende fase I:

$$L_t = Z_T \cdot (\cot \beta_0 - \cot \beta_1) \text{ [m]}$$

$$\text{Fase II: } t_{II} = t_2 - t_1 = \frac{L_T}{k_1 \cdot \sqrt{g \cdot (h_w - Z_{T,0})}} = 16 \text{ s}$$

$$\text{Fase III: } t_{III} = t_3 - t_2 = \frac{2}{k_2} \cdot \sqrt{\frac{h_w}{g}} = 37 \text{ s}$$

In fase III wordt de dieptegroei vertraagt door de breedtegroei. Doordat de zijwanden van de bres instorten als gevolg van ondergraving komen grote hoeveelheden zand in de bres terecht. Dit extra zand moet eerst afgevoerd worden voordat de diepte verder kan toenemen. Visser [2] stelt een vertragsingsfactor voor, waarvoor geldt:

$$f_2 = \frac{b_T + 2d_T}{2b_T}$$

Voor de halve bresbreedte b_T geldt, bij $\beta_1 \approx \phi = 32^\circ$ [4]:

$$b_T \approx 1.1 d_T = 1.1 (h_w - Z_T)$$

Voor d_T geldt:

$$d_T = \frac{q_T}{u_e} = \frac{m \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{g} \cdot (h_w - Z_T)^{\frac{3}{2}}}{\left(\frac{g}{C_f} \cdot q_T \cdot \sin \beta_1\right)^{\frac{1}{3}}} = \left[\frac{m^2 \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^3 \cdot C_{f,III}}{\sin \beta_1} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot (h_w - Z_T) = 0.162 \cdot (h_w - Z_T)$$

Voor de vertragsingsfactor f_2 volgt:

$$f_2 = \frac{b_T + 2d_T}{2b_T} = \frac{1.1 + 2 \cdot 0.162}{2 \cdot 1.1} = 0.647$$

De duur van fase III wordt dan:

$$t_{III} = t_3 - t_2 = \frac{37}{0.647} = 57 \text{ s}$$

Fase IV begint op $t = t_3$ en eindigt op het moment dat de stroming subkritisch wordt. Voor deze tijdsduur is geen éénduidige uitdrukking te geven, zij hangt af van de stromingscondities en de komberging.

Fase V duurt tot het moment waarop de bres niet meer groeit. Ook dit is niet in één simpele formule te benaderen, de stromingsparameters worden per tijdstap berekend.

V.2 Voorspelling fase I en II

In fase I en II is de bres nog niet gegroeid, de kruinhoogte en de bresbreedte zijn gelijk aan de beginwaarden, $Z_T = 0.27 \text{ m}$ en $b_{T,I,II} = 0.10 \text{ m}$. Het debiet in deze fasen is daarom constant, en gelijk aan:

$$q_{T,I,II} = m \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{g} \cdot (h_w - Z_{T,0})^{\frac{3}{2}} = 8.86 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s}$$

Aan het einde van fase I, op $t = t_1 = 68 \text{ s}$, is de benedenstroomse waterstand h_{kom} :

$$h_{kom}(t_1) = -0.35 \text{ m} + \frac{q_{T,I} \cdot b_{ov} \cdot t_I}{A_{kom,I}}$$

Op tijdstip $t = t_2 = 84 \text{ s}$, het einde van fase II, geldt:

$$h_{kom}(t_2) = h_{kom}(t_1) + \frac{q_{T,II} \cdot b_{ov} \cdot t_{II}}{A_{kom,II}}$$

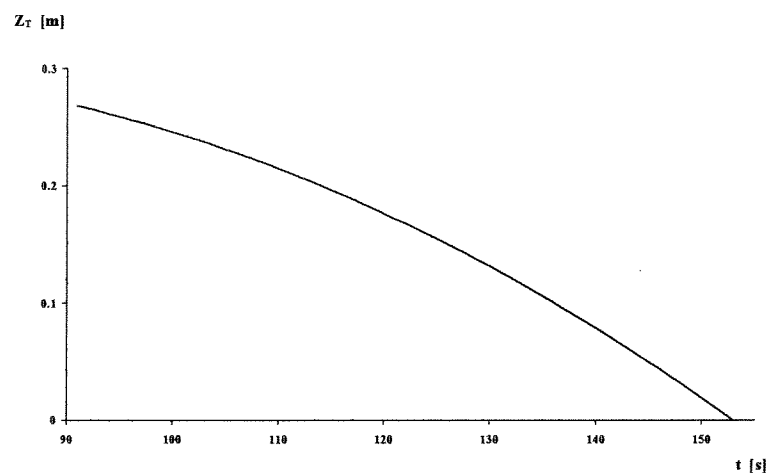
	Rechte overlaat	Cirkelvormige overlaat
Debiet q_T	$8.86 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	$8.86 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
Overlaatbreedte b_{ov}	0.10 m	0.157 m
Debiet Q_T	$8.86 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$	$13.9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
Waterstand $h_{kom}(t_1)$	-34.98 cm	-34.96 cm
Waterstand $h_{kom}(t_2)$	-34.97 cm	-34.95 cm

tabel V.1: Berekening fase I en II

V.3 Voorspelling fase III

In fase III daalt de kruin van de dijk in de bres van de beginwaarde $Z_{T,0} = 0.27 \text{ m}$ tot $Z_T = 0$, volgens de relatie:

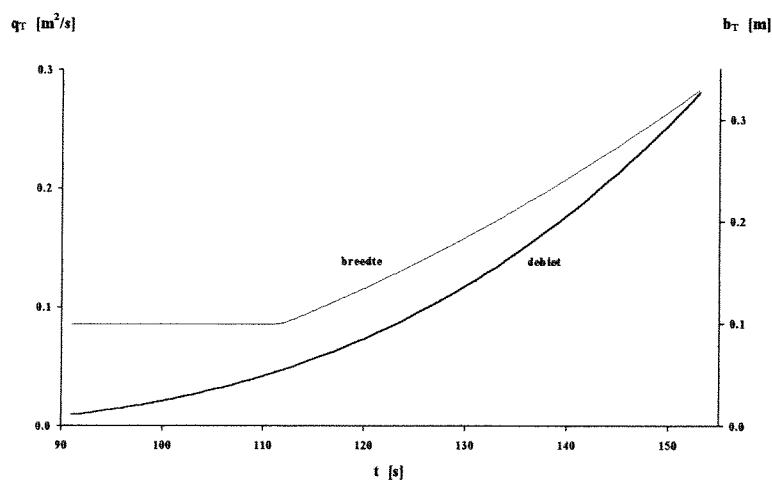
$$Z_T(t) = h_w - \left[\frac{f_2 \cdot k_2}{2} \cdot (t - t_3) + \sqrt{h_w} \right]^2 \quad (\text{zie figuur V.1})$$



figuur V.1: Kruindaling in fase III

Als gevolg van deze kruindaling neemt het debiet door de bres toe. De breedte van de bres is lineair met de bresdiepte $d_T = h_w - Z_T$, en wordt dus ook groter gedurende fase III.

De breedte van de bres en het debiet door de bres voor zowel de rechte als de cirkelvormige overlaat ontwikkelen zich gedurende fase III zoals weergegeven in figuur V.2.



figuur V.2: Debiet en bresbreedte in fase III

V.4 Voorspelling fase IV

In fase IV blijft de breedte van de bres lineair doorgroeien, met dezelfde snelheid als in fase III:

$$b_T(t) = b_T(t_3) + \beta_{IV} \cdot (t - t_3)$$

In deze fase is de stroming nog steeds superkritisch, de dijk in de bres is geheel verdwenen. Fase IV eindigt op het moment dat de stroming subkritisch wordt. Dit is het geval als geldt:

$$h_{\text{kom}} = \frac{2}{3} \cdot h_w = 0.55 \text{ m}$$

Verondersteld wordt dat de ontgrondingskuil de gehele stroming omlaag brengt, zonder de condities te veranderen. Zodoende worden het debiet en de diepte constant gedurende fase IV. De ontgrondingskuil wordt in feite buiten beschouwing gelaten.

Voor het debiet geldt dan:

$$q_T = m \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{g} \cdot h_w^{\frac{3}{2}} = 0.28 \text{ m}^2 / \text{s}$$

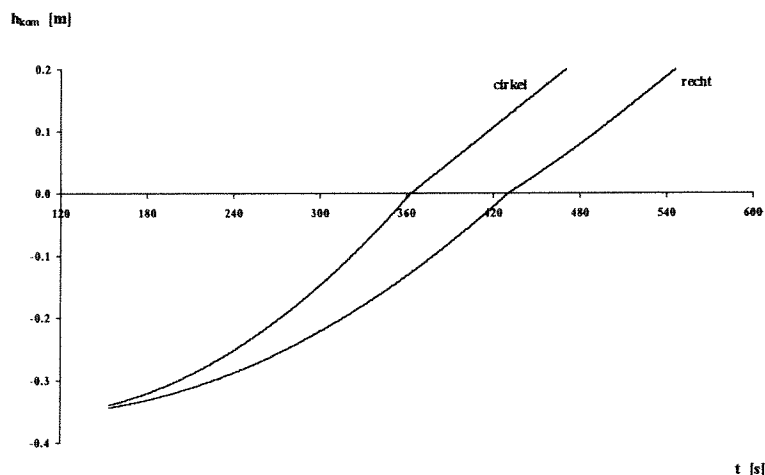
Omdat de stroming superkritisch is geldt voor de diepte in de bres:

$$d_T = d_g = \sqrt[3]{\frac{q_T^2}{g}} = \frac{2}{3} \cdot h_w = 0.20 \text{ m}$$

Voor de stroomsnelheid geldt:

$$u_T = \frac{q_T}{d_T} = 1.40 \text{ m/s}$$

In het geval van de rechte overlaat duurt fase IV $t_{IV} = 383 \text{ s}$, in het geval van de cirkelvormige overlaat $t_{IV} = 293 \text{ s}$. De waterstand in de polder bedraagt dan $h_{\text{kom}} = 0.20 \text{ m}$. De komberging ontwikkelt zich gedurende fase IV zoals in figuur V.3. Bij de gekromde overlaat stroomt er meer water door de bres in de polder waardoor de grens van subkritische stroming eerder wordt bereikt.



figuur V.3: Kombergingswaterstand in fase IV

V.5 Voorspelling fase V

In fase V is de stroming subkritisch. Voor het debiet geldt:

$$q_{T,V} = h_{kom} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_w - h_{kom})}$$

De bovenstroomse waterstand h_w is gelijk aan 0.30 m.

In de berekening wordt voor de waterstand h_{kom} de uitkomst van de vorige tijdstap gebruikt. Omdat de berekening uitgevoerd is met een tijdstap van 1 s, is de fout, die hiermee gemaakt wordt, relatief klein.

Voor de stroomsnelheid in de bres geldt:

$$u_T = \frac{q_T}{d_T}$$

Hierin is d_T de diepte in de bres, die volgt uit een berekening volgens Bernoulli:

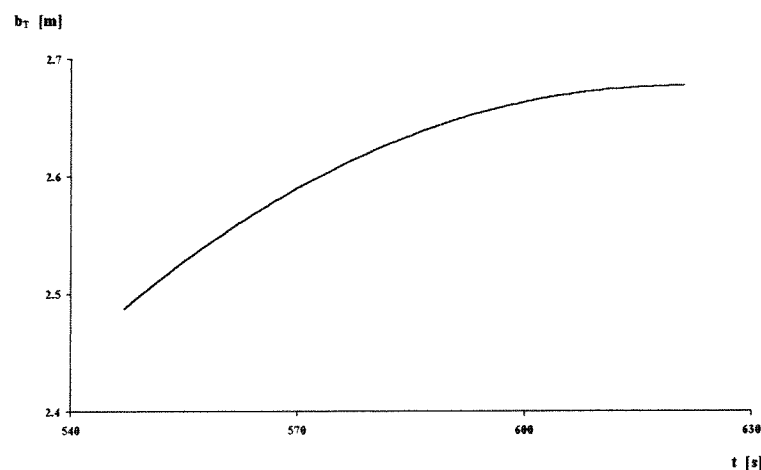
$$d_T = h_w - \frac{u_T^2}{2 \cdot g}$$

Deze twee onbekenden d_T en u_T zijn op te lossen door de vergelijking voor u_T in de vergelijking van Bernoulli te substitueren. Er ontstaat dan een derdegraadsvergelijking:

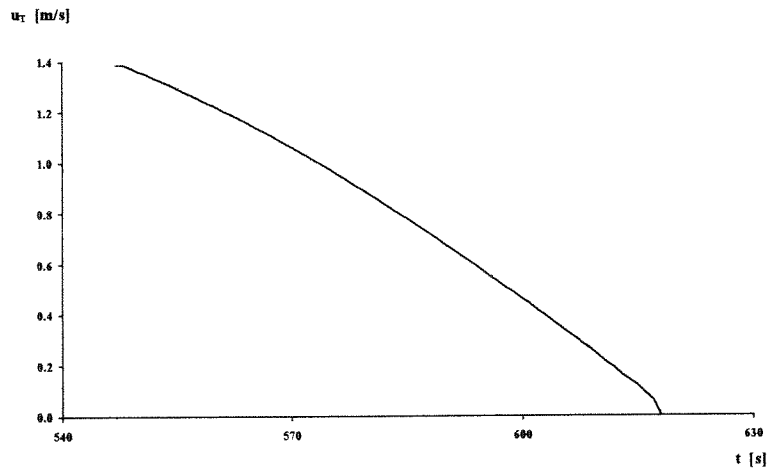
$$d_T = h_w - \frac{q_T^2}{2 \cdot g \cdot d_T^2} \Leftrightarrow h_w - \frac{q_T^2}{2 \cdot g \cdot d_T^2} - d_T = 0 \Leftrightarrow d_T^3 - h_w \cdot d_T^2 + \frac{q_T^2}{2 \cdot g} = 0$$

In de berekening is deze vergelijking gebruikt. Per tijdstap wordt via een iteratieprocedure een waarde voor de diepte d_T bepaald. Uit deze d_T wordt dan de stroomsnelheid u_T berekend.

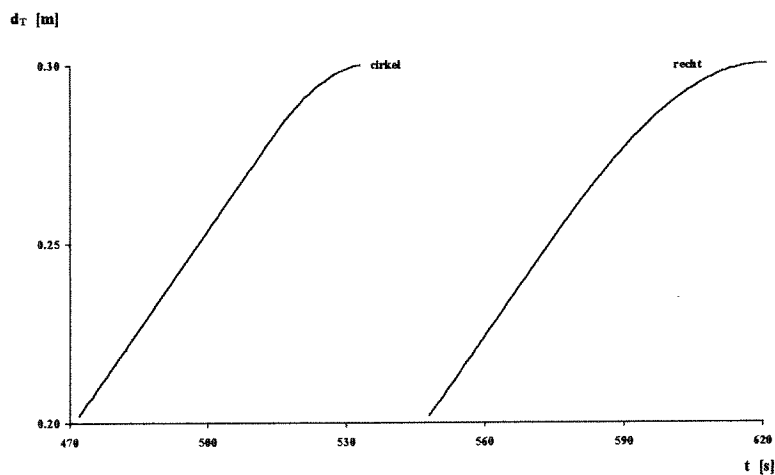
De bresbreedte b_T , de stroomsnelheid u_T en de waterdiepte in de bres d_T zijn grafisch weergegeven in figuur V.4 tot figuur V.6.



figuur V.4: Bresbreedte in fase V voor de rechte overlaat



figuur V.5: Stroomsnelheid in de bres in fase V



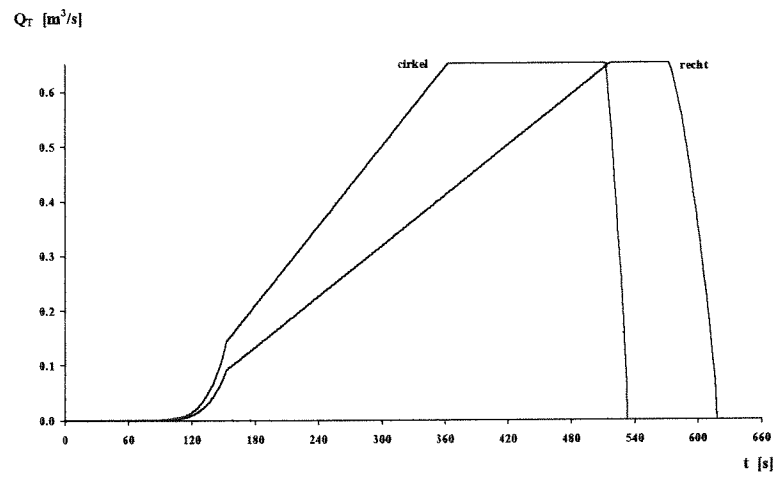
figuur V.6: Diepte in de bres in fase V

In figuur V.6 is goed het verschil tussen de twee vormen van de toestroming te zien. In principe verloopt het bresgroeiproces in beide gevallen identiek; de vorm van de krommes is gelijk. Het verschil is dat in geval van een cirkelvormige toestroming het proces sneller verloopt, door de grotere watervoerende breedte. Dit geldt ook voor het breedte- en snelheidsverloop. Hiervan is in figuur V.4 en figuur V.5 alleen de kromme voor de rechte overlaat getekend.

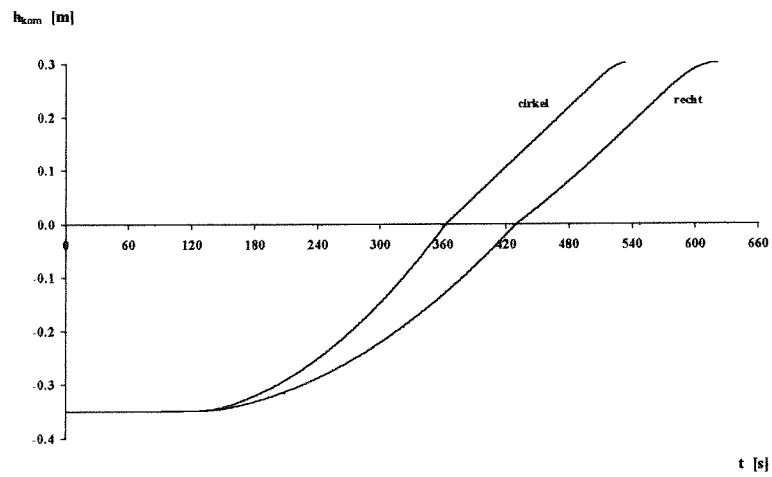
De eindbreedte $b_{T,5}$ is bij de cirkelvormige toestroming kleiner. Dit komt doordat het debiet door de bres Q_T groter is, terwijl de stromingsparameter waarvan het bresgroeiproces afhankelijk is, het specifiek debiet q_T , gelijk is aan die bij een rechte toestroming. Hierdoor groeit de bres even snel in breedte maar duurt het proces minder lang, zodat de eindbreedte kleiner wordt.

V.6 Totaaloverzicht

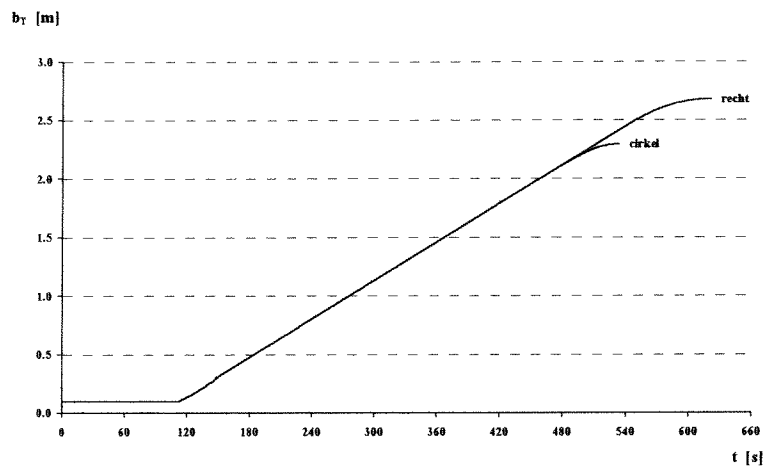
In figuur V.7 tot figuur V.9 is het debiet door de bres, de komberging en het breedteverloop getekend voor beide stromingsvormen. Ook hier is te zien dat het proces bij een cirkelvormige toestroming sneller gaat. Het debiet door de bres is begrensd op 650 l/s (zie figuur V.7). Dit komt overeen met een situatie in de proefopstelling waarin drie pompen worden gebruikt voor de watertoevoer. (zie hoofdstuk 5.10).



figuur V.7: Totale debiet Q_T door de bres gedurende de proef



figuur V.8: Komberging h_{kom} tijdens de proef

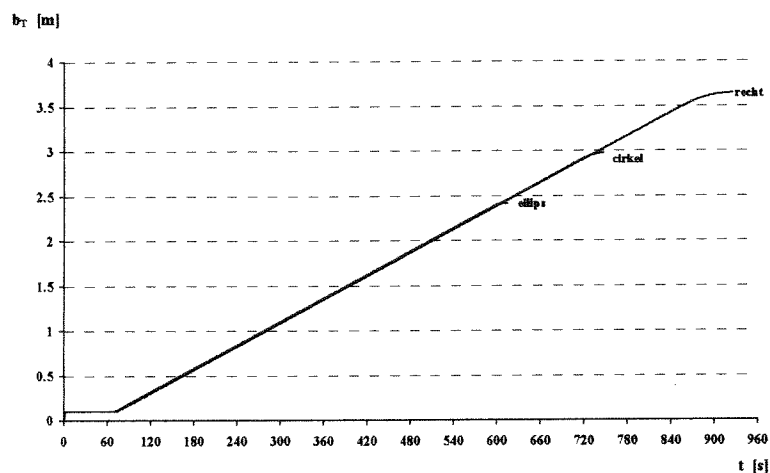


figuur V.9: Breedte van de bres b_T

V.7 Resultaten voor een lagere dijk

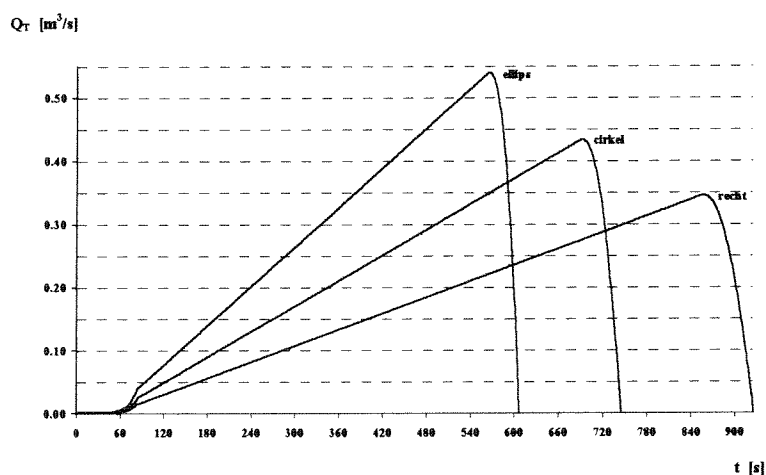
Een zelfde berekening als boven is uitgevoerd voor de situatie waarin de dijk een hoogte $h_D = 15$ cm heeft, zoals in het tweede en derde experiment het geval is. Deze berekening verloopt geheel analoog aan de berekening voor een dijk van 30 cm hoog. In deze berekening is naast de rechte en cirkelvormige toestroming ook een ellipsvormige toestroming met de verhouding lange/korte as van 2:1 uitgekend. Hier worden alleen de belangrijkste resultaten (die gebruikt worden in de vergelijking van de experimenten met het bresgroeimodel) weergegeven.

De breedte van de bres ontwikkelt zich als in figuur V.10 is weergegeven. De eindbreedte bedraagt zo'n 3 m voor de cirkelvormige toestroming en 2.5 m voor de ellipsvormige.



figuur V.10: Breedte van de bres voor een lage dijk

Het debiet door de bres verloopt als in figuur V.11. In de situatie met cirkelvormige toestroming bedraagt het maximum debiet $Q_{T,max} \approx 430$ l/s. Bij een ellipsvorm is dit $Q_{T,max} \approx 540$ l/s.



figuur V.11: Debiet door de bres voor een lage dijk

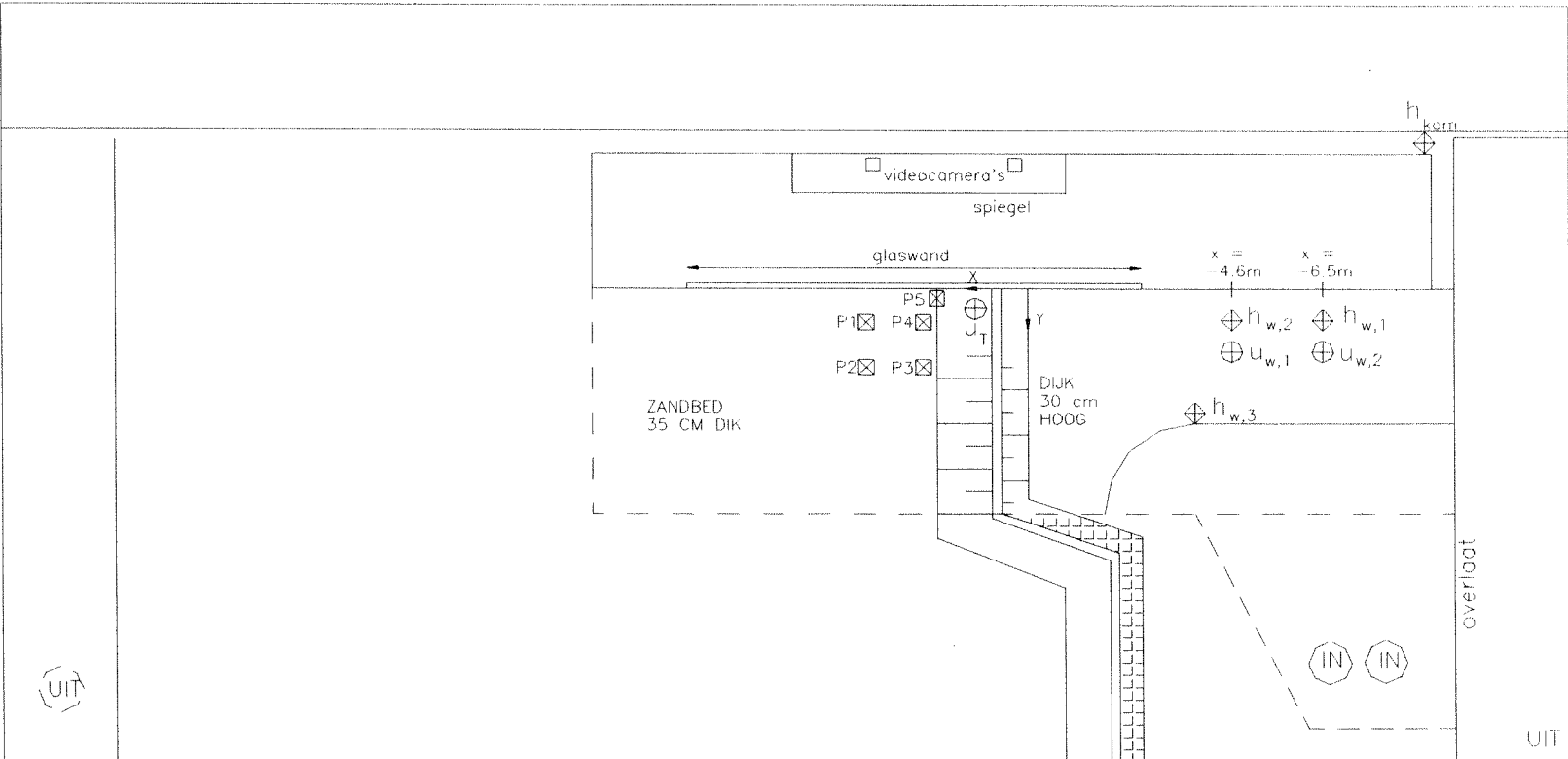
Bijlage VI

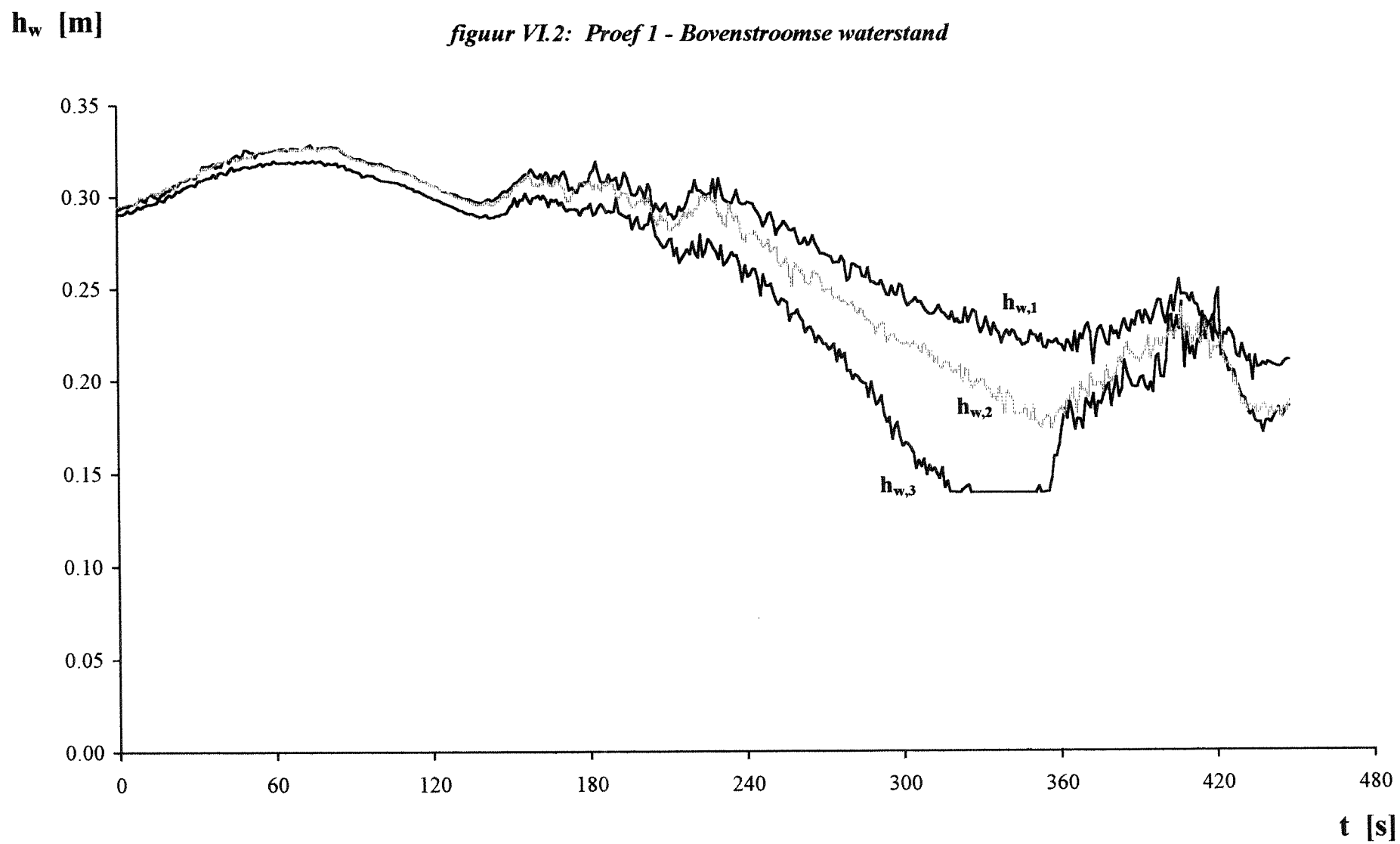
De resultaten van het eerste experiment

Bijlage VI De resultaten van het eerste experiment

In deze bijlage worden de resultaten van het eerste experiment gepresenteerd. De resultaten bestaan uit de grafieken van de meetgegevens (bijlage VI.1) en de langsdoorsneden van de ontgrondingskuil die uit de bestudering van de videobeelden zijn geconstrueerd (bijlage VI.2).

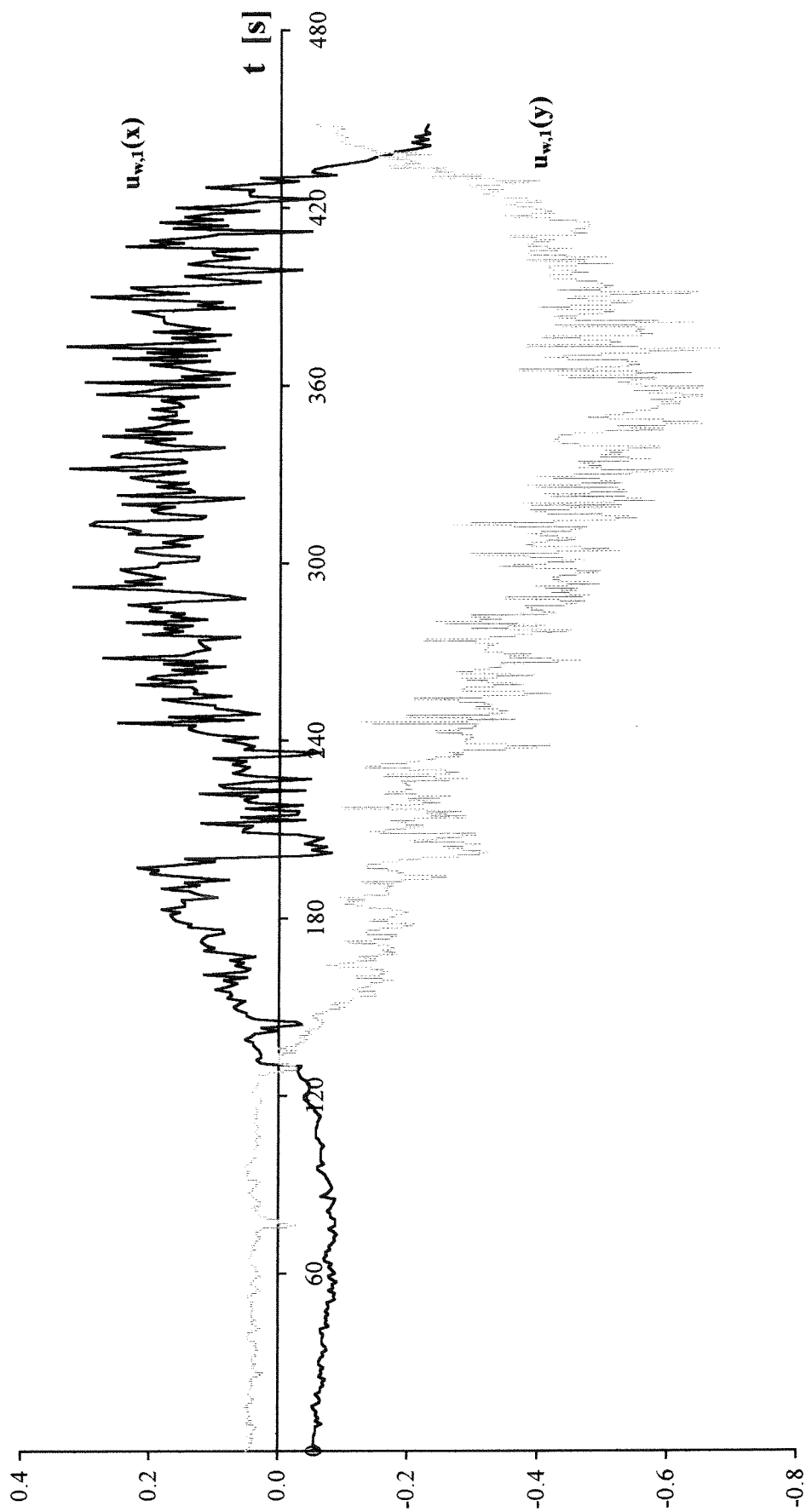
figuur VI.1: Proef 1 - Meetopstelling

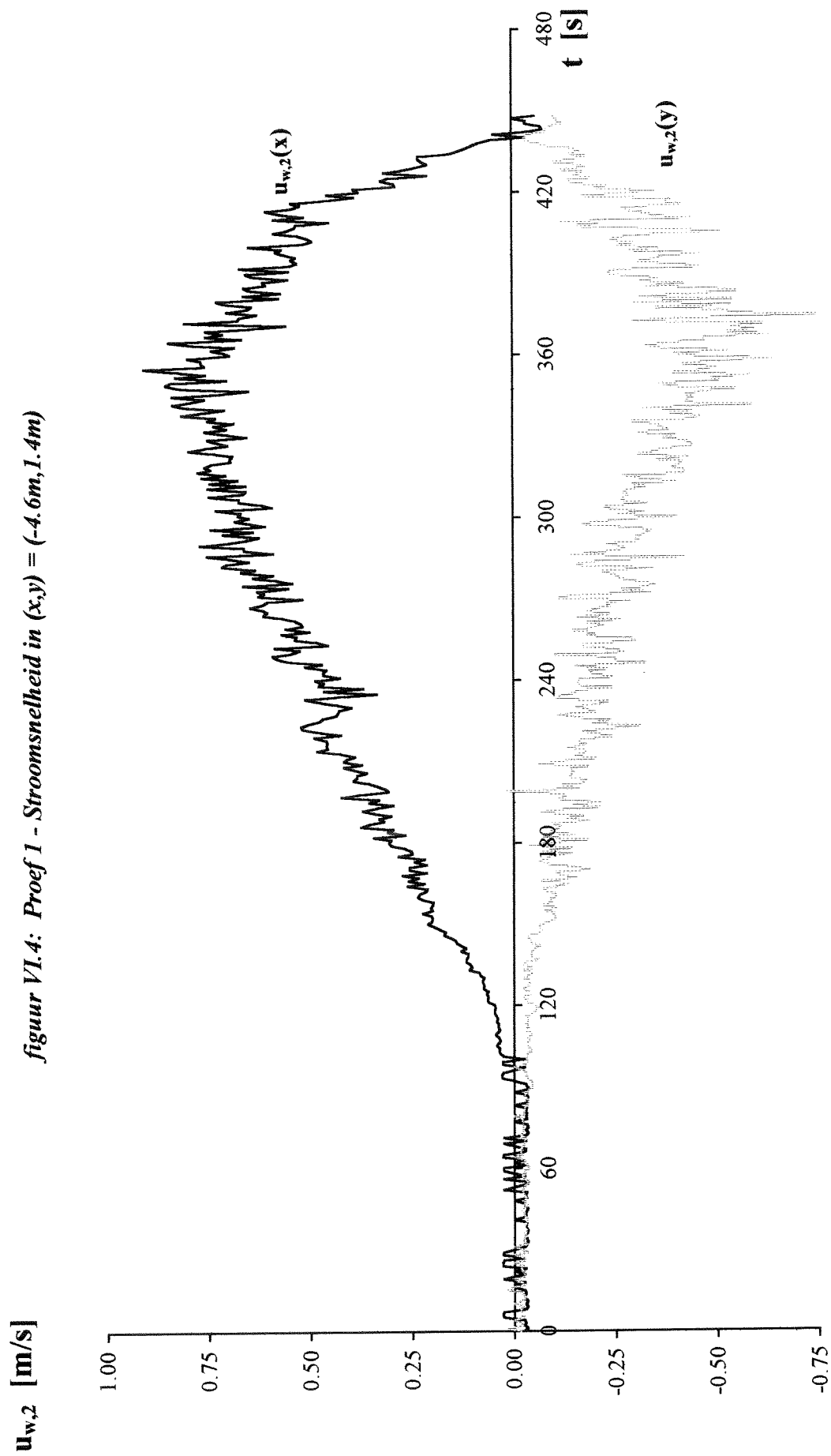


figuur VI.2: Proef 1 - Bovenstroomse waterstand

$u_{w,1}$ [m/s]

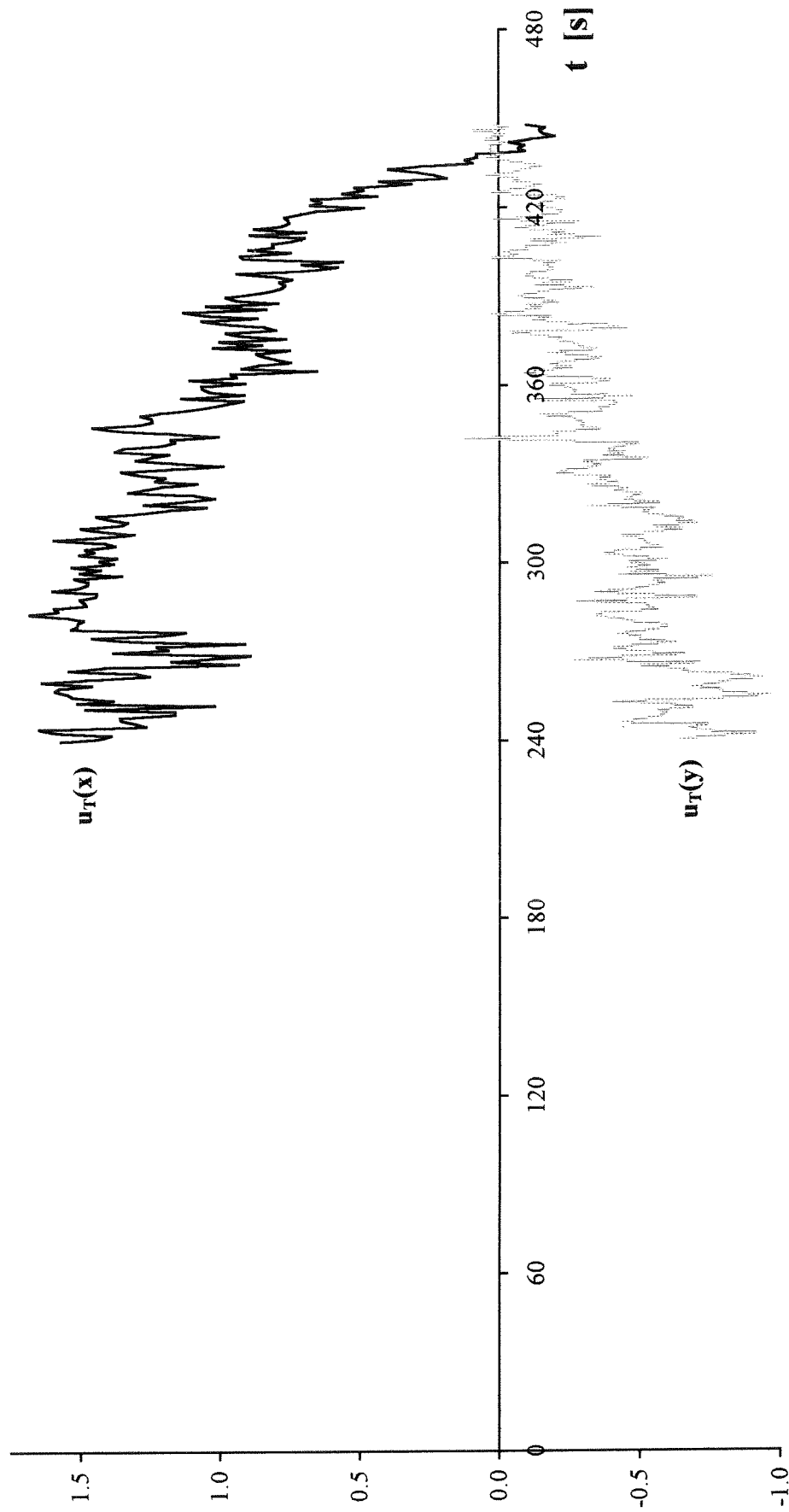
figuur VI.3: Proef 1 - Stroomsnelheid in $(x,y) = (-6.5m, 1.4m)$

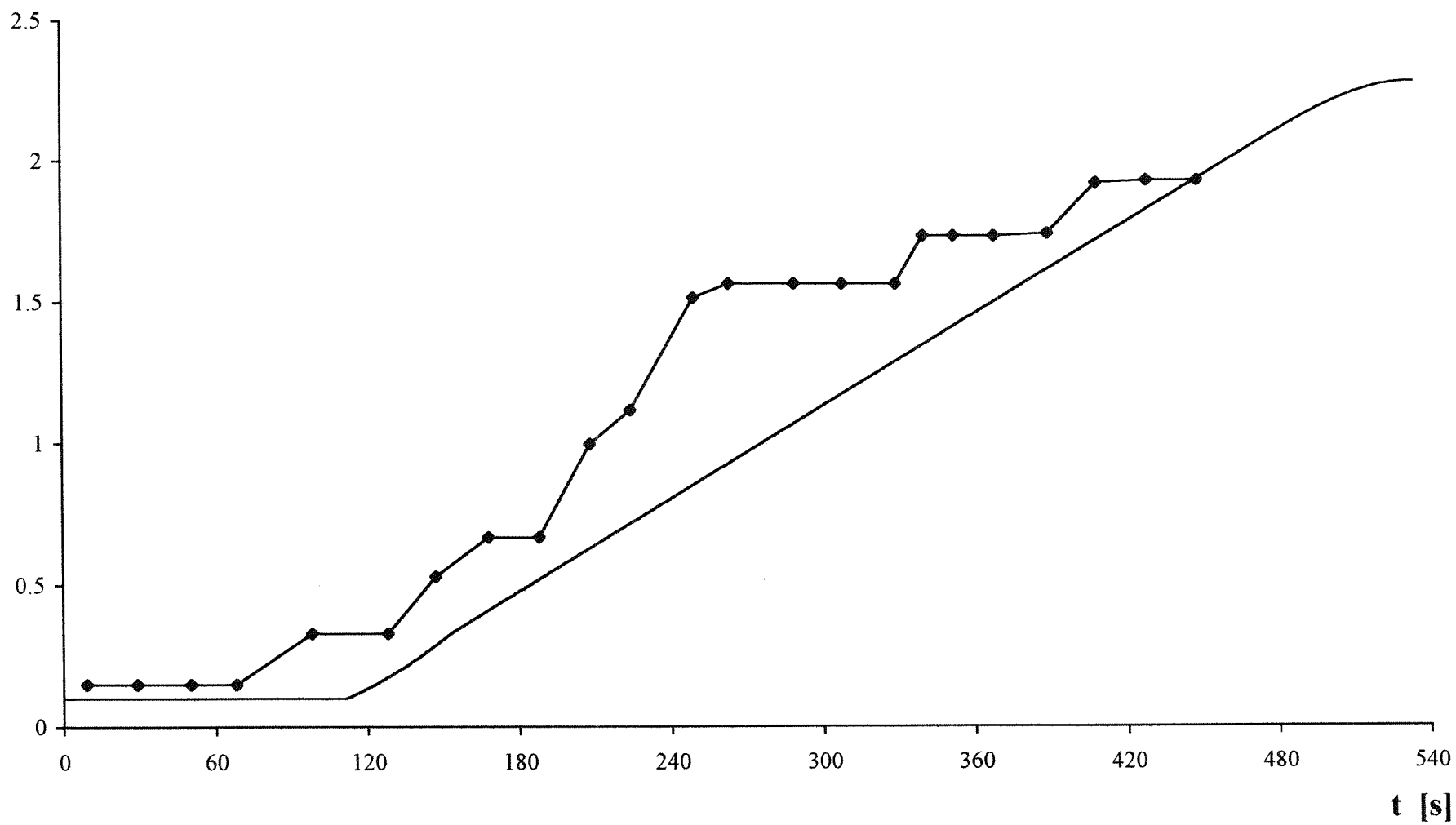




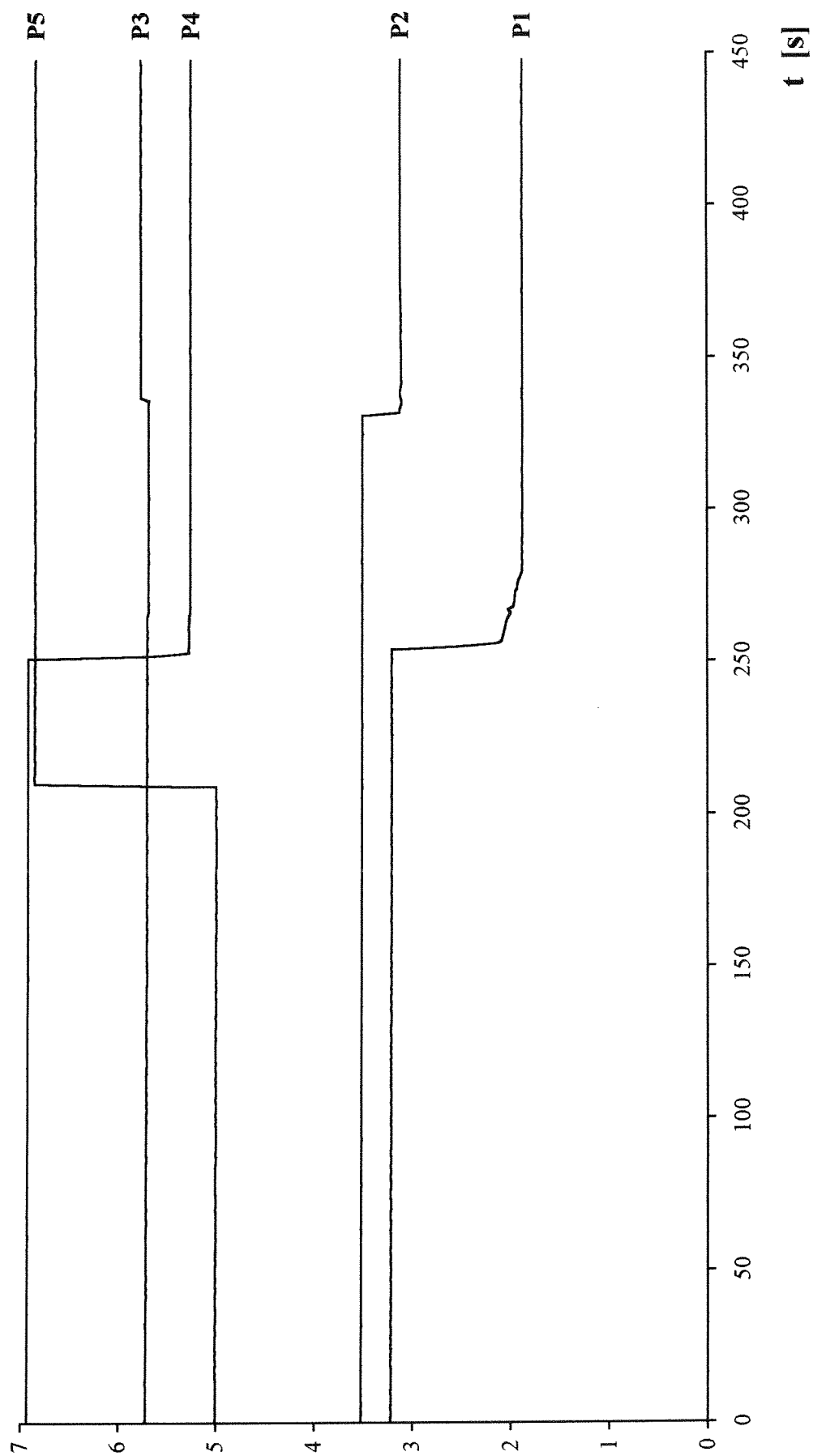
u_T [m/s]

figuur VI.5: Proef 1 - Stroomsnelheid in de bres, $(x,y) = (0.8m; 0.45m)$

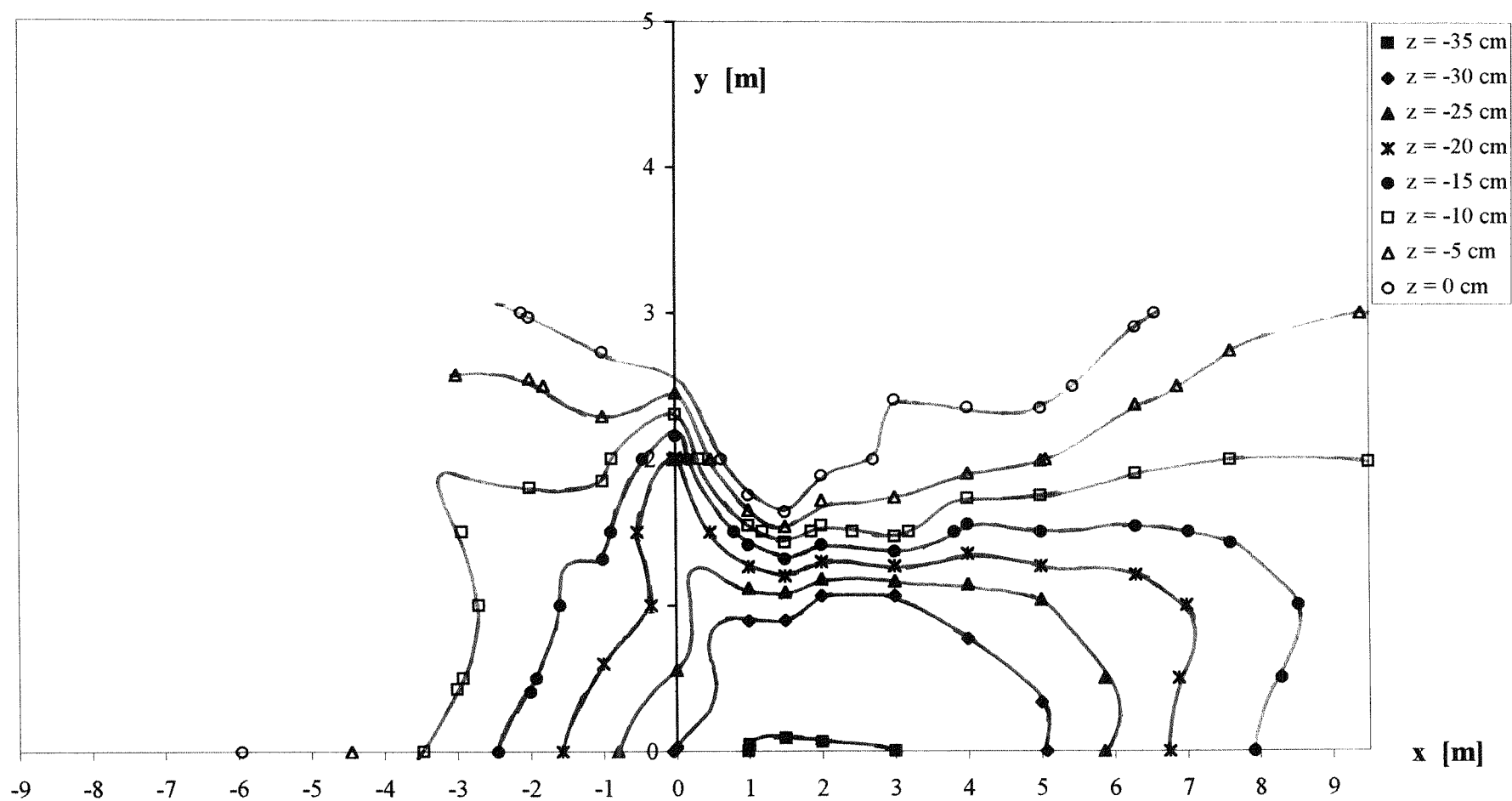


b_T [m]*figuur VI.6: Proef 1 - Breedte van de bres midden op de kruin*

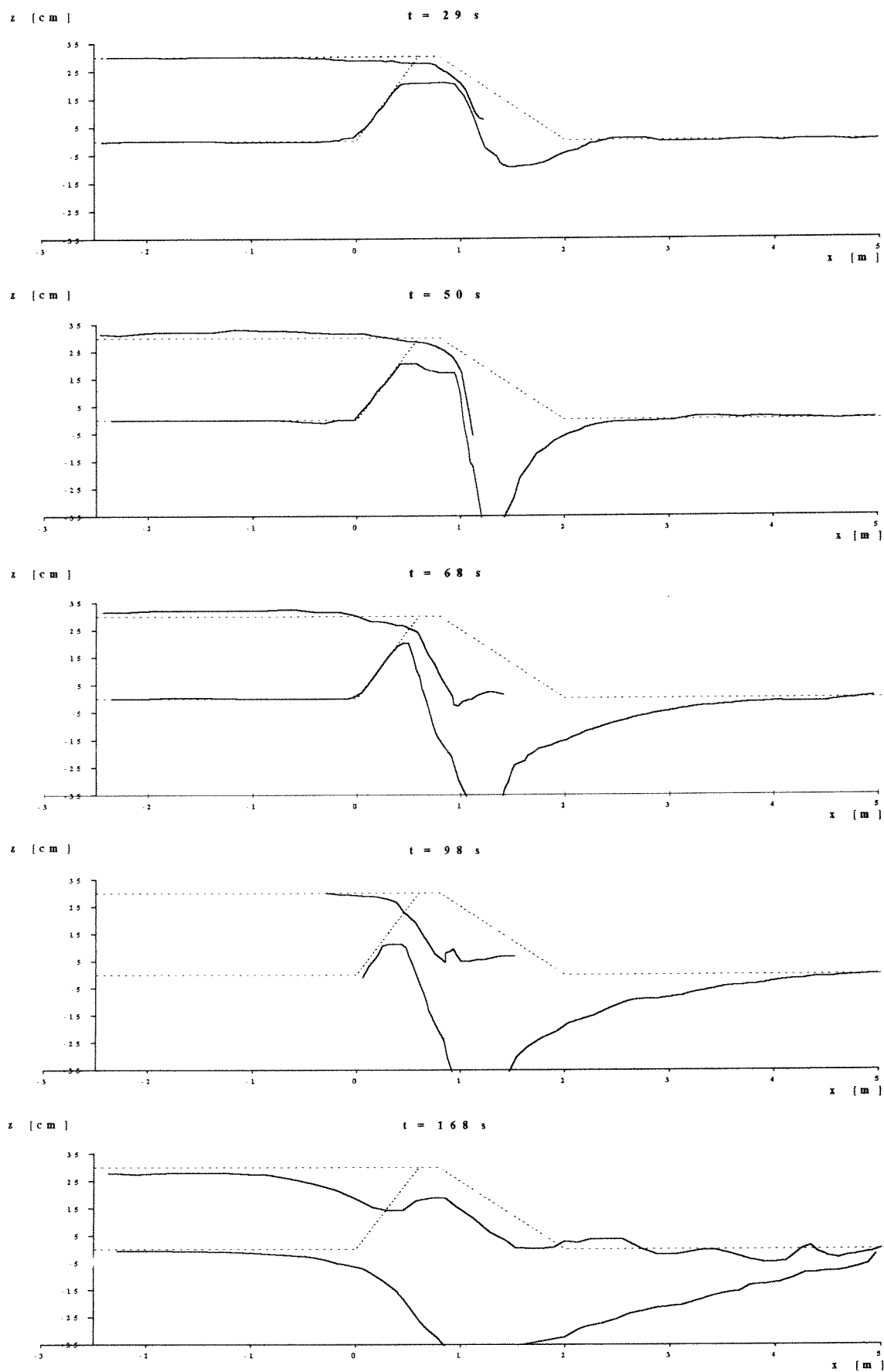
[V]

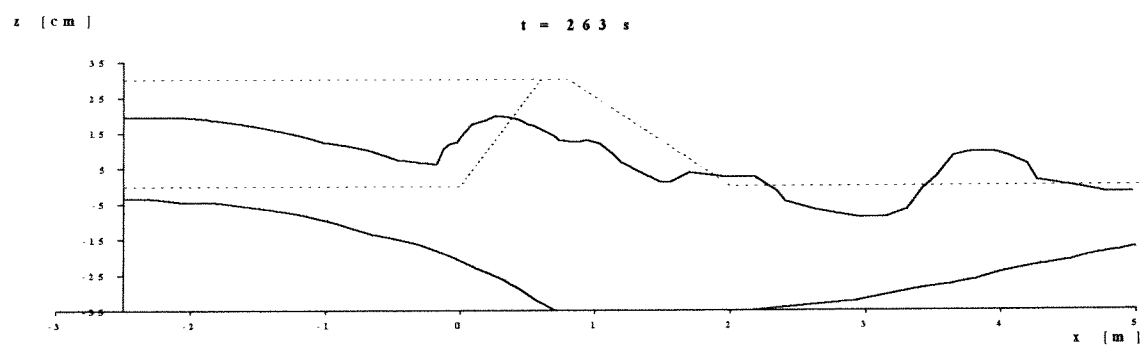
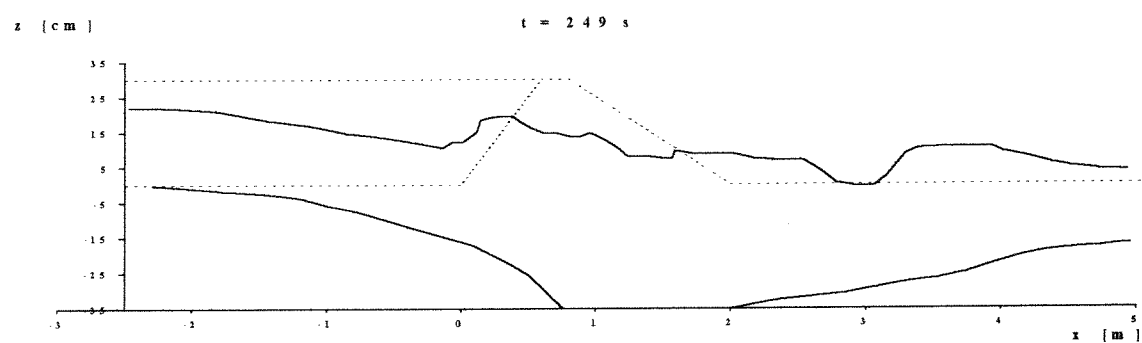
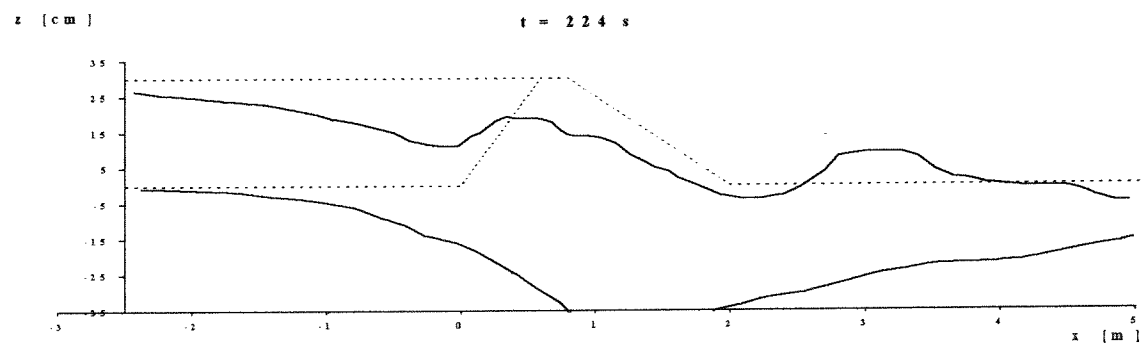
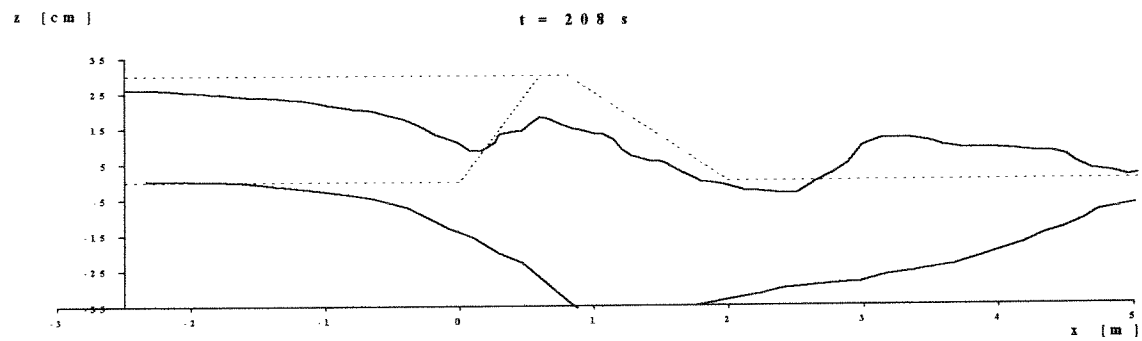
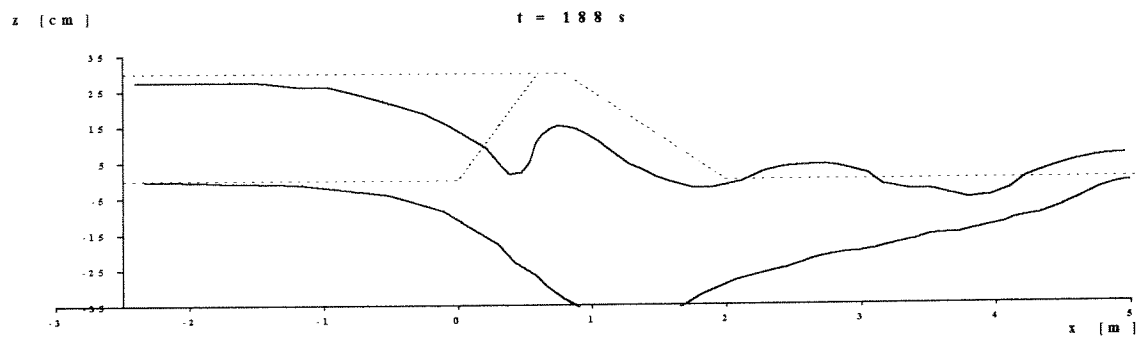
figuur VI.7: Proef 1 - Resultaten profielvolgers

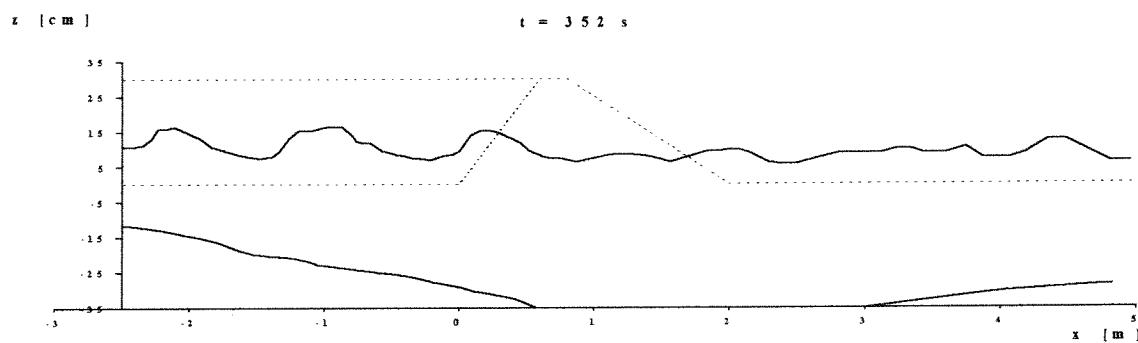
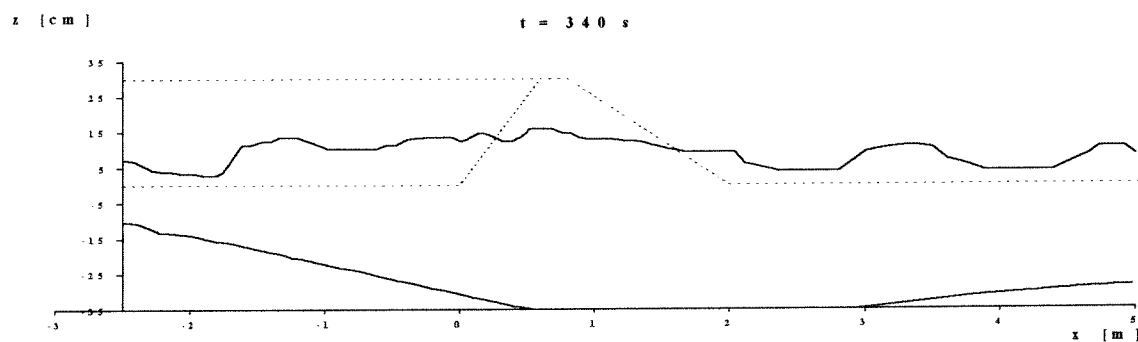
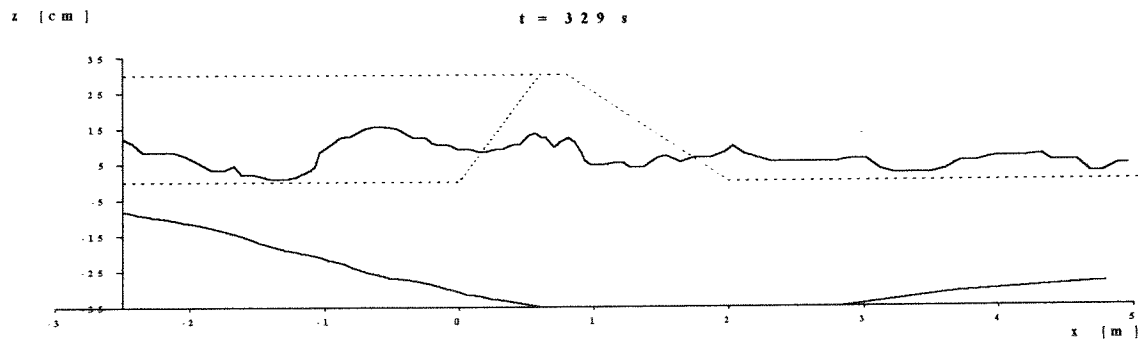
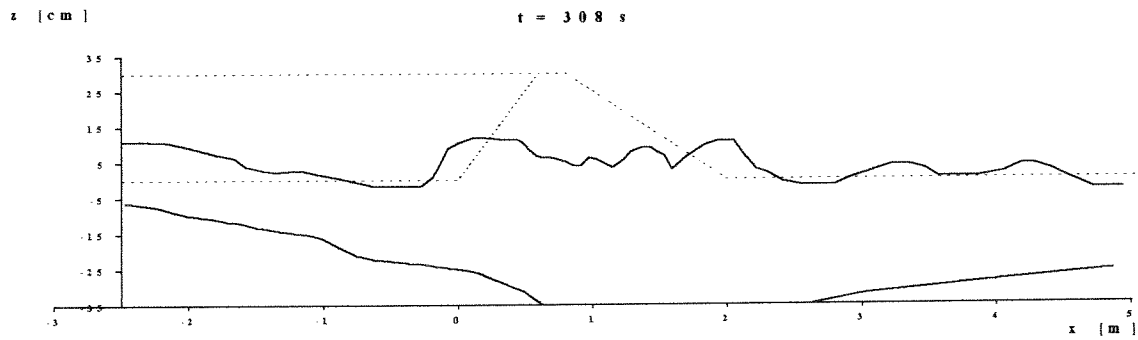
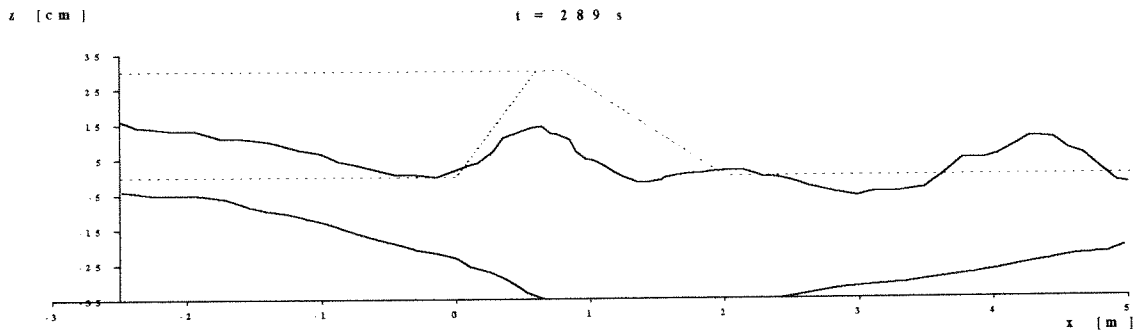
figuur VI.8: Proef 1 - Contourplot ontgrondingskuil in eindsituatie

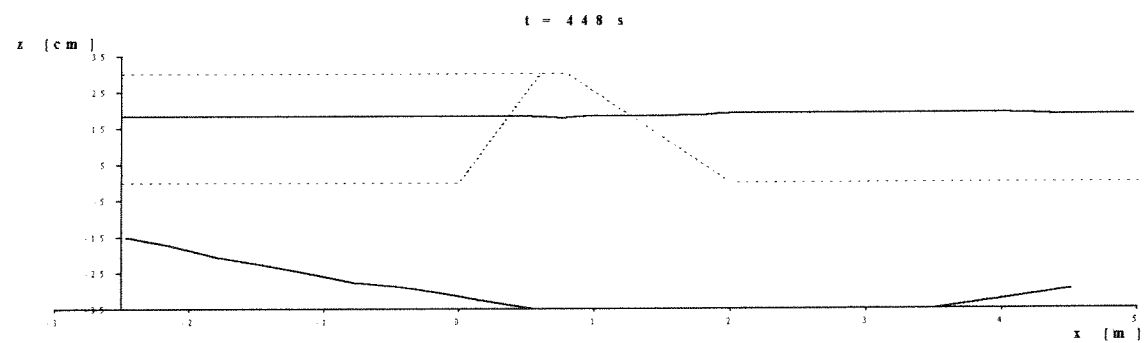
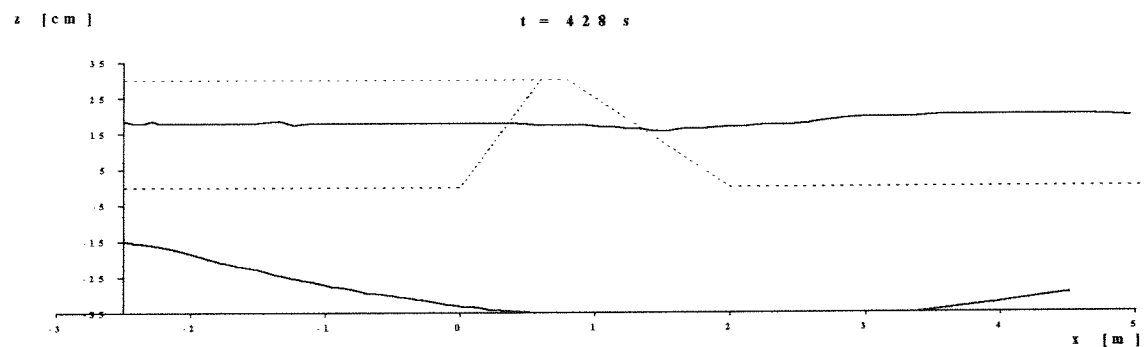
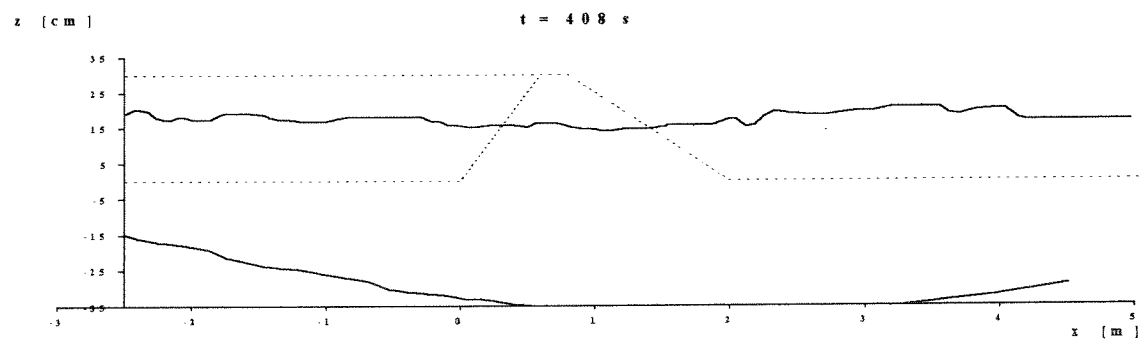
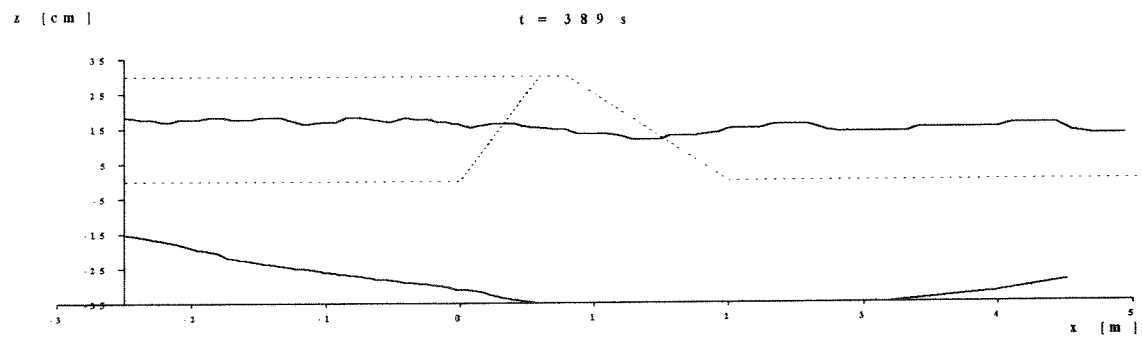
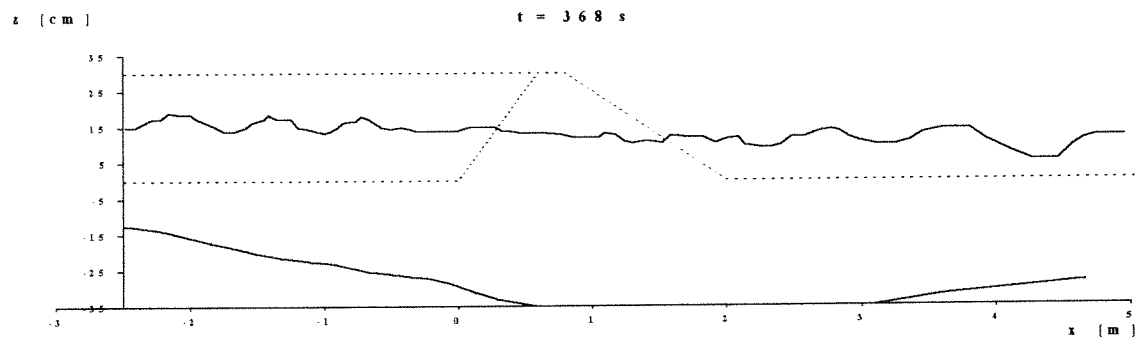


VI.2 Langsdoorsneden van de ontgrondingskuil









Bijlage VII

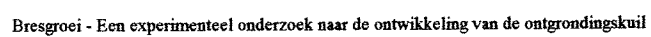
De resultaten van het tweede experiment

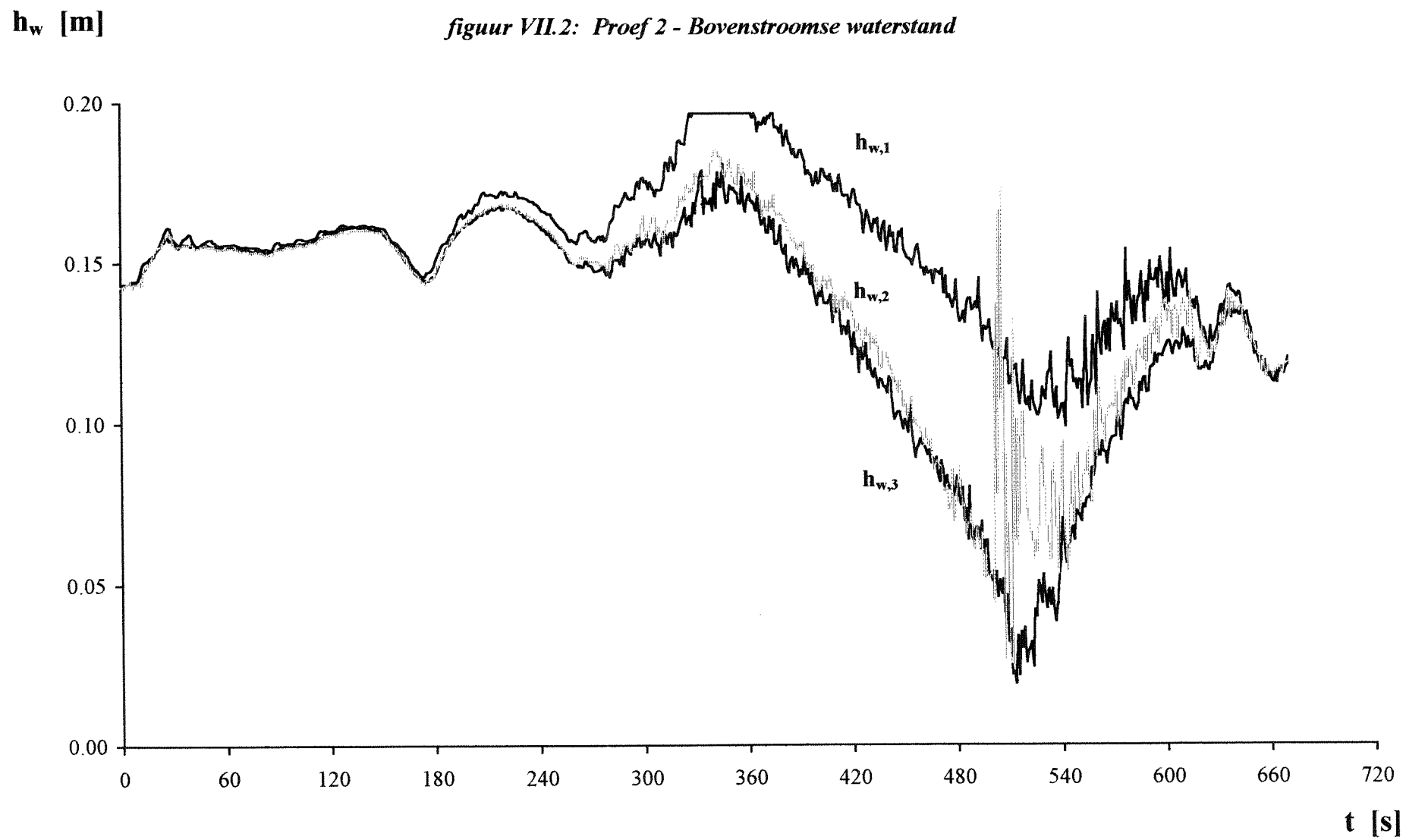
Bijlage VII De resultaten van het tweede experiment

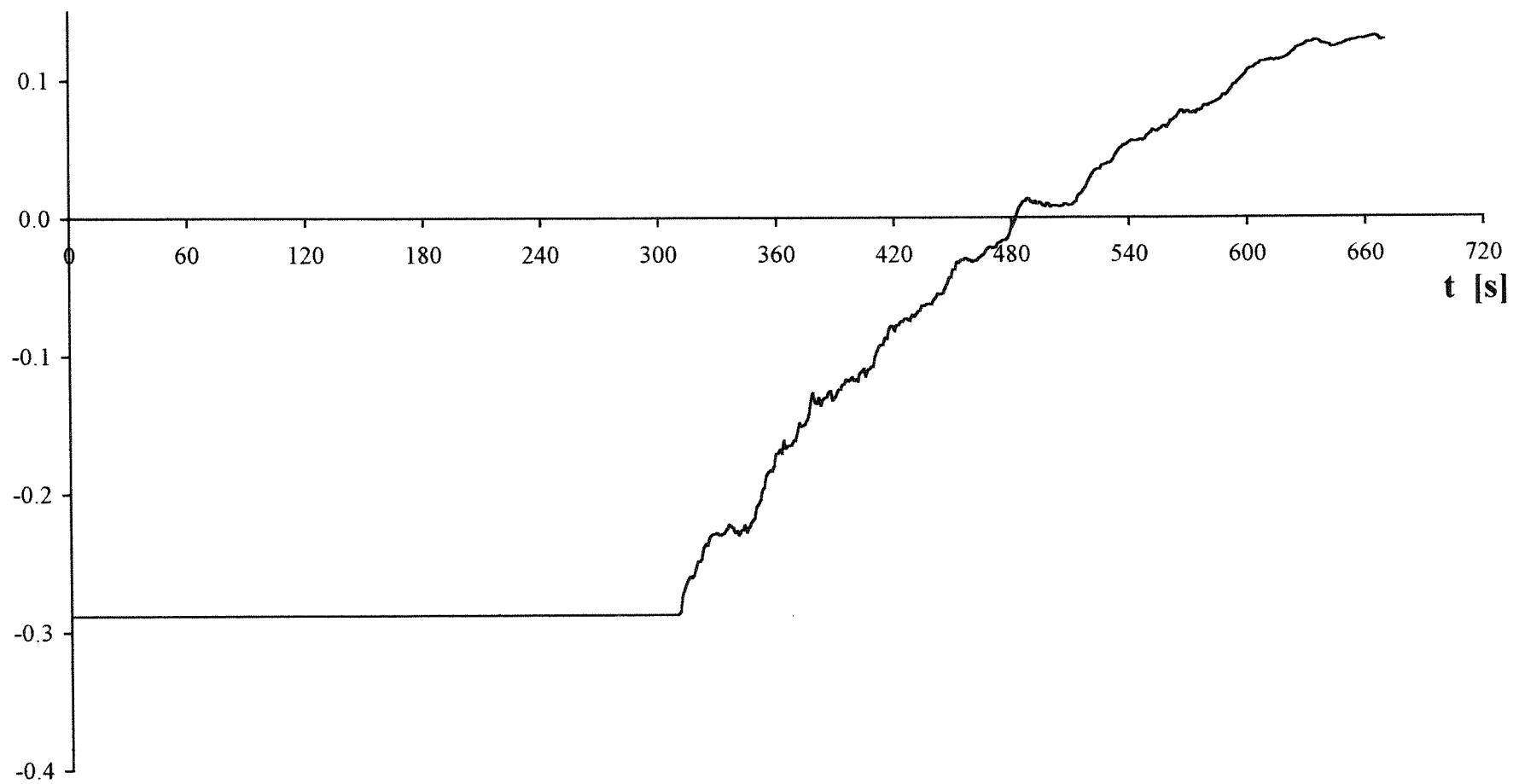
In deze bijlage worden de resultaten van het tweede experiment gepresenteerd. De resultaten bestaan uit de grafieken van de meetgegevens (bijlage VII.1) en de langsdoorsneden van de ontgrondingskuil die uit de bestudering van de videobeelden zijn geconstrueerd (bijlage VII.2).

50

50

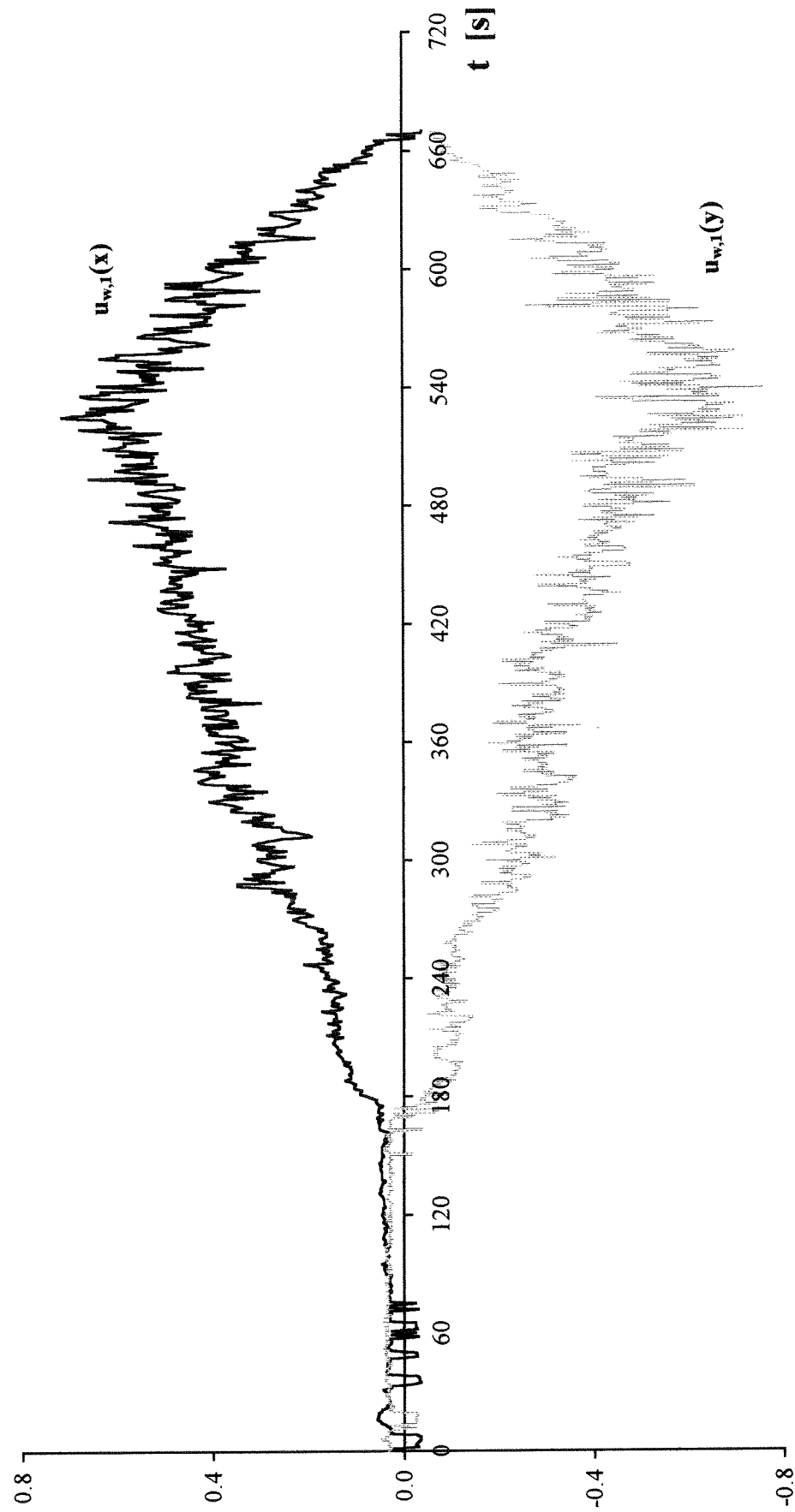


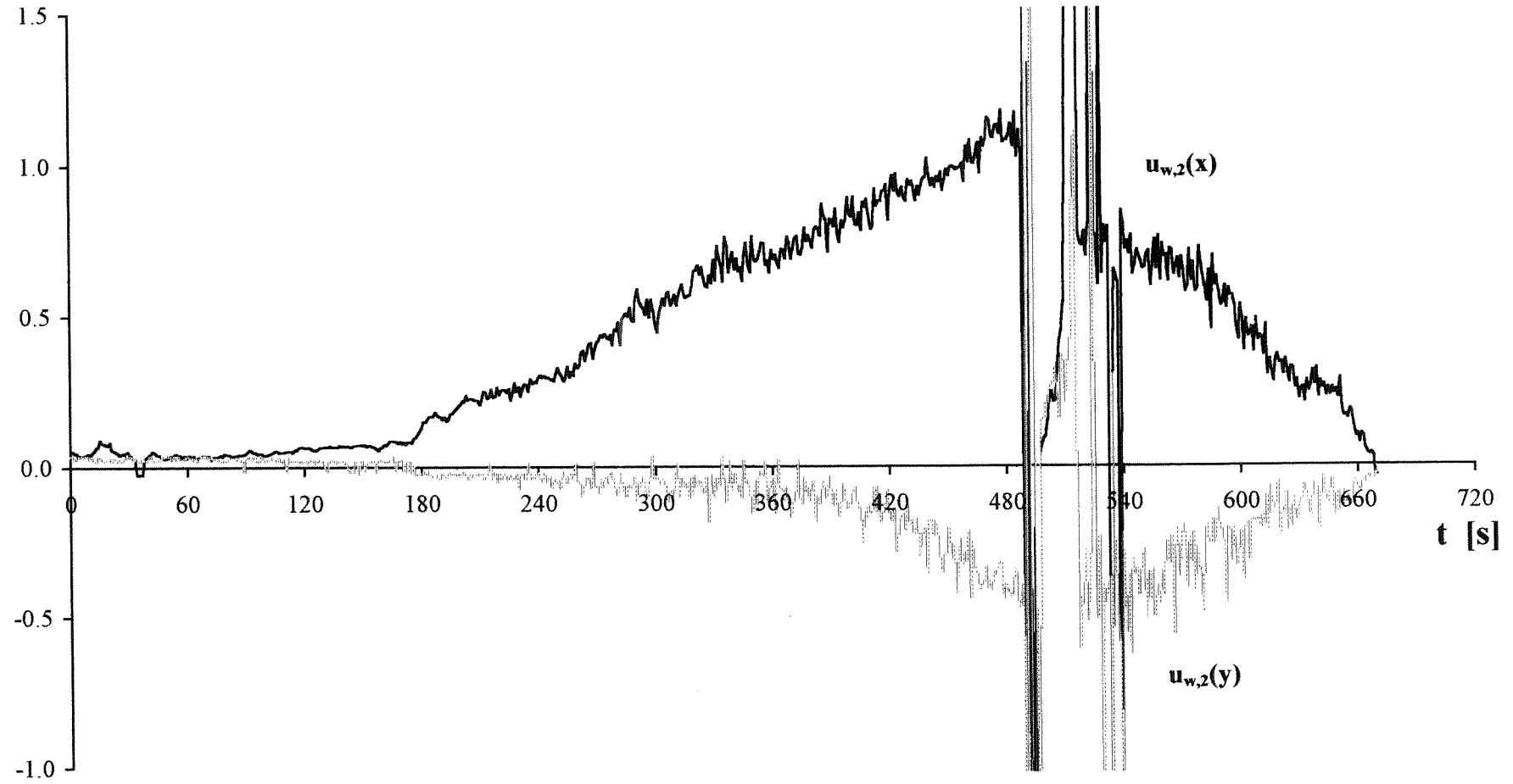
figuur VII.2: Proef 2 - Bovenstroomse waterstand

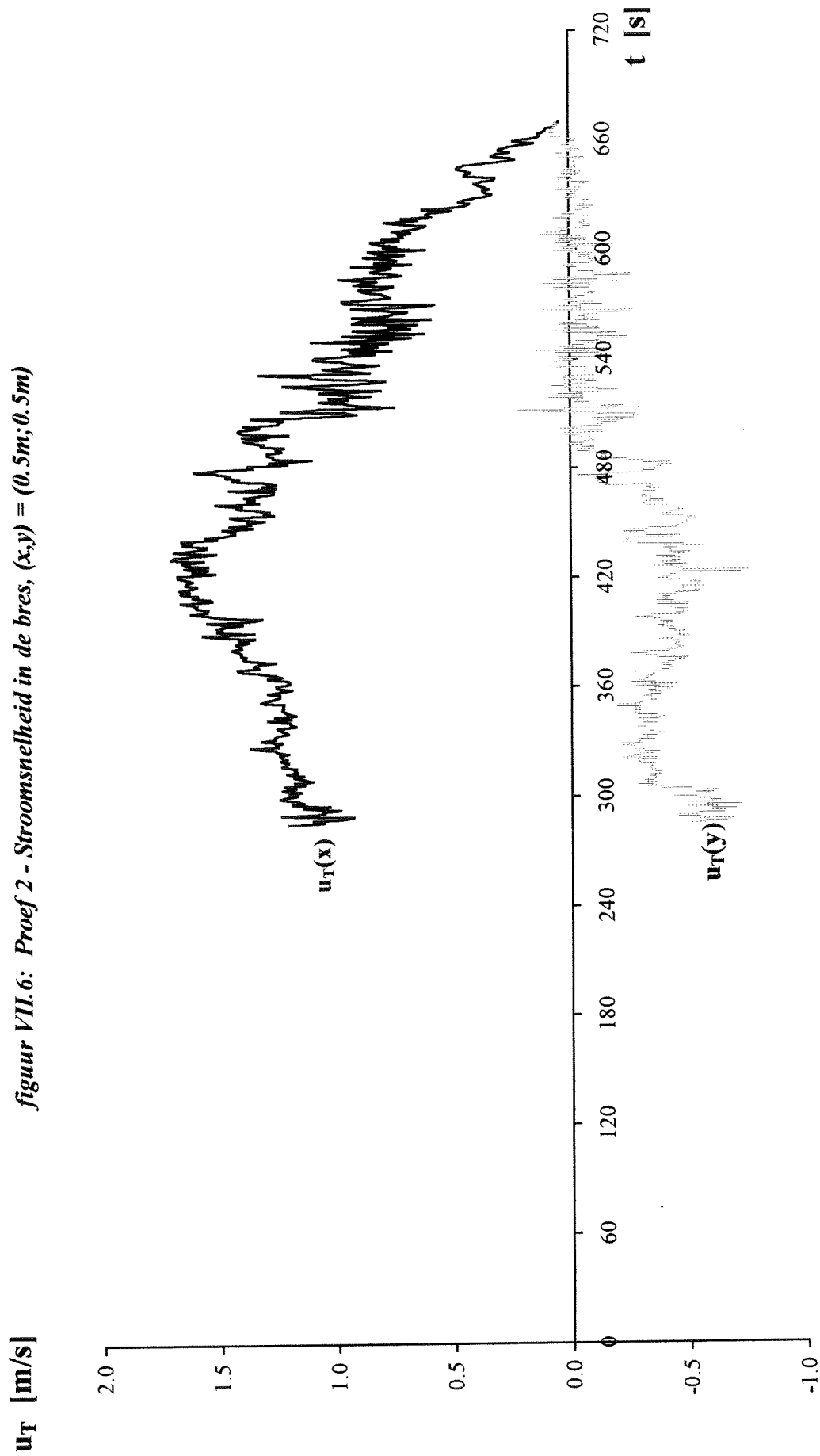
h_{kom} [m]*figuur VII.3: Proef 2 - Benedenstroomse waterstand*

$u_{w,1}$ [m/s]

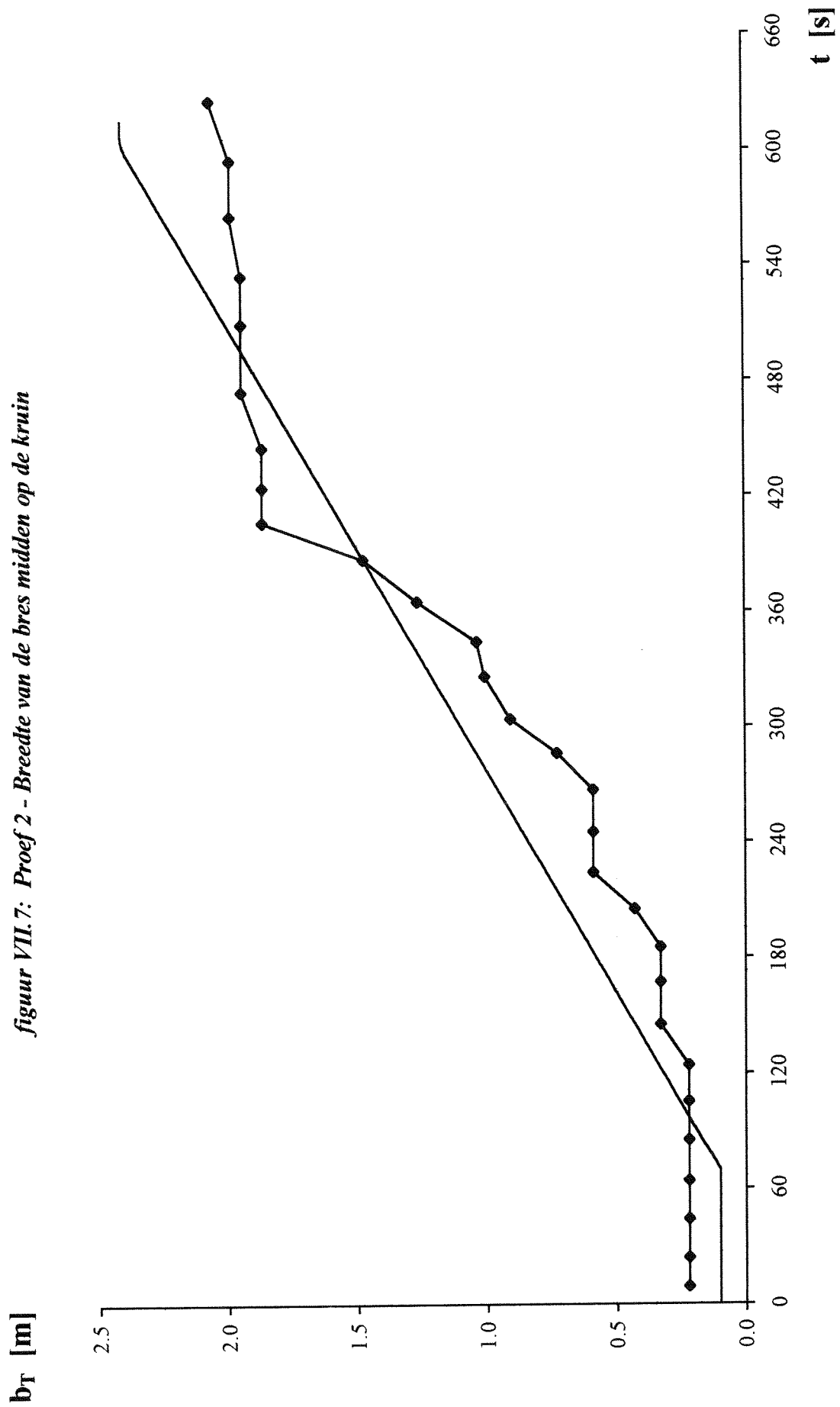
figuur VII.4: Proef 2 - Stroomsnelheid in $(x,y) = (-6.6m; 1.0m)$



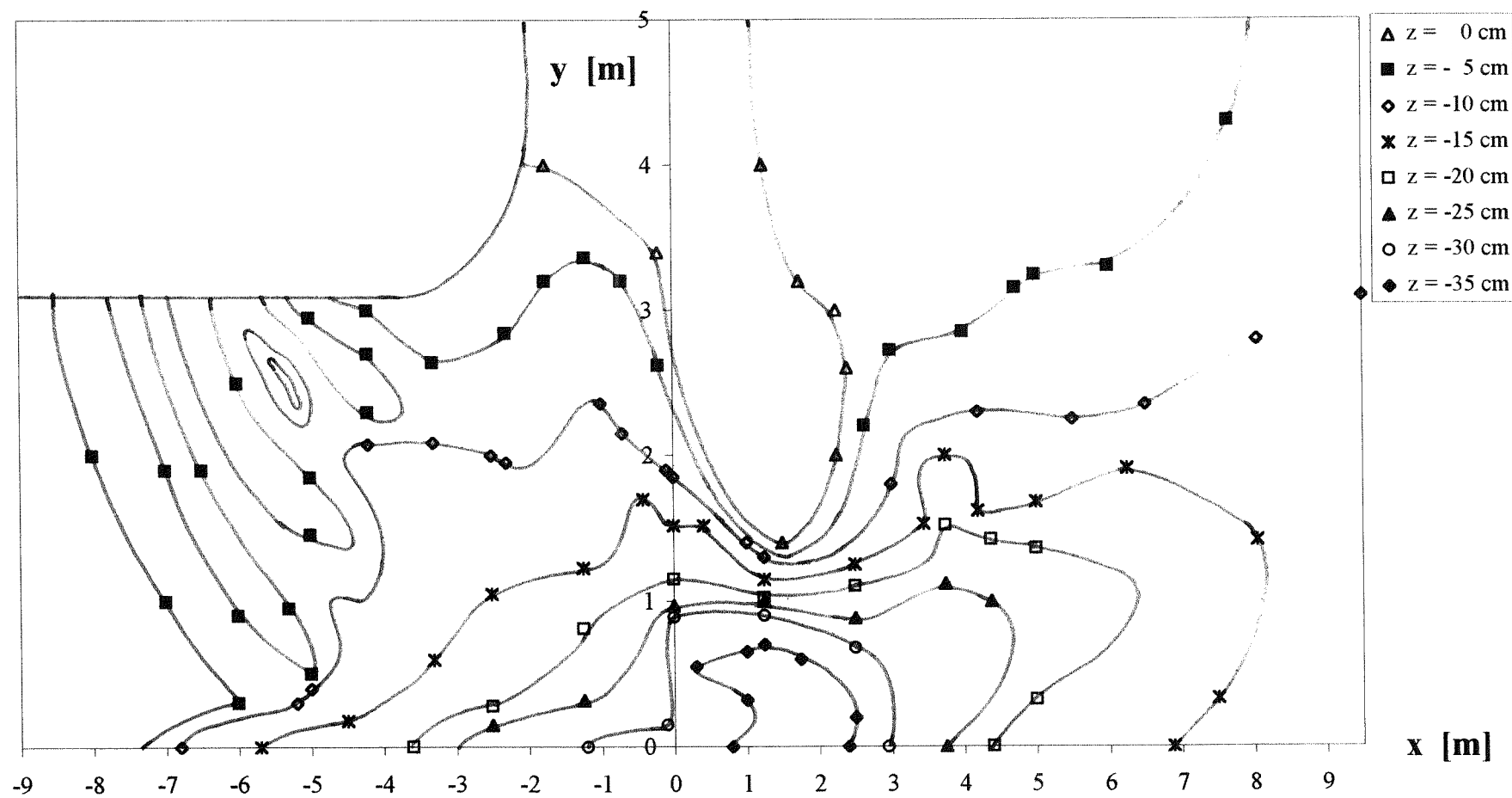
$u_{w,2}$ [m/s]figuur VII.5: Proef 2 - Stroomsnelheid in $(x,y) = (-4.4m; 1.05m)$ 



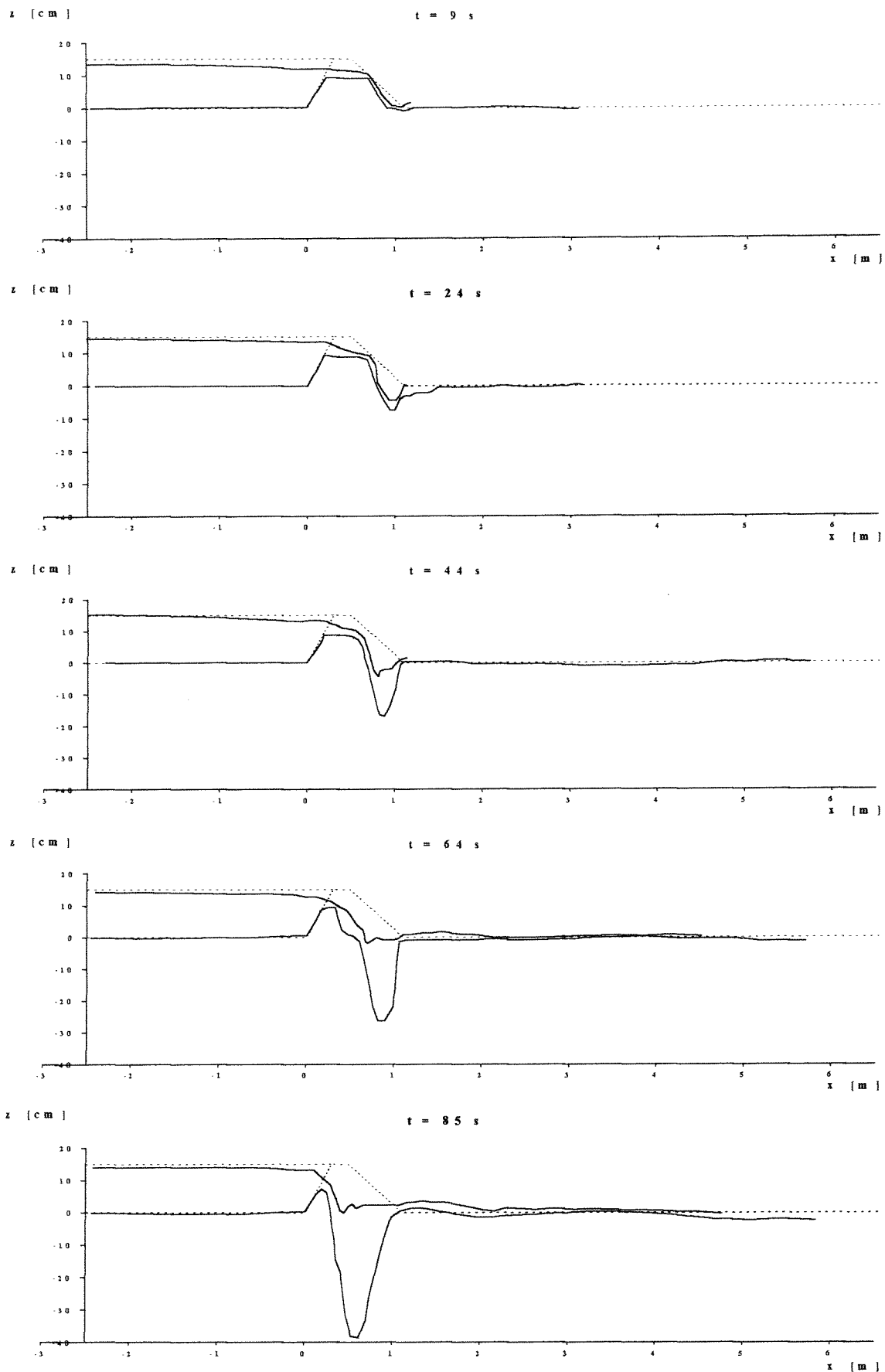
figuur VII.7: Proef 2 - Breedte van de bres midden op de kruin

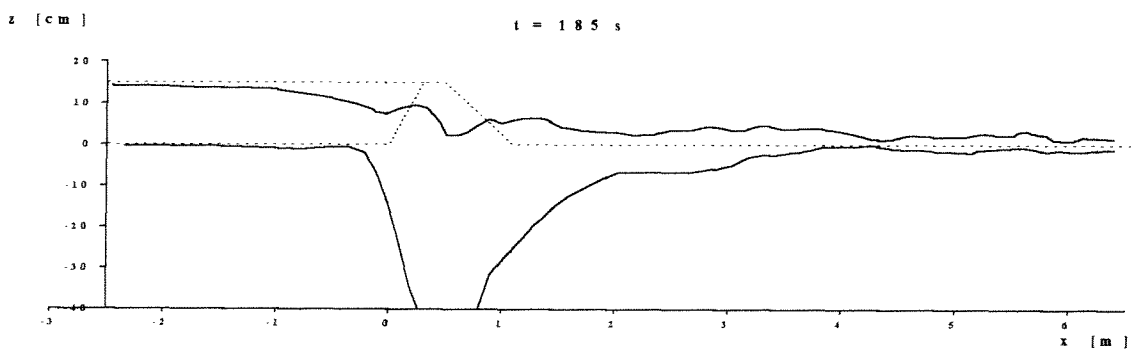
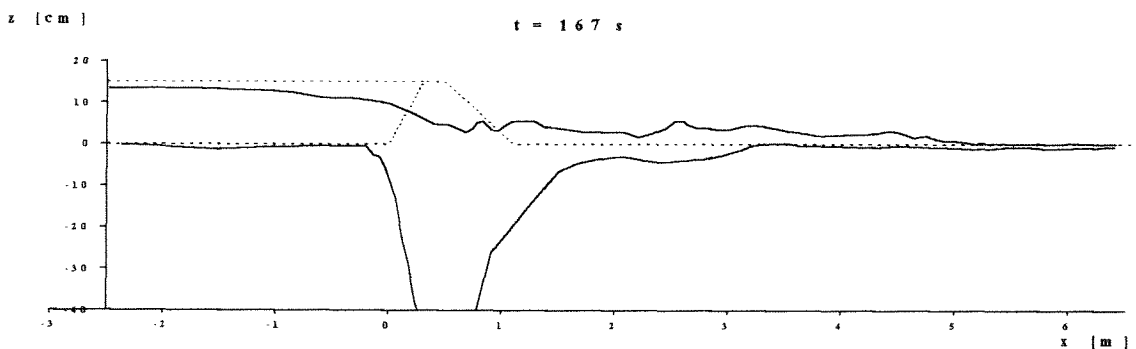
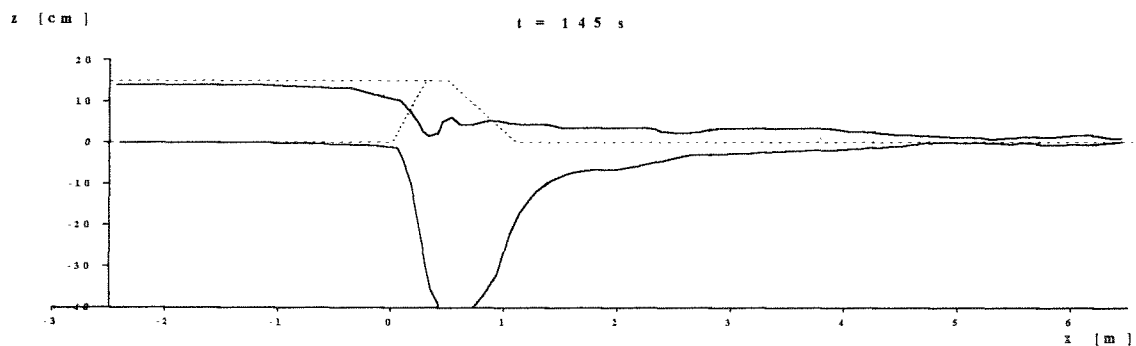
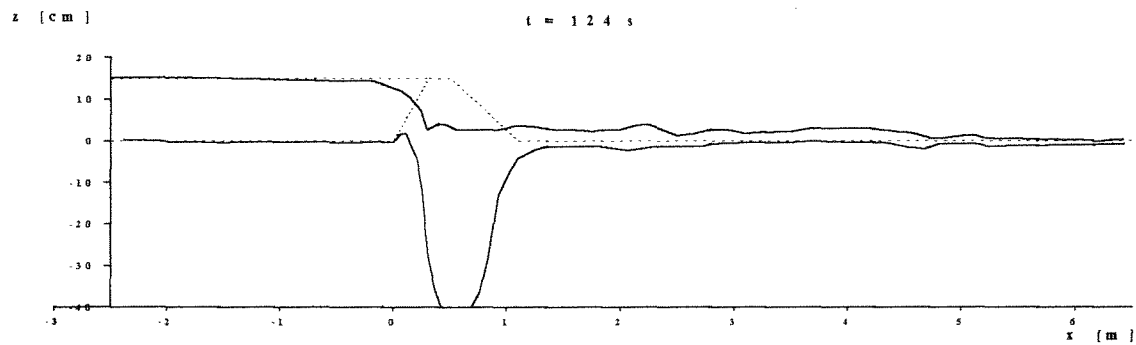
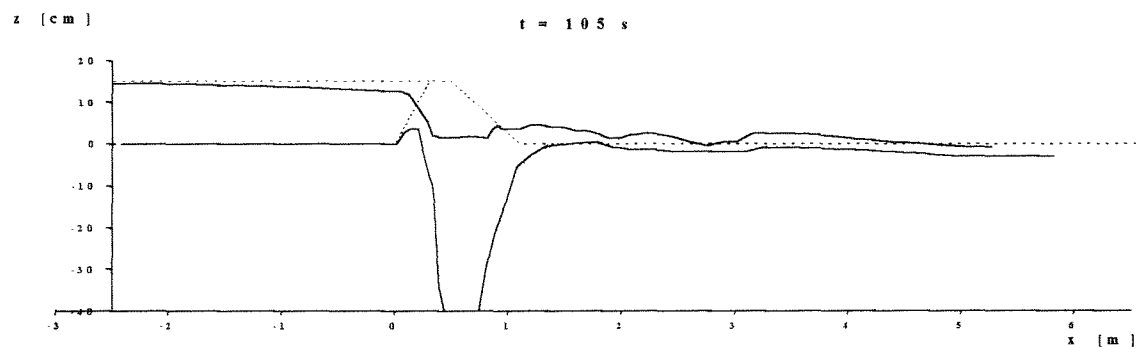


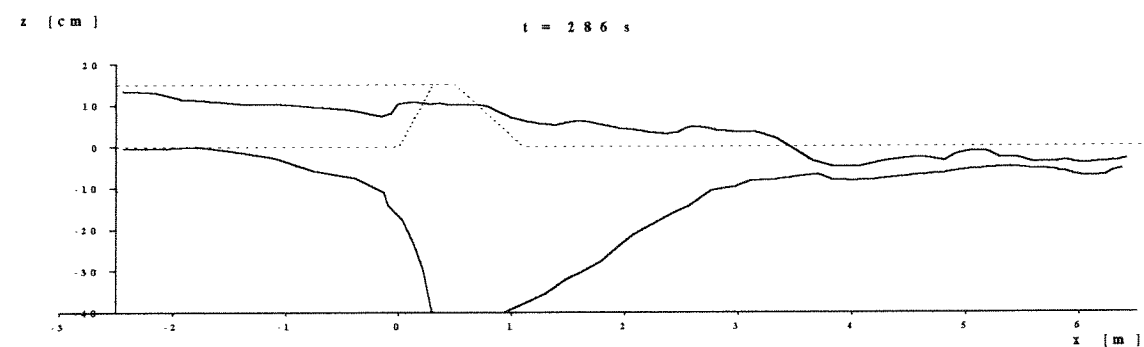
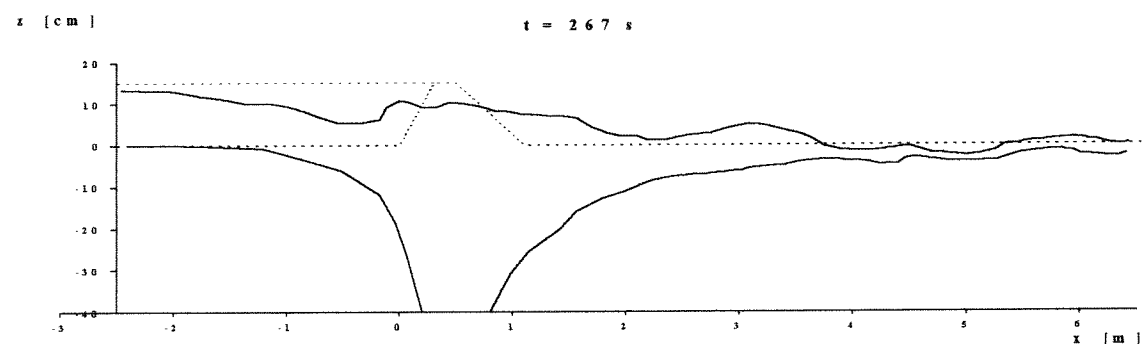
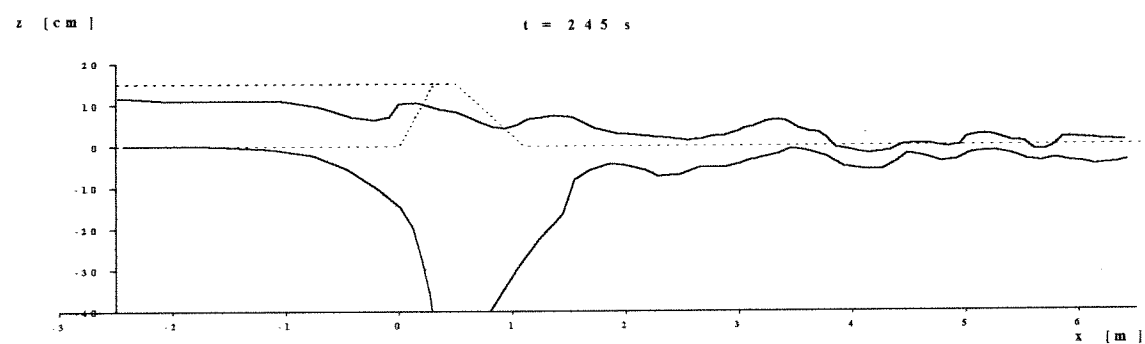
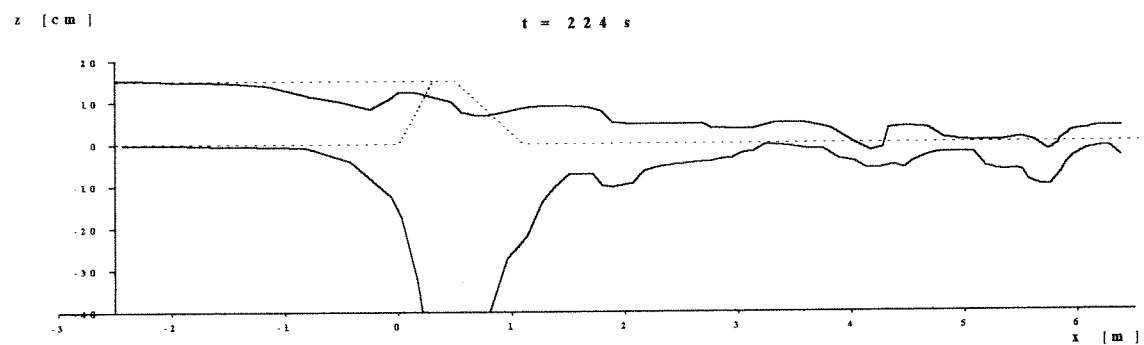
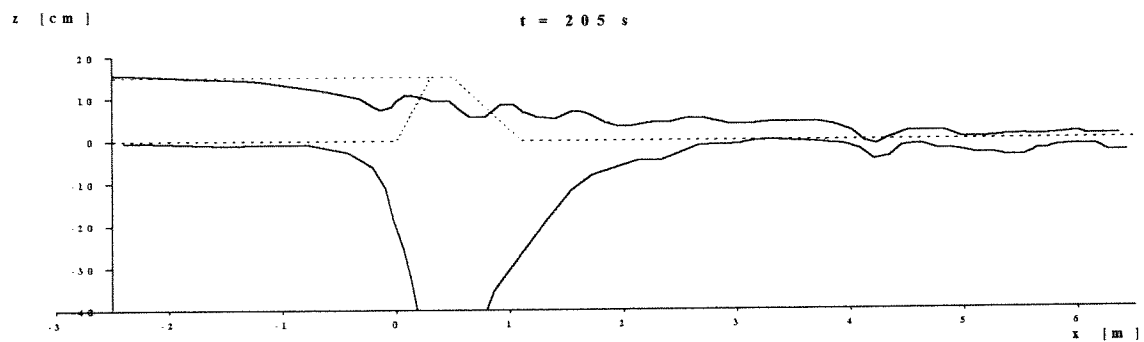
figuur VII.8: Proef 2 - Contourplot ontgrondingskuil in eindsituatie

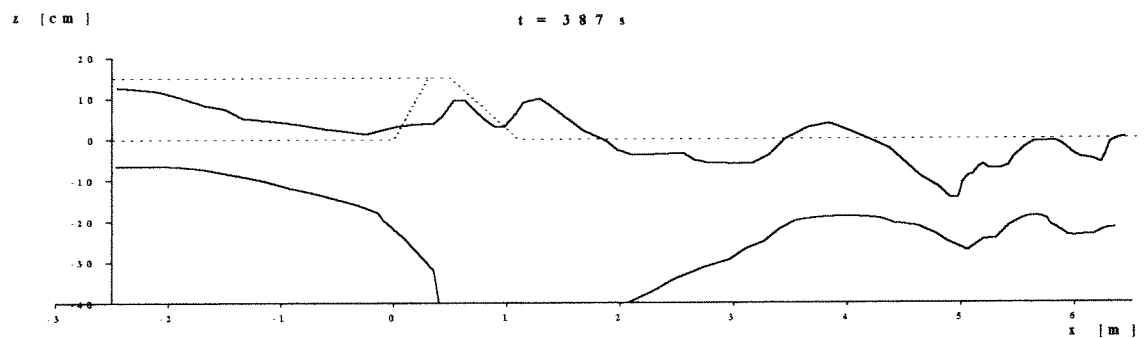
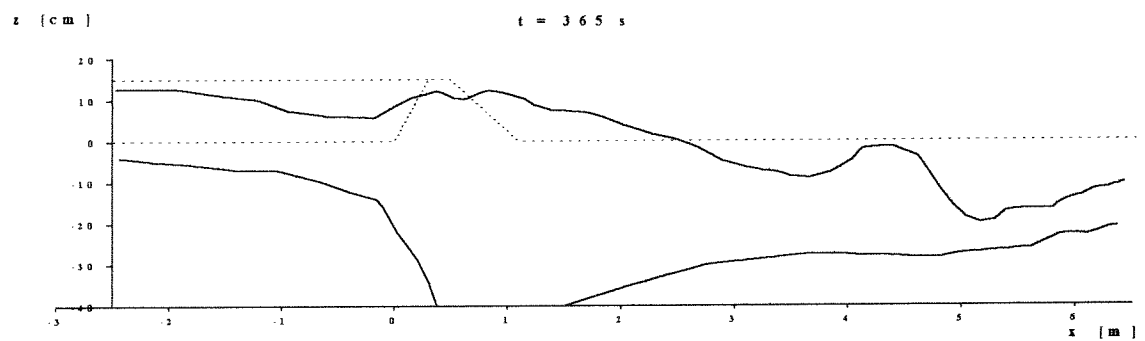
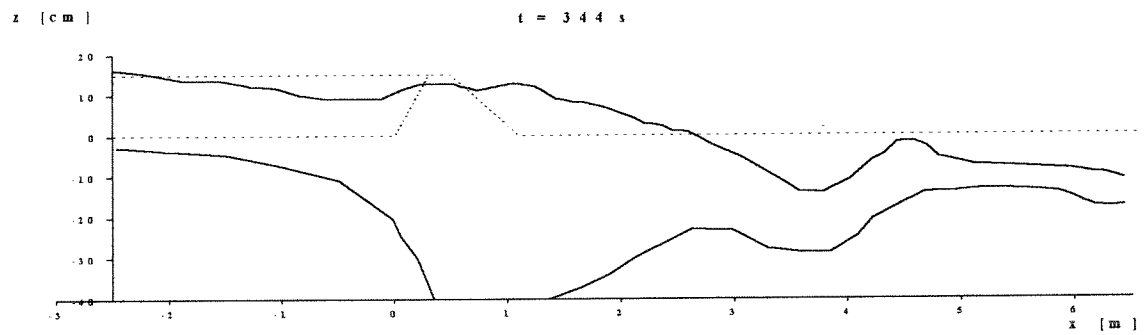
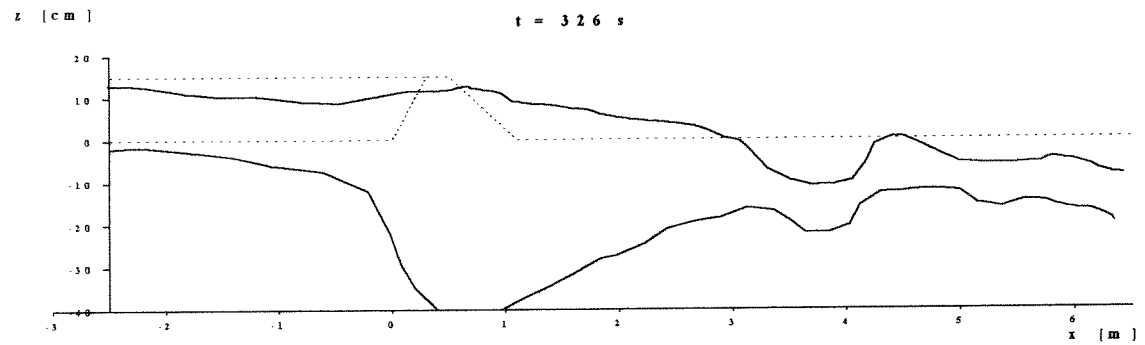
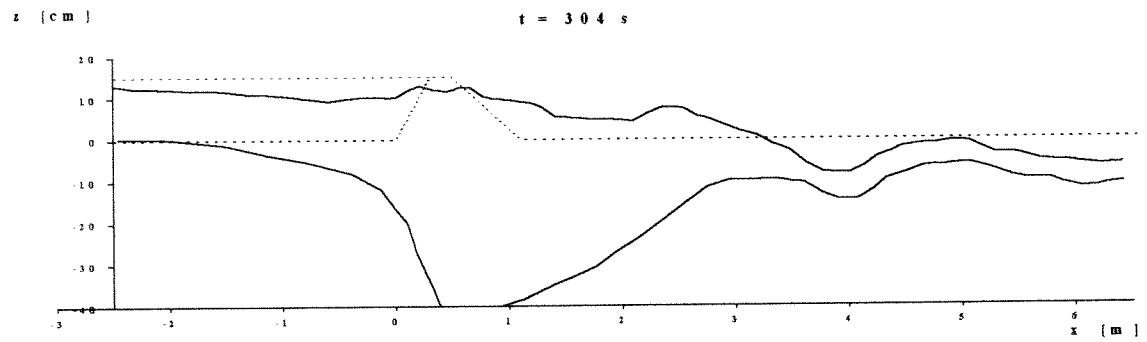


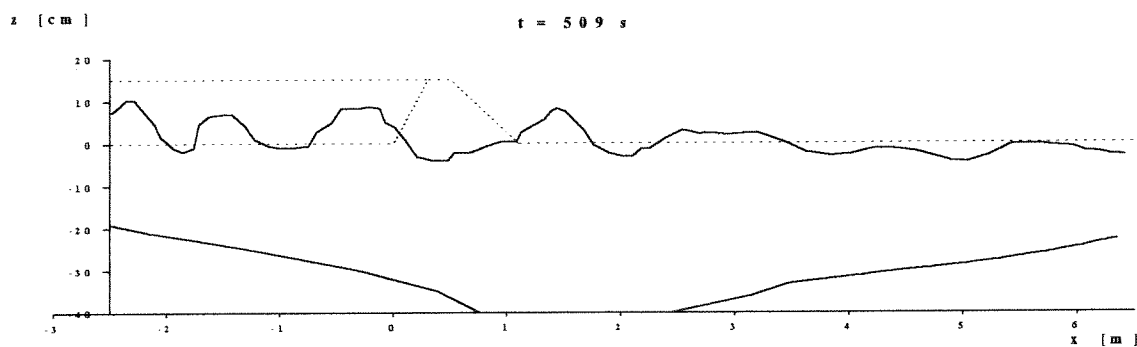
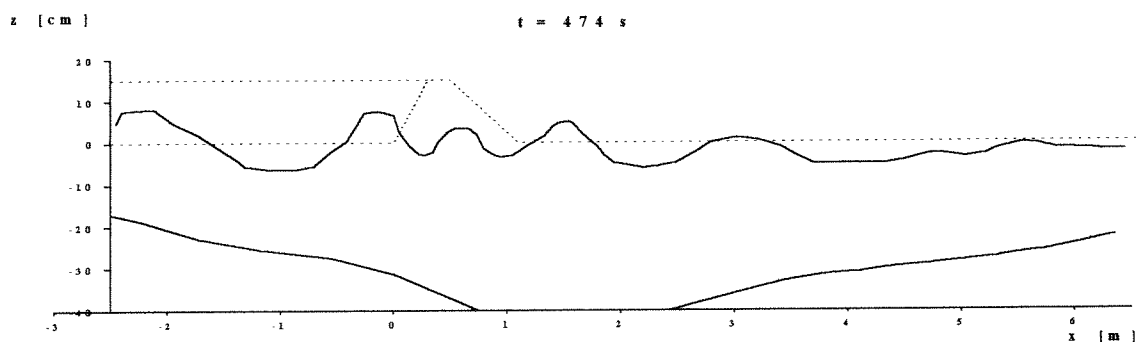
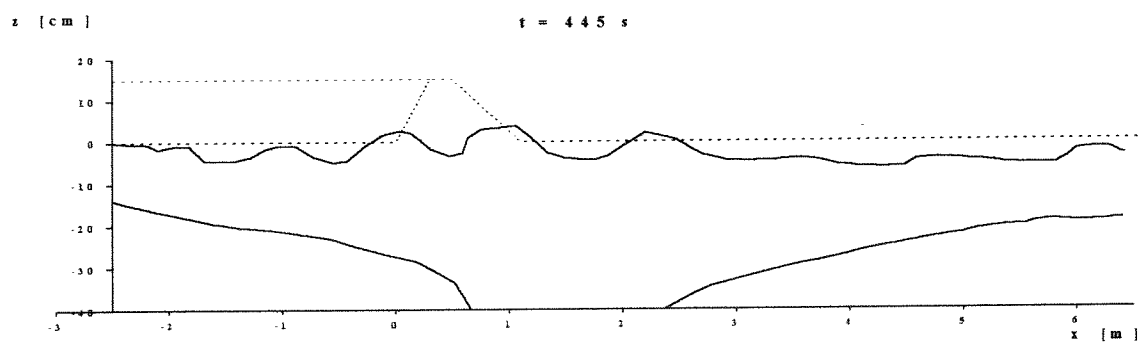
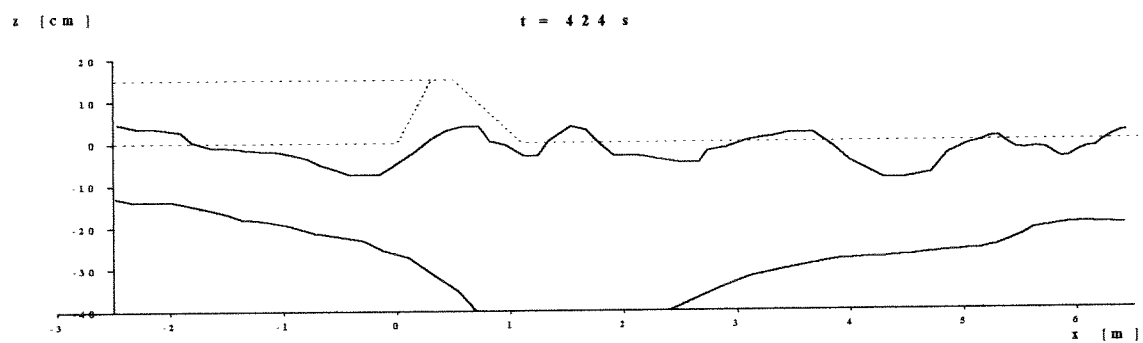
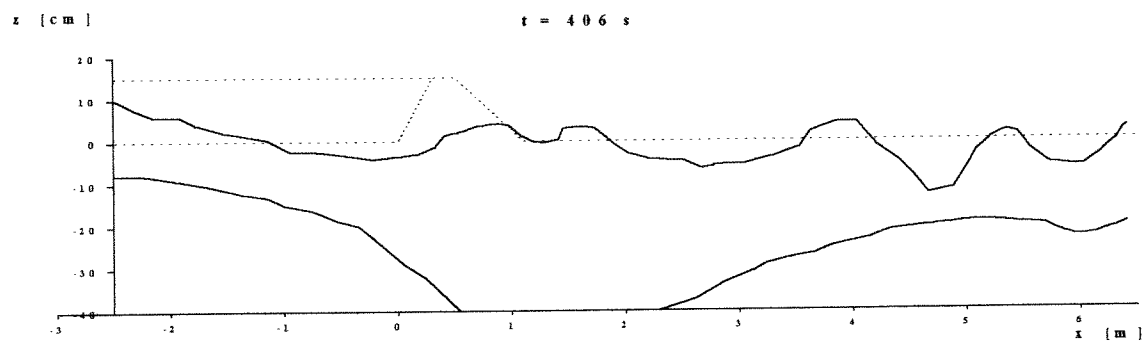
VII.2 Langsdoorsneden van de ontgrondingskuil

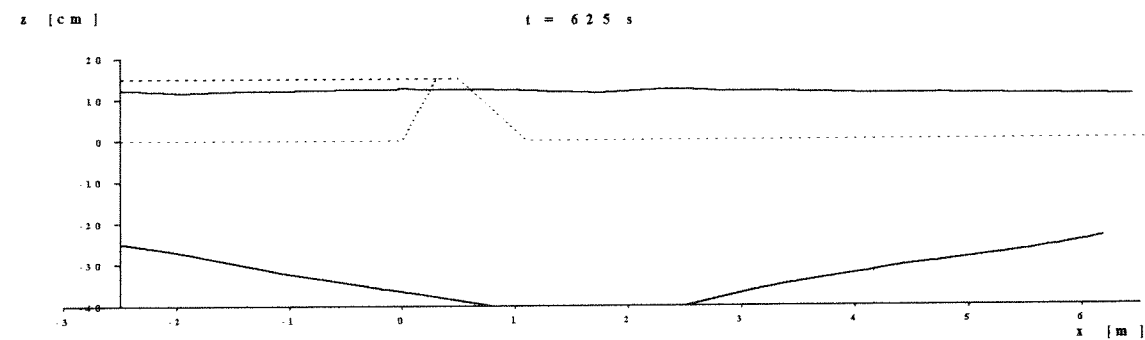
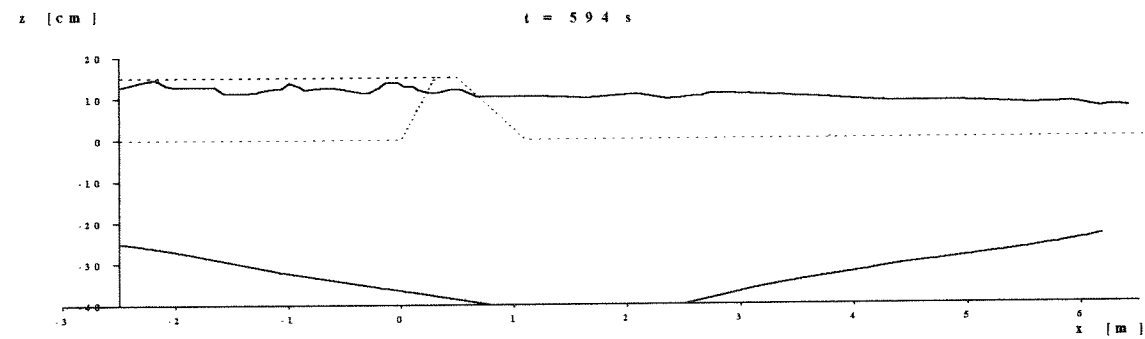
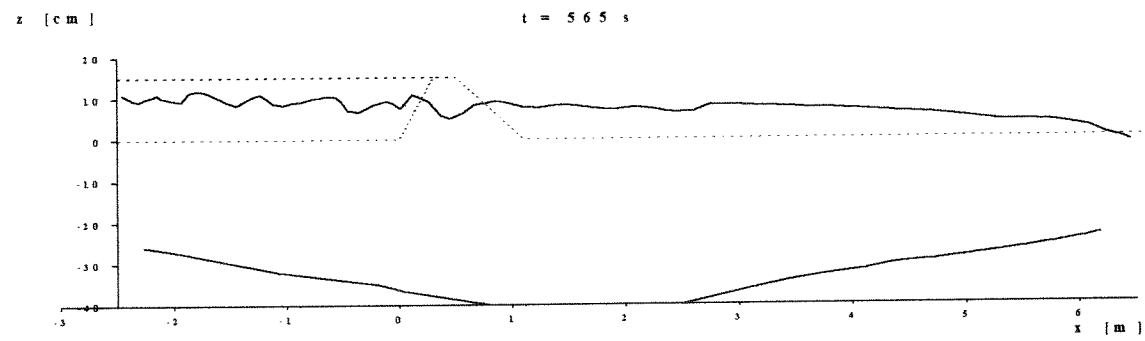
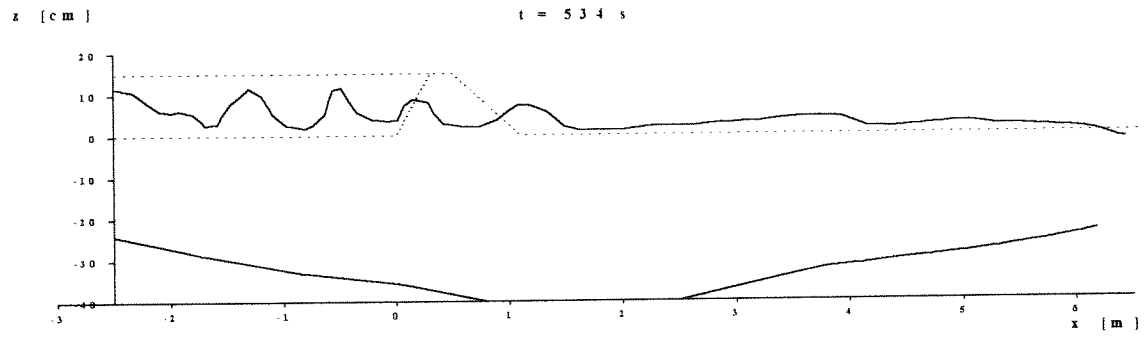












Bijlage VIII

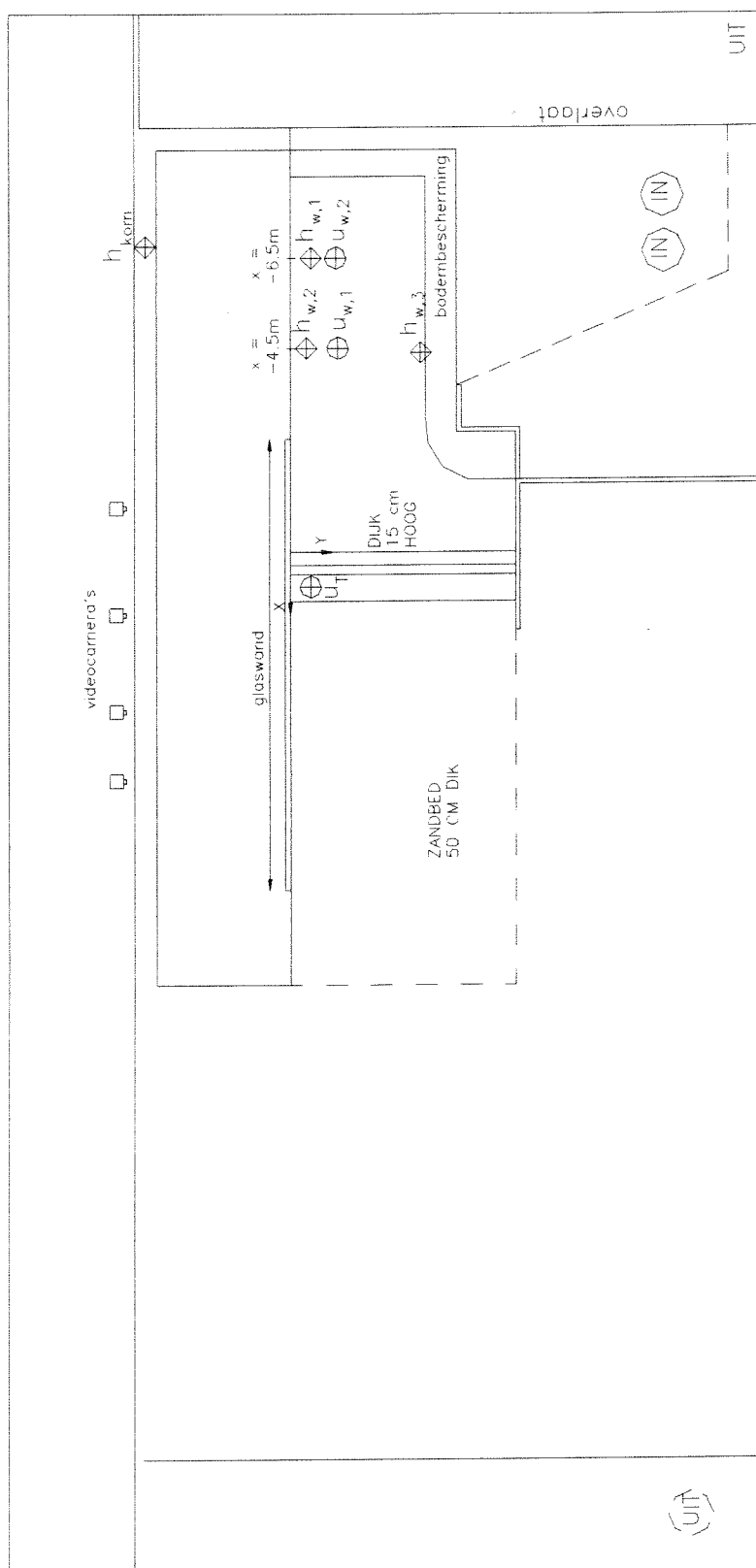
De resultaten van het derde experiment

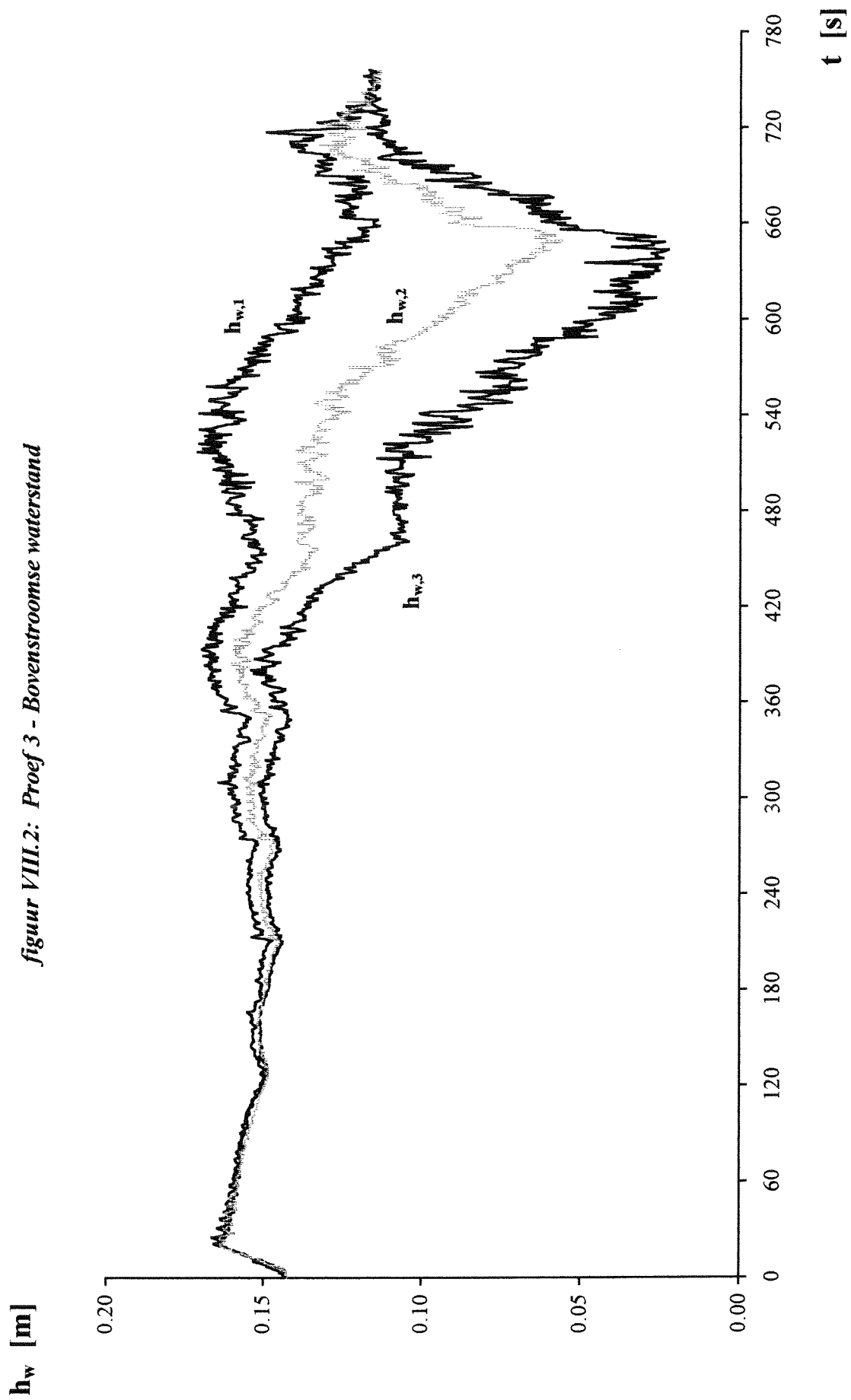
Bijlage VIII De resultaten van het derde experiment

In deze bijlage worden de resultaten van het derde experiment gepresenteerd. De resultaten bestaan uit de grafieken van de meetgegevens (bijlage VIII.1) en de langsdoorsneden van de ontgrondingskuil die uit de bestudering van de videobeelden zijn geconstrueerd (bijlage VIII.2).

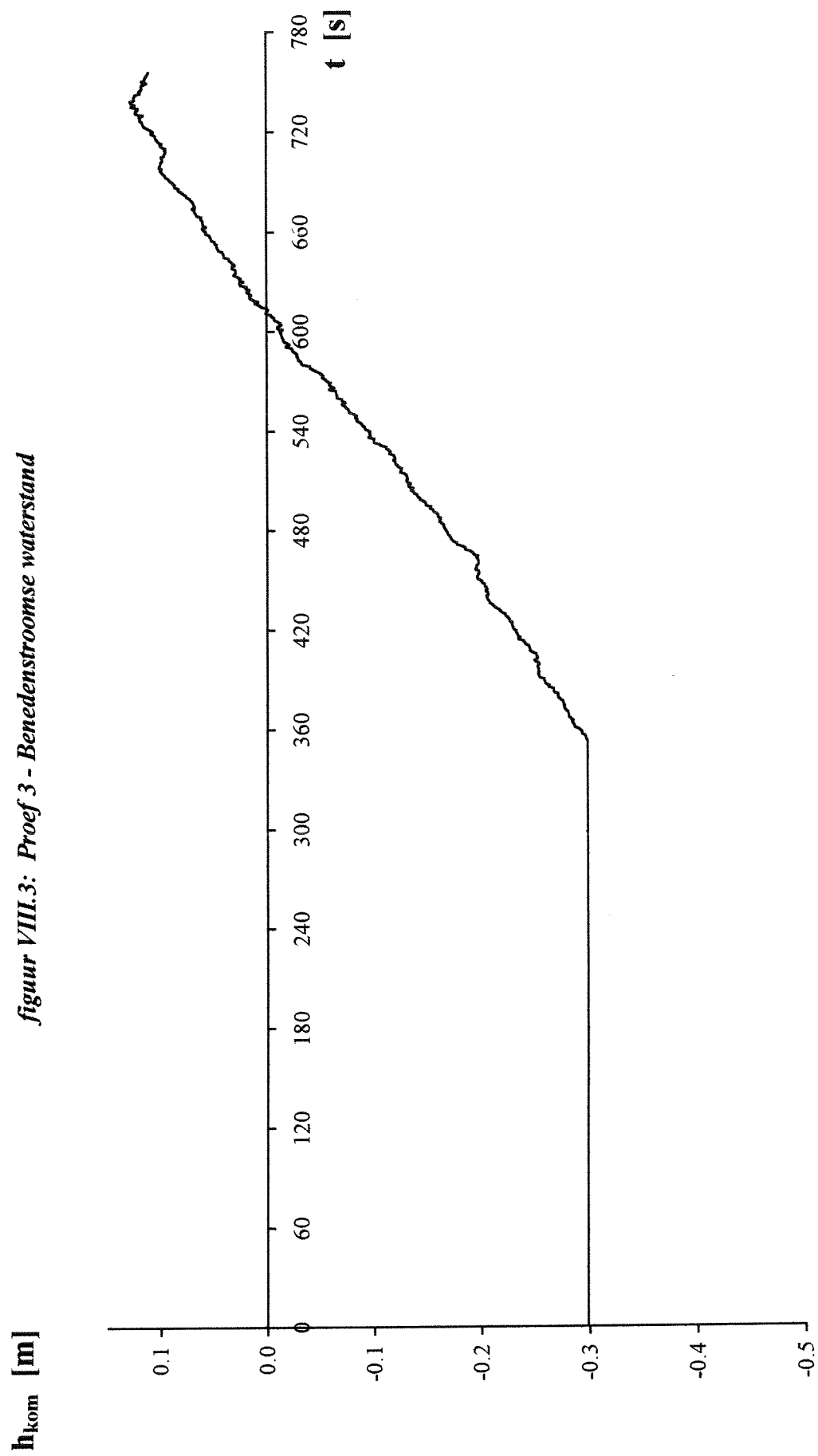
VIII.1 Meetresultaten

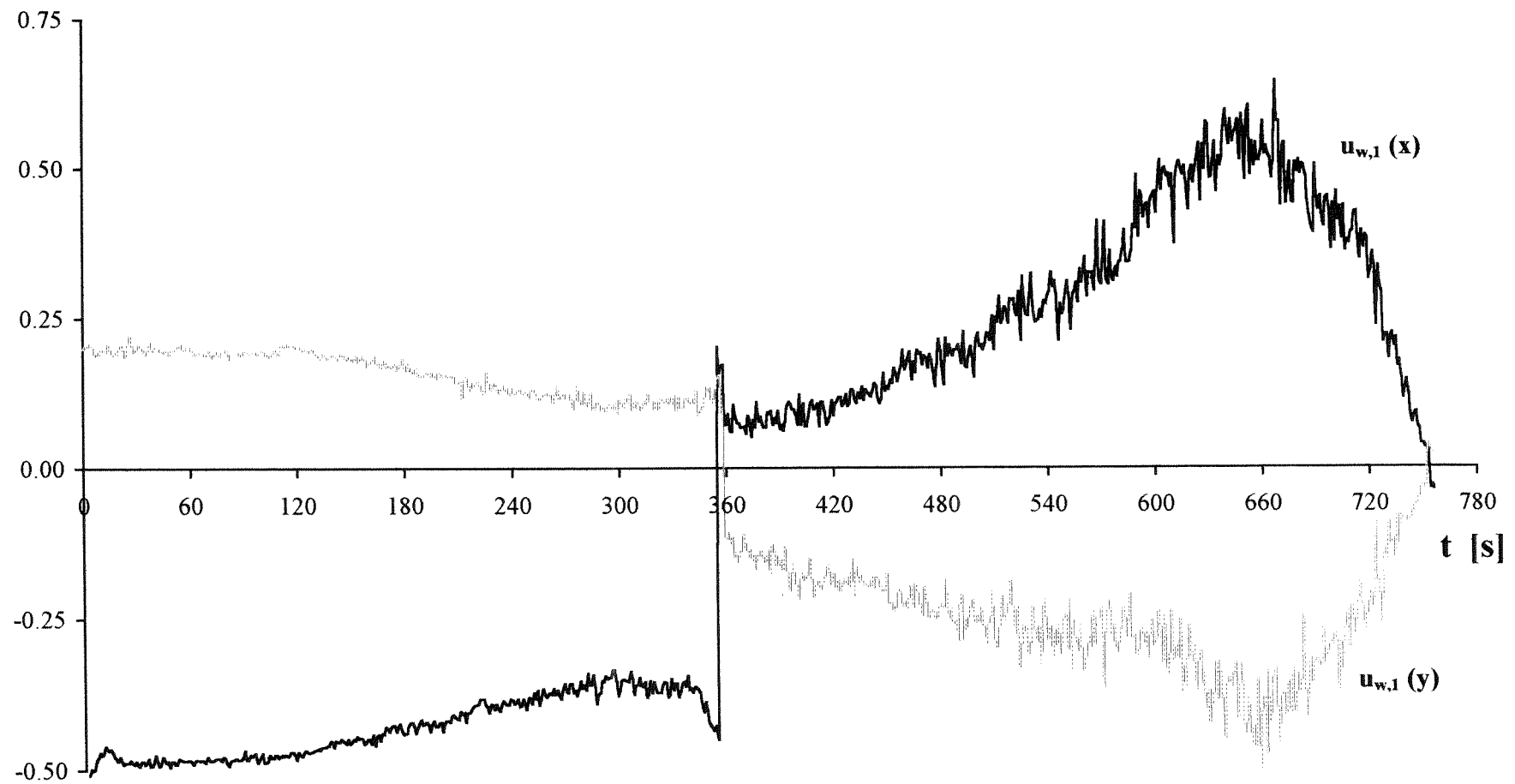
figuur VIII.1: Proef 3 - Meetopstelling

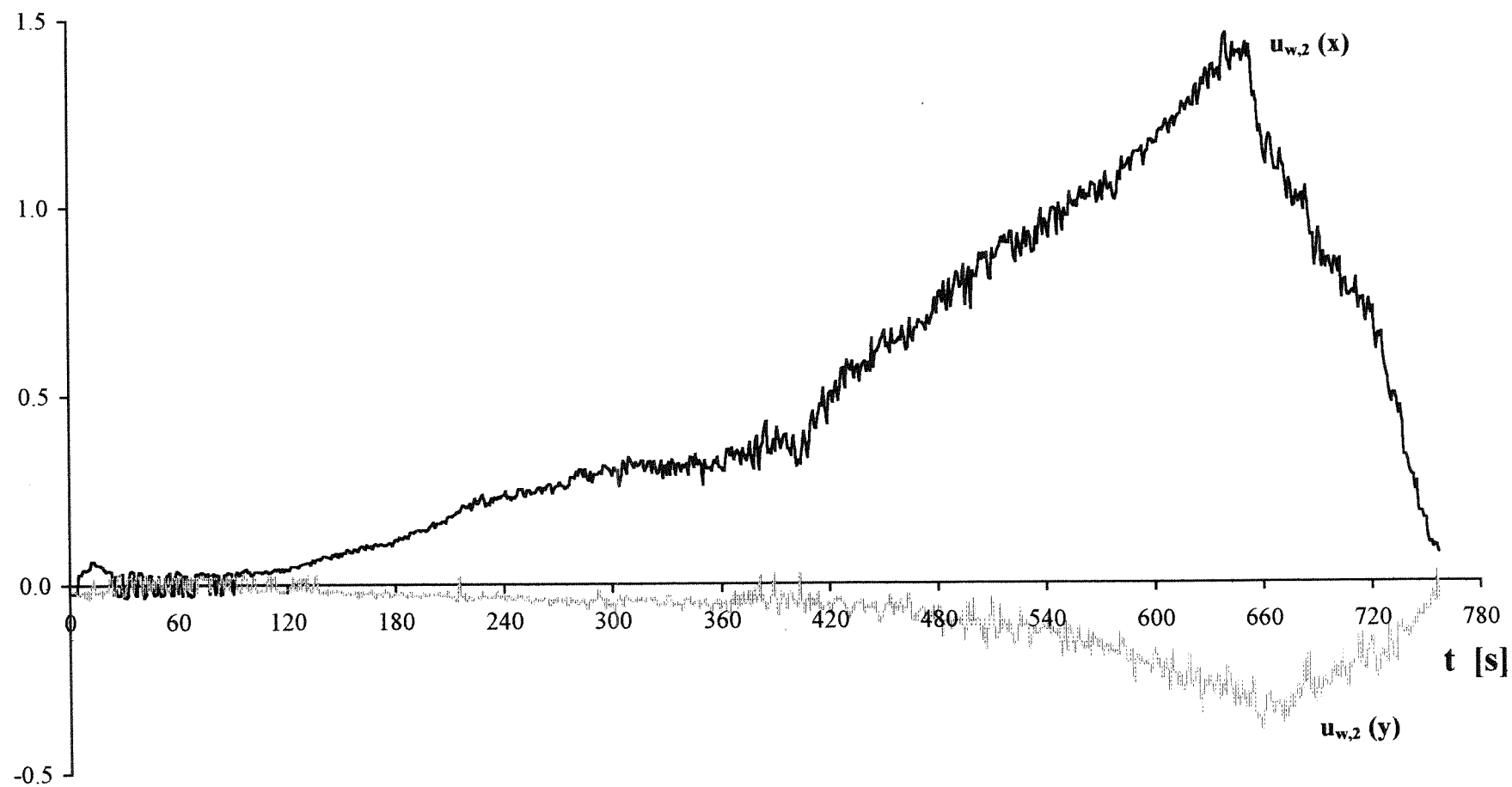


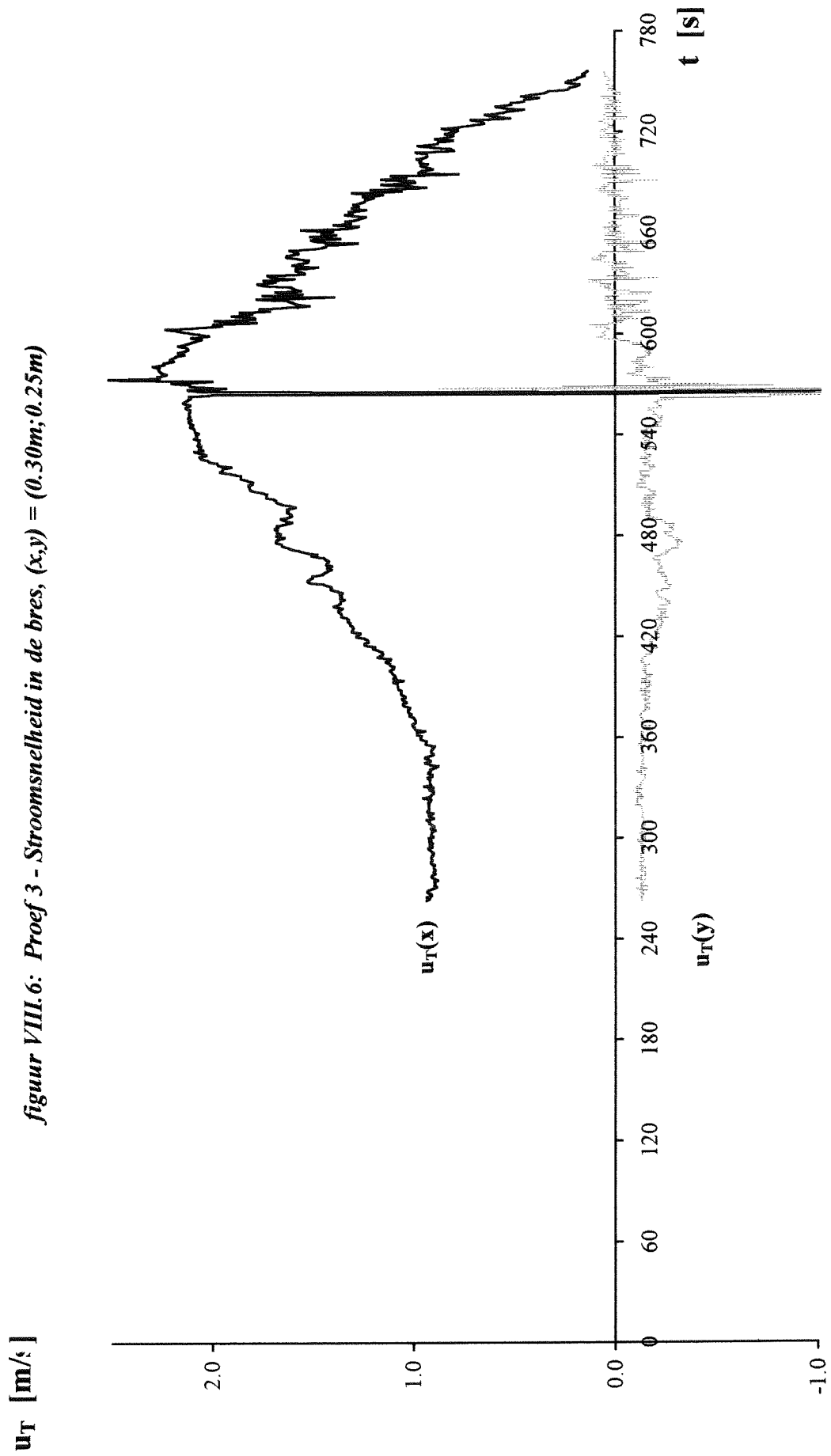


figuur VIII.3: Proef 3 - Benedenstroomse waterstand



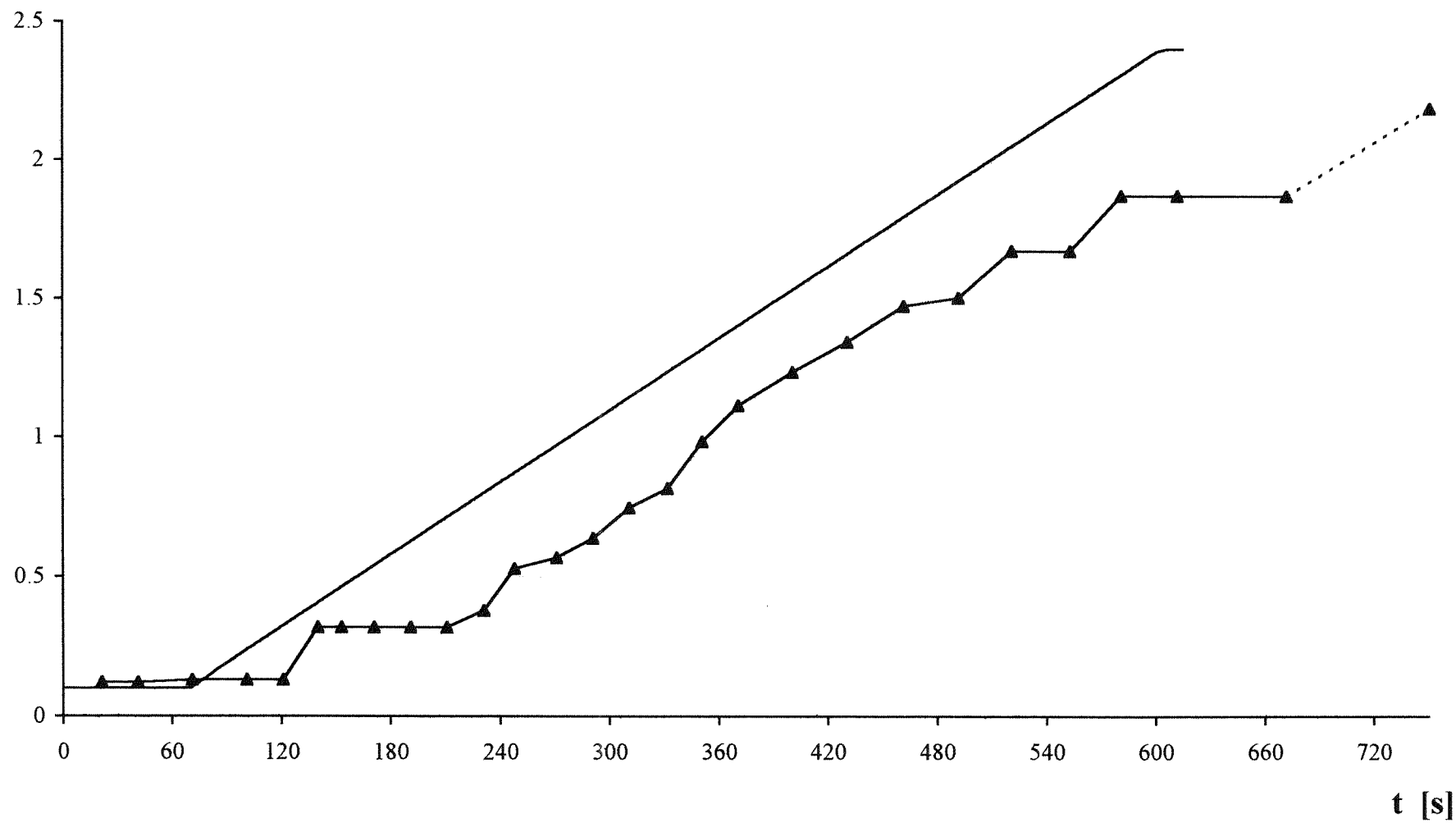
$u_{w,1}$ [m/s]*figuur VIII.4: Proef 3 - Stroomsnelheid in $(x,y) = (-6.5m; 1m)$* 

$u_{w,2}$ [m/s]*figuur VIII.5: Proef 3 - Stroomsnelheid in $(x,y) = (-4.5m; 1.05m)$* 

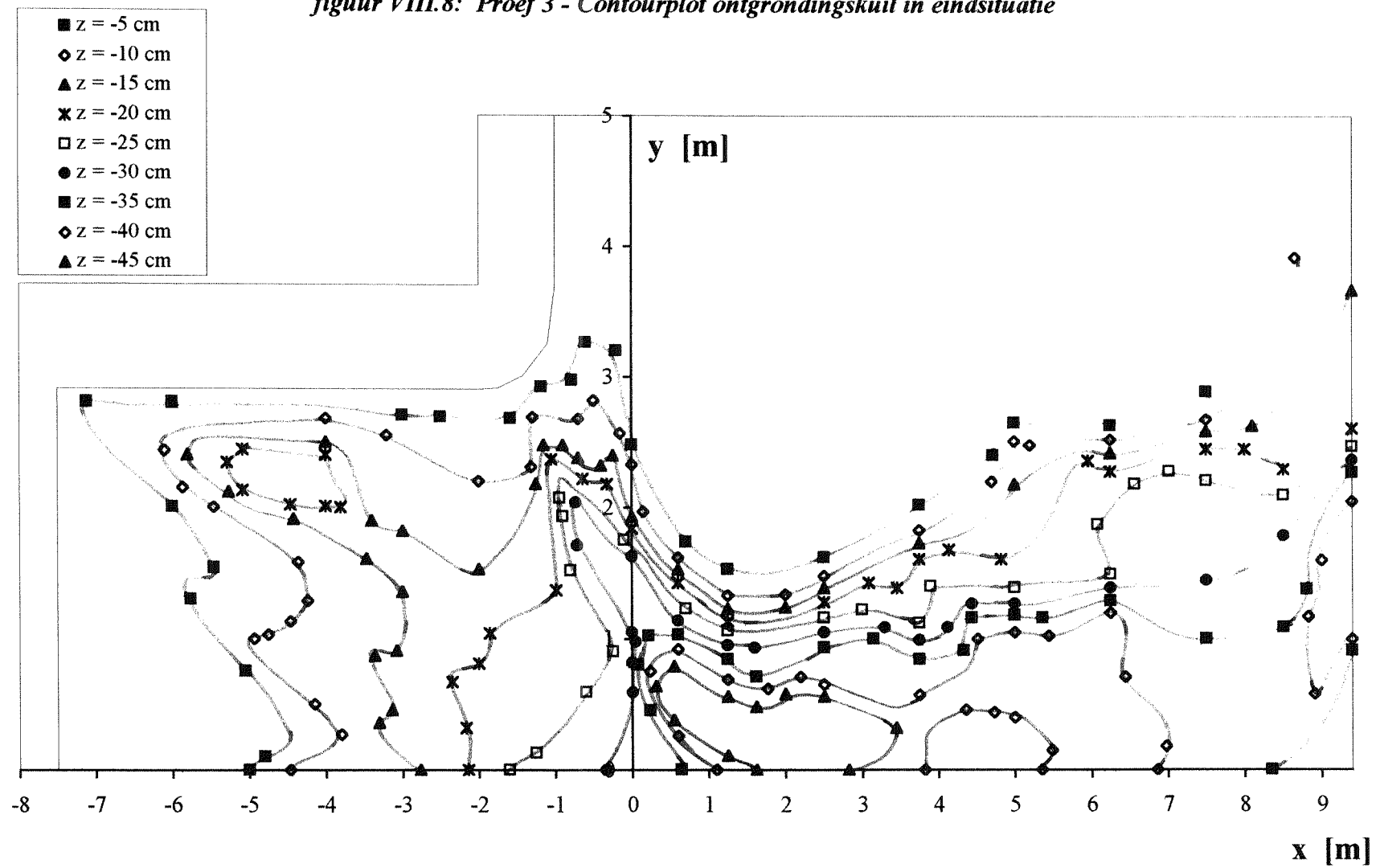


b_T [m]

figuur VIII.7: Proef 3 - Breedte van de bres midden op de kruin

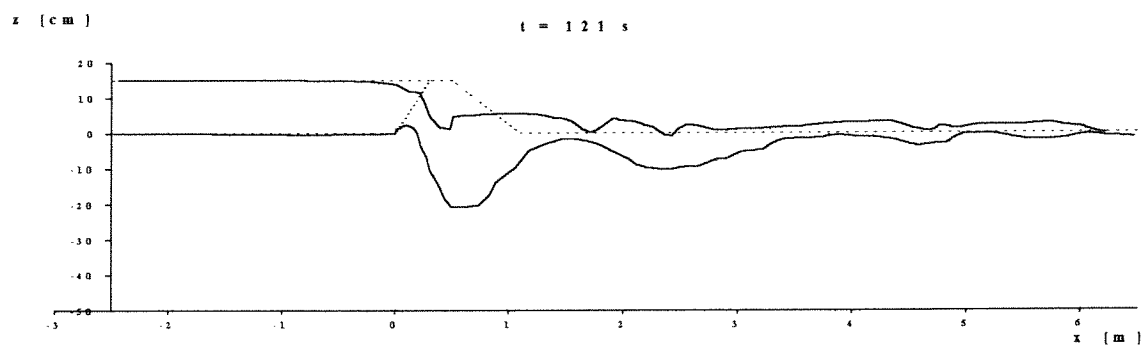
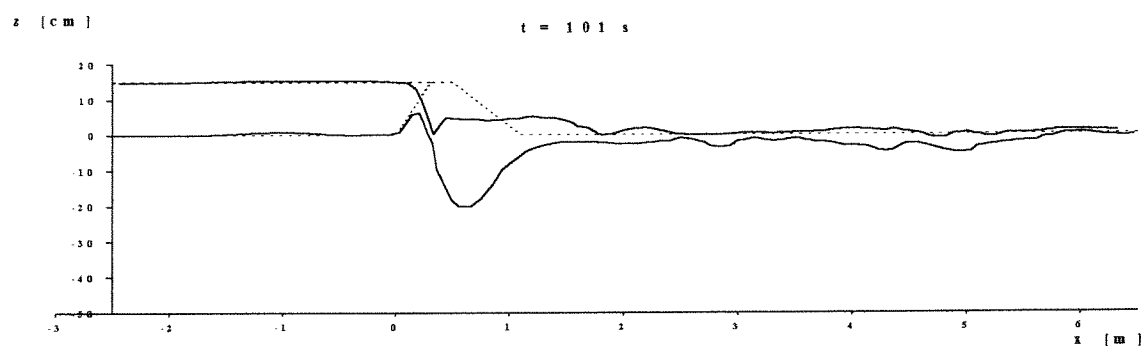
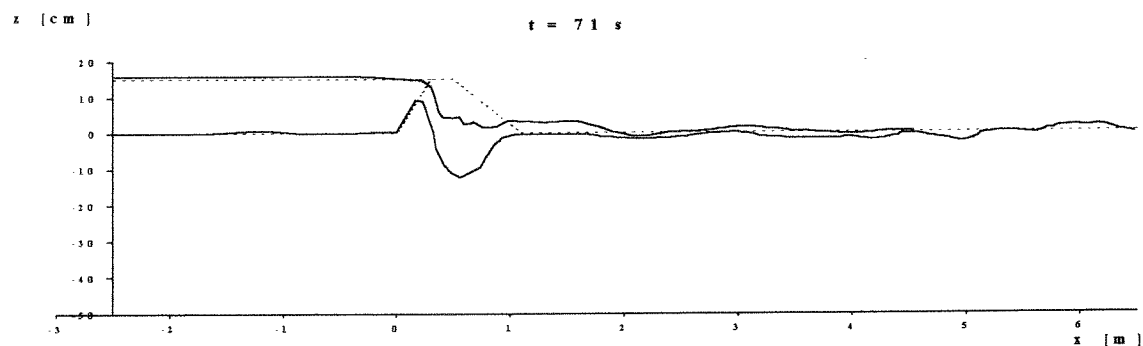
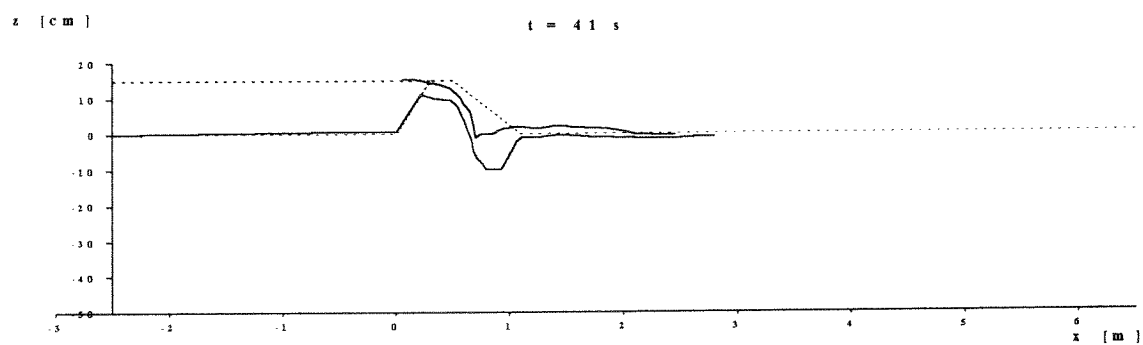
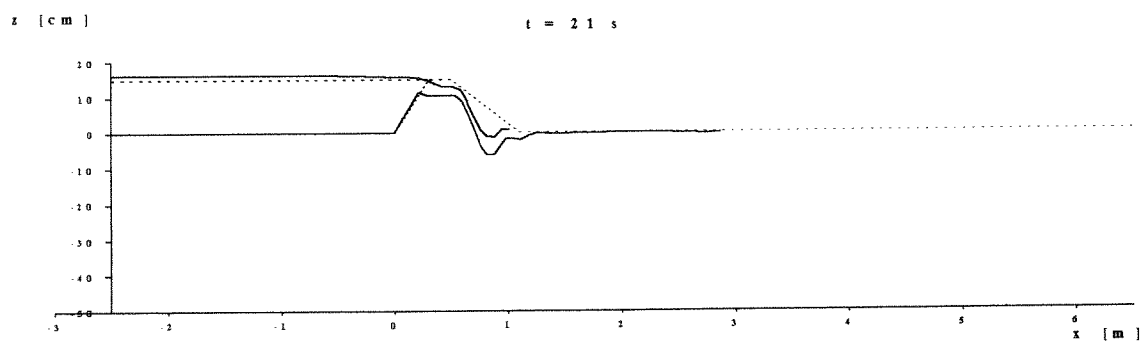


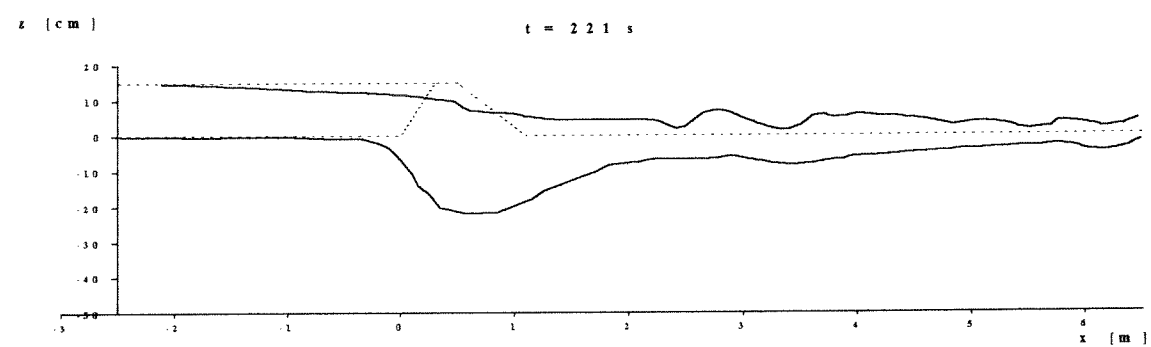
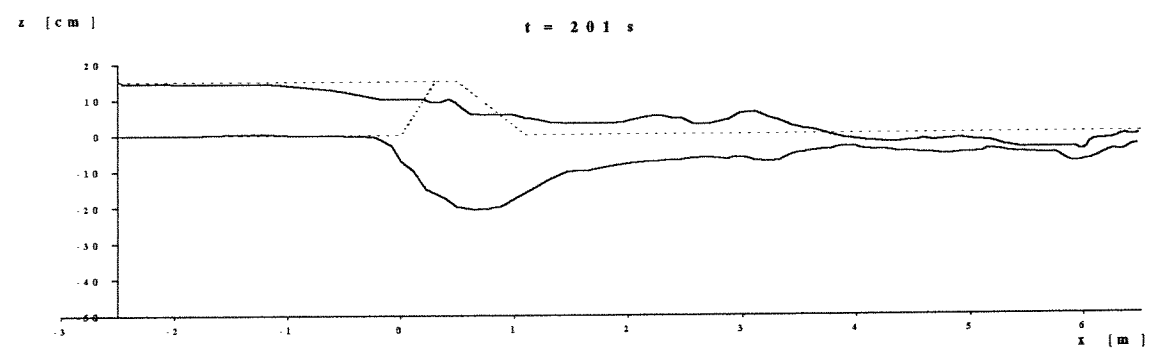
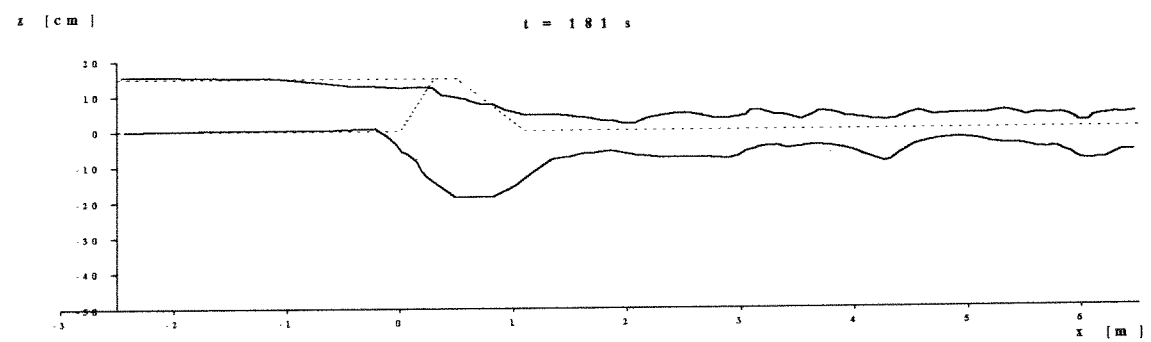
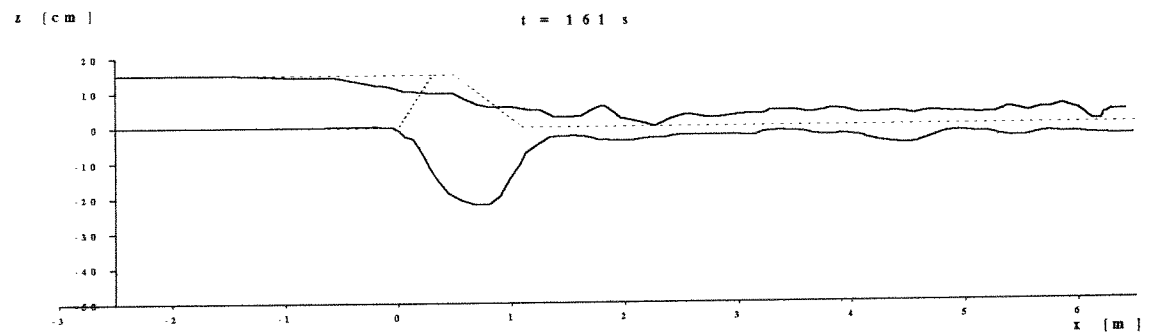
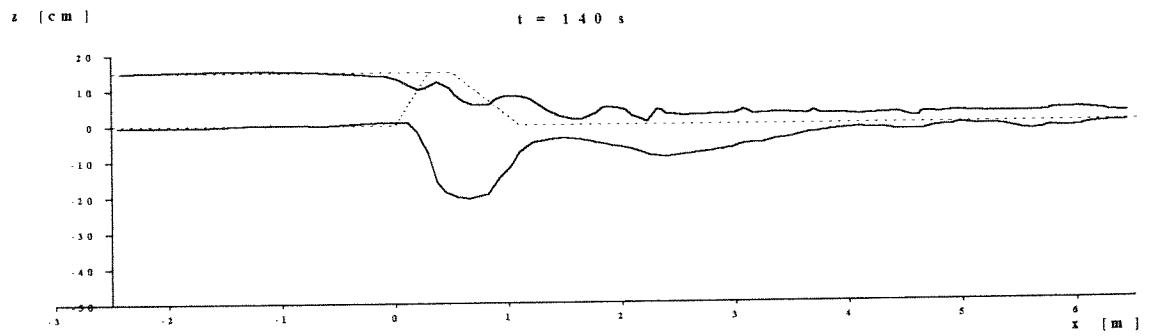
figuur VIII.8: Proef 3 - Contourplot ontgrondingskuil in eindsituatie

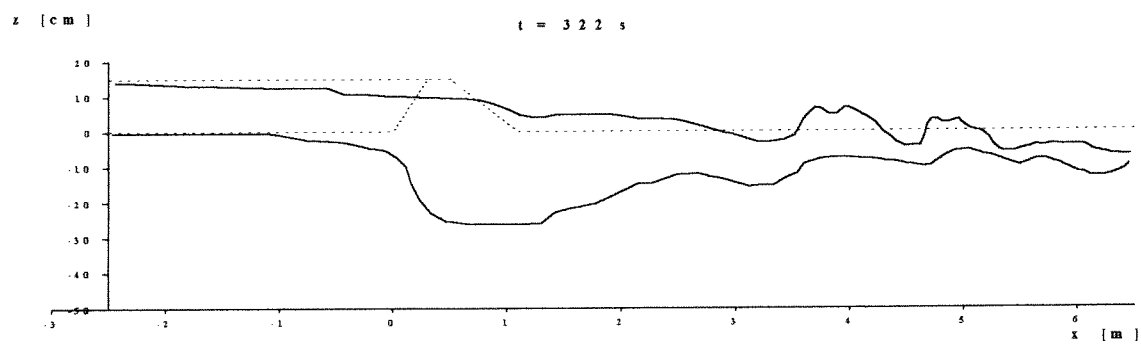
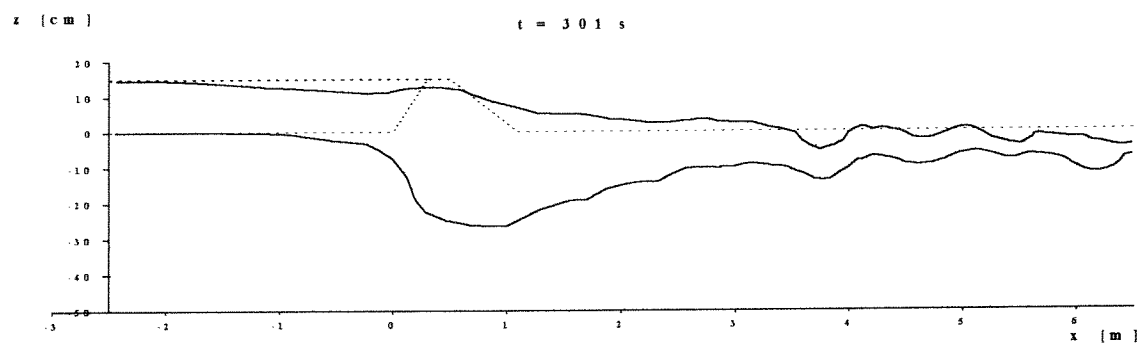
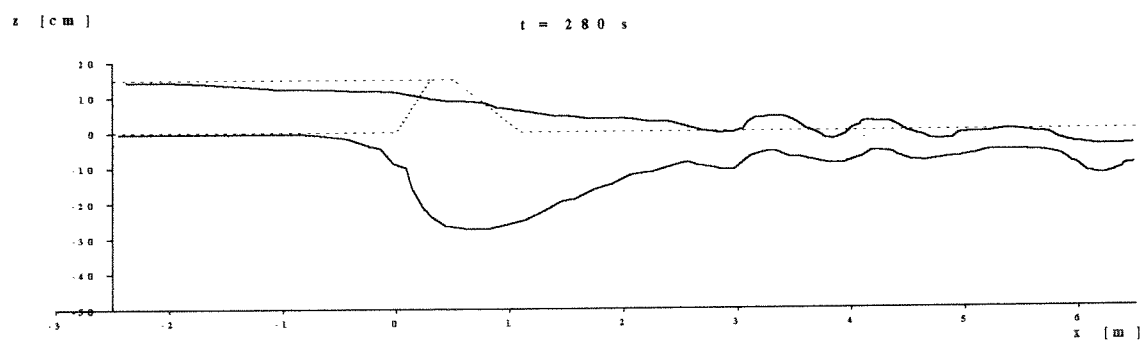
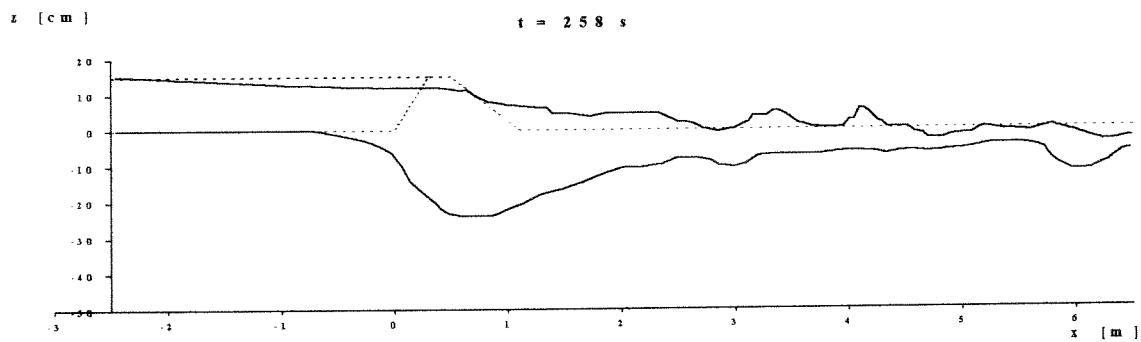
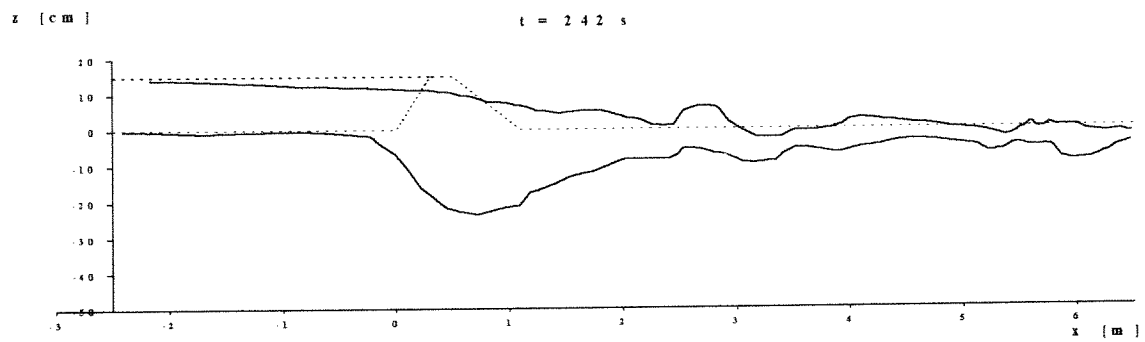


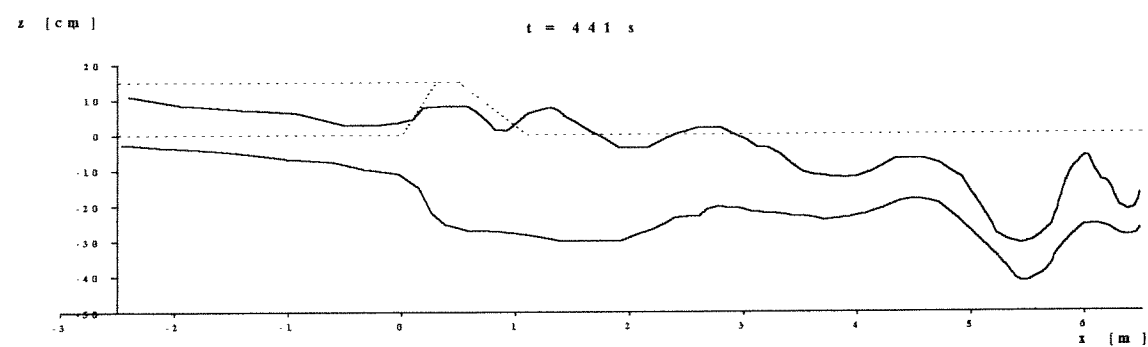
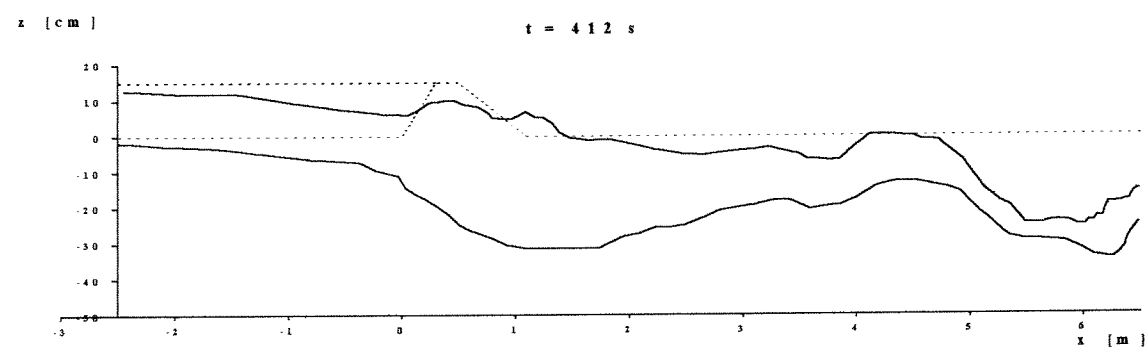
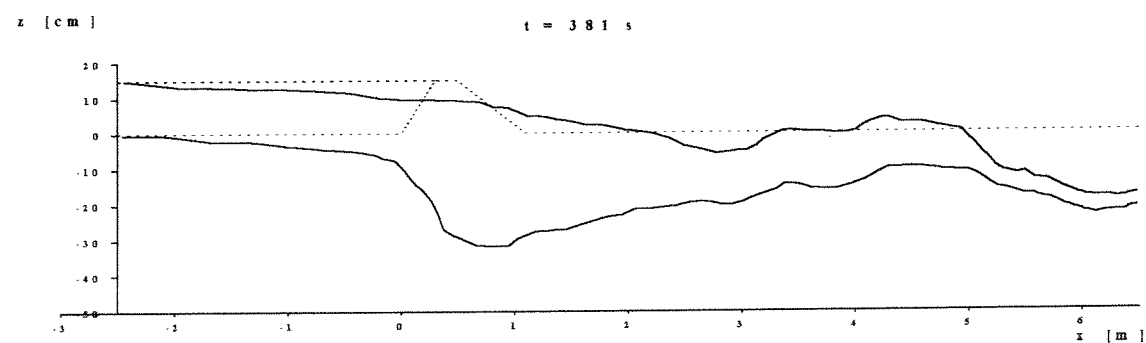
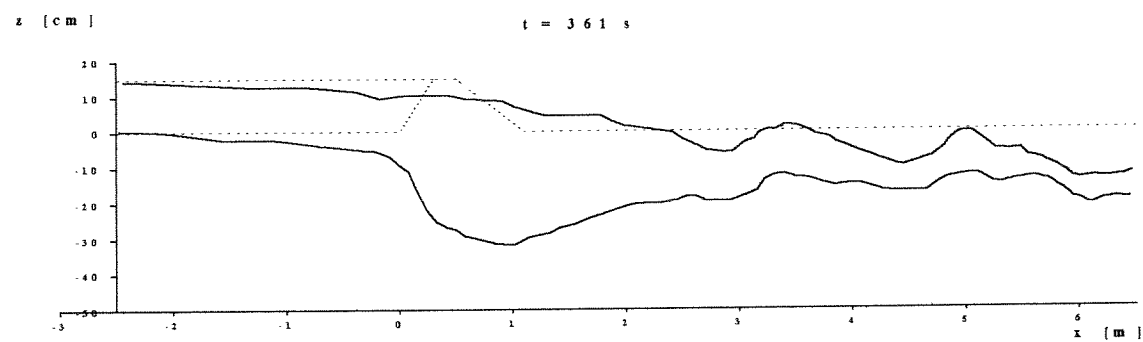
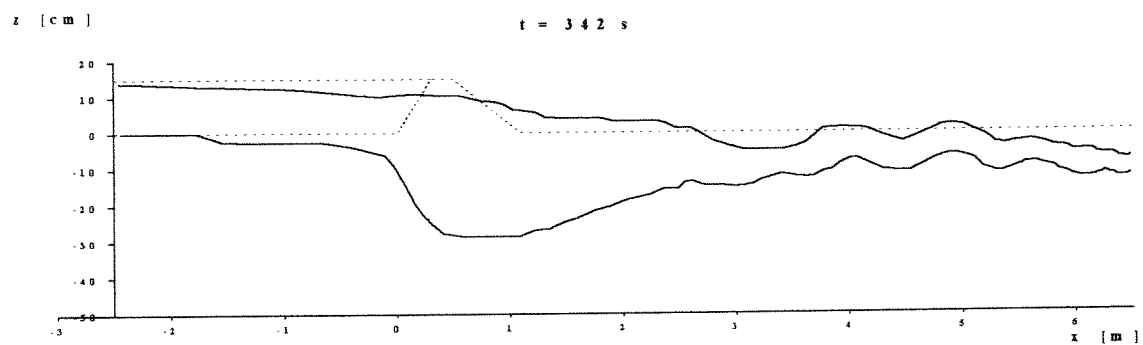
VIII.2

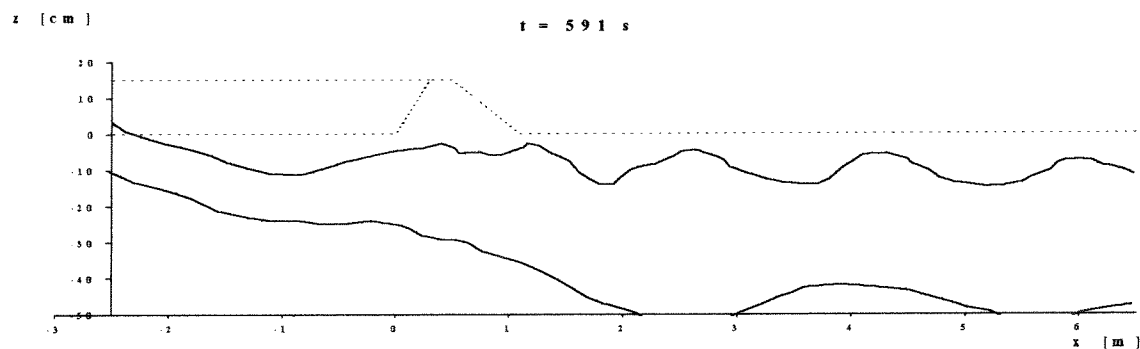
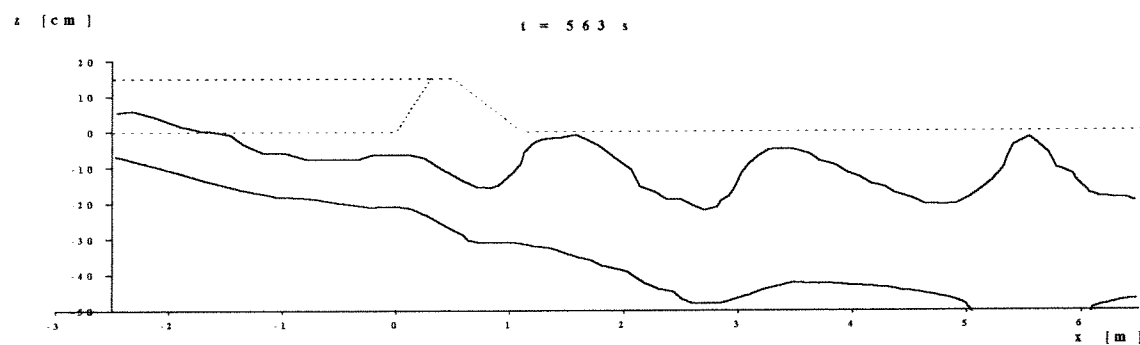
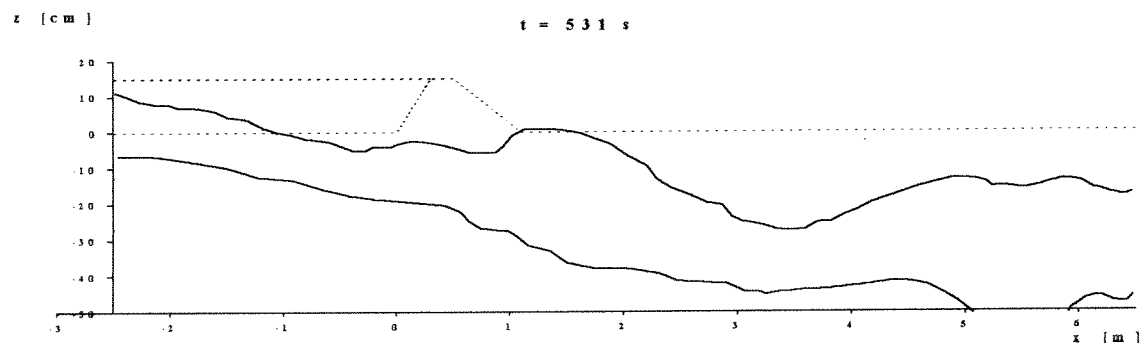
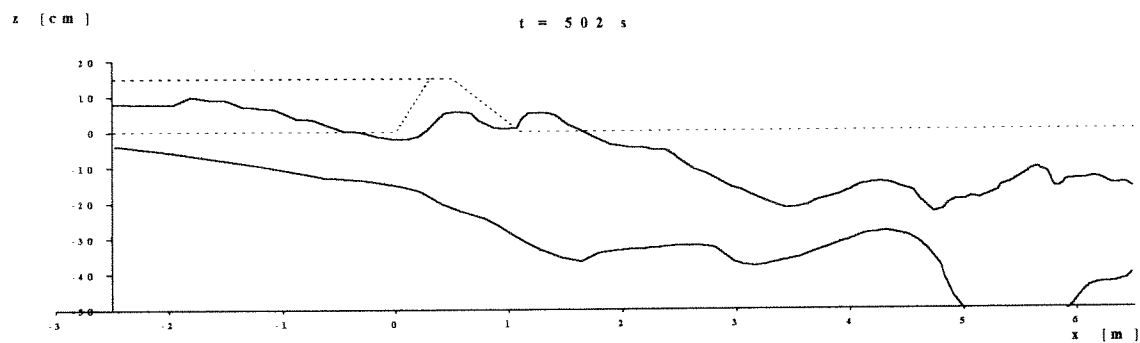
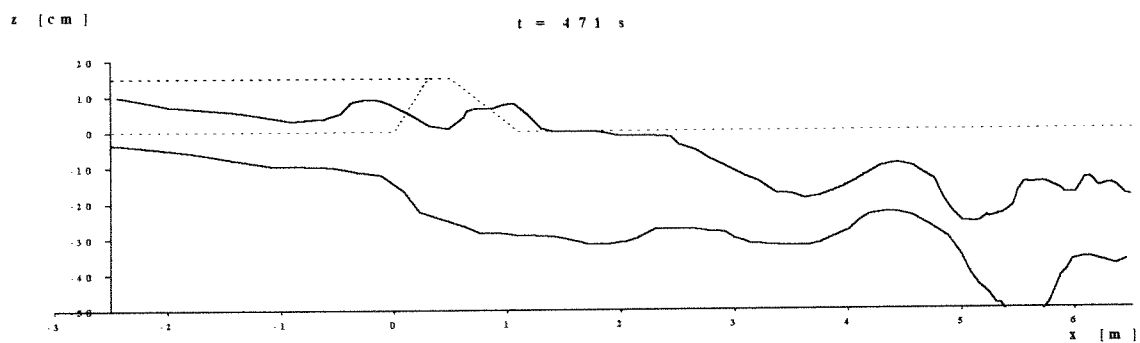
Langsdoorsneden van de ontgrondingskuil

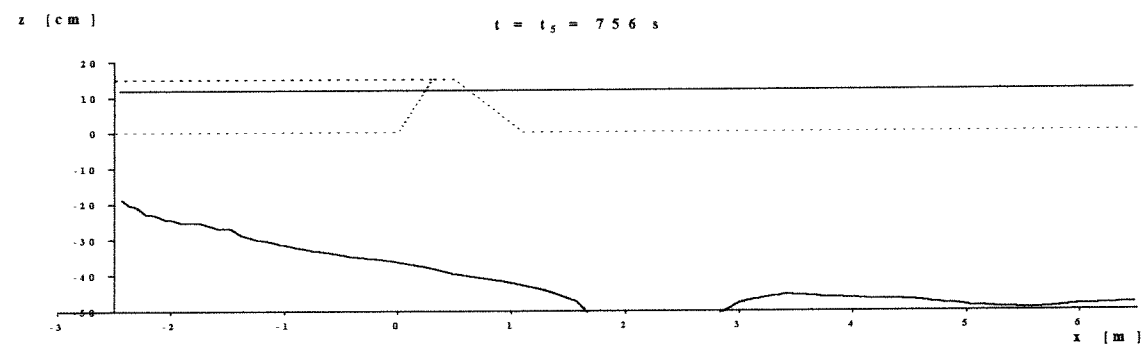
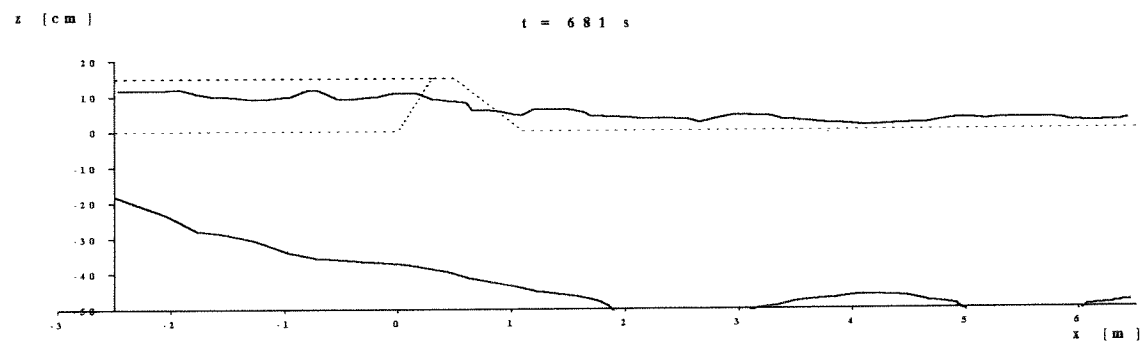
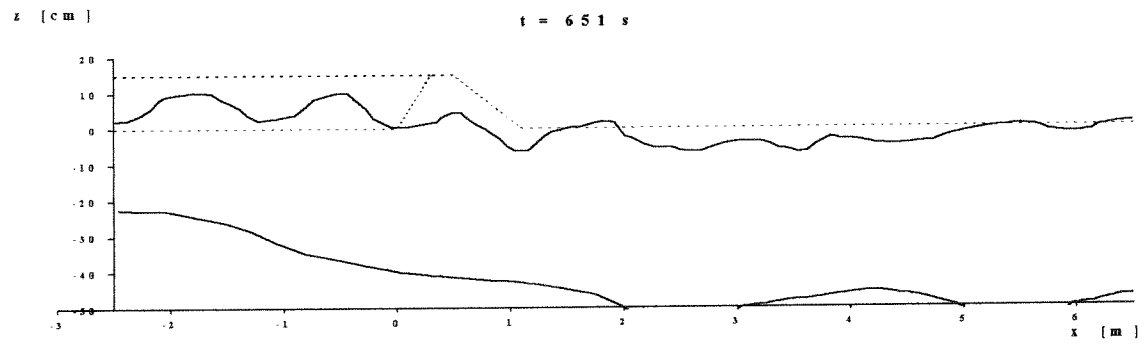
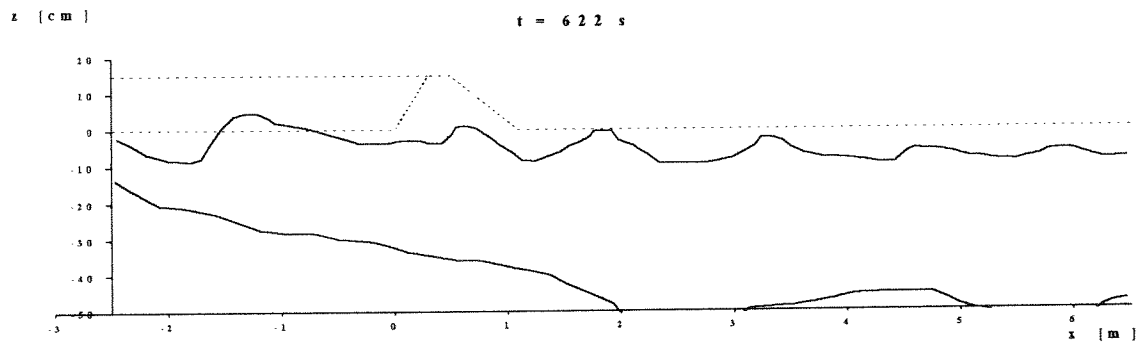












Bijlage IX

Getalswaarden van de metingen

Bijlage IX Getalswaarden van de metingen

In deze bijlage worden de getalswaarden van de metingen van de drie uitgevoerde experimenten gegeven. De gepresenteerde getallen zijn gemiddeld per 5 s. Voor de exacte meetwaarden wordt verwezen naar het aangelegde archief (zie hoofdstuk 8 en bijlage X).

IX.1 Meetgegevens van het eerste experiment

Tijd	$h_{w,1}$	$h_{w,2}$	$h_{w,3}$	$U_{w,1}(x)$	$U_{w,1}(y)$	$U_{w,2}(x)$	$U_{w,2}(y)$	$U_T(x)$	$U_T(y)$
[s]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2	0.304	0.295	0.292	-0.056	-0.056	0.043	-0.008	2.473	-2.469
7	0.307	0.297	0.294	-0.059	-0.059	0.041	-0.019	2.473	-2.469
12	0.311	0.301	0.297	-0.059	-0.059	0.045	-0.017	2.473	-2.469
17	0.312	0.304	0.299	-0.060	-0.060	0.044	-0.005	2.473	-2.469
22	0.318	0.306	0.303	-0.068	-0.068	0.043	-0.022	2.473	-2.469
27	0.323	0.310	0.307	-0.066	-0.066	0.035	-0.017	2.473	-2.469
32	0.328	0.314	0.310	-0.068	-0.068	0.038	-0.018	2.473	-2.469
37	0.331	0.317	0.313	-0.070	-0.070	0.042	-0.026	2.473	-2.469
42	0.334	0.320	0.315	-0.072	-0.072	0.037	-0.026	2.473	-2.469
47	0.338	0.321	0.317	-0.076	-0.076	0.042	-0.026	2.473	-2.469
52	0.340	0.323	0.318	-0.083	-0.083	0.040	-0.024	2.473	-2.469
57	0.340	0.325	0.319	-0.084	-0.084	0.037	-0.026	2.473	-2.469
62	0.342	0.326	0.320	-0.081	-0.081	0.038	-0.024	2.473	-2.469
67	0.342	0.326	0.320	-0.076	-0.076	0.041	-0.020	2.473	-2.469
72	0.343	0.327	0.320	-0.087	-0.087	0.034	-0.022	2.473	-2.469
77	0.343	0.326	0.321	-0.085	-0.085	0.005	-0.016	2.473	-2.469
82	0.343	0.327	0.319	-0.081	-0.081	0.032	-0.028	2.473	-2.469
87	0.340	0.325	0.318	-0.079	-0.079	0.041	-0.031	2.473	-2.469
92	0.336	0.320	0.315	-0.075	-0.075	0.041	-0.039	2.473	-2.469
97	0.334	0.318	0.313	-0.064	-0.064	0.046	-0.022	2.473	-2.469
102	0.332	0.317	0.310	-0.066	-0.066	0.036	-0.034	2.473	-2.469
107	0.329	0.314	0.309	-0.059	-0.059	0.034	-0.035	2.473	-2.469
112	0.326	0.312	0.306	-0.062	-0.062	0.036	-0.032	2.473	-2.469
117	0.322	0.309	0.303	-0.049	-0.049	0.032	-0.043	2.473	-2.469
122	0.318	0.306	0.300	-0.045	-0.045	0.037	-0.036	2.473	-2.469
127	0.314	0.303	0.297	-0.034	-0.034	0.014	-0.033	2.473	-2.469
132	0.311	0.299	0.293	0.016	0.016	-0.005	-0.034	2.473	-2.469
137	0.309	0.297	0.291	0.039	0.039	-0.026	-0.039	-0.994	-1.837
142	0.309	0.297	0.290	0.014	0.014	-0.050	-0.048	-2.475	-2.469
147	0.313	0.300	0.292	0.035	0.035	-0.064	-0.054	-2.475	-2.469
152	0.320	0.306	0.298	0.068	0.068	-0.111	-0.092	-2.475	-2.469
157	0.327	0.310	0.300	0.080	0.080	-0.144	-0.088	-2.475	-2.469
162	0.325	0.308	0.301	0.067	0.067	-0.132	-0.095	-2.475	-2.469
167	0.324	0.308	0.298	0.071	0.071	-0.145	-0.115	-2.475	-2.469
172	0.322	0.302	0.295	0.113	0.113	-0.158	-0.112	-2.475	-2.469
177	0.318	0.307	0.294	0.123	0.123	-0.162	-0.097	-2.475	-2.469
182	0.328	0.307	0.294	0.164	0.164	-0.171	-0.118	-2.475	-2.469
187	0.322	0.307	0.295	0.132	0.132	-0.133	-0.127	-2.475	-2.469
192	0.322	0.303	0.294	0.137	0.137	-0.188	-0.139	-2.475	-2.469
197	0.316	0.298	0.289	0.174	0.174	-0.161	-0.111	-2.475	-2.469
202	0.316	0.298	0.285	-0.021	-0.021	-0.275	-0.155	-2.475	-2.469

Tijd	$h_{w,1}$	$h_{w,2}$	$h_{w,3}$	$U_{w,1}(x)$	$U_{w,1}(y)$	$U_{w,2}(x)$	$U_{w,2}(y)$	$U_T(x)$	$U_T(y)$
[s]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
207	0.304	0.288	0.279	-0.027	-0.027	-0.244	-0.135	-2.475	-2.469
212	0.301	0.285	0.275	0.048	0.048	-0.210	-0.168	-2.475	-2.469
217	0.307	0.290	0.269	0.001	0.001	-0.210	-0.177	-2.475	-2.469
222	0.317	0.296	0.273	0.052	0.052	-0.206	-0.228	-2.475	-2.469
227	0.315	0.299	0.274	0.041	0.041	-0.223	-0.178	-2.475	-2.469
232	0.313	0.290	0.268	0.067	0.067	-0.201	-0.166	-2.475	-2.469
237	0.310	0.287	0.266	0.012	0.012	-0.319	-0.173	-0.949	-1.801
242	0.307	0.280	0.261	0.100	0.100	-0.283	-0.204	1.531	-0.744
247	0.298	0.276	0.253	0.129	0.129	-0.266	-0.215	1.291	-0.573
252	0.294	0.269	0.247	0.120	0.120	-0.301	-0.234	1.315	-0.614
257	0.292	0.262	0.236	0.140	0.140	-0.343	-0.202	1.546	-0.803
262	0.283	0.259	0.233	0.162	0.162	-0.314	-0.212	1.448	-0.786
267	0.281	0.257	0.225	0.161	0.161	-0.379	-0.229	1.092	-0.518
272	0.273	0.249	0.219	0.123	0.123	-0.304	-0.238	1.210	-0.501
277	0.268	0.245	0.212	0.149	0.149	-0.378	-0.282	1.371	-0.529
282	0.266	0.241	0.203	0.175	0.175	-0.341	-0.224	1.566	-0.436
287	0.260	0.234	0.196	0.143	0.143	-0.425	-0.267	1.508	-0.516
292	0.254	0.229	0.185	0.212	0.212	-0.441	-0.296	1.505	-0.503
297	0.251	0.224	0.174	0.212	0.212	-0.429	-0.255	1.474	-0.552
302	0.246	0.221	0.164	0.173	0.173	-0.420	-0.287	1.434	-0.468
307	0.243	0.219	0.153	0.166	0.166	-0.424	-0.286	1.465	-0.514
312	0.238	0.213	0.150	0.257	0.257	-0.399	-0.324	1.389	-0.621
317	0.236	0.209	0.143	0.159	0.159	-0.481	-0.384	1.276	-0.517
322	0.233	0.206	0.140	0.162	0.162	-0.487	-0.372	1.172	-0.483
327	0.234	0.200	0.139	0.184	0.184	-0.466	-0.408	1.203	-0.392
332	0.227	0.198	0.139	0.204	0.204	-0.509	-0.362	1.201	-0.286
337	0.224	0.191	0.139	0.187	0.187	-0.539	-0.406	1.296	-0.436
342	0.224	0.189	0.139	0.194	0.194	-0.441	-0.441	1.151	-0.194
347	0.219	0.182	0.139	0.193	0.193	-0.572	-0.438	1.326	-0.300
352	0.220	0.180	0.139	0.168	0.168	-0.573	-0.489	1.124	-0.339
357	0.218	0.180	0.148	0.200	0.200	-0.611	-0.496	1.017	-0.279
362	0.216	0.187	0.175	0.142	0.142	-0.545	-0.401	1.002	-0.245
367	0.218	0.193	0.177	0.173	0.173	-0.480	-0.541	0.801	-0.244
372	0.221	0.198	0.187	0.191	0.191	-0.528	-0.515	0.872	-0.276
377	0.222	0.201	0.192	0.132	0.132	-0.521	-0.451	0.899	-0.208
382	0.225	0.206	0.194	0.180	0.180	-0.488	-0.470	0.966	-0.180
387	0.229	0.216	0.202	0.147	0.147	-0.482	-0.339	0.954	-0.138
392	0.235	0.216	0.198	0.195	0.195	-0.512	-0.332	0.849	-0.168
397	0.239	0.219	0.204	0.063	0.063	-0.444	-0.365	0.793	-0.164
402	0.238	0.225	0.221	0.101	0.101	-0.438	-0.280	0.741	-0.121
407	0.251	0.231	0.228	0.148	0.148	-0.407	-0.272	0.803	-0.115
412	0.243	0.225	0.217	0.086	0.086	-0.446	-0.336	0.790	-0.196
417	0.233	0.222	0.226	0.115	0.115	-0.414	-0.318	0.731	-0.169
422	0.216	0.217	0.232	0.054	0.054	-0.364	-0.216	0.583	-0.183
427	0.196	0.202	0.221	0.045	0.045	-0.339	-0.164	0.463	-0.065
432	0.177	0.186	0.212	-0.045	-0.045	-0.239	-0.142	0.279	-0.064
437	0.166	0.186	0.209	-0.147	-0.147	-0.191	-0.095	0.056	-0.009
442	0.171	0.184	0.209	-0.217	-0.217	-0.110	-0.067	-0.104	0.021
447	0.174	0.185	0.210	-0.228	-0.228	-0.081	-0.111	-0.144	0.011

IX.2 Meetgegevens van het tweede experiment

Tijd	$h_{w,1}$	$h_{w,2}$	$h_{w,3}$	h_{kom}	$u_{w,1}(x)$	$u_{w,1}(y)$	$u_{w,2}(x)$	$u_{w,2}(y)$	$u_T(x)$	$u_T(y)$
[s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2	0.143	0.143	0.143	-0.288	-0.006	0.031	0.048	0.033	2.334	-2.490
7	0.144	0.143	0.144	-0.288	-0.020	0.038	0.040	0.036	2.476	-2.490
12	0.148	0.145	0.147	-0.288	0.034	0.008	0.056	0.027	2.489	-2.490
17	0.151	0.151	0.151	-0.288	0.053	-0.026	0.080	0.025	2.489	-2.490
22	0.155	0.155	0.155	-0.288	0.039	0.026	0.060	0.026	2.489	-2.490
27	0.160	0.158	0.157	-0.288	0.033	0.034	0.046	0.029	2.489	-2.490
32	0.155	0.155	0.156	-0.288	0.022	0.032	0.023	0.030	2.489	-2.490
37	0.158	0.155	0.156	-0.288	-0.019	0.038	-0.001	0.024	2.489	-2.490
42	0.156	0.155	0.156	-0.288	0.035	0.032	0.046	0.028	2.489	-2.490
47	0.156	0.155	0.156	-0.288	0.006	0.036	0.035	0.032	2.489	-2.490
52	0.157	0.155	0.155	-0.288	0.020	0.039	0.038	0.031	2.435	-2.490
57	0.155	0.154	0.155	-0.288	0.016	0.036	0.038	0.029	2.039	-2.490
62	0.156	0.154	0.155	-0.288	-0.015	0.037	0.034	0.030	2.129	-2.490
67	0.155	0.154	0.155	-0.288	0.019	0.037	0.035	0.031	2.103	-2.490
72	0.155	0.154	0.154	-0.288	0.016	0.037	0.033	0.031	2.173	-2.490
77	0.155	0.153	0.154	-0.288	0.019	0.034	0.039	0.023	2.149	-2.490
82	0.154	0.153	0.154	-0.288	0.028	0.034	0.040	0.027	1.923	-2.490
87	0.155	0.153	0.154	-0.288	0.028	0.034	0.041	0.017	1.868	-2.490
92	0.156	0.154	0.155	-0.288	0.039	0.030	0.052	0.030	1.987	-2.490
97	0.156	0.155	0.156	-0.288	0.036	0.034	0.045	0.028	2.305	-2.490
102	0.157	0.155	0.156	-0.288	0.034	0.037	0.043	0.025	2.081	-2.490
107	0.157	0.156	0.156	-0.288	0.041	0.029	0.052	0.022	2.346	-2.490
112	0.158	0.156	0.157	-0.288	0.038	0.029	0.052	0.017	2.396	-2.490
117	0.160	0.158	0.159	-0.288	0.041	0.030	0.063	0.018	2.337	-2.490
122	0.160	0.159	0.160	-0.288	0.043	0.031	0.063	0.019	2.269	-2.490
127	0.161	0.159	0.161	-0.288	0.042	0.031	0.061	0.020	2.214	-2.490
132	0.161	0.160	0.161	-0.288	0.049	0.029	0.067	0.007	2.346	-2.490
137	0.161	0.160	0.161	-0.288	0.045	0.029	0.069	0.017	2.489	-2.490
142	0.162	0.160	0.161	-0.288	0.048	0.028	0.069	0.003	2.489	-2.490
147	0.161	0.160	0.160	-0.288	0.048	0.030	0.073	0.003	2.489	-2.490
152	0.160	0.159	0.159	-0.288	0.046	0.024	0.072	0.010	2.489	-2.490
157	0.157	0.155	0.156	-0.288	0.039	0.030	0.063	0.012	2.489	-2.490
162	0.154	0.152	0.152	-0.288	0.041	0.018	0.076	0.020	1.416	-1.014
167	0.150	0.148	0.149	-0.288	0.051	0.029	0.084	0.017	0.224	2.447
172	0.146	0.145	0.146	-0.288	0.050	-0.022	0.081	0.003	-0.256	0.877
177	0.147	0.144	0.145	-0.288	0.056	-0.038	0.100	-0.016	0.315	0.284
182	0.152	0.148	0.148	-0.288	0.091	-0.059	0.151	-0.022	0.273	-0.168
187	0.157	0.154	0.154	-0.288	0.110	-0.074	0.171	-0.033	-0.537	0.206
192	0.161	0.159	0.158	-0.288	0.111	-0.108	0.161	-0.029	-1.358	1.009
197	0.165	0.161	0.161	-0.288	0.121	-0.100	0.188	-0.023	-1.353	0.082
202	0.167	0.164	0.163	-0.288	0.136	-0.068	0.220	-0.029	-0.460	0.113
207	0.170	0.166	0.165	-0.288	0.144	-0.099	0.225	-0.027	-1.465	1.310
212	0.171	0.167	0.167	-0.288	0.142	-0.099	0.231	-0.030	-0.864	0.973
217	0.171	0.168	0.167	-0.288	0.142	-0.115	0.245	-0.025	1.095	-0.012
222	0.171	0.168	0.167	-0.288	0.147	-0.092	0.251	-0.032	0.436	0.198
227	0.171	0.167	0.167	-0.288	0.143	-0.097	0.253	-0.033	-0.005	0.053
232	0.170	0.165	0.165	-0.288	0.141	-0.078	0.262	-0.041	-0.429	-0.102
237	0.169	0.164	0.163	-0.288	0.147	-0.100	0.276	-0.023	-0.482	-0.059
242	0.167	0.162	0.161	-0.288	0.164	-0.085	0.299	-0.037	-0.061	-0.283
247	0.165	0.160	0.158	-0.288	0.173	-0.100	0.296	-0.048	-0.120	-0.382

Tijd	$h_{w,1}$	$h_{w,2}$	$h_{w,3}$	h_{kom}	$u_{w,1}(x)$	$u_{w,1}(y)$	$u_{w,2}(x)$	$u_{w,2}(y)$	$u_T(x)$	$u_T(y)$
[s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
252	0.161	0.156	0.156	-0.288	0.162	-0.110	0.305	-0.045	-0.119	-0.572
257	0.158	0.153	0.152	-0.288	0.167	-0.101	0.319	-0.024	-0.102	-0.400
262	0.157	0.151	0.150	-0.288	0.169	-0.116	0.357	-0.065	-0.086	-0.907
267	0.159	0.151	0.150	-0.288	0.198	-0.133	0.390	-0.041	0.164	-0.955
272	0.157	0.151	0.148	-0.288	0.217	-0.163	0.430	-0.059	-0.602	0.203
277	0.158	0.149	0.148	-0.288	0.232	-0.174	0.431	-0.044	-0.315	0.271
282	0.163	0.152	0.149	-0.288	0.243	-0.195	0.466	-0.067	0.347	1.009
287	0.168	0.155	0.151	-0.288	0.293	-0.212	0.502	-0.066	1.056	-0.553
292	0.170	0.155	0.154	-0.288	0.301	-0.237	0.552	-0.064	1.098	-0.596
297	0.174	0.159	0.156	-0.288	0.263	-0.238	0.527	-0.046	1.157	-0.571
302	0.175	0.161	0.157	-0.288	0.285	-0.252	0.504	-0.045	1.198	-0.532
307	0.172	0.162	0.157	-0.288	0.289	-0.213	0.555	-0.089	1.167	-0.337
312	0.177	0.160	0.157	-0.272	0.231	-0.256	0.575	-0.042	1.171	-0.354
317	0.180	0.163	0.158	-0.257	0.270	-0.230	0.574	-0.073	1.204	-0.320
322	0.187	0.169	0.163	-0.242	0.304	-0.318	0.655	-0.054	1.229	-0.308
327	0.194	0.173	0.164	-0.230	0.359	-0.287	0.613	-0.094	1.282	-0.260
332	0.196	0.177	0.173	-0.229	0.367	-0.269	0.681	-0.044	1.268	-0.332
337	0.196	0.178	0.169	-0.226	0.351	-0.287	0.689	-0.056	1.221	-0.327
342	0.196	0.184	0.172	-0.227	0.409	-0.334	0.673	-0.061	1.231	-0.333
347	0.196	0.179	0.173	-0.219	0.391	-0.288	0.679	-0.060	1.214	-0.263
352	0.196	0.177	0.173	-0.199	0.370	-0.286	0.709	-0.072	1.268	-0.321
357	0.196	0.178	0.170	-0.181	0.367	-0.245	0.696	-0.055	1.242	-0.369
362	0.196	0.175	0.170	-0.168	0.362	-0.267	0.689	-0.055	1.227	-0.320
367	0.193	0.169	0.166	-0.164	0.396	-0.272	0.729	-0.110	1.309	-0.363
372	0.195	0.168	0.162	-0.152	0.375	-0.255	0.729	-0.085	1.339	-0.419
377	0.192	0.167	0.159	-0.137	0.394	-0.286	0.748	-0.086	1.398	-0.368
382	0.189	0.162	0.152	-0.133	0.398	-0.301	0.768	-0.103	1.424	-0.450
387	0.184	0.156	0.150	-0.130	0.430	-0.301	0.800	-0.073	1.441	-0.442
392	0.182	0.154	0.148	-0.125	0.416	-0.317	0.811	-0.118	1.468	-0.419
397	0.176	0.148	0.144	-0.118	0.457	-0.267	0.812	-0.115	1.429	-0.377
402	0.177	0.144	0.140	-0.114	0.402	-0.264	0.833	-0.107	1.574	-0.448
407	0.176	0.144	0.137	-0.111	0.412	-0.334	0.850	-0.169	1.590	-0.419
412	0.174	0.137	0.134	-0.095	0.437	-0.326	0.841	-0.117	1.634	-0.481
417	0.170	0.138	0.129	-0.083	0.439	-0.314	0.905	-0.137	1.622	-0.490
422	0.170	0.132	0.123	-0.078	0.440	-0.366	0.917	-0.205	1.627	-0.504
427	0.164	0.127	0.121	-0.073	0.482	-0.380	0.901	-0.173	1.610	-0.426
432	0.162	0.126	0.116	-0.068	0.473	-0.381	0.930	-0.199	1.620	-0.441
437	0.161	0.120	0.112	-0.063	0.477	-0.381	0.937	-0.263	1.617	-0.398
442	0.158	0.117	0.109	-0.057	0.480	-0.372	0.962	-0.195	1.563	-0.316
447	0.157	0.111	0.102	-0.048	0.440	-0.404	0.951	-0.304	1.432	-0.375
452	0.152	0.106	0.100	-0.034	0.503	-0.393	0.986	-0.292	1.383	-0.479
457	0.153	0.100	0.093	-0.031	0.481	-0.425	0.984	-0.300	1.325	-0.444
462	0.148	0.095	0.092	-0.031	0.498	-0.408	1.035	-0.317	1.395	-0.325
467	0.147	0.089	0.088	-0.024	0.481	-0.432	1.048	-0.376	1.340	-0.332
472	0.146	0.083	0.084	-0.021	0.534	-0.450	1.115	-0.383	1.315	-0.172
477	0.138	0.076	0.080	-0.015	0.516	-0.425	1.126	-0.363	1.491	-0.222
482	0.136	0.079	0.077	-0.001	0.499	-0.469	1.095	-0.406	1.345	-0.357
487	0.137	0.068	0.069	0.012	0.518	-0.470	0.760	-1.337	1.245	-0.134
492	0.138	0.064	0.067	0.011	0.539	-0.458	-0.692	0.088	1.266	-0.041
497	0.130	0.055	0.057	0.009	0.552	-0.416	-1.566	-1.094	1.330	-0.052
502	0.123	0.096	0.051	0.008	0.537	-0.471	0.188	0.247	1.387	-0.069
507	0.121	0.091	0.043	0.009	0.568	-0.472	0.388	0.290	1.218	-0.207
512	0.116	0.071	0.027	0.011	0.570	-0.484	2.101	0.469	0.983	-0.042
517	0.111	0.088	0.030	0.021	0.598	-0.578	1.692	-0.101	0.985	-0.035

Tijd	$h_{w,1}$	$h_{w,2}$	$h_{w,3}$	h_{kom}	$u_{w,1}(x)$	$u_{w,1}(y)$	$u_{w,2}(x)$	$u_{w,2}(y)$	$u_T(x)$	$u_T(y)$
[s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
522	0.108	0.066	0.031	0.033	0.609	-0.615	1.852	0.676	0.933	-0.066
527	0.106	0.077	0.048	0.038	0.654	-0.611	0.907	-1.156	0.978	-0.015
532	0.114	0.071	0.046	0.043	0.578	-0.560	-0.521	-1.185	1.064	-0.056
537	0.106	0.072	0.047	0.052	0.616	-0.645	-0.460	-1.300	0.949	0.040
542	0.111	0.069	0.063	0.056	0.558	-0.569	0.750	-0.449	0.980	-0.034
547	0.115	0.081	0.069	0.057	0.548	-0.558	0.682	-0.362	0.841	-0.064
552	0.117	0.081	0.073	0.062	0.512	-0.645	0.667	-0.385	0.838	-0.149
557	0.116	0.088	0.082	0.065	0.559	-0.615	0.691	-0.427	0.758	-0.011
562	0.125	0.102	0.092	0.070	0.457	-0.565	0.695	-0.298	0.823	-0.061
567	0.129	0.103	0.092	0.076	0.504	-0.481	0.667	-0.334	0.764	-0.059
572	0.133	0.105	0.098	0.076	0.448	-0.515	0.649	-0.276	0.823	-0.045
577	0.138	0.116	0.106	0.079	0.429	-0.504	0.638	-0.320	0.828	-0.053
582	0.136	0.118	0.106	0.082	0.395	-0.416	0.617	-0.303	0.869	-0.041
587	0.140	0.121	0.112	0.087	0.421	-0.457	0.592	-0.203	0.788	-0.115
592	0.145	0.127	0.117	0.094	0.437	-0.457	0.558	-0.269	0.784	-0.052
597	0.146	0.133	0.121	0.101	0.367	-0.422	0.509	-0.284	0.800	-0.043
602	0.143	0.134	0.124	0.108	0.379	-0.409	0.466	-0.260	0.760	-0.017
607	0.143	0.133	0.124	0.112	0.335	-0.365	0.438	-0.181	0.725	0.015
612	0.143	0.136	0.126	0.114	0.331	-0.374	0.399	-0.177	0.675	-0.031
617	0.137	0.125	0.121	0.115	0.249	-0.322	0.333	-0.102	0.666	-0.001
622	0.128	0.125	0.117	0.119	0.250	-0.339	0.332	-0.169	0.528	-0.046
627	0.127	0.122	0.120	0.124	0.251	-0.277	0.293	-0.161	0.417	-0.045
632	0.134	0.131	0.130	0.127	0.200	-0.220	0.245	-0.097	0.348	-0.012
637	0.141	0.137	0.134	0.127	0.184	-0.205	0.284	-0.108	0.357	-0.020
642	0.139	0.136	0.134	0.125	0.177	-0.203	0.253	-0.112	0.444	-0.012
647	0.133	0.128	0.129	0.125	0.169	-0.198	0.247	-0.096	0.357	-0.023
652	0.123	0.124	0.122	0.128	0.123	-0.156	0.206	-0.118	0.287	0.008
657	0.117	0.117	0.118	0.129	0.085	-0.108	0.149	-0.094	0.230	0.003
662	0.114	0.116	0.115	0.131	0.061	-0.088	0.087	-0.069	0.140	0.045
667	0.117	0.117	0.117	0.130	-0.002	-0.072	0.025	-0.040	0.070	0.061

IX.3: Meetgegevens van het derde experiment

Tijd	$h_{w,1}$	$h_{w,2}$	$h_{w,3}$	h_{kom}	$u_{w,1}(x)$	$u_{w,1}(y)$	$u_{w,2}(x)$	$u_{w,2}(y)$	$u_T(x)$	$u_T(y)$
[s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2	0.143	0.144	0.143	-0.299	-0.511	0.203	-0.013	-0.022	0.010	-0.023
7	0.146	0.148	0.146	-0.299	-0.482	0.195	0.036	-0.022	0.013	-0.024
12	0.153	0.154	0.152	-0.299	-0.466	0.198	0.056	-0.016	0.013	-0.032
17	0.160	0.160	0.160	-0.299	-0.479	0.193	0.045	-0.019	0.016	-0.034
22	0.164	0.164	0.163	-0.299	-0.488	0.198	0.022	-0.005	0.014	-0.035
27	0.162	0.162	0.162	-0.299	-0.488	0.207	-0.016	0.005	0.017	-0.029
32	0.162	0.163	0.161	-0.299	-0.489	0.201	0.008	0.005	0.019	-0.027
37	0.161	0.162	0.161	-0.299	-0.486	0.201	0.008	0.012	0.018	-0.029
42	0.161	0.161	0.160	-0.299	-0.486	0.200	0.004	0.006	0.015	-0.031
47	0.160	0.161	0.160	-0.299	-0.488	0.194	-0.015	0.005	0.006	-0.036
52	0.159	0.161	0.159	-0.299	-0.486	0.201	0.007	-0.009	0.001	-0.037
57	0.159	0.160	0.158	-0.299	-0.485	0.203	0.009	0.011	0.008	-0.048
62	0.159	0.159	0.158	-0.299	-0.486	0.195	0.005	0.005	0.008	-0.057
67	0.158	0.159	0.157	-0.299	-0.484	0.192	-0.005	0.004	0.001	-0.062
72	0.158	0.158	0.157	-0.299	-0.483	0.192	0.029	0.019	-0.007	-0.073
77	0.158	0.158	0.157	-0.299	-0.483	0.193	0.008	0.011	-0.011	-0.088
82	0.158	0.157	0.156	-0.299	-0.485	0.192	0.006	0.003	-0.023	-0.107
87	0.157	0.157	0.155	-0.299	-0.479	0.193	0.020	0.011	-0.021	-0.128
92	0.156	0.157	0.155	-0.299	-0.479	0.194	0.030	0.000	-0.033	-0.154
97	0.155	0.156	0.154	-0.299	-0.479	0.194	0.035	-0.002	-0.040	-0.182
102	0.155	0.155	0.153	-0.299	-0.484	0.193	0.033	-0.003	-0.056	-0.227
107	0.154	0.154	0.152	-0.299	-0.478	0.193	0.033	-0.002	-0.071	-0.290
112	0.153	0.153	0.152	-0.299	-0.477	0.203	0.039	-0.002	-0.074	-0.400
117	0.151	0.152	0.150	-0.299	-0.474	0.204	0.038	-0.017	-0.057	-0.509
122	0.150	0.151	0.149	-0.299	-0.473	0.200	0.046	-0.009	-0.041	-0.598
127	0.149	0.150	0.149	-0.299	-0.470	0.198	0.052	0.004	-0.015	-0.677
132	0.149	0.151	0.149	-0.299	-0.464	0.189	0.058	-0.001	-0.027	-0.718
137	0.151	0.152	0.150	-0.299	-0.458	0.188	0.069	-0.012	-0.034	-0.727
142	0.151	0.153	0.151	-0.299	-0.453	0.188	0.074	-0.020	-0.016	-0.702
147	0.151	0.154	0.151	-0.299	-0.455	0.187	0.078	-0.018	0.003	-0.715
152	0.151	0.154	0.152	-0.299	-0.449	0.184	0.087	-0.025	-0.038	-0.739
157	0.151	0.153	0.152	-0.299	-0.453	0.182	0.091	-0.023	-0.048	-0.794
162	0.151	0.154	0.152	-0.299	-0.450	0.180	0.099	-0.024	-0.052	-0.840
167	0.151	0.154	0.151	-0.299	-0.440	0.175	0.103	-0.024	-0.036	-0.849
172	0.150	0.152	0.151	-0.299	-0.432	0.171	0.105	-0.024	0.006	-0.831
177	0.150	0.151	0.150	-0.299	-0.434	0.175	0.110	-0.027	0.042	-0.783
182	0.149	0.151	0.149	-0.299	-0.428	0.168	0.121	-0.025	0.070	-0.751
187	0.148	0.152	0.149	-0.299	-0.427	0.161	0.131	-0.029	0.090	-0.728
192	0.148	0.151	0.149	-0.299	-0.427	0.158	0.142	-0.029	0.090	-0.691
197	0.147	0.151	0.148	-0.299	-0.425	0.157	0.148	-0.028	0.101	-0.671
202	0.146	0.150	0.147	-0.299	-0.425	0.156	0.160	-0.026	0.097	-0.664
207	0.145	0.149	0.146	-0.299	-0.414	0.151	0.171	-0.029	0.101	-0.639
212	0.145	0.151	0.147	-0.299	-0.410	0.137	0.185	-0.027	0.109	-0.640
217	0.146	0.151	0.148	-0.299	-0.399	0.140	0.203	-0.035	0.090	-0.647
222	0.147	0.153	0.150	-0.299	-0.388	0.139	0.213	-0.039	0.091	-0.650
227	0.148	0.153	0.150	-0.299	-0.398	0.141	0.222	-0.032	0.110	-0.659
232	0.149	0.154	0.151	-0.299	-0.395	0.135	0.220	-0.035	0.127	-0.668
237	0.149	0.155	0.151	-0.299	-0.390	0.132	0.231	-0.030	0.115	-0.660
242	0.149	0.155	0.151	-0.299	-0.391	0.131	0.232	-0.038	0.131	-0.643

Tijd	$h_{w,1}$	$h_{w,2}$	$h_{w,3}$	h_{kom}	$u_{w,1}(x)$	$u_{w,1}(y)$	$u_{w,2}(x)$	$u_{w,2}(y)$	$u_T(x)$	$u_T(y)$
[s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
247	0.149	0.155	0.152	-0.299	-0.389	0.128	0.243	-0.035	0.123	-0.646
252	0.149	0.155	0.151	-0.299	-0.383	0.126	0.241	-0.041	0.139	-0.643
257	0.148	0.155	0.150	-0.299	-0.377	0.121	0.249	-0.042	0.582	-0.421
262	0.147	0.154	0.149	-0.299	-0.372	0.120	0.254	-0.043	0.887	-0.196
267	0.146	0.154	0.148	-0.299	-0.372	0.125	0.255	-0.043	0.927	-0.134
272	0.146	0.153	0.148	-0.299	-0.367	0.115	0.259	-0.044	0.900	-0.132
277	0.147	0.157	0.151	-0.299	-0.365	0.116	0.281	-0.045	0.901	-0.135
282	0.148	0.158	0.153	-0.299	-0.355	0.117	0.297	-0.049	0.901	-0.132
287	0.150	0.160	0.154	-0.299	-0.372	0.105	0.284	-0.050	0.916	-0.132
292	0.150	0.159	0.154	-0.299	-0.350	0.101	0.297	-0.035	0.915	-0.135
297	0.150	0.159	0.154	-0.299	-0.355	0.104	0.303	-0.054	0.917	-0.128
302	0.151	0.160	0.155	-0.299	-0.354	0.110	0.292	-0.049	0.915	-0.132
307	0.151	0.161	0.154	-0.299	-0.358	0.109	0.321	-0.044	0.912	-0.136
312	0.150	0.162	0.155	-0.299	-0.362	0.107	0.315	-0.043	0.924	-0.138
317	0.149	0.160	0.154	-0.299	-0.365	0.114	0.318	-0.043	0.925	-0.132
322	0.149	0.160	0.153	-0.299	-0.368	0.109	0.308	-0.046	0.930	-0.114
327	0.147	0.160	0.154	-0.299	-0.367	0.114	0.301	-0.050	0.912	-0.113
332	0.147	0.159	0.153	-0.299	-0.366	0.110	0.310	-0.048	0.923	-0.126
337	0.145	0.156	0.152	-0.299	-0.360	0.110	0.311	-0.053	0.922	-0.137
342	0.146	0.158	0.151	-0.299	-0.370	0.110	0.318	-0.048	0.908	-0.133
347	0.143	0.156	0.150	-0.299	-0.403	0.112	0.313	-0.052	0.933	-0.135
352	0.143	0.157	0.150	-0.298	-0.437	0.124	0.309	-0.060	0.910	-0.133
357	0.145	0.162	0.153	-0.295	0.156	0.082	0.320	-0.053	0.938	-0.127
362	0.147	0.163	0.154	-0.287	0.079	-0.122	0.331	-0.059	0.970	-0.133
367	0.146	0.166	0.156	-0.283	0.075	-0.138	0.347	-0.046	1.001	-0.142
372	0.149	0.166	0.158	-0.279	0.070	-0.140	0.337	-0.035	1.007	-0.132
377	0.150	0.167	0.158	-0.274	0.085	-0.147	0.357	-0.041	1.032	-0.150
382	0.150	0.167	0.159	-0.269	0.079	-0.155	0.376	-0.037	1.050	-0.162
387	0.150	0.167	0.157	-0.261	0.085	-0.149	0.356	-0.028	1.065	-0.148
392	0.149	0.168	0.159	-0.255	0.076	-0.154	0.385	-0.046	1.081	-0.157
397	0.145	0.166	0.157	-0.253	0.100	-0.185	0.369	-0.041	1.102	-0.158
402	0.142	0.167	0.156	-0.251	0.090	-0.189	0.335	-0.036	1.113	-0.148
407	0.141	0.167	0.155	-0.247	0.095	-0.188	0.384	-0.052	1.144	-0.140
412	0.139	0.164	0.153	-0.240	0.100	-0.193	0.443	-0.052	1.179	-0.185
417	0.138	0.163	0.152	-0.234	0.089	-0.177	0.475	-0.065	1.240	-0.185
422	0.136	0.160	0.149	-0.229	0.109	-0.193	0.506	-0.046	1.291	-0.210
427	0.135	0.161	0.149	-0.225	0.110	-0.189	0.555	-0.064	1.314	-0.229
432	0.133	0.159	0.145	-0.215	0.122	-0.180	0.570	-0.066	1.350	-0.227
437	0.128	0.159	0.143	-0.207	0.125	-0.193	0.573	-0.057	1.378	-0.235
442	0.125	0.155	0.140	-0.205	0.130	-0.188	0.588	-0.060	1.362	-0.236
447	0.121	0.154	0.139	-0.203	0.125	-0.197	0.633	-0.088	1.387	-0.231
452	0.116	0.153	0.137	-0.197	0.145	-0.229	0.646	-0.059	1.490	-0.257
457	0.112	0.153	0.136	-0.196	0.166	-0.218	0.644	-0.062	1.470	-0.228
462	0.107	0.155	0.139	-0.197	0.173	-0.217	0.657	-0.059	1.425	-0.222
467	0.108	0.155	0.138	-0.189	0.184	-0.219	0.671	-0.086	1.463	-0.214
472	0.107	0.155	0.137	-0.177	0.180	-0.230	0.691	-0.088	1.602	-0.289
477	0.109	0.156	0.138	-0.170	0.173	-0.241	0.718	-0.080	1.672	-0.304
482	0.108	0.159	0.139	-0.165	0.181	-0.226	0.770	-0.105	1.683	-0.268
487	0.109	0.161	0.138	-0.161	0.196	-0.260	0.766	-0.104	1.650	-0.253
492	0.109	0.161	0.135	-0.155	0.194	-0.247	0.816	-0.111	1.629	-0.166
497	0.108	0.160	0.136	-0.146	0.179	-0.243	0.788	-0.086	1.628	-0.167
502	0.108	0.161	0.132	-0.138	0.209	-0.254	0.842	-0.111	1.710	-0.166
507	0.109	0.163	0.137	-0.134	0.225	-0.256	0.848	-0.106	1.791	-0.161
512	0.107	0.164	0.137	-0.130	0.244	-0.265	0.882	-0.121	1.828	-0.134

Tijd	$h_{w,1}$	$h_{w,2}$	$h_{w,3}$	h_{kom}	$u_{w,1}(x)$	$u_{w,1}(y)$	$u_{w,2}(x)$	$u_{w,2}(y)$	$u_T(x)$	$u_T(y)$
[s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
517	0.108	0.168	0.136	-0.124	0.261	-0.223	0.912	-0.113	1.915	-0.145
522	0.104	0.167	0.135	-0.120	0.274	-0.280	0.905	-0.133	1.970	-0.167
527	0.100	0.166	0.135	-0.115	0.265	-0.281	0.904	-0.125	2.051	-0.153
532	0.096	0.167	0.133	-0.105	0.275	-0.261	0.913	-0.135	2.074	-0.154
537	0.092	0.160	0.131	-0.097	0.264	-0.276	0.950	-0.122	2.081	-0.155
542	0.093	0.164	0.128	-0.092	0.305	-0.284	0.968	-0.121	2.091	-0.158
547	0.081	0.164	0.132	-0.085	0.260	-0.269	0.970	-0.143	2.117	-0.215
552	0.080	0.163	0.127	-0.077	0.283	-0.280	1.002	-0.153	2.124	-0.204
557	0.075	0.161	0.127	-0.072	0.305	-0.308	1.020	-0.152	2.133	-0.201
562	0.074	0.161	0.122	-0.065	0.324	-0.288	1.030	-0.157	2.105	-0.604
567	0.076	0.156	0.119	-0.060	0.340	-0.256	1.045	-0.156	1.168	-0.662
572	0.072	0.154	0.115	-0.054	0.338	-0.272	1.058	-0.178	2.237	-0.210
577	0.067	0.154	0.113	-0.044	0.330	-0.287	1.041	-0.175	2.266	-0.106
582	0.066	0.151	0.112	-0.031	0.360	-0.255	1.103	-0.184	2.256	-0.135
587	0.060	0.150	0.107	-0.027	0.372	-0.280	1.127	-0.202	2.188	-0.148
592	0.053	0.145	0.101	-0.020	0.443	-0.283	1.145	-0.213	2.149	-0.149
597	0.049	0.143	0.097	-0.015	0.437	-0.288	1.167	-0.214	2.081	0.018
602	0.042	0.141	0.093	-0.012	0.468	-0.269	1.192	-0.230	2.143	0.049
607	0.036	0.141	0.090	-0.009	0.490	-0.299	1.218	-0.236	1.908	-0.007
612	0.035	0.140	0.088	-0.001	0.475	-0.311	1.238	-0.262	1.822	-0.059
617	0.037	0.139	0.085	0.009	0.481	-0.316	1.277	-0.250	1.627	-0.067
622	0.037	0.134	0.079	0.016	0.501	-0.323	1.293	-0.272	1.628	-0.015
627	0.033	0.134	0.076	0.021	0.522	-0.381	1.341	-0.266	1.646	0.017
632	0.027	0.132	0.073	0.026	0.522	-0.367	1.356	-0.280	1.707	0.001
637	0.034	0.130	0.068	0.030	0.516	-0.384	1.409	-0.265	1.605	-0.049
642	0.027	0.129	0.065	0.033	0.566	-0.348	1.398	-0.295	1.543	0.026
647	0.031	0.124	0.060	0.041	0.563	-0.390	1.409	-0.310	1.605	0.031
652	0.035	0.121	0.063	0.047	0.548	-0.429	1.393	-0.301	1.452	-0.062
657	0.052	0.118	0.074	0.053	0.524	-0.428	1.238	-0.364	1.455	0.023
662	0.059	0.120	0.088	0.058	0.539	-0.407	1.161	-0.320	1.408	0.005
667	0.062	0.124	0.091	0.060	0.548	-0.379	1.116	-0.335	1.323	0.000
672	0.065	0.125	0.096	0.067	0.508	-0.378	1.076	-0.322	1.292	-0.043
677	0.069	0.122	0.099	0.068	0.475	-0.381	1.024	-0.305	1.282	-0.015
682	0.082	0.122	0.101	0.076	0.504	-0.344	1.026	-0.242	1.234	-0.006
687	0.087	0.123	0.112	0.085	0.429	-0.338	0.907	-0.287	1.082	0.037
692	0.092	0.133	0.116	0.092	0.453	-0.317	0.883	-0.275	1.065	-0.005
697	0.102	0.133	0.117	0.099	0.421	-0.297	0.850	-0.249	0.912	-0.041
702	0.111	0.131	0.125	0.098	0.427	-0.317	0.821	-0.236	0.966	0.061
707	0.110	0.140	0.129	0.096	0.389	-0.260	0.777	-0.231	0.923	0.008
712	0.113	0.139	0.125	0.098	0.406	-0.232	0.763	-0.186	0.897	0.002
717	0.115	0.140	0.126	0.104	0.378	-0.239	0.729	-0.179	0.835	0.011
722	0.114	0.129	0.126	0.111	0.317	-0.184	0.665	-0.221	0.781	0.044
727	0.114	0.126	0.126	0.117	0.274	-0.188	0.576	-0.174	0.628	0.031
732	0.116	0.121	0.122	0.120	0.211	-0.123	0.484	-0.169	0.554	0.027
737	0.118	0.117	0.119	0.125	0.167	-0.090	0.379	-0.132	0.506	-0.001
742	0.117	0.118	0.118	0.122	0.113	-0.084	0.275	-0.111	0.387	0.012
747	0.117	0.116	0.116	0.116	0.071	-0.050	0.179	-0.083	0.213	0.030
752	0.116	0.117	0.116	0.114	0.020	0.007	0.103	-0.053	0.183	0.039

Bijlage X

De inhoud van het archief

Bijlage X De inhoud van het archief

Deze bijlage bespreekt de kenmerken van de verschillende elementen van het aangelegde archief, voor zover deze van belang zijn bij het gebruik door derden.

Het archief is beschikbaar in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TU Delft. Het bevat de volgende elementen:

- het afstudeerverslag met deze bijlagen;
- 3 diskettes met meetgegevens;
- 1 videoband;
- 5 series dia's.

X.1 Diskettes met meetgegevens

De diskettes (3 stuks) bevatten drie bestanden met daarin de meetgegevens van de drie uitgevoerde experimenten. De diskettes hebben de volgende etiketten:

Disk 1:

Bresgroei 1/3
Laboratoriumproeven C.P. Caan
Proef 1
Datum: 25 april 1996
Bestand: **DATA-P1.XLS**
Type bestand: EXCEL 5.0 spreadsheet

Disk 2:

Bresgroei 2/3
Laboratoriumproeven C.P. Caan
Proef 2
Datum: 13 mei 1996
Bestand: **DATA-P2.XLS**
Type bestand: EXCEL 5.0 spreadsheet

Disk 3:

Bresgroei 3/3
Laboratoriumproeven C.P. Caan
Proef 3
Datum: 3 juni 1996
Bestand: **DATA-P3.XLS**
Type bestand: EXCEL 5.0 spreadsheet

De originele uitvoerbestanden van DasyLab (in ASCII-formattering) zijn geconverteerd naar EXCEL-bestanden (spreadsheets). In deze spreadsheets zijn de uitgangssignalen van de diverse meetinstrumenten (in Volts) omgerekend naar snelheden en waterdieptes.

De bestanden bevatten de originele meetgegevens (in Volts), de formules voor de omrekening en de resultaten (in meters [m] en meters per seconde [m/s]) van de omrekening. Het geheel is waar nodig van commentaar voorzien.

De spreadsheets zijn beveiligd. Er kunnen dus geen gegevens (per ongeluk) worden gewijzigd. Wel is het mogelijk de gegevens binnen EXCEL te kopiëren naar een nieuw bestand, waarna wel wijzigingen kunnen worden uitgevoerd.

De versie van EXCEL waarin de bestanden zijn gemaakt is versie 5.0.

X.2 Videoband

Op de videoband zijn alle opnames verzameld die tijdens de uitvoering van de experimenten gemaakt zijn. De opnames zijn in Super-VHS kwaliteit, met het oog op de beeldkwaliteit.

Per proef zijn verschillende camera's gebruikt om de ontwikkeling van de ontgrondingskuil vast te leggen. De opname bestaat daarom per proef uit verschillende gedeelten: twee voor de eerste, vier voor de tweede en vier delen voor de derde proef. Iedere deelopname beslaat een gedeelte van de glaswand. Dit bereik is op de videoband opgenomen vóór het begin van ieder nieuw deel. In onderstaande tabel is dit bereik weergegeven, samen met de tellerstand van de video bij het begin van ieder gedeelte.

		Bereik		Videoklok aan begin
		van	tot	
Proef 1	Deel 1	x = -2.5 m	x = 1.25 m	0.00.00
	Deel 2	x = 1.25 m	x = 5.0 m	0.09.04
Proef 2	Deel 1	x = -2.5 m	x = 0.5 m	0.17.45
	Deel 2	x = 0.0 m	x = 3.1 m	0.28.44
	Deel 3	x = 2.75 m	x = 5.8 m	0.39.52
	Deel 4	x = 5.2 m	x = 6.4 m	0.51.48
Proef 3	Deel 1	x = -2.5 m	x = 0.5 m	1.04.04
	Deel 2	x = 0.0 m	x = 2.8 m	1.16.54
	Deel 3	x = 2.5 m	x = 5.6 m	1.30.10
	Deel 4	x = 5.2 m	x = 6.4 m	1.44.09

X.3 Dia's

De diacollectie in het archief bevat drie opbergdozen met vijf series dia's. Op iedere doos is een label geplakt waarop is aangegeven wat de inhoud is. Dit label ziet er als volgt uit:

Bresgroei
Laboratoriumproeven C.P. Caan
Dia's
Serie A: Bovenaanzicht van de bres
tijdens proef 1 (25/04/96)
Aantal: 23 (A1 t/m A23)

De dia's zijn genummerd met een letter A t/m E en een getal dat de volgorde aangeeft. Deze codering is aangebracht op de diaraampjes met een zwarte stift. De overige cijfers op de diaraampjes zijn niet relevant als kenmerk.

De verschillende letters A t/m F betekenen achtereenvolgens:

- A bovenaanzicht van de bres tijdens proef 1 (23 stuks);
- B bovenaanzicht van de bres tijdens proef 2 (29 stuks);
- C bovenaanzicht van de ontgrondingskuil in de eindsituatie van proef 2, bij verschillende waterstanden (24 stuks);
- D bovenaanzicht van de bres tijdens proef 3 (29 stuks);
- E bovenaanzicht van de ontgrondingskuil in de eindsituatie van proef 3, bij verschillende waterstanden (44 stuks).

Literatuur

Literatuur

- [1] Rijn, L.C. van, 1993: Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications, Amsterdam.
- [2] Visser, P.J., 1994: A model for breach growth in sand-dikes. Proc. 24th International Conference on Coastal Engineering, Kobe, Japan, pp. 2197-2206.
- [3] Visser, P.J., 1994: Bresgroei, deel I: Mathematisch model; band B: Inventarisatie sedimenttransport-formuleringen. Waterloopkundig Laboratorium, Delft.
- [4] Visser, P.J., Ribberink, J.S., en Kalkwijk, J.P.Th., 1986: Ontwikkeling stroomgat en debiet bij dijkdoorbraak; deelstudie voor een Pomp Accumulatie Centrale. Rapport nr. 8-86, vakgroep waterbouwkunde, faculteit der Civiele Techniek, TU Delft.

