



**Sedimentatiesystemen
voor sleepopperzuigers 2**

Tweede afstudeeropdracht
M.J.P. Meeuwissen, rapp.nr:92.3.GV.4073

Begeleiders:

Ir H.P. Hokke, HAM

Dr ir S.A. Miedema, T.U. Delft

Hollandsche Aanneming Maatschappij
Capelle aan den IJssel, augustus 1993

VAKGROEP TRANSPORTTECHNOLOGIE, SECTIE GRONDVERZET

Project-/themacode:	030C922	Soort opdracht:	2 ^e afstudeer
VF-code:	Wb-02/83-29	Opdrachtnummer:	92.3.GV.4073
Vertrouwelijk:	Ja	Datum:	24 juni 1993
		Naam:	M.J.P. Meeuwissen

Titel: Sedimentatiesystemen voor sleephopperzuigers

Overweging

▪ Begripsbeschrijving

Voor het winnen van zand zijn verschillende werktuigen te onderscheiden. De twee belangrijkste typen werktuigen zijn de snijkopzuiger en de sleephopperzuiger. Een snijkopzuiger wordt gekenmerkt door een zuigbuis met aan het einde een roterende snijkop, die de grond erodeert en vervolgens verticaal omhoog transporteert. Een sleephopperzuiger is een vaartuig dat een sleepkop over de bodem voortsleept en door onder andere hydraulische erosie zand losmaakt, waarna het door de zuigbuis omhoog getransporteerd wordt.

Van groot belang bij een sleephopperzuiger is de cyclustijd, bestaande uit een winfase en een transportfase. De transportfase is in deze opdracht geen doel van onderzoek.

Er ontstaan tijdens de winfase verliezen bij het beladen van de hopper. Na het verticale transport wordt het mengsel in de hopper van de sleephopperzuiger gestort. In de hopper worden zand en water gesepareerd doordat de korrels bezinken en het water, wanneer de hopper gevuld is met mengsel, via de uitstroom de hopper verlaat met de niet bezonken deeltjes. De grootte van dit overvloeiverlies is ondermeer afhankelijk van de samenstelling van de grond (korrelgrootte en slibgehalte), het debiet, de concentratie van het opgezogen mengsel en de vormgeving en de dimensies van het totale systeem (instroom, bassin en uitstroom).

▪ Probleemstelling

Bij fijn en/of slibhoudend zand is het hopperrendement van de huidige vast-vloeibaar separatiesystemen laag. Dit heeft als gevolg dat gedurende een bepaalde laadtijd weinig nuttige lading in de hopper achterblijft, en de efficiency van de baggeroperatie is hierdoor laag.

▪ Doelstelling

Het doel van het onderzoek is het genereren van praktische oplossingen ter verbetering van het sedimentatierendement bij het sleepzuigen van fijn en/of slibhoudend zand.

▪ Tot nu toe uitgevoerd onderzoek

In een eerste afstudeeronderzoek in 1990 is een inventarisatie gemaakt van de relevante fysische processen bij de hopperbezinking. Vervolgens is een schaalmodel ontwikkeld, waarin de processen zijn bestudeerd. Mede op basis van dit onderzoek is een aantal concrete verbeteringsvoorstellen gedaan. De modelopstelling is inmiddels ingrijpend aangepast teneinde aan de nieuwe randvoorwaarden en meetnauwkeurigheden te kunnen voldoen.

In de eerste afstudeeropdracht zijn de omgeving van de hopper en de processen die zich hierin afspelen aan de orde gekomen. Verder is een inventarisatie van bestaande en eventueel mogelijke hopperconfiguraties gemaakt. De cyclonen en lamellen separators zijn bij dit onderzoek uitgebreid aan de orde gekomen.

■ **Uit te voeren werkzaamheden**

Uitwerken en beproeven van een vijftal in de eerste afstudeeropdracht interessant en veelbelovend gebleken hopperconfiguraties. Deze vijf configuraties zullen bij twee debieten en bij twee ingaande concentraties worden beproefd. Dit brengt het totaal aantal verschillende soorten proeven op twintig.

A Uitgangspunten

- 1 Het rapport van de eerste afstudeeropdracht.
- 2 De beschikbare testfaciliteiten van de Hollandsche Aanneming Maatschappij en de Technische Universiteit Delft.
- 3 Overige relevante literatuur.

B Opdrachten

- 1 Construeren en vervaardigen van de hopperconfiguraties die beproefd zullen worden.
- 2 Beproeven van de hopperconfiguraties, uitwerken en evalueren van de proeven. Tevens dienen de verschillende configuraties onderling te worden vergeleken. Met als doel een uitspraak te kunnen doen over welk systeem in de praktijk het meest veelbelovend is.
- 3 Rapportage omtrent B1 en B2.

C Begeleiding

Uw directe begeleider voor deze opdracht is dr ir S.A. Miedema. Namens de Hollandsche Aanneming Maatschappij treedt ir H.P.B. Hokke als begeleider op. Met Uw directe begeleider dient U tweewekelijks contact te houden inzake de voortgang van het project. De beide begeleiders controleren de voortgang.

Tezamen met de begeleiders zal per twee maanden een bespreking met de hoogleraar plaatsvinden.

D Planning en rapportage

Gestreefd zal worden naar een tijdsbesteding van 520 uur (13 weken), inclusief de rapportage. De opdracht vangt aan op 3 mei 1993. De tijdsbesteding is 40 uur per week.

Een gedetailleerde planning op het G.V.-planningsformulier moet worden ingeleverd bij de begeleiding.

Nadat de opdracht voor tweederde gevorderd is, volgt een bespreking met de begeleiders en de hoogleraar ter formulering van de ingenieurs opdracht.

Het rapport mag een omvang van 75 pagina's exclusief bijlagen en listings niet te boven gaan. Het rapport vangt aan met een kopie van deze opdracht gevolgd door een inhoudelijke samenvatting van ten hoogste vijf pagina's.

Er wordt een intern-HAM-rapport gemaakt dat als basis voor de eindbeoordeling kan dienen. Op basis hiervan wordt een TU-rapport gemaakt, waarbij de HAM zich het recht voorbehoudt gevoelige HAM-bedrijfsinformatie daarin niet te laten opnemen.

Planningschema

Week	Werkzaamheden
18-20, 3 mei - 21 mei:	Vorbereiding proevenseries.
21-23, 24 mei - 11 juni:	Eerste proevenserie.
24-26, 14 juni - 2 juli:	Vorbereiding verdere proeven en uitwerking van de voorgaande proeven.
27-31, 5 juli - 6 augustus:	Tweede proevenserie en verdere uitwerking en interpretatie van de proeven

E Archivering en eigendom

Het rapport is eigendom van de Technische Universiteit Delft. Het manuscript wordt losbladig ingeleverd bij de hoogleraar, terwijl twee gebonden exemplaren worden vervaardigd voor plaatsing in de bibliotheek van de Vakgroep Transporttechnologie voor intern TUD-gebruik.

De Technische Universiteit Delft zal het rapport de eerste twee jaar na gereedkomen niet aan derden verstrekken zonder schriftelijke toestemming van de HAM.

De industriële eigendomsrechten van dit project zijn van de HAM. Publicatie zal in principe een gezamenlijke inspanning van de TUD en de HAM zijn.

F Embargo

Naast een copie van het TU-rapport voor de HAM zal ook de student een copie van dit rapport krijgen. De student en zijn begeleiders verklaren bij deze het embargo te zullen eerbiedigen en de gevoelige HAM-bedrijfsinformatie vertrouwelijk te zullen behandelen.

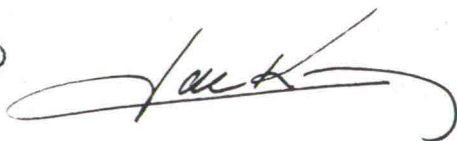
■ Voor accoord:

De student,



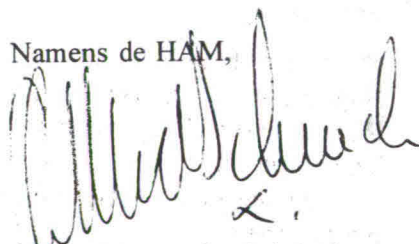
M.J.P. Meeuwissen

De hoogleraar,



Prof. ir J. de Koning

Namens de HAM,



Ir G.L.M. van der Schrieck

C.c.: Dr ir S.A. Miedema TU. Delft
Ing. J. Brouwer T.U. Delft
Hr M. Neeleman T.U. Delft
Ir H.P.B. Hokke HAM

Samenvatting

In de eerste afstudeeropdracht zijn een vijftal sedimentatiesystemen voor sleeplopperzuigers als veelbelovend naar voren gekomen. Dit leidt tot drie hopperconfiguraties die zullen worden beproefd, de referentie configuratie, schottenkerend (intermitterend) en de lamellenbezinker met flappen.

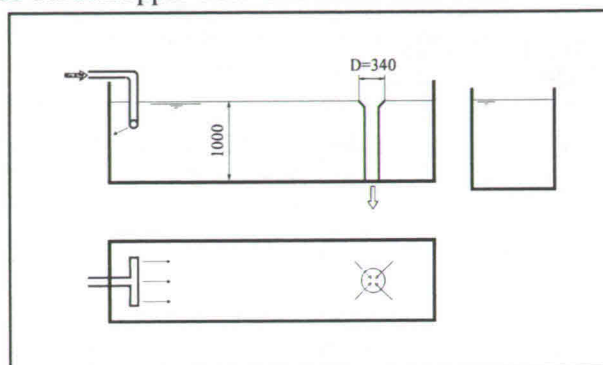
Referentie configuratie

De referentie configuratie, een voorstelling van een conventionele hopper, bestaat uit een instroom die het mengsel over de breedte van de hopper verdeelt. Op de bodem van het bezinkbassin bevindt zich een kippekooi. Het mengsel verlaat de modelhopper door een ronde uitstroom.

Bij aanvang van het laden is de modelhopper tot aan het overvloeiniveau met water gevuld. Op vier verschillende wijzen wordt beladen. Bij hoog debiet ($16 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$) en hoge dichtheid ($1,4 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$); hoog debiet en lage dichtheid ($1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$), laag debiet ($8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$) en hoge dichtheid en laag debiet en lage dichtheid.

Bij het laden met de hoge dichtheid blijkt het overvloeiverlies lager te zijn, dit gunstige effect wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat wordt aangevangen met beladen met een modelhopper vol met water. Hierdoor ontstaan grotere dichtheidstromen door de grotere instroomdichtheid, bovendien is het dichtheidsverschil groter waardoor de menglagen stabiel zijn. Tenslotte is de hopper meer gevuld op het moment dat het ingestromende mengsel de uitstroom bereikt.

Het meest interessant bleken de proeven bij de hoge dichtheid en het hoge debiet, aangezien de hopper dan relatief snel vol geraakt. Echter mede in verband met de proeven van een afstudeeronderzoek van een medestudent naar de stromingen en dichtheden in de modelhopper zijn ook bij het lage debiet en de lage dichtheid veel proeven uitgevoerd.

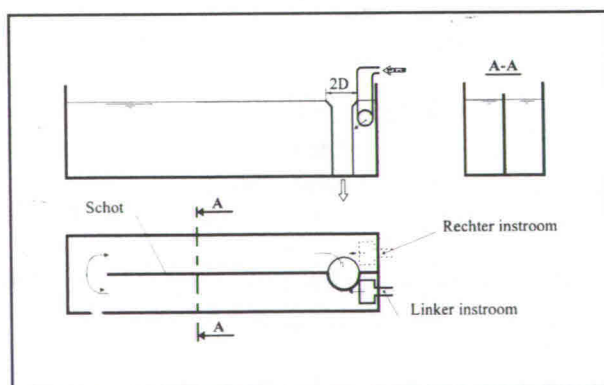


afb: Referentie configuratie

Schottenkerende configuratie

De reden voor het testen van deze opstelling ligt vooral in het feit dat onderzocht wordt in hoeverre de suspensiestroom over de bodem positief is te beïnvloeden door de stroming door de modelhopper van tijd tot tijd volledig om te keren. Een geschikte opstelling is die met een schot in het midden zodat de twee instromen en de twee uitstromen die voor het intermitterend laden vereist zijn dan aan dezelfde kant van de modelhopper kunnen worden opgesteld. Bovendien wordt een tweemaal zo grote bezinklengte en een half zo groot dwarsdoorstroomd oppervlak verkregen ten opzichte van de referentie configuratie, waardoor de suspensiestromen over de bodem beter waarneembaar worden.

Verwacht wordt dat het schottenkerend niet intermitterend laden slechter zal zijn dan het laden met de referentie configuratie, door de



afb: Schottenkerende configuratie

storende werking van de bocht die het mengsel moet maken. Het beproeven van het niet intermitterend beladen is nuttig, deze kan dienen als referentie proef om na te gaan of het intermitterend laden een positieve invloed op het beladingsproces heeft.

De schottenkerende configuratie bestaat uit een instroom over de halve breedte van de hopper. In het midden van de modelhopper is in de langsrichting een schot geplaatst. Het mengsel moet aan de ene zijde van het schot over de lengte van de hopper stromen, vervolgens stroomt het retour aan andere zijde van het schot. Aan de andere zijde van het schot bevindt zich een halve ronde overvloei, met een diameter tweemaal die van de diameter van de overvloei bij de referentie configuratie, zodat de uitstroomschil gelijk is aan die van de referentie configuratie.

Het schottenkerend intermitterend beladen bestaat uit het omdraaien van de stromingen in het beladingsproces. Op de positie van de instroom ontstaat een uitstroom en omgekeerd. De schakeltijden worden vastgesteld op een tweetal wijzen. Ten eerste wordt geschakeld om de 0,1 m bezonken zandbed verhoging. De tweede methode is het schakelen op het moment dat de suspensiestroom de op dat moment functionerende uitstroom bereikt. De tweede methode geeft problemen, omdat de suspensiestroom niet altijd visueel waarneembaar is.

Het is gebleken dat het intermitterend laden een verbetering vormt ten opzicht van het niet intermitterend laden bij de schottenkerend intermitterend beladende configuratie. De schottenkerend intermitterend belading bleek, echter niet beter dan de referentie proef. Waarschijnlijk is het gunstig een intermitterende laadwijze te construeren waarbij de referentie hopper afwisselend van links en van rechts wordt beladen, zonder keerschotten in het midden. Voor verder onderzoek is het interessant na te gaan of het op de één of andere wijze intermitterend beladen met een hopper zonder schot, bijvoorbeeld met de referentie configuratie, ook een beter resultaat geeft dan het niet intermitterend beladen.

Lamellenbezinker met flappen

De lamellenbezinker met flappen combineert het effect van lamellen met dat van flappen. In de lamellendoorgangen is de verticale bezinkafstand klein en het bezinkoppervlak van het lamellensysteem is groot. De flappen sluiten de lamellendoorgang aan de onderkant af. De flappen gaan open en laten zand door op het moment dat voldoende zand onderin de doorgang tegen de flappen drukt. Neemt de bezonken zandhoogte af, dan sluit de flap weer. Het positieve effect van de flap is dat geen water via de onderkant van de doorgang weer naar boven stroomt, dat het sedimentatieproces zou kunnen verstoren.

Het lamellenbezinkstelsel moet qua afmetingen, volume en gewicht geschikt zijn voor plaatsing in een hopper. Dit geeft enige beperkingen voor de lamellengte, de lamelbreedte, de lamelafstand, de lamelhoogte en het aantal lamellen.

Verder moet het lamellenbezinkstelsel geschikt zijn voor een bepaald debiet en een bepaald soort deeltjes.

De optimale lamelafstand voor een bepaalde lamellengte is te bepalen uit het debiet per lamellendoorgang, de korrelvalsnelheid en de korreluitschuursnelheid.

Verstopping kan optreden bij een bepaalde grootte van het zandpakket, dat zich onder in de lamellendoorgang tegen de flap bevindt, de lamelafstand te klein is, de lamel niet verticaal genoeg staat en als het waterniveauverschil te groot is waardoor de flap te veel wordt dichtgedrukt. Tussen de lamellen vormt zich een ophoping van zand, zogenaamde brugvorming, waarna meer zand zich ophoopt en de inklemming groter wordt. In de praktijk zal dit probleem niet zo groot zijn door de doorgaande stroming.

Besloten is voordat een volledig model van een lamellenbezinkstelsel wordt gebouwd, eerst een

enkele doorgang te beproeven. Deze enkele doorgang bestaat uit twee lamellen die onder een hoek worden geplaatst. Tussen deze lamellen bevindt zich de doorgang, waarin over de hele breedte mengsel wordt ingestroomd. Het mengsel stroomt in de lengte richting door de doorgang met een dusdanige snelheid dat vrijwel alle deeltjes de gelegenheid krijgen te bezinken. De uitstroming vindt plaats over een stuw, dit is een schot dat tussen de twee lamellen is geplaatst. Voor de visuele waarneming zijn de lamellen van plexiglas, zodat in deze beginfase van de experimenten de stromingen enigszins zichtbaar worden. Onder andere is de bezonken zandhoogte onderin de lamel eenvoudig te bepalen.

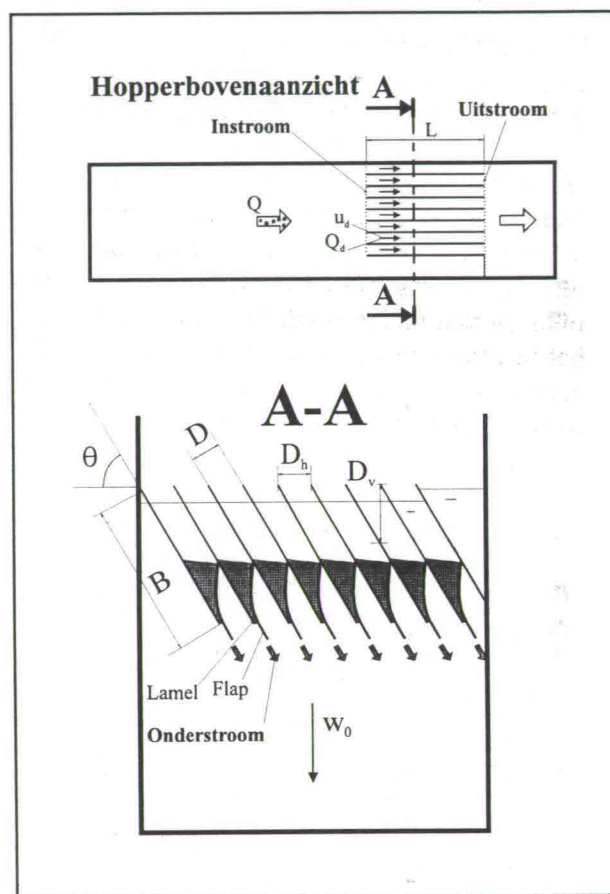
De opstelling van de lamellen doorgang is zo geconstrueerd dat een derde lamellen tussen de twee buitenste lamellen kan worden aangebracht. De lamelafstand wordt op deze wijze ongeveer gehalveerd.

Het beproeven van de enkele en de dubbele lamellendoorgang is niet eenvoudig, doordat de proefopstelling geschikt is voor en ingesteld is op debieten die ongeveer een factor tien hoger liggen, dan de debieten die bij de enkele en dubbele lamellendoorgang worden toegepast. Ombouwen van de proefopstelling ten behoeve van proeven met de doorgangen zou niet verstandig zijn, aangezien deze proeven zijn om te kijken of het lamellensysteem met flappen functioneert en om enig inzicht in het lamellenbezinkproces te krijgen. Dit gaat moeilijk bij het werken met een volledig lamellenbezinkstelsel, met meerdere doorgangen. Blijkt de lamellendoorgang naar verwachting te functioneren dan zullen proeven met een volledig lamellenbezinkstelsel worden gedaan, waarvoor het volledige debiet weer nodig is. Dit heeft tot gevolg dat uiteindelijk bij één debiet, $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ proeven zijn gedaan. De ingaande dichtheid is bij alle proeven ingesteld op ongeveer $1,25 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Gekozen is voor een drietal hoeken ten opzicht van de horizontaal van de lamellen, 45° , 60° en 90° .

De proeven waarbij de lamellen onder 90° zijn opgesteld en feitelijk niet als lamellen functioneren gaven bij een instroomdichtheid van $1,25 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, gaven een lamefficiency van rond de 75 %, over de lamellendoorgang beschouwd. Dit houdt in dat 75 % van het nuttige materiaal, zand, dat de lamellendoorgang via de instroom betreedt via de onderstroom in de hopper komt. En de andere 25 % als overloeverlies de doorgang via de uitstroom verlaat.

Het plaatsen van de lamellen onder de ander twee hoeken gaf een lamefficiency van rond de 96 %. De invloed van de twee verschillende lamelafstanden en de twee hoeken op dit overloeverlies is niet uit de proeven af te leiden. De verschillen zijn niet significant, waarschijnlijk door de zeer lage dichtheden die de dichtheid van zuiver water benaderen.

De invloed van de flappen op het overloeverlies kan niet met de lamellendoorgang worden aangetoond. Bij een proef waarbij de flappen werden opgehouden, blijkt het instromende mengsel onmiddellijk naar de bodem van de modelhopper te zakken door dichtheidsstroming. Water uit de modelhopper met een lage dichtheid stroomt aan de onderstroomzijde de lamellendoorgang in en vormt het uitstromende mengsel. Het uitstromende mengsel vormt geen indicatie voor de grootte van het overloeverlies. In een volledig lamellensysteem, met meerdere doorgangen, zal juist mengsel met een hoge dichtheid onder de lamellendoorgangen aanwezig zijn.



afb: Lamellenbezinker met flappen

Als dit aan de uitstroomzijde naar boven zou stromen geeft dit hoge overvloeiverliezen. Ook zal bij een volledig lamellenbezinkstelsel het instromende mengsel niet als een dichtheidsstroom neerwaarts stromen, door wederom de grote dichtheid van het mengsel onderin de hopper.

Inhoud

Opdrachtsomschrijving

Samenvatting	i
Inleiding	1
1 Faciliteiten	3
1.1 Geometrie	3
1.2 Gegevensverwerking	5
2 Proevenprogramma	7
2.1 De modelhopperconfiguraties	7
2.2 Variatie van de proeven	8
2.3 Vastleggen van metingen	9
2.4 Resultaten en interpretatie	10
3 Referentie proef	13
3.1 Ontwerp	13
3.2 Proefuitvoering	14
3.3 Resultaten en interpretatie	15
4 Schottenkerend	17
4.1 Ontwerp	17
4.2 Proefuitvoering	18
4.3 Resultaten en interpretatie	19

5	Lamellenbezinker met flappen	23
5.1	Ontwerp	25
5.1.1	Lamellensysteem volgens het model van Camp	25
5.1.2	Stromingen	32
5.1.3	Verstopping van zandpakket tussen de lamellen	34
5.1.4	Stijfheid en sterkte	40
5.2	Proefuitvoering	42
5.2.1	Ontwerp van lamellendoorgang met flap	42
5.2.2	Beproeven van de lamellendoorgang met flap	43
5.3	Resultaten en interpretatie	45
5.3.1	Lamelwerking	46
5.3.2	Flapwerking	47
5.3.3	Combinatie lamel en flap	47
6	Resultaten en interpretatie	49
	Conclusies	53
	Referenties	55
	Symbolen	57
	Bijlage A: Overvloeiverlies en laadtijd	
	Bijlage B: Ontwerp van Lamellenbezinker	
	Bijlage C: Proeven met Lamellenbezinker	
	Bijlage D: Foto's	
	Bijlage E: Laadproeven	

Inleiding

Sleephopperzuigers transporteren grote hoeveelheden materiaal van de bodem van de zee, rivieren of havens. Dit bodemmateriaal wordt losgemaakt door de sleepkop, waarna het vermengd met water door de zuigbuis omhoog naar de hopper wordt verpompt. Gezien de grens aan de ruimte in de hopper, is het belangrijk dat deze met zo veel mogelijk met nuttige lading, slib, zand en rots wordt gevuld. Gestreefd wordt een maximale hoeveelheid water dat het materiaal bij het verticale transport meeneemt, uit de hopper af te voeren. Door het materiaal goed te laten sedimenteren wordt er voor gezorgd dat het water dat door het overvloeisysteem wordt afgevoerd weinig nuttige lading meeneemt. Na het horizontale varende transport naar de plaats van bestemming moet het materiaal uit de hopper worden afgevoerd. Veelal zal het materiaal, voor het kan worden afgevoerd, weer door toevoeging van water vloeibaar moeten worden gemaakt. Het is belangrijk dat het sedimentatiesysteem bijvoorbeeld dit afvoeren van het mengsel op de plaats van bestemming niet te zeer bemoeilijkt. Anders wordt de rendementsverbetering, die door het betere beladen ontstaat, weer teniet gedaan door losproblemen.

Dit rapport beschrijft het ontwerp en de beproeving van drie hopperconfiguraties, zogenaamde sedimentatiesystemen die voortkomen uit de vijf veelbelovende hopperconfiguraties uit de eerste afstudeeropdracht. Zoals in de volgende alinea wordt beschreven moeten deze systemen niet alleen gedurende het laadproces een verbetering opleveren, doch ook in een breder verband de werking van de sleephopperzuiger positief beïnvloeden.

De eerste hopperconfiguratie is de referentie configuratie, een model van conventionele hoppers, aan de hand van de resultaten van de proeven hiermee zijn de overige configuraties te vergelijken. Deze configuratie zal worden beproefd bij twee debieten en twee dichtheden, dit geeft vier verschillende proeven.

De tweede hopperconfiguratie is de schottenkerende configuratie. Hierbij wordt over de lengte een schot in het hoppermodel geplaatst, die de bezinklengte verdubbeld. Feitelijk zal deze opstelling waarschijnlijk geen verbetering zijn ten opzichte van de referentie configuratie, de bezinking wordt verslechterd doordat het mengsel de bocht om moet. Echter deze opstelling is geschikt voor het beproeven van intermitterend beladen. De opstelling voor het intermitterend laden is zo gemaakt dat alle stromingen kunnen worden omgedraaid, op het moment dat een suspensiestroom bij de uitstroom ontstaat.

De derde hopperconfiguratie is de lamellenbezinker met flappen. Hiervan wordt een enkele en een dubbele lamellendoorgang beproefd, zodat als deze blijkt te functioneren aan de hand van de resultaten hiermee uiteindelijk een volledig model van een lamellenbezinkstelsel kan worden beproefd.

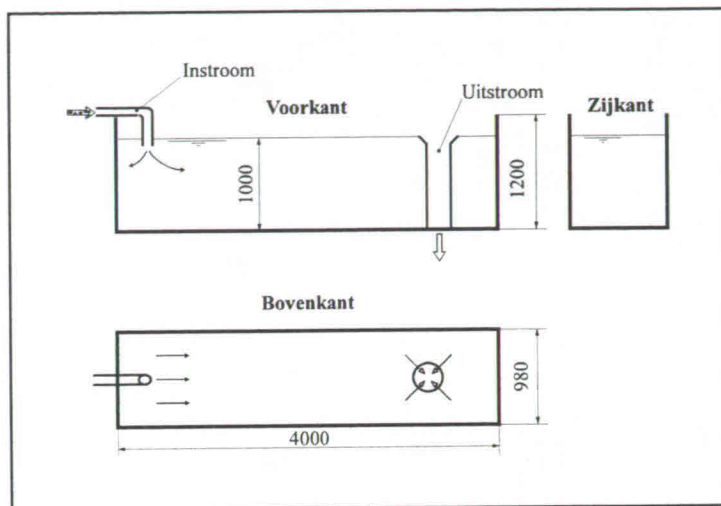
1 Faciliteiten

In dit hoofdstuk worden de faciliteiten op de Merwelanden ter beproeving van modelhoppersystemen globaal beschreven, voor een uitgebreidere beschrijving wordt verwezen naar een stagerapport [MEEUWISSEN]. De opstelling wordt weergegeven op foto D1 in de bijlage. Linksboven op deze foto staat de modelhopper en op de voorgrond staat de mengselbak en de waterbak.

1.1 Geometrie

Modelhopper

De hoofdafmetingen van de modelhopper staan in de nevenstaande afbeelding weergegeven. De zijden van de modelhopper bestaan uit glas, zodat de processen die zich af spelen visueel waarneembaar zijn.



afb. 1.1: Modelhopperafmetingen met maten in mm's

Materiaalstroom

In de mengselbak ontstaat een gebied op een bepaalde hoogte, waar het mengsel een dichtheid heeft gelijk aan de gewenste instroomdichtheid. Wanneer de zuigmond een mengsel met een te hoge dichtheid zuigt

wordt het mengsel verdund door toevoeging van water aan het systeem met behulp van een jetsysteem. Als de dichtheid te laag is dan kan deze op de gewenste waarde worden gesteld door het laten dalen van de zuigmond naar een gebied met een mengsel met een hogere dichtheid.

Het pompsysteem dat het instromende mengsel van de mengselbak naar de modelhopper transporteert is geschikt voor en afgeregeld op debieten van $8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ tot $16 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ en dichtheden tot ruim $1,4 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Materiaal

In afbeelding 1.2 staat de zeefcurve van het zand met de belangrijkste specifieke gegevens weergegeven.

Zeefcurve

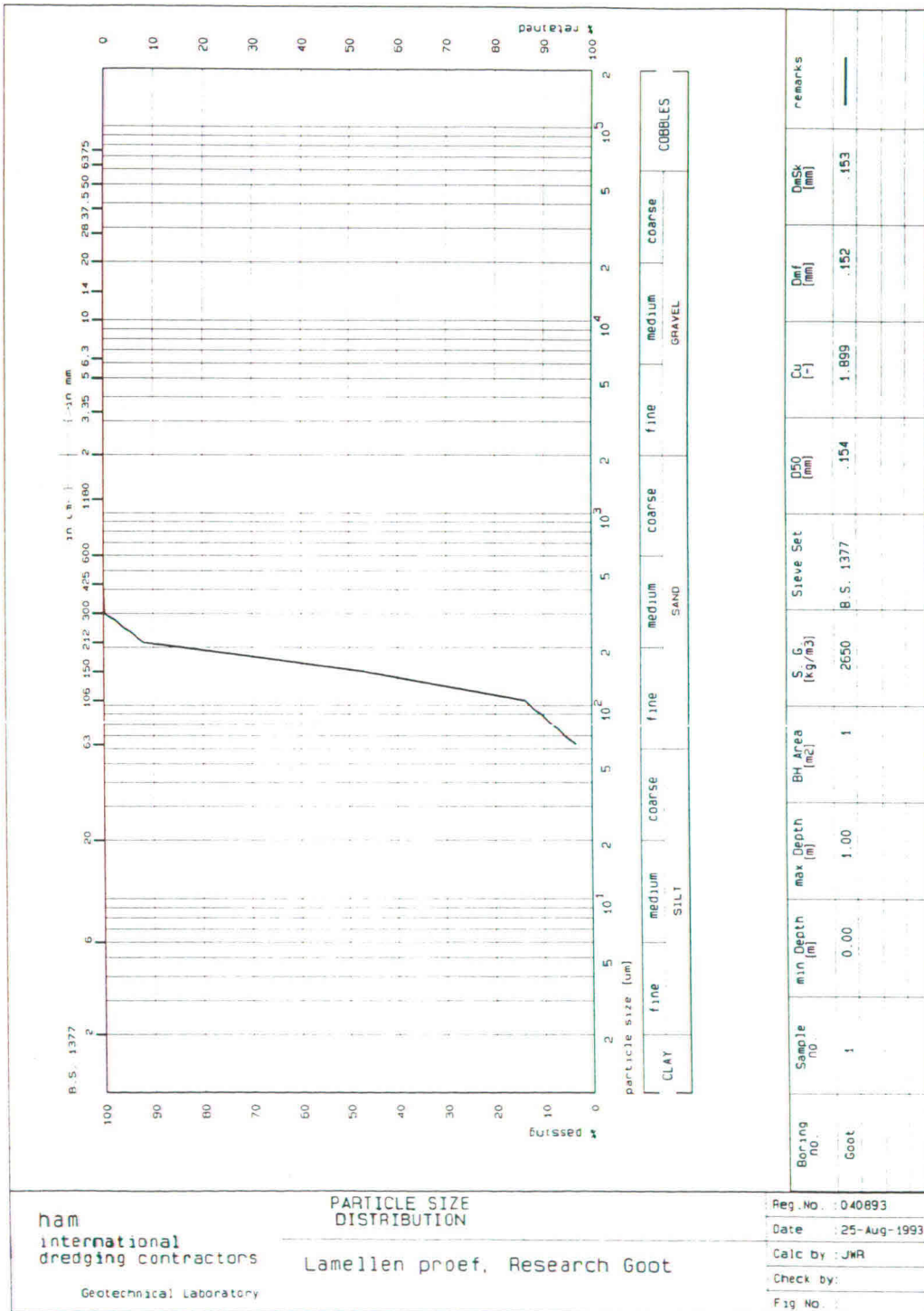
In de grafiek met de zeefcurve is de verdeling van de diverse korreldiameters af te lezen. De gemiddelde diameter, $d_{50} \approx 160 \mu\text{m}$, is hieruit af te lezen. Bij een eerdere proevenserie gedurende zomer 1992 was de gemiddelde diameter ongeveer $110 \mu\text{m}$.

Doorlatendheid

Voor de doorlatendheid van het losgepakte materiaal gedurende de proevenserie in zomer 1992, dat een poriëngetal van 0,44 had, bedroeg de doorlatendheid $7,4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$. Voor een vaste pakking, met een poriëngetal van 0,39, bedroeg de doorlatendheid van $2,4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$.

Soortelijke massa

De soortelijke massa van het zand, het kwarts, bedraagt $2,65 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.



ham
international
dredging contractors
Geotechnical Laboratory

PARTICLE SIZE
DISTRIBUTION

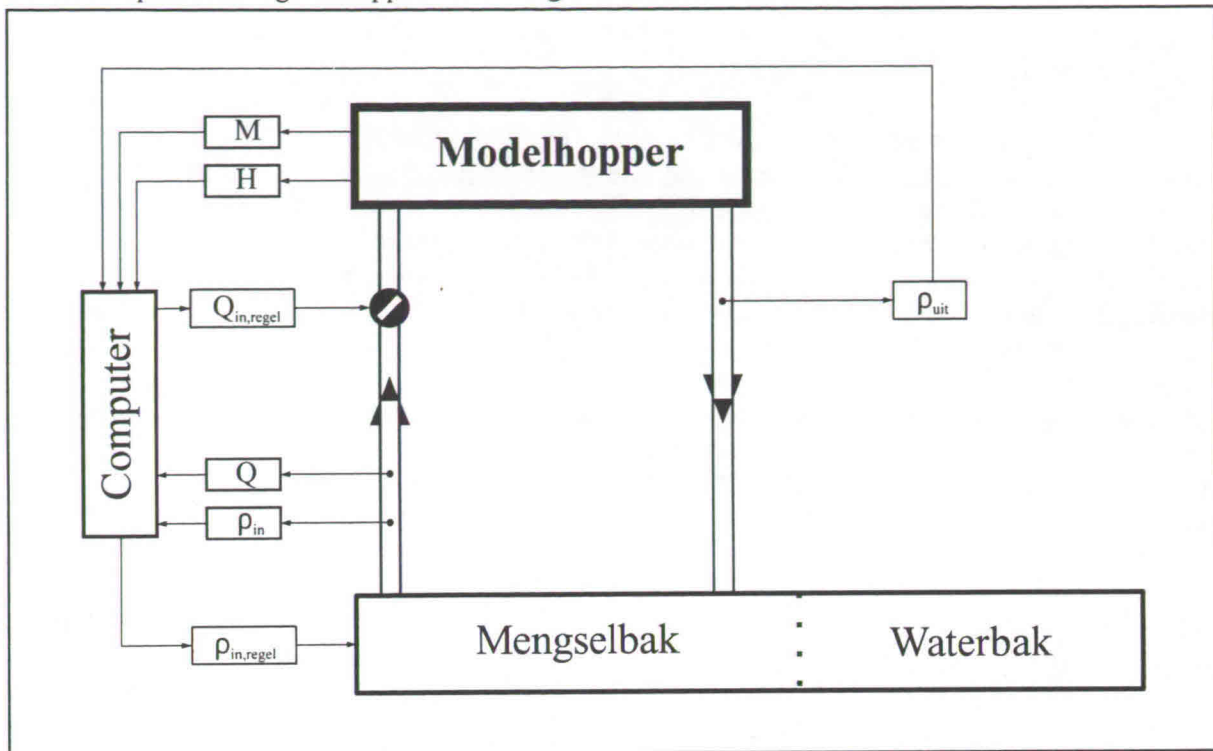
Lamellen proef, Research Goot

Reg. No. : 040893
Date : 25-Aug-1993
Calc by : JWR
Check by :
Fig No. :

afb. 1.2: Zeefkromme met specifieke gegevens van het materiaal

1.2 Gegevensverwerking

Het onderstaande schema geeft de signaalstromen en materiaalstromen weer. In deze paragraaf zullen de specifieke eigenschappen van de signalen aan de orde komen.



afb. 1.3: Stromen van signalen en materialen in de proefopstelling

Onafhankelijke variabelen

Het ingaande debiet en de ingaande dichtheid zijn de onafhankelijke variabelen in de proefopstelling. Door regeling aan de hand van gemeten signalen, houdt de computer deze variabelen zo veel mogelijk op de vooraf ingestelde waarde.

Afhankelijke variabelen

Dit zijn de uitgaande concentratie, het mengselniveau en de massa van de modelhopper. Deze drie afhankelijke variabelen zijn voor het onderzoek het meest van belang.

Overige onafhankelijke variabelen

De korrelgrootte en de temperatuur zijn de overige onafhankelijke variabelen. Deze hebben naar gedurende de proeven een veel geringere invloed op de proeven dan de eerder genoemde onafhankelijke variabelen.

De korrelgrootte van de instroom aan het einde van een proef zal kleiner zijn dan aan het begin. Dit komt doordat de fijne fractie minder snel bezinkt en dus minder snel in de modelhopper zal achterblijven.

Een temperatuurstijging van 0 tot 30°, doet de viscositeit met een factor vier afnemen. Dit maakt de proeven temperatuurafhankelijk. Gedurende een proef zal de temperatuur niet veel veranderen, echter er zal verschil kunnen zijn tussen proeven in de zomer en winter.

Dichtheden

De dichtheid wordt op drie plaatsen bepaald. De materiaalstroom van de mengselbak naar de modelhopper is over een zogenaamde bochtmeter (foto D2) geplaatst. De andere twee meetpunten bevinden zich in de uitstroom. Een bronmeter is aan een aftakking van de uitstroom geplaatst. Deze bepaalt door middel van de doorlatendheid van het mengsel voor een radioactieve bundel de concentratie van de deeltjes in de uitstroom. Het andere meetpunt in de uitstroom bestaat uit het handmatige nemen van monsters met behulp van maatbekers in de uitstroom. Van deze monsters wordt het volume en de massa bepaald, waar de dichtheid van het mengsel uit volgt.

De ijking van de weegbrug vindt plaats door middel van de handmatige monsternamen voor en na de proef tijdens het rondpompen. Tijdens het rondpompen zijn de instroom en de uitstroom kortgesloten, zodat de weegbrug en de handmatige monsternamen betrekking hebben op dezelfde mengsels. Het ijken van de bronmeter gebeurt met behulp van de handmatige monsternamen gedurende de hele proef. Dit kan doordat zowel de bronmeter als de handmatige monsters in de uitstroom zijn geplaatst.

De dichtheid van de instroom dient gedurende een proef een constante waarde te hebben. Aan de hand van de meting van de weegbrug wordt de afwijking van de instroomdichtheid ten opzichte van de gewenste waarde afgeleid. Deze afwijking van de instroomdichtheid bepaald of de zuigmond handmatig hoger dan wel lager in de mengbak dient te worden geplaatst. De dichtheid van het mengsel in de mengbak neemt van boven naar onder toe.

Is de dichtheid van het ingaande mengsel te hoog dan kan deze worden bijgesteld door toevoeging van water met behulp van een jetpomp. Een PID-regeling bepaald de hoeveelheid jetwater die wordt toegevoegd.

Debiet

Net als de dichtheid van de instroom wordt ook het instroomdebiet gedurende een proef op een constante waarde gehouden. Het debiet wordt in de instroom bepaald, dit is een functie van de door snelheidsmeting van het mengsel ter hoogte van de bochtmeter en de dwarsdoorsnede. Aan de hand van het instroomdebiet wordt wederom met behulp van een PID-regeling het debiet door het veranderen van een afsluiter in de instroom vlak voor de modelhopper geregeld.

Bij het beladen wordt aangevangen met een met water tot aan de overvloei gevulde modelhopper. Dit betekent dat gezien de continuïteit van volumina het instromende debiet en het uitstromende debiet gelijk zijn.

Massa van de modelhopper

De massabepaling van de modelhopper gebeurt aan de hand van een viertal drukdozen die onder de vier hoekpunten van de bodem zijn geplaatst. Voor verdere verwerking van de data wordt alleen de som van de meetwaarden van de drukdozen opgeslagen.

Mengselniveau

Het mengselniveau wordt gemeten met een capacatieve niveaumeter. Deze meter werkt volgens het principe van elektrische capaciteit. Er staat een elektrode in de rechter onderhoek van de modelhopper (afb. 1.2). Deze elektrode en de hopperwand vormen samen de 'platen' van de condensator. Door verandering van de hoeveelheid van het medium, mengsel of lucht, tussen de elektrode en de hopperwand, verandert de capaciteit. Deze capaciteitsverandering is te meten en is een maat voor het niveau in de modelhopper.

2 Proevenprogramma

2.1 De modelhopperconfiguraties

De modelhopperconfiguraties worden onderverdeeld in drie configuraties. Ten eerste de referentie configuratie, die een eenvoudig hoppersysteem moet voorstellen, waaraan de nieuw geteste systemen kunnen worden getoetst.

Als tweede wordt de schottenkerende configuratie behandeld. Dit is een combinatie van de niet dan wel, wel intermitterende uitvoering.

De derde en laatste configuratie is de lamellenbezinker met flappen, die een combinatie vormt van het lamellenbezinkstelsel en het flappensysteem. Deze twee systemen zouden aanvankelijk afzonderlijk worden getest.

Referentie configuratie

De referentie configuratie (afb. 3.1) dient ter vergelijking van de twee andere hoppersystemen, hiermee zijn de andere configuraties te vergelijken. De instroom bestaat uit een horizontaal in de breedte geplaatste pijp, die het mengsel goed over de breedte verdeelt. De pijp bevindt net onder het uitstroomniveau. De modelhopper is verder een rechthoekige bak, met een kippekooi op de bodem. De uitstroom bestaat uit een schotelvormige overvloei, die niet verdrongen wordt.

Schottenkerende configuratie

De schottenkerende configuratie (afb. 4.1) bestaat uit een plaat die verticaal in het midden over de lengte van de modelhopper is geplaatst. Het mengsel stroomt aan de ene kant van het schot de bak in door een sproeier drie half zo breed is als de sproeier dan bij de referentie opstelling.

Het stroomt de modelhopper uit over de halve omtrek van een ronde uitstroom, die een twee maal zo grote diameter heeft dan de referentie hopper. Hierdoor is de uitstroomblijb bij schottenkerend gelijk aan die bij de referentie hopper. Waardoor de schil bij de uitstroom in beide opstellingen even dik is en de uitstroomsnelheden en dus de uitschuring gelijk zijn.

De proeven worden tevens intermitterend uitgevoerd, ten behoeve hiervan is de instroom dubbel uitgevoerd en is de uitstroom steeds slechts aan een zijde open. Het mengsel stroomt dan door de instroom aan de ene zijde de modelhopper in en aan de andere zijde langs de ronde uitstroom eruit. Dit betekent dat het mengsel net als bij het niet intermitterend schottenkerend beladen altijd een zo lang mogelijke weg af moet leggen.

Lamellenbezinker met flappen configuratie

De lamellenbezinker met flappen configuratie (afb. 5.1) is bedoeld om inzicht te krijgen in de verbetering van een hoppersysteem door het toepassen van lamellen, het toepassen van flappen of een combinatie van deze eerste twee. Gekozen is voor het vervaardigen van de combinatie van deze twee. Het belangrijk dat onder aan de lamellendoorgangen flappen zijn geplaatst, deze worden door drukverschil door het waterniveau dichtgedrukt en laten bezonken zand door op het moment dat voldoende zand onder in de doorgang langs de onderlamel is neergedaald. Als geen flappen zouden worden toegepast dan ontstaat een stroming van onder het lamellensysteem door de lamellen naar boven. Deze stroming neemt zand deeltjes die onder uit het lamellensysteem neerdalen en op de onderlamel neergedaalde deeltjes weer meer omhoog, door deze op te wervelen en mee te slepen.

Deze opstelling kan tevens worden gebruikt om de afzonderlijke effecten te bekijken. Door de lamellen loodrecht op de horizontaal te plaatsen wordt het lamellenbezinkeffect teniet gedaan en kan de flapwerking worden getest. Tevens kan door het openzetten van de flap onderaan de lamellendoorgang de werking van de flap worden uitgeschakeld.

2.2 Variatie van de proeven

Referentie configuratie en schottenkerend

Er wordt aangevangen met beladen van de modelhopper als de bak tot aan het overvloeiniveau is gevuld met leidingwater. Bij belading met een hogere dichtheid zal hierdoor het overvloeiverlies gunstiger zijn dan bij belading met een lagere dichtheid.

Op vier verschillende wijzen wordt beladen. Bij hoog debiet ($16 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$) en hoge dichtheid ($1,4 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$); hoog debiet en lage dichtheid ($1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$), laag debiet ($8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$) en hoge dichtheid en laag debiet en lage dichtheid. Het meest interessant zijn de proeven bij de hoge dichtheid en het hoge debiet, aangezien de hopper dan relatief snel vol raakt

De schottenkerend proeven worden intermitterend en niet-intermitterend uitgevoerd, bij het intermitterend beproeven kunnen de omschakeltijden op diverse wijzen worden bepaald. De bedoeling is dat omgeschakeld wordt op het moment dat de suspensiestroom de overvloed heeft bereikt.

Lamellenbezinker met flappen

De lamellenbezinker met flappen moet in eerste instantie worden getest of het opstellen van de lamellen onder een hoek werkt en of het principe van het bevestigen van de flap een verbetering van het bezinkproces oplevert. De lamellendoorgang wordt beproefd bij twee verschillende lamelafstanden.

Aanvankelijk was het de bedoeling de lamellenbezinker te beproeven bij twee debieten ($0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ en $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$), vier ingaande dichtheden ($1,1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, $1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, $1,3 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ en $1,4 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$), twee lamelafstanden ($2 \times 10 \text{ mm}$ en 25 mm) en twee lamelhoeken (45° en 60°). Gedurende de proeven is gebleken dat vooral het variëren van het debiet niet eenvoudig is. De bedoeling was het debiet in te stellen door het knijpen van afsluiters. Uiteindelijk werd besloten slechts bij één debiet proeven te doen. Ook bij deze wijze van proefneming bleek het niet eenvoudig dit debiet bij de verschillende proeven hetzelfde te houden. Het aantal proeven zou in eerste instantie 32 bedragen.

De proeven zijn tenslotte gedaan bij één debiet ($0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$), één ingaande dichtheid ($1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$), de twee eerder vermelde lamelafstanden en drie lamelhoeken (45° , 60° en 90°). Dit brengt het aantal verschillende proeven op zes. De ene ingaande dichtheid is gekozen aangezien het veranderen van de ingaande dichtheid problemen met de constantheid van het debiet gaf, waardoor de proeven langer duurden dan verwacht. De extra lamelhoek van 90° is bedoeld om het effect van de lamellen te testen aangezien bij deze verticale stand de lamellen niet als lamellenbezinker behoort te werken.

De lamellenbezinker zal tevens met open flappen worden beproefd.

2.3 Vastleggen van de metingen

Referentie en schottenkerende proeven

Bij de referentie en de schottenkerende proeven wordt door de computer om de circa twee seconde een zestal signalen vastgelegd:

- tijd, t
- totale massa, M
- debiet, Q
- instroomdichtheid, ρ_i
- uitstroomdichtheid, ρ_u
- niveau, h

Voor het uitwerken van de proeven zal gebruik worden gemaakt van de tijd, de beide dichtdeden en het debiet. De meetapparatuur voor de dichtdeden wordt zoals in het vorige hoofdstuk aan de orde kwam gedurende iedere proef geijkt.

De meetwaarden van de totale massa en het niveau zullen bij het uitwerken van de proeven niet worden gebruikt. Wel zijn deze waarden tezamen met de waarden voor het debiet, de ingaande dichtheid en de uitgaande dichtheid in de grafieken in bijlage E terug te vinden als functie van de tijd. Het totale massaverloop geeft een indicatie van het aan de modelhopper toegevoegde zand. Echter bevindt zich een schil boven het overvloeiniveau die bij de hoppermassa wordt meegeteld. Het totale massaverloop zal moeten worden gecorrigeerd met het niveau in de modelhopper om informatie te krijgen over het toegevoegde zand.

De niveaumeter geeft geen juiste indicatie voor het niveau in de bak en met name bij het schottenkerend (vooral bij intermitterend) is deze meting niet bepaald representatief voor het gemiddelde niveau in de modelhopper. Aldus wordt behalve de niveaumeting ook de massameting niet voor de uitwerking van de proeven gebruikt.

IJkkrommen staan tevens in bijlage E, als nauwkeurigheidcheck ten behoeve van de dichtheidsmeters [MEEUWISSEN, STAGERAPPORT].

Uit de opgeslagen gegevens volgen dan:

■ Laadtijd

Vanzelfsprekend is het van belang het verloop van de zandtoename tegen de tijd te kennen.

■ Nuttige lading

De nuttige lading is gezien het feit dat met een volle modelhopper wordt beladen gelijk aan de massatoename. Deze massatoename wordt berekend uit het debiet en de dichtdeden. Dit heeft als bijkomend voordeel, dat het niet uitmaakt of er personen of voorwerpen op de modelhopper plaatsnemen of weggaan. De nuttige lading [MEEUWISSEN, STAGERAPPORT: 18] wordt als volgt berekend:

$$M_{\text{nut}}(t) = \int_0^t Q_i \cdot (\rho_i - \rho_u) \cdot dt \quad (2.1)$$

■ Overvloeiverlies

Het overvloeiverlies is de hoeveelheid nuttige massa die de modelhopper uitstroomt gedeeld door de hoeveelheid nuttige massa die de hopper instroomt. Dit kan worden berekend met de volgende vergelijking [MEEUWISSEN, STAGERAPPORT: 17]:

$$OV = \frac{\rho_u - \rho_i}{\rho_i - \rho_u} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

OV is dus negatief?

■ Beladingsnelheid

Dit is de toename van de hoeveelheid nuttige lading van de modelhopper per tijdseenheid. Dit wordt als volgt berekend:

$$BS = Q \cdot (\rho_i - \rho_u) \quad (2.3)$$

2.4 Resultaten en interpretatie

Referentie configuratie en schottenkerend

De resultaten van de referentie configuratie en schottenkerend staan in bijlage A. Deze bijlage vangt aan met een overzichtstabel van alle proeven. In de linkerzijde van de eerste kolom staan de proefcodes, de eerste letter is een H of een L. Een H duidt het hoge debiet ($16 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$) aan en een L het lage ($8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$). De tweede letter geeft op dezelfde wijze met H de hoge dichtheid ($1,4 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$) en met L de lage dichtheid ($1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$) aan. De rechterzijde van de eerste kolom geeft de datumcode weer.

In de overige kolommen van de overzichtstabel worden de maximale lading, de gemiddelde instroomdichtheid, de gemiddelde dichtheid tot 50 % beladingsgraad en de tijd tot aan 50 % beladingsgraad weergegeven. Uit deze gegevens kan worden afgeleid of een bepaalde proef aan de gewenste instroomdichtheid voldoet. Met name bij de hoge dichtheid proeven wordt de dichtheid aan het eind van de proef niet meer gehaald, echter tot aan 50 % beladingsgraad is de dichtheid (gemiddeld) wel de gewenste waarde. Indien nadere gegevens omtrent het verloop van een proef van belang zijn, kunnen deze in bijlage E worden gevonden. In bijlage E zijn de vijf meetsignalen tegen de tijd en de ijklijnen van de dichtheidsmetingen grafisch weergegeven.

Bijlage A bevat zes grafieken, waarvan de eerste drie (pagina A2 t/m A4) de helft van het bereik over de verticale as van het bereik van de laatste drie (pagina A5 t/m A7) weergegeven. De eerste grafiek op pagina A2 geeft de laadtijd tot beladingsgraad weer, de tweede op pagina A3, het overvloeiverlies gemiddeld tot aan een bepaalde beladingsgraad en de derde het overvloeiverlies bij een bepaalde beladingsgraad. De weergaven van de grafieken gebeurt tegen de beladingsgraad op de horizontale as.

De curven van de configuraties worden zoveel mogelijk met dezelfde soort kleuren weergegeven. De referentie proeven met rood, roze en geel, de schottenkerend proeven met groen en de schottenkerend intermitterend proeven met licht en donker blauw. Het hoge debiet wordt in de curven aangeduid met de aanwezigheid van symbolen en de hoge dichtheid met de doorgetrokken lijnen.

Lamellenbezinker met flappen

De resultaten van de lamellenbezinker met flappen staan in bijlage C. Van iedere proef is een tabel gemaakt (bijvoorbeeld tab. C1) die wordt aangeduid met de lamelhoek en de lamelafstand. Uit deze tabel is voor zes momenten gedurende het stationaire lamellendoorgang bezinkproces, de uitgaande dichtheid en het debiet op dat moment bepaald. Monsters met de maatbekers aangeduid met bijvoorbeeld A1 en A2 zijn tegelijkertijd genomen. De dichtheden van de in totaal twaalf monsters per proef staan in de tabel.

Vlak voor en vlak na het nemen van een tweetal monsters wordt het debiet van de uitgaande stroom bepaald door middel van de vultijd van een emmer met een inhoud van $19 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$. De vultijden zijn tevens in de tabel te vinden.

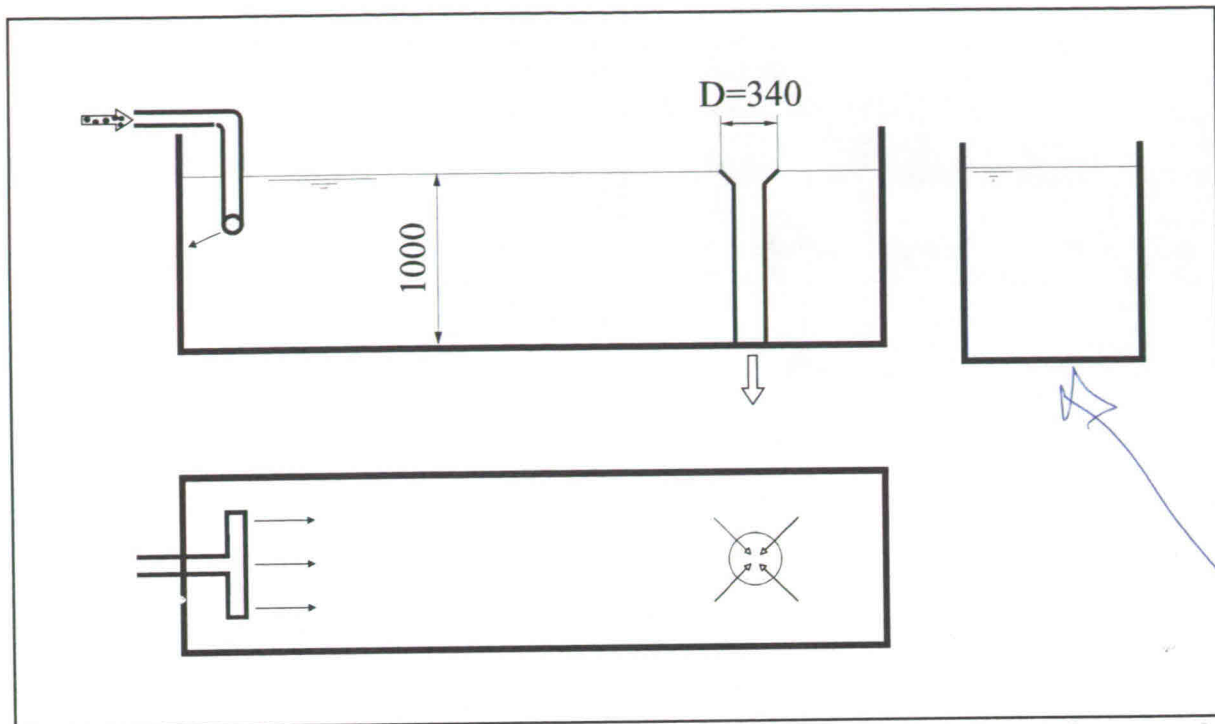
Bij een aantal proeven staat een extra tabel (tab. C2) met daarin gegevens over de grote van de ingaande dichtheid, gemeten voor de proef. De ingaande dichtheid werd door middel van monsters bepaald, aangezien de ijkwaarde van de computer enigszins af bleek te wijken. Het verschil tussen de waarde ingesteld op de computer en de werkelijke waarde blijkt uit de grafiek in afbeelding C3, waarin is te zien dat een dichtheid van $1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ op de computer in werkelijkheid $1,25 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ bleek te zijn. Het setpoint was 4 % hoger dan de gewenste waarde. Deze ijkingsproef voor de bochtmeter is na afloop van de proeven gedaan, maar geldt waarschijnlijk voor het merendeel van de proeven met de lamellendoorgang. Bij de proeven voor de lamellendoorgang, de proeven met de referentie configuratie, was een soortgelijke afwijking geconstateerd.

Een overzicht van de gemeten dichtheden van het uit de doorgang stromende mengsel van de verschillende proeven wordt weergegeven in twee grafieken. De eerste grafiek bevat de gegevens van de dubbele doorgang, lamelafstand is $2 \times 10 \text{ mm}$ en de tweede die van de enkele doorgang, lamelafstand is 25 mm . Afbeelding C1 is de eerste grafiek, de uitgaande dichtheden zijn uitgezet tegen het gemiddelde van het debiet voor en na het nemen van de dichtheidsmonsters.

De vet gedrukte symbolen geven aan dat het debiet tamelijk constant was gedurende het nemen van de monsters. Deze constantheid blijkt uit de tabellen waarin de vultijd van de emmer voor en na de monsters kleiner of gelijk aan één seconde moet zijn. Tevens zijn de rijen van die maatbekers waarvoor dit geldt in de tabel cursief weergegeven.

3 Referentie configuratie

De referentie configuratie is een eenvoudige hopper, waarmee de andere te beproeven configuraties kunnen worden vergeleken.



afb. 3.1: Referentie hoppermodel

3.1 Ontwerp

De afmetingen van de referentie configuratie (afb. 3.1) zijn een één op tien verscaling van de hopper van de HAM 309. De instroom bestaat uit een sproei­pijp die horizontaal in de breedte onder het overvloeiniveau is opgesteld. Het basin is een vierkante bak met onderin een kippekooi. In het basin is een installatie opgesteld ten behoeve van de proeven van een ander afstudeeronderzoek. De instrumenten van deze installatie bepalen de dichtheid en de snelheden in twee loodrecht op elkaar staande horizontale richtingen op diverse plaatsen in de hopper. Bij aanvang van de beladingen is de hopper tot aan het overvloeiniveau met leidingwater gevuld. Verder is het basin leeg. De uitstroom bestaat uit een niet verdrongen ronde uitstroom, die op enige afstanden van de zijwanden is opgesteld.

3.2 Proefuitvoering

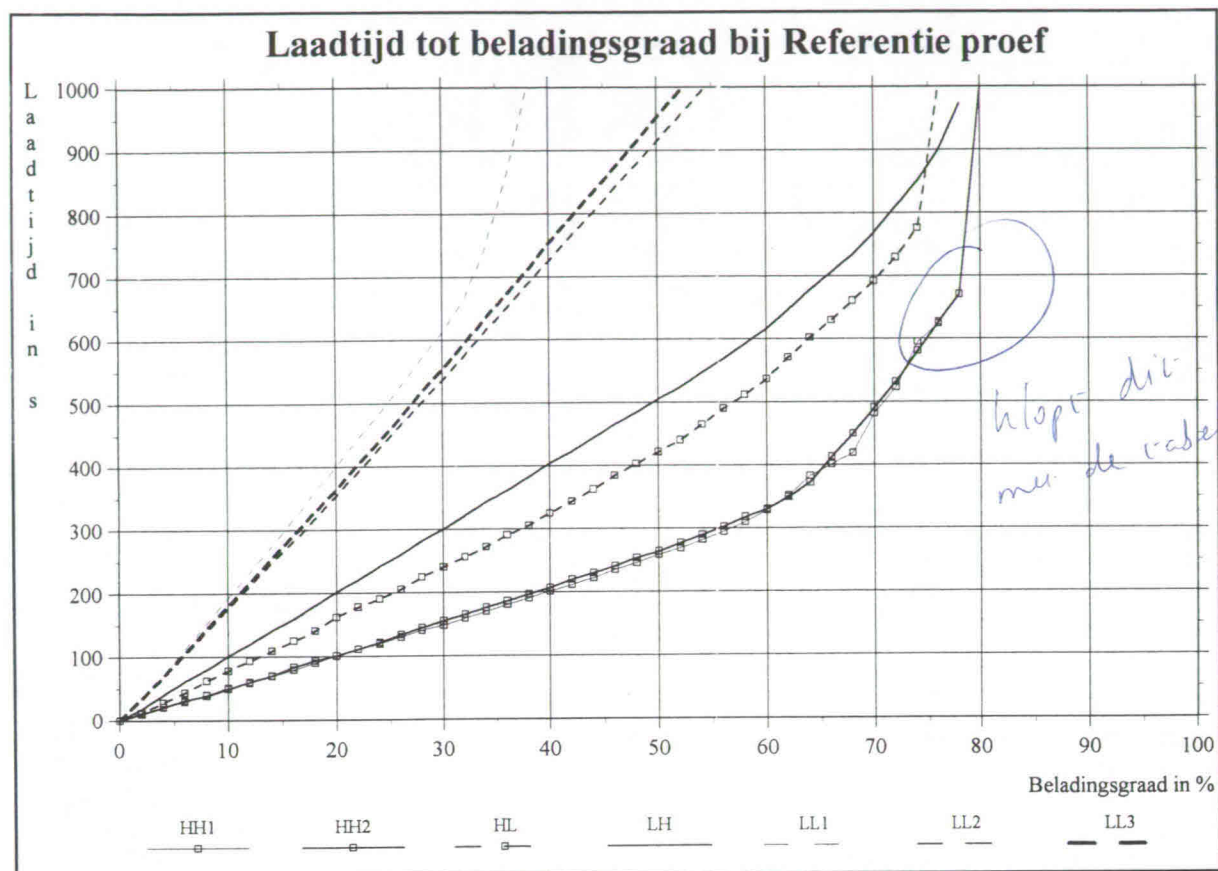
Bij iedere proef wordt aangevangen met laden met een volledig met leidingwater gevulde modelhopper. Op de bodem is tussen de schotten van de kippekooi altijd een kleine hoeveelheid zand aanwezig. Gedurende het laden wordt getracht het debiet, het ingaande en uitgaande debiet zijn gelijk doordat met een volle bak modelhopper wordt aangevangen met beladen, en de ingaande dichtheid zo constant mogelijk te houden. Het debiet blijft tamelijk constant, echter de ingaande dichtheid kan enigszins schommelen doordat het zand in de mengselbak opraakt of door het instorten van taluds in de mengselbak. 2.12

De proef wordt beëindigd op het moment dat de massa van de modelhopper niet meer of nog maar weinig toeneemt of op het moment dat de ingaande dichtheid te veel afneemt door het opraken van het zand in de mengselbak.

3.3 Resultaten en interpretatie

De resultaten van de referentie proeven staan in de grafieken van afbeeldingen 3.2 en 3.3. De aanduiding HH betekent hoog debiet en hoge dichtheid, HL hoog debiet en lage dichtheid, LH laag debiet en hoge dichtheid en LL laag debiet en lage dichtheid.

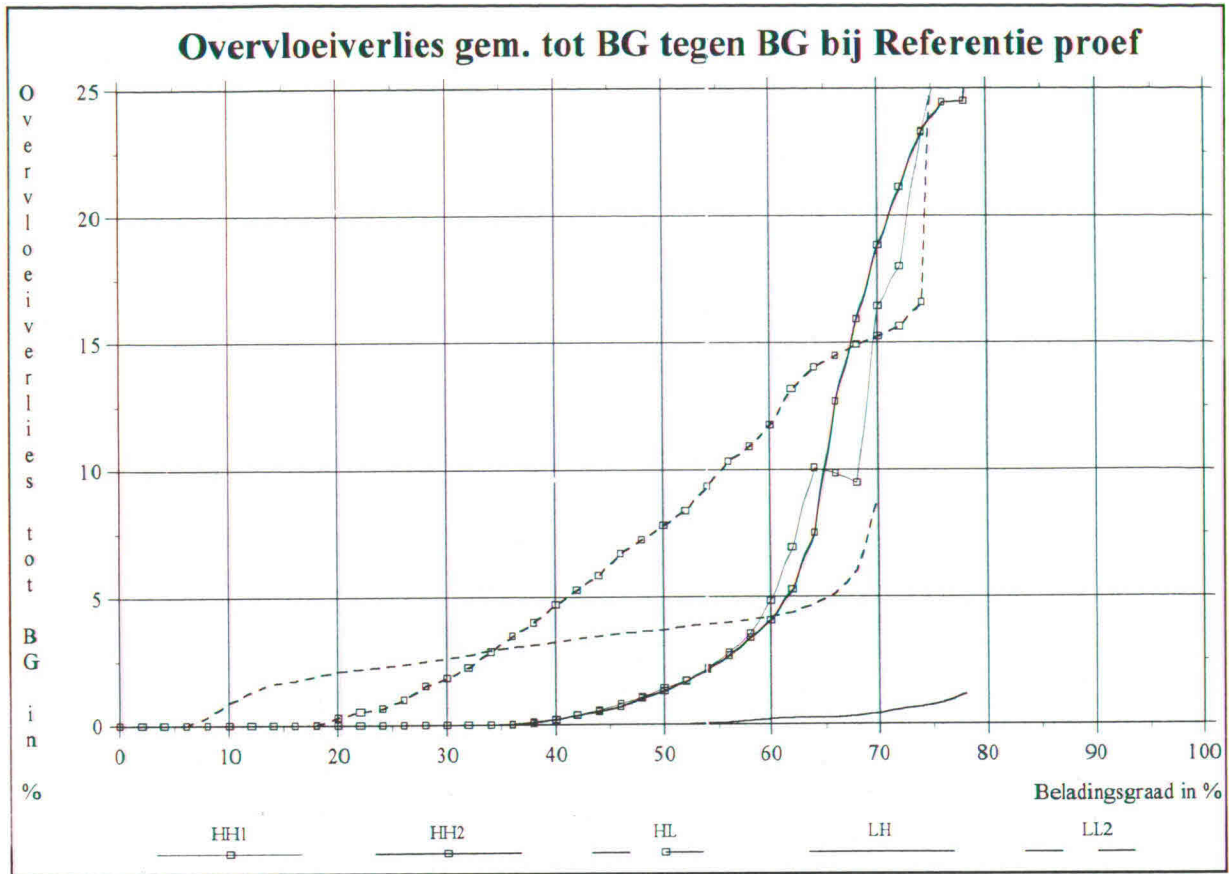
De curven in deze grafieken zijn dezelfde als die in de grafieken in de bijlage op pagina A2 en A3, echter hier worden enkel de curven van de referentie proef weergegeven.



afb. 3.2: Laadtijd tot beladingsgraad bij referentie proef

Uit de laadtijd grafiek blijkt dat de belading bij het hoge debiet en de hoge dichtheid het meest gunstig is (HH1 en HH2). De grafieken zijn in drie groepen op te delen, het blijkt dat de middelste curven, de hoog debiet, lage dichtheid en de laag debiet, hoge dichtheid laadtijd curven ongeveer gelijk lopen. Bij de proeven waarbij het debiet en de dichtheid hoog zijn is de laadtijd ongeveer de helft van de middelste curven en bij de proeven waarbij beiden laag zijn is de laadtijd tweemaal die van de middelste curven. Het ontstaan van de drie groepen laadtijdverloop is vanzelfsprekend en blijkt tot een beladingsgraad van ongeveer 70 % te gelden.

Ik mis definitie



afb. 3.3: Overvloeiverlies gemiddeld tot BG tegen BG bij referentie proef

Uit de grafiek met het overvloeiverlies gemiddeld tot BG tegen BG blijkt dat de proeven met de hoge dichtheid, tot een beladingsgraad van 70 %, veel lagere overvloeiverliezen geven dan proeven bij hetzelfde debiet met de lage dichtheid. Vermoedelijk is de oorzaak van dit verschijnsel, het aanvangen van de belading met een modelhopper die tot aan de overvloed is gevuld met water.

Drie verschijnselen verklaren het lagere overvloeiverlies bij een hogere instroomdichtheid. Ten eerste is op het moment dat het eerste overvloeiverlies begint op te treden als het eerste ingestroomde mengsel de uitstroom bereikt bij een hogere instroomdichtheid inmiddels meer nuttige lading in de hopper gestroomt. Ten tweede heeft de dichtheidstroom meer invloed bij een hogere instroomdichtheid, het instromende mengsel daalt sneller neer. Tenslotte is het dichtheidsverschil tussen de instroom en het mengsel dat zich in de modelhopper bevindt groter naarmate de instroomdichtheid groter is. Een groter dichtheidsverschil veroorzaakt stabielere menglagen, waardoor bij de instroom minder opname, entrainment, van mengsel met een lage dichtheid dat zich boven in de modelhopper bevindt optreedt.

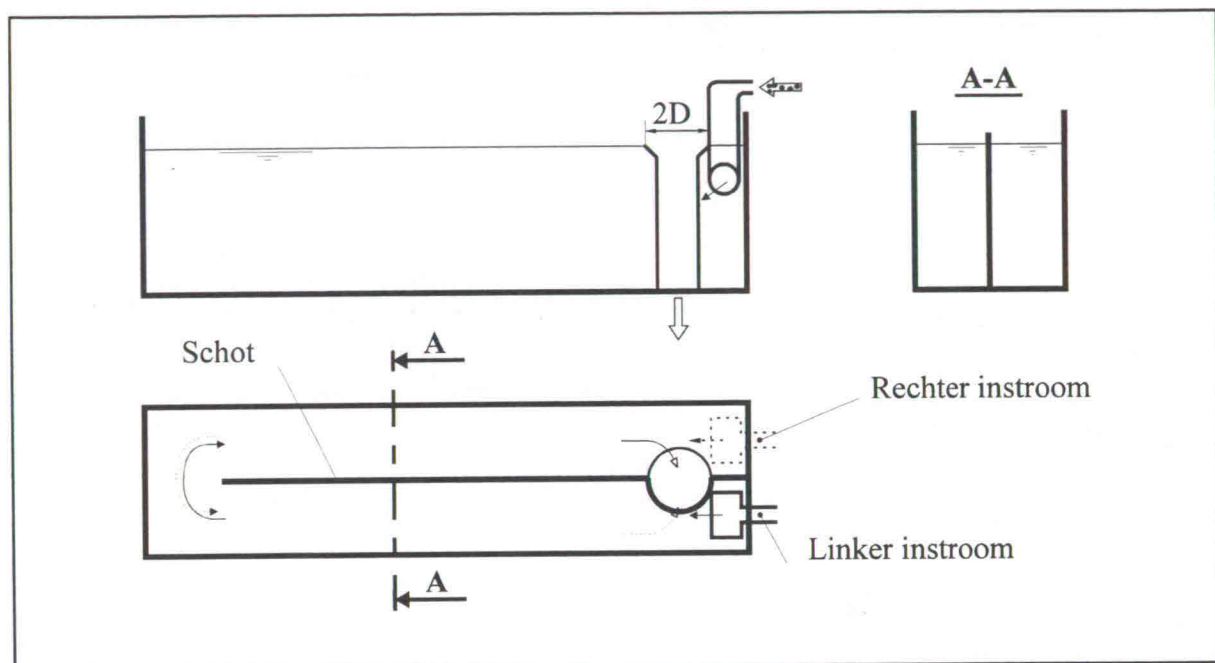
Als aangevangen wordt met beladen van een lege modelhopper zullen de hierboven genoemde verschijnselen minder of niet optreden, waardoor de beladingsprocessen waarschijnlijk anders zullen verlopen.

Nieuw robot!

4 Schottenkerend

4.1 Ontwerp

De opstelling, weergegeven in afbeelding 4.1 en op foto D3 bestaat uit dezelfde modelhopper als bij de referentie configuratie, met een plaat verticaal over de lengte op het midden van de breedte geplaatst, die boven het mengselniveau uitsteekt. Het mengsel stroomt aan één zijde van het schot de bak in en stroomt aan de andere zijde via een halve ronde uitstroom de bak uit. De diameter van de ronde uitstroom is tweemaal zo groot als de diameter van die van de referentie configuratie, zodat de omtrek en dus de uitstroomsnelheden voor beide configuraties gelijk zijn. Ten behoeve van het intermitterend beladen is het instroom en het uitstroom in spiegelbeeld van het middenschot nog een keer opgesteld. Het schakelen gebeurt handmatig door een persoon die zich op de bak bevindt. Bij het schakelen wordt eerst de instroom omgeschakeld en daarna de uitstroom. Het mengsel wordt altijd gedwongen een zo lang mogelijke weg door de bak af te leggen.



afb. 4.1: Schottenkerend

Ten behoeve van het intermitterend beladen zijn twee instromen aangebracht, deze zijn met behulp van afsluiters handmatig bedienbaar. Op foto D5 zijn deze afsluiters achterin de bak, boven de dwarsplank, op de twee toevoerleidingen zichtbaar.

Het omschakelbare instroomsysteem bestaat uit een omklapklep, die op foto D4 aan de rechterzijde is te zien. Deze omklapklep bestaat uit twee halve cirkels, die loodrecht op elkaar zijn bevestigd. Op de foto ligt een laag zand op de op dat moment afsluitende halve cirkel. De omklapklep is scharnierend aan de ronde uitstroom bevestigd, op een zodanige wijze dat de ene zijde geopend is als de andere zijde afgesloten is.

In verband met de mogelijke verdrinking van de ronde uitstroom, met name bij het hoge debiet, doordat het mengsel cirkelvormig in de ronde uitstroom gaat stromen, met middelpuntvliedende krachten als gevolg, wordt een assenkruis aangebracht. Dit assenkruis is in het midden van de ronde uitstroom geplaatst, zoals op foto D3 is te zien. Het assenkruis is zowel bij de niet intermitterende als bij de intermitterende proeven aanwezig.

4.2 Proefuitvoering

Variatie van debiet en dichtheid van de instroom

Deze configuratie wordt op een tweetal wijzen beproefd. Allereerst wordt de opstelling beproefd waarbij de instroom en de uitstroom geplaatst zijn volgens afbeelding 5.1. Voor deze configuratie worden proeven genomen bij een debiet van $8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, het lage debiet, en $16 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, het hoge debiet en bij beide debieten wordt bij een dichtheid van $1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, de hoge dichtheid, en $1,4 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, de lage dichtheid.

Intermitterend

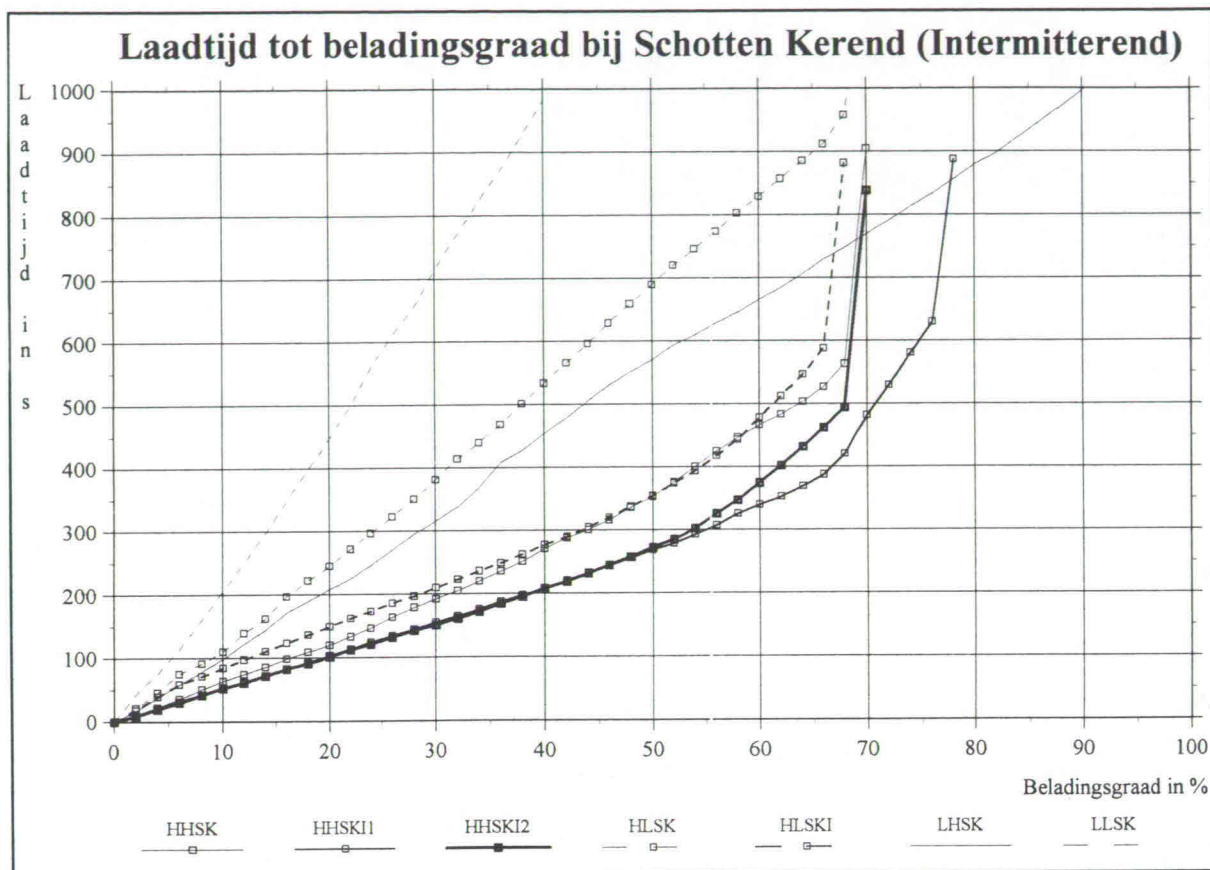
De configuratie is dezelfde als bij het gewone schottenkerend laden, echter nu wordt om en om links ingestroomd en rechts uitgestroomd en vervolgens rechts ingestroomd en links uitgestroomd. In afbeelding 4.1 zijn de rechter instroom en de daarbij behorende stromingspijlen gestippeld weergegeven.

Op twee manieren worden de omschakeltijden bepaald. De eerste manier van omschakelen (proef HHSKI1, 1-0806) wordt bepaald door de verhoging van het bezonken zandbed. Hierbij wordt om de 0,1 m verhoging omgeschakeld. De tweede manier van schakelen (proef HHSKI2 2-0806 en proef HLSKI 1-0906) gebeurt door de visuele waarneming van de suspensiestromen over de bodem. Op het moment dat de suspensiestroom over de bodem de op dat moment in werking zijnde uitstroom bereikt wordt geschakeld. Het is niet altijd eenvoudig deze suspensiestroom goed waar te nemen.

Van de methode van het intermitterend laden wordt verwacht dat, mits op het juiste moment wordt geschakeld, de zogenaamde suspensie stroom over de bodem die bij de uitstroom bereikt weer wordt omgekeerd. Door de lange weg die het mengsel in de hopper moet afleggen bij deze opstelling wordt verwacht dat deze proef inzicht kan geven of het intermitterend beladen inderdaad gunstig is.

4.3 Resultaten en interpretatie

De resultaten van de schottenkerende en de schottenkerend intermitterende belading staan, evenals de referentie proeven in het voorgaande hoofdstuk, in twee grafieken, afbeelding 4.2 en 4.3, weergegeven. De schottenkerend proeven worden door het dunste lijntype weergegeven.

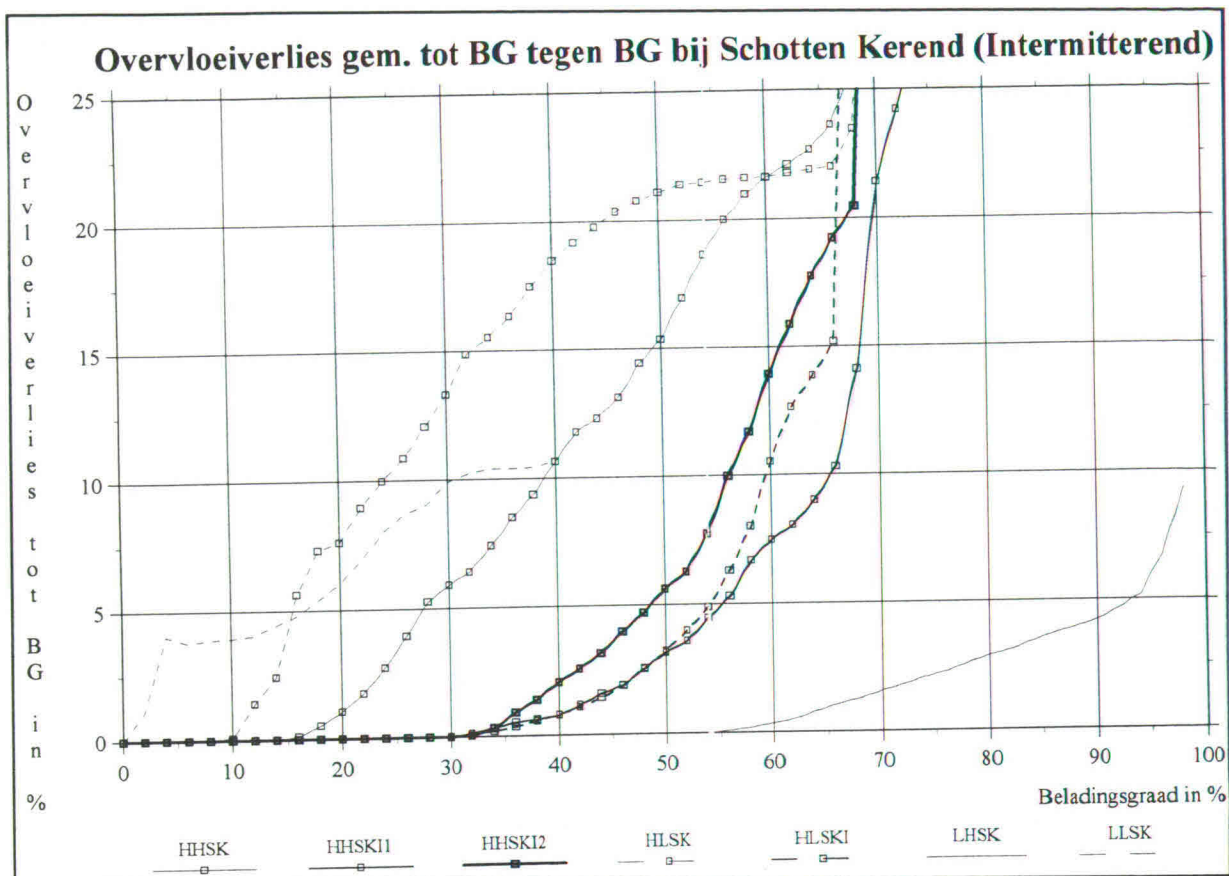


afb. 4.2: Laadtijd tot beladingsgraad bij schottenkerend (intermitterend)

Schottenkerend

In afbeelding 4.2, waarin de laadtijden tot aan de beladingsgraad staan, is bij de schottenkerend curven, net als bij de referentie proeven, duidelijk waarneembaar dat de curve bij hoog debiet en lage dichtheid ongeveer hetzelfde verloop heeft als die bij laag debiet en hoge dichtheid. Tot ongeveer een beladingsgraad van 70 % is de laadtijd bij een bepaalde beladingsgraad bij de proeven waarbij debiet en dichtheid hoog zijn, de helft van de twee eerder genoemde proeven. Zijn debiet en dichtheid beiden laag dan is de laadtijd tweemaal die van de twee eerst genoemde proeven.

Bij een beladingsgraad van 70 % wordt bij eenzelfde debiet de lagere dichtheid qua laadtijd gunstiger. Dit is duidelijker zichtbaar in de grafiek in bijlage A, pagina A5, groene curven.



Het verloop van het gemiddelde overvloeiverlies van begin van belading tot aan de beladingsgraad, tegen de beladingsgraad wordt in afbeelding 4.3 weergegeven. Aan de hand van de curven (dunste lijnen) is te zien dat voor het hoge en het lage debiet geldt, dat wat betreft het overvloeiverlies de hoge dichtheid het meest gunstige is. De LLSK proef kan eigenlijk beter niet in beschouwing worden genomen, daar deze zeer afwijkt.

Tussen een beladingsgraad van 60 % en 70 % is in de grafiek op pagina A6 (bijlage A) is te zien dat het voor het gemiddelde overvloeiverlies weinig scheelt of bij hoog debiet met een hoge dichtheid (HHSK) of met een lage dichtheid (HLSK) wordt beladen. Echter zoals eerder uit afbeelding 4.2 bleek is het met een hoge dichtheid laden tweemaal zo snel als het bij lage dichtheid laden tot ongeveer 70 % beladingsgraad bij hetzelfde debiet.

Schottenkerend intermitterend

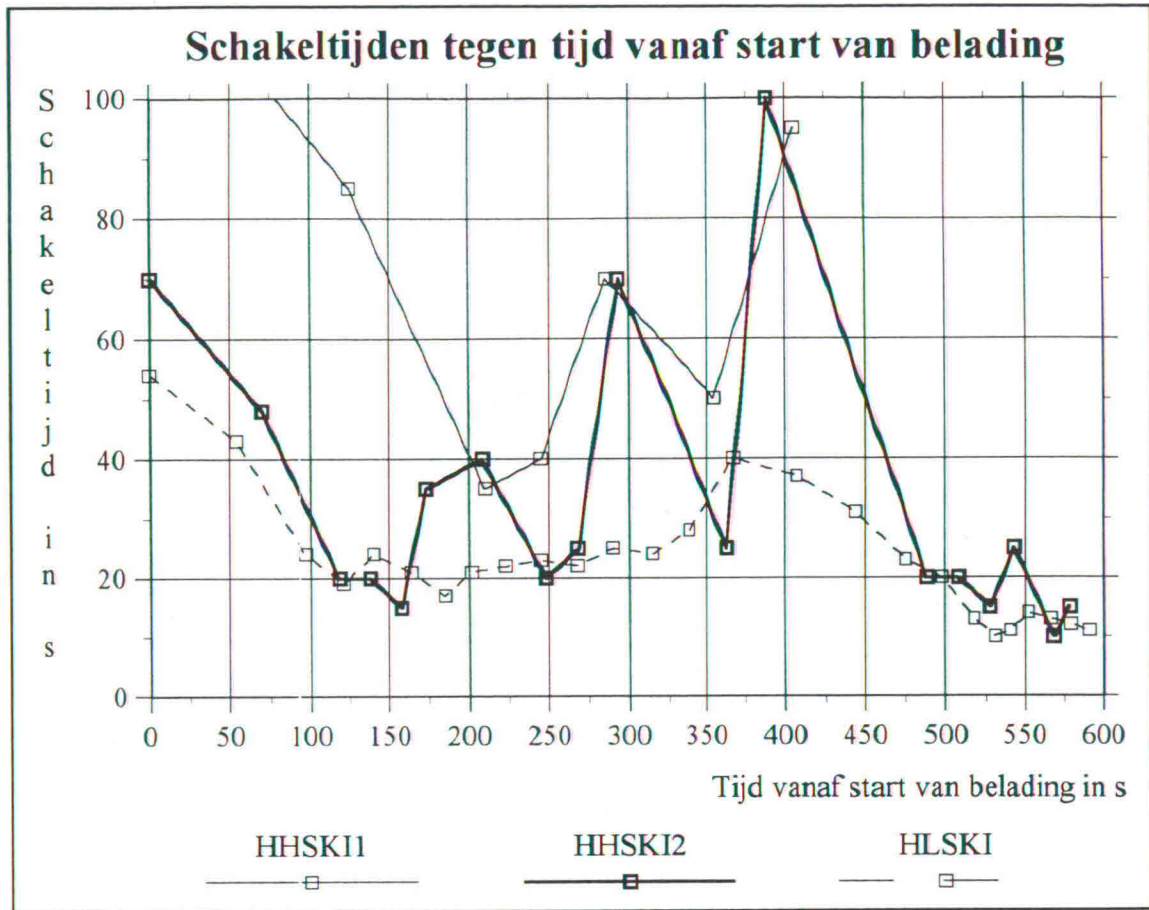
In tabel 4.1 staan de schakeltijdstippen, deze tijdstippen stemmen overeen met de tijd die door de computer in seconden wordt vastgelegd, zoals langs de horizontale tijdassen bij de ruwe data weergave in bijlage E.

Schakeltijdstippen in seconden, bij aanvang wordt langs linkerzijde beladen.		
Schakelen om de 0,1 m bodemverhoging	Schakelen na visuele waarneming van suspensiestroom	
HHSKI1	HHSKI2	HLSKI
518	588	549
603	636	592
638	656	616
678	676	635
748	691	659
798	726	680
893	766	697
	786	718
	811	740
	881	763
	906	785
	1006	810
	1026	834
	1046	862
	1061	902
	1086	939
	1096	970
	1111	993
		1013
		1026
		1036
		1047
		1061
		1074
		1086
		1097

tab. 4.1: Schakeltijdstippen van de schottenkerend intermitterend proeven

De twee schottenkerend proeven bij hoog debiet en hoge dichtheid (HHSKI1 en HHSKI2) verlopen wat betreft de laadtijd (afb. 4.2) en het overvloeiverlies (afb. 4.3) tot 50 % beladingsgraad gelijk, waarna de curven enigszins uiteen lopen. Volgens de data van deze proeven in bijlage E verlopen de proeven vrijwel hetzelfde.

De derde schottenkerend proef (HLSKI), eveneens bij hoog debiet maar nu bij lage dichtheid, heeft een grotere laadtijd volgens de curven in afbeelding 4.2. Echter in afbeelding 4.3 is waar te nemen dat de curve die het overvloeiverlies gemiddeld weergeeft tussen de twee hoge dichtheidscurven loopt. Dit betekent dat het volgens deze proeven alleen vanwege de laadtijd gunstiger is met een hoge dichtheid te laden.



afb. 4.4: Schakelijden tegen tijd vanaf start van belading

In de bovenstaande afbeelding staan de schakeltijden van de drie schottenkerend intermitterend beladen proeven uitgezet tegen de tijd van schakelen van het aanvang van de belading. Met name bij de proeven bij de hoge dichtheid (HHSKI1 en HHSKI2) is halverwege de belading een zeer onregelmatig verloop van de schakeltijden te zien. Dit wordt veroorzaakt door het niet meer duidelijk zichtbaar zijn van de zandbedverhoging, danwel de suspensiestroom over de bodem. Globaal is aan de drie curven te zien dat de schakeltijden eerst afnemen, waarna deze stabiel zouden moeten worden tussen de 20 en 40 seconden.

Schottenkerend en schottenkerend intermitterend

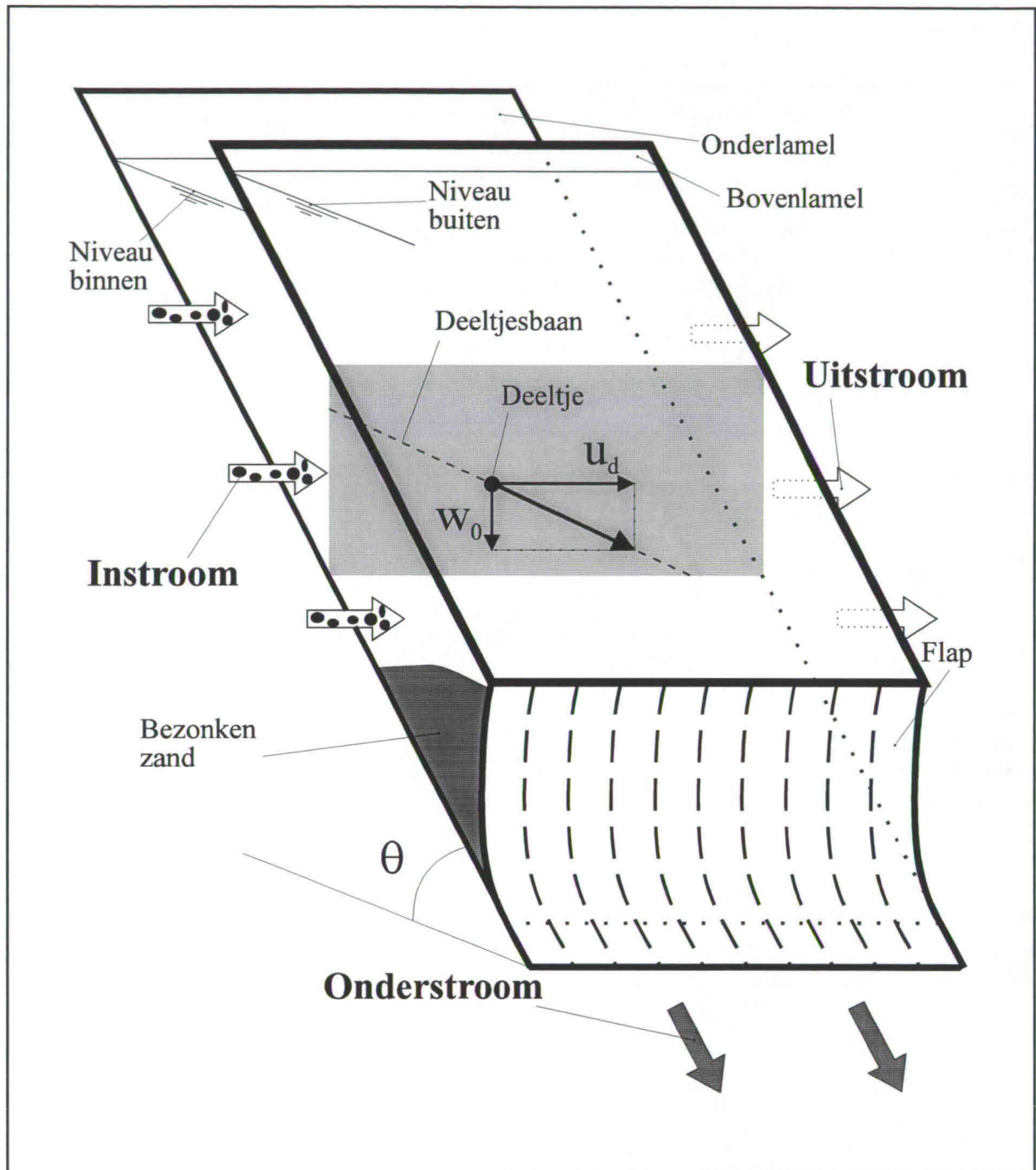
Het meest interessant zijn de proeven bij hoog debiet en hoge dichtheid, aangezien eerder is gebleken dat de andere beladingswijzen vooral tot 50 % beladingsgraad ongunstiger zijn. Deze proeven worden dan ook gebruikt ter beschouwing van de invloed van het intermitterend beladen. Het blijkt dat de schottenkerend intermitterend proef beter is dan de niet intermitterende proef.

Wat betreft het gemiddelde overvloeiverlies dat (afb. 4.3) bij het intermitterend laden pas begint toe te nemen bij een beladingsgraad van 30 %. De aanvang van die toename begint bij het niet intermitterend laden bij 15 % beladingsgraad. De stijging van de curven na het begin van het overvloeiverlies in afbeelding 4.3 ongeveer gelijk.

Het laadtijdverloop is volgens de curven in afbeelding 4.2 ook ongunstig voor de niet intermitterende proef.

5 Lamellenbezinker met flappen

Het lamellenbezinkingsysteem met flappen, afbeelding 5.1, combineert het positieve effect van lamellen met dat van flappen.



afb. 5.1: Dwarsdoorstroomde lamellendoorgang met flap

Effect van de lamellen

Door de plaatsing van lamellen wordt het bezinkoppervlak vergroot bovendien hebben de op de lamellen neergedaalde deeltjes relatief minder last van de doorgaande stroming. Het type lamellensysteem dat wordt toegepast is het zogenaamde dwarsaangestroomde

[MEEUWISSEN, EERSTE AFSTUDEERRAPPORT]. Dit houdt in dat de stroming van het instromende mengsel loodrecht staat op de stroming van de op de lamellen neergedaalde deeltjes. De lamellen worden horizontaal doorstroomd, het water met de niet bezonken deeltjes stroomt aan uitstroomzijde horizontaal via een stuw uit de lamellendoorgang.

Effect van de flappen

Onderaan de lamellen zijn flappen bevestigd, dusdanig dat deze voorkomen dat een suspensie met een te grote hoeveelheid water, een licht mengsel, neerwaarts stroomt en het door de suspensie verdrongen lichte mengsel onder de lamellenbezinker kan niet door de doorgang naar boven stromen. De flappen worden zo opgesteld dat deze de bezonken deeltjeslaag op de onderlamel onder uit de doorgang laten stromen. Door het toepassen van het dwarsaangestroomde lamellenbezinkstelsel, wordt voorkomen dat de deeltjes die onder uit de doorgang in de hopper neerdalen weer door het instromende mengsel worden opgenomen, zoals bij het meestroom systeem het geval is. Door middel van het gewicht van de suspensie, dat tegen de flap drukt gaat de flap open op het moment dat dit gewicht zoveel druk tegen de flap aan de binnenzijde levert, dat deze groter wordt dan de stijfheid en de massa van de flap en het drukverschil door het verschil in waterniveau binnen en buiten de lamellendoorgang. Dit waterniveauverschil wordt verkregen door regeling van het niveau in de doorgang door middel van debietregeling en stuwhoogteregeling van de uitstroom van de lamellendoorgang.

Combinatie lamellen en flappen

Bij het lamellensysteem zijn diverse geometrische variabelen te onderscheiden zoals, de hoek, de lamelafstand en de lamellengte. Het proces van het lamellensysteem gedurende het beladen is stationair, afgezien van de verhoging van de gemiddelde mengseldichtheid in de hopper gedurende het laden, door het toenemen van de hoeveelheid deeltjes ten opzichte van de hoeveelheid water in de hopper. Deze verhoging zorgt voor een grotere tegendruk aan de buitenzijde van de flap, waardoor de flap moeilijker opengaat.

Aangezien in iedere lamel hetzelfde proces optreedt wordt in de in dit hoofdstuk beschreven eerste testfase een enkele en een dubbele lamellendoorgang geconstrueerd en beproefd. Met een lamellendoorgang wordt de ruimte tussen op elkaar volgende lamellen bedoeld. Een groot voordeel van deze opstelling is dat mits de zogenaamde lamellendoorgang van doorzichtig materiaal wordt uitgevoerd, de processen die in de doorgang plaatsvinden duidelijk visueel waarneembaar zijn. Met name de hoogte van het zandpakket dat tegen de flap onderin in de doorgang ophoopt (h_{bz} in afb. 5.5) is duidelijk waarneembaar. Ook is de hoek waaronder de lamellen staan bij een enkele lamellendoorgang eenvoudig te wijzigen in tegenstelling tot bij een systeem met een groot aantal doorgangen.

Na uitvoerig beproeven van de enkele doorgang zal uiteindelijk eventueel een volledig lamellensysteem met flap kunnen worden vervaardigd en getest.

5.1 Ontwerp

Afbeelding 5.2 geeft een volledig lamellensysteem met flappen zoals het uiteindelijk aan boord van een sleepopperzuiger zou moeten worden opgesteld weer. De symbolen voor de hoofdafmetingen staan eveneens in deze afbeelding. Het lamellensysteem met flappen dat in dit hoofdstuk wordt beschreven is zoals eerder vermeld slechts een deel van dit systeem, de enkele of dubbele doorgang, dat het proces goed weer geeft.

In deze paragraaf wordt het ontwerp in vier delen opgesplitst. Het vangt aan met een berekening van de belangrijke afmetingen aan de hand van het model van Camp. Vervolgens worden de stromingen die bij het ontwerp met de inmiddels in grote lijnen bekende afmetingen horen uitgewerkt. Hierna komt verstopping door een te grote zandophoping onder in de lamellendoorgang tegen de flap aan de orde. Tenslotte wordt gerekend aan de stijfheid en de sterkte van het lamellensysteem in verband met lameldikte, lamelmateriaal en ondersteuning.

5.1.1 Afmetingen volgens het model van Camp

De afmetingen worden bepaald aan de hand van het beschrijven van het dwarsdoorstroomde lamellenbezinkstelsel volgens het model van Camp.

In eerste instantie worden de te onderscheiden en van belang zijnde parameters opgesomd. Vervolgens wordt de optimale lamelafstand bepaald door een criterium voor de uitschuursnelheid die betrekking heeft op de doorstroomsnelheid en een criterium voor de valsnelheid die betrekking heeft op het neerdalen van de deeltjes op de onderste lamel vast te stellen. Deze twee criteria worden in het model van Camp verwerkt.

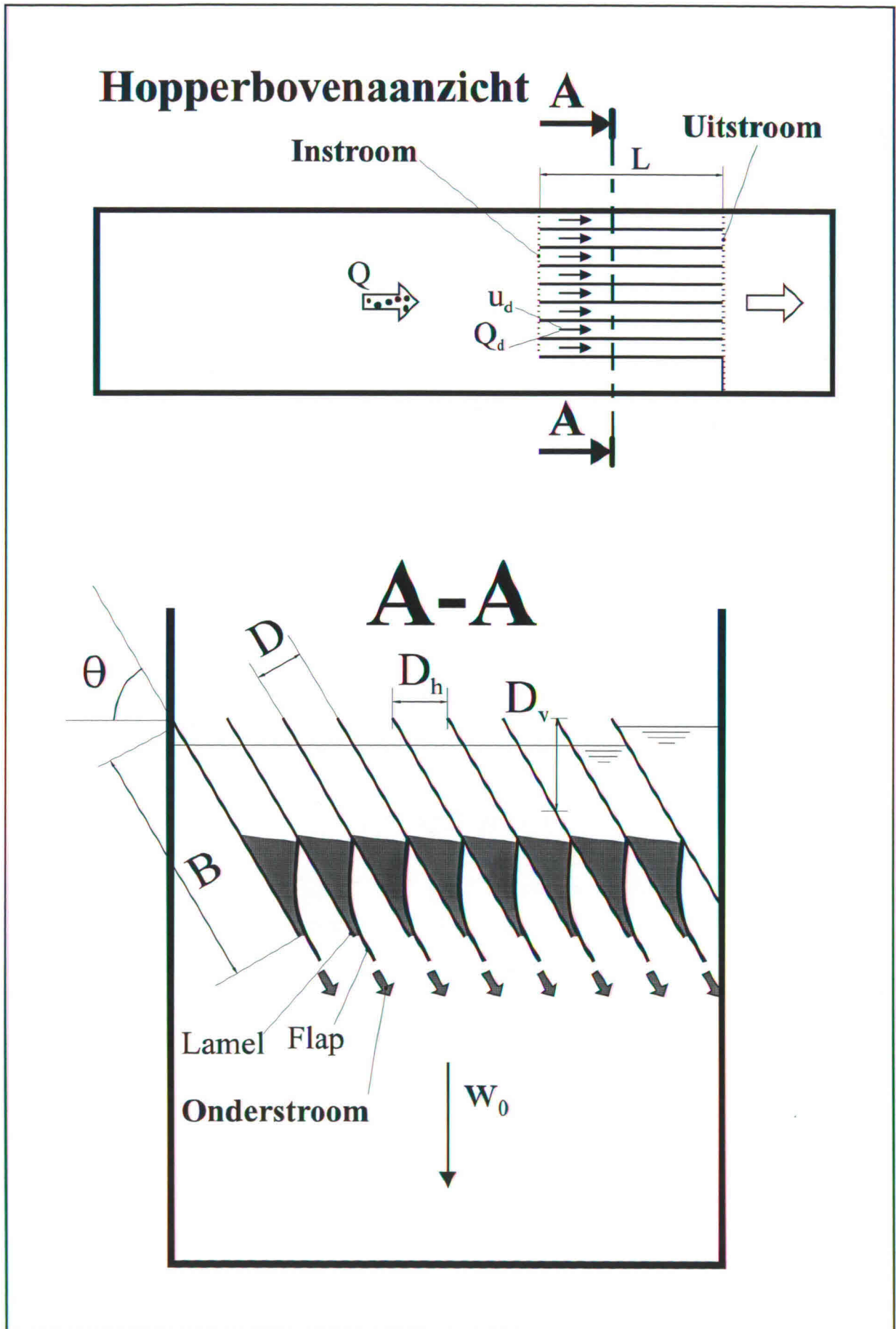
Het aantal doorgangen wordt bepaald nu bekend is wat de lamelafstand is. Het produkt van het aantal doorgangen en de lamelafstand houdt namelijk verband met de doorstroomsnelheid, die de uitschuursnelheid niet mag overschrijden.

Tenslotte wordt gerekend aan de afmetingen van een prototype lamellenbezinkstelsel, dat voldoet aan de twee gestelde criteria.

Bij een lamellensysteem zijn een achttal parameters te onderscheiden, deze staan verderop in tabel 5.1 In deze tabel wordt tevens aangegeven wat reële waarden zijn in model en in de praktijk.

Parameter	Model	Praktijk
Debiet	$Q_m = 16 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_p = 5 \text{ m}^3/\text{s}$
Lamellengte	$L_m = 0,8 \text{ m}$	$L_p = 10 \text{ m}$
Lamelafstand	$2 \cdot 10^{-2} \text{ m} < D_m < 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	$0,2 \text{ m} < D_p < 0,5 \text{ m}$
Lamelbreedte	$0,1 \text{ m} < B_m < 0,3 \text{ m}$	$0,5 \text{ m} < B_p < 1 \text{ m}$
Aantal doorgangen	n_m en n_p zijn variabel	
Doorstroomsnelheid	u_d	
Lamelhoek	$\theta_m = \theta_p = 45^\circ$ of 60°	
Valsnelheid deeltje	w_0	

tab.5.1: Symbolen en waarden van parameters in model en praktijk



afb. 5.2: Afmetingen van lamellensysteem met flappen in een hopper

Toelichting op de inhoud van tabel 5.1

Debiet

Het praktijkdebiet is dat debiet waarmee normaal in de praktijk wordt beladen. Het debiet in het model is het debiet volgens de verschalingsfactor die van toepassing is op de modelhopper.

Lamellengte

De lamellengte houdt verband met de afmetingen van de hopper. Voor de modelbreedte wordt dezelfde verschalingsfactor, ongeveer één op tien, aangehouden als voor de rest van de afmetingen. Voor het model is het gunstig een te grote lengte te nemen, zodat instroom en uitstroom afwijkingen van de lamellendoorgang relatief minder van invloed zijn op de processen die zich in de doorgang afspelen.

Lamelafstand

De praktijkwaarde voor de lamellengte mag niet te klein zijn in verband met verstoppingsgevaar, niet te groot anders wordt de stroming turbulent; de modelhopper moet qua verscaling zoveel mogelijk overeenkomen met de praktische waarde. Bij een te kleine waarde van de plaatafstand is een groot aantal lamellen nodig. De plaatafstand wordt verderop vastgesteld met behulp van de korrelvalsnelheid en de uitschuursnelheid.

Lamelbreedte

De lamelbreedte staat evenals lamellengte in verband met de dimensies van de hopper, niet te kort anders krijgen de stromingen niet goed de kans zich in te stellen.

Aantal doorgangen

Zoals eerder beschreven wordt het aantal doorgangen vastgelegd als de optimale lamelafstand bekend is. Het aantal doorgangen is dan zoals verderop blijkt rechtevenredig met het debiet. Bij een groter debiet moet het dwarsdoorstroomde oppervlak groter worden anders overschrijdt de doorstroomsnelheid de uitschuursnelheid.

Doorstroomsnelheid

De doorstroomsnelheid, u_d , mag niet groter zijn dan de uitschuursnelheid, aangezien anders neergedaalde deeltjes weer in de doorgaande stroming worden opgenomen. De uitschuursnelheid wordt bepaald met de Shields curve [VELDEN VAN DER: 43]. In de Shields curve kan op de horizontale as de waarde voor Re^* die bij de gemiddelde korreldiameter, $d_{50} = 160 \mu\text{m}$, hoort worden afgelezen. De uitschuursnelheid is dan met de volgende vergelijking te berekenen.

$$Re^* = \frac{V^* \cdot d_{50}}{\nu} \quad \wedge \quad V^* = \frac{V_{\text{uitschuur}} \sqrt{g}}{C} \quad \Rightarrow \quad V_{\text{uitschuur}} = \frac{Re^* \cdot \nu \cdot C}{\sqrt{g} \cdot d_{50}} \quad (5.1)$$

Voor de kinematische viscositeit wordt de waarde bij 10°C , $\nu = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ genomen. Verder wordt de Chezy coëfficiënt, C , op de volgende wijze bepaald.

$$C = 18 \cdot \log \frac{12 \cdot h}{r} \quad \wedge \quad r \approx d_{50} \quad \wedge \quad h = \frac{1}{2} \cdot D \quad \Rightarrow \quad C = 18 \cdot \log \frac{6 \cdot D}{d_{50}}$$

Wagon?

In de vorige vergelijking is voor de waterhoogte, h , de halve doorgang genomen, aangezien wordt aangenomen dat de stroming tussen twee lamellen kan worden beschouwd als twee stromingen aan de onderkant begrensd zijn door de bodem en aan de bovenkant open, die in het midden elkaars spiegelbeeld zijn.

Voor de lamelafstand in model wordt $25 \cdot 10^{-3}$ m genomen. Na het invullen van deze waarde voor de lamelafstand en de ruwheid, r , in de voorgaande vergelijking wordt de Chezy coëfficiënt, $C = 54 \sqrt{m/s}$.

Invullen van de in de Shields curve afgelezen waarde voor $Re^* \approx 1,5$ en de andere eerder aan de orde gekomen waarden geeft met behulp van vergelijking 5.1 een waarde van de uitschuursnelheid van $V_{uitschuur} = 0,20$ m/s. De doorstroomsnelheid moet kleiner zijn dan deze waarde.

Hoek

In lamellensystemen in de literatuur worden hoeken van $\theta = 45^\circ$ en 60° veel toegepast [WARD].

Valsnelheid

De valsnelheid moet van een dusdanige grootte zijn dat theoretisch de meeste deeltjes op de onderlamel neerdalen, voor een deeltje met een $d_{50} = 160 \mu\text{m}$ kan de valsnelheid door middel van de volgende vergelijking bij 10°C worden berekend [VELDEN VAN DER: 56].

$$\log \frac{1}{w_0} = 0,4758 \cdot (\log d_{50})^2 + 2,1795 \cdot \log d_{50} + 3,1915$$

De ongehinderde valsnelheid wordt $w_0 = 18 \cdot 10^{-3}$ m/s

Theoretisch optimaal lamellenbezinkingsysteem

Verderop blijkt dat het lamellensysteem kan worden vastgelegd op basis van de criteria voor de valsnelheid en de uitschuring.

In deze paragraaf wordt het dwarsdoorstroomde lamellensysteem beschouwd door middel van het model van Camp [CAMP] voor ideale bezinking in een rechthoekige bak

Het debiet per doorgang:

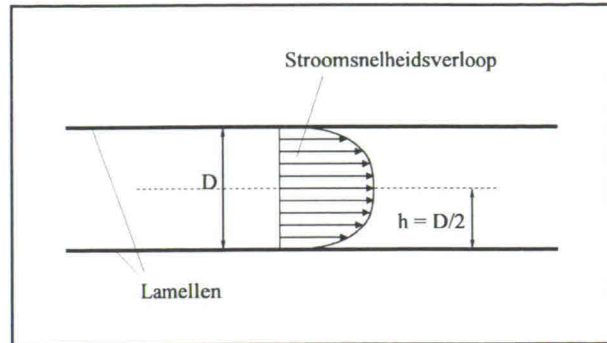
$$Q_d = \frac{Q}{n}$$

Het dwarsoppervlak van een doorgang:

$$A_d = B \cdot D$$

Doorstroomsnelheid

De doorstroomsnelheid, die niet te groot mag zijn in verband uitschuring is wordt door de volgende functie van de lamelparameters beschreven:



afb. 5.3: Symmetrisch stroomsnelheidsverloop

$$u_d = \frac{Q_d}{A_d} = \frac{Q}{n \cdot B \cdot D} \quad (5.2)$$

De tijd die de vloeistof gemiddeld nodig heeft om van de instroomzijde naar de uitroomzijde van de lamellen te stromen is:

$$\Delta t = \frac{B}{u_d} = \frac{n \cdot B \cdot L \cdot D}{Q}$$

Valsnelheid van net bezinkende korrel

De valsnelheid, w_0 , van een korrel die de verticale lamellentussenruimte, D_v , van boven naar beneden precies kan de volgende functie van de lamelparameters:

$$w_0 = \frac{D_v}{\Delta t} = \frac{\frac{D}{\cos\theta} \cdot Q}{n \cdot B \cdot L \cdot D} = \frac{Q}{\cos\theta \cdot n \cdot B \cdot L} \quad (5.3)$$

Door middel van vergelijking 5.2 en 5.3 worden de meeste parameters van het lamellensysteem vastgelegd:

Parameter			Waarde (gekozen)
Vast	Valsnelheid	w_0	$18 \cdot 10^{-3}$ m/s
	Uitschuursnelheid	u_d	0,20 m/s
Variabel	Debiet	Q	$16 \cdot 10^{-3}$ m ³ /s
	Lamelbreedte	B	0,30 m
	Lamelengte	L	0,80 m
	Lamelhoek	θ	45° of 60°
Onbekend	Aantal doorgangen	n	vgl. 5.7
	Lamelafstand	D	vgl. 5.6

tab.5.2: Parameters met waarde van lamellenbezinker

De lamelafstand volgt uit de vergelijking voor de doorstroomsnelheid, vgl. 5.2. Het herschrijven van die vergelijking geeft:

$$D = \frac{Q}{n \cdot B} \cdot u_d \quad (5.4)$$

Het herschrijven van de vergelijking voor de valsnelheid, vgl 5.3. geeft:

$$\frac{Q}{n \cdot B} = w_0 \cdot L \cdot \cos\theta \quad (5.5)$$

Lamelafstand

Uit de vergelijkingen 5.4 en 5.5 volgt D als functie van diverse parameters:

$$D = \frac{w_0 \cdot L \cdot \cos\theta}{u_d} \quad (5.6)$$

Deze vergelijking laat zien dat bij een bepaalde uitschuursnelheid, valsnelheid, lamellenlengte en lamelhoek, de optimaal waarde voor de lamelafstand, D , kan worden vastgesteld.

Het invullen van de waarden voor de valsnelheid, uitschuursnelheid, de hoek en de lamellenlengte in vergelijking 5.6 geven optimale lamelafstanden bij de twee lamelhoeken van $D_{\theta=45} = 51 \cdot 10^{-3}$ m en $D_{\theta=60} = 36 \cdot 10^{-3}$ m. Vervolgens wordt de lamelafstand gesteld op $D = 25 \cdot 10^{-3}$ m, zodat ruimschoots aan de eis bij de beide hoeken wordt voldaan.

Bij een lamelafstand van $D = 25 \cdot 10^{-3}$ m, is de valsnelheid van de deeltjes die nog net bezinken, $w_{0,krit.}$, met de onderstaande vergelijking die een herschreven vorm van vergelijking 5.6 is verkregen:

$$w_{0,krit.} = \frac{D \cdot u_d}{L \cdot \cos\theta}$$

De waarde voor de kritieke valsnelheid voor de beide hoeken is $w_{0,krit.,\theta=45} = 8,4 \cdot 10^{-3}$ m/s en $w_{0,krit.,\theta=45} = 12 \cdot 10^{-3}$ m/s. Hieruit blijkt dat bij beide lamelhoeken veel meer dan de helft van de deeltjes bezinken, aangezien de helft van het aantal deeltjes bezinkt als de kritieke valsnelheid, $w_{0,krit.,\theta=45} = 18 \cdot 10^{-3}$ m/s, zou zijn.

Aantal lamellen

Het aantal lamellen kan worden vastgelegd met behulp van de waarde van de uitschuursnelheid:

$$n = \frac{Q}{B \cdot D \cdot u_d} \quad (5.7)$$

Na het invullen van de modelwaarde voor het debiet, de uitschuursnelheid, de lamelbreedte en de lamelafstand blijkt dat in de modelsituatie minimaal 11,2 doorgangen. Dit betekent dat een naar boven afgerond aantal van 12 doorgangen minimaal vereist is.

Praktisch mogelijk systeem

Een mogelijk praktijksysteem is te als volgt te beschrijven aan de hand van, het debiet ($Q = 5 \text{ m}^3/\text{s}$), de lamelhoek ($\theta = 45^\circ$ of $\theta = 60^\circ$), lamellenlengte ($L = 8 \text{ m}$) de korrelvalsnelheid van zand met $D_{50} = 160 \text{ }\mu\text{m}$, ($w_0 = 18 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) en de uitschuursnelheid ($u_d = 0,20 \text{ m/s}$) worden ingevuld in vergelijking 5.6. De lamelafstanden worden dan $D_{\theta=45} = 0,51 \text{ m}$ en $D_{\theta=60} = 0,36 \text{ m}$.

Uit vergelijking 5.7 volgt dat voor het benodigde aantal doorgangen bij de eerder vermelde waarden voor het debiet en de uitschuursnelheid, de lamelbreedte ($B = 2 \text{ m}$) en lamelafstand geldt dat $n_{\theta=45} = 25$ en $n_{\theta=60} = 35$, naar boven afgerond.

De lamelbreedte, B , mag niet te groot zijn aangezien het lamellensysteem niet meer functioneert op het moment dat het zandpakket onder in de hopper de flappen heeft bereikt.

Verder wordt het produkt van het aantal lamellen en de lamelafstand beperkt door de breedte van de hopper. Voor de waarden van het hier beschreven praktische systeem is de waarde van dit produkt bijna 13 m. Horizontaal is het lamellensysteem bij 45° , 9,2 m breed en bij 60° , 6,5 m. Deze breedte van het lamellensysteem is exclusief de lameldikten. Volgens deze berekening is de hopperbreedte die ongeveer 10 m bedraagt bij grote slephoppers geen belemmering.

5.1.2 Stromingen in het lamellendoorgangmodel

In deze subparagraaf komt eerst het drukverschil oftewel het verval als gevolge van diverse soorten wrijving aan de orde. Vervolgens wordt de stuwhoogte boven de uitstroom in de doorgang bepaald, dit is van belang voor in hoeverre de breedte van de lamellen boven deze stuwlijn uit moet steken. Tenslotte wordt ten behoeve van de opstelling van de doorgang de grootte van de secundaire stroom bepaald, deze is van belang bij de proefopstelling aangezien de onderuit de doorgang verdwijnende suspensie water verdringt en het niveau in de modelhopper doet stijgen. Met als gevolg dat voor een continu proefproces het niveau in de bak gelijk blijven en wordt mengsel via de secundaire uitstroom wederom door de doorgang geleid.

Drukverschil tussen instroom en uitstroom

Hierbij wordt uitgegaan van het feit dat de stroming dwars door het lamellenpakket als buisstroming kan worden beschouwd. De krachten worden berekend voor de situatie waarbij het mengsel over de hele breedte van de lamellen instroomt en over de hele breedte van de lamellen uitstroomt.

Het drukverschil is tussen instroom en uitstroom op dezelfde horizontale posities steeds Δp . Het verband tussen hoogte verschil en drukverschil is het volgende:

$$\Delta h = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} \quad (5.8)$$

Verval door versnelling ter plaatse van de instroom

$$\Delta p_{u_d} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_d^2 \quad (5.9)$$

Door invullen van $u_d = 0,18$ m/s en $\rho = 1,1 \cdot 10^3$ kg/m³ volgt: $\Delta p_u = 17,8$ N/m²

Het verval door versnelling wordt na invullen van het drukverschil in vergelijking 5.8: $1,6 \cdot 10^{-3}$ m.

Verval door wandwrijving bij stalen wand

Wrijving over het oppervlak:

$$\tau_0 = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot u_d^2 \cdot f_0 \quad (5.10)$$

Invullen van $\rho = 1,1 \cdot 10^3$ kg/m³; $u_d = 0,18$; $f_0 = 0,15$ geeft: $\tau_0 = 0,67$ N/m²

Het totale lamellenoppervlak waarlangs mengsel stroomt:

$$A = 2 \cdot n \cdot B \cdot L$$

Totale kracht door lamellen en vloeistof op elkaar uitgeoefend:

$$F = A \cdot \tau_0$$

Deze kracht is gelijk aan het produkt van het drukverschil tussen de instroom en de uitstroom en de uitstroom en het dwarsoppervlak van het lamellenpakket:

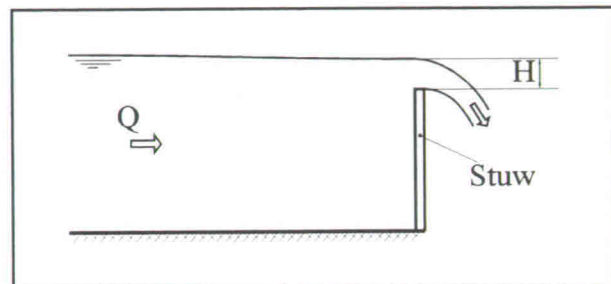
$$\Delta p_w = \frac{F}{n \cdot B \cdot D} = \frac{A \cdot \tau_0}{n \cdot B \cdot D} = \frac{2 \cdot L \cdot \tau_0}{D} \quad (5.11)$$

Invullen van $L = 0,8$ m; $\tau_0 = 0,67$ N/m en $D = 0,025$ m geeft: $\Delta p_w = 43$ N/m²

Het verval door wandwrijving wordt na invullen van het drukverschil in vergelijking 5.8, $\Delta h = 4 \cdot 10^{-3}$ m.

Stuwhoogte van de uitstroom

Het lamellenpakket is aan de uitstroomzijde tegen een rechte overvloei (afb. 5.4) geplaatst. Het volume aan mengsel dat de hopper instroomt kan alleen via deze stuw de hopper verlaten. Dit betekent dat het debiet over deze stuw gelijk is aan dat van de instroom. Met behulp van dit debiet en de breedte, D_h , waarover de uitstroom plaatsvindt is de stuwhoogte te bepalen. Voor de stuwhoogte wordt gebruik gemaakt van de Rehbock stuwhoogte vergelijking voor een rechte stuw [RIJN VAN].



afb. 5.4: Rehbockstuw

$$H = \left(\frac{Q}{1,71 \text{ m} \cdot D_h} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \wedge \quad m = 1,08 \frac{1}{s} \quad (5.12)$$

Het maximale debiet is bij de toe te passen 16 doorgangen: $1 \cdot 10^{-3}$ m³/s en de horizontale doorstroombreedte is $2,9 \cdot 10^{-2}$ m. Dit geeft bij het invullen van vergelijking 5.12 waaruit een stuwhoogte van $7 \cdot 10^{-2}$ m volgt.

Secundaire instroom

In de modeldoorgang moet het water dat door het uit de flappen stromende zand wordt verdrongen door de lamellendoorgang eruit stromen. Hiervoor is een overvloei, de secundaire instroom (afb. 5.8), van de bak naar de doorgang gemaakt, zodat evenals in de werkelijke opstelling het mengsel alleen via de doorgang de hopper kan verlaten. De secundaire instroom is op foto D11 linksboven in de onder en de bovenlamel zichtbaar als rechthoekige inkepingen in het plexiglas. De grote van deze doorgang is als volgt te berekenen voor het mengsel met het hoogste debiet, $1 \cdot 10^{-3}$ m³/s en de grootste dichtheid, $\rho_i = 1,4 \cdot 10^3$ kg/m³.

Een dichtheid van $1,4 \cdot 10^3$ kg/m³ betekent dat de zandconcentratie 24 % bedraagt. Uitgaande van een poriëngehalte van 40 %, betekent dit een natte zandconcentratie van 40 % Van de $1 \cdot 10^{-3}$ m³/s stroomt maximaal $0,40 \cdot 10^{-3}$ m³/s zand onder uit de flap. Dit heeft als gevolg dat dezelfde hoeveelheid volume de lamellendoorgang weer door moet stromen.

Gekozen wordt voor twee doorgangen met een breedte van $5 \cdot 10^{-2}$ m in beide lamellen op ongeveer $5 \cdot 10^{-2}$ m van de instroom. Bij het debiet van $0,40 \cdot 10^{-3}$ m³/s geeft dit na invullen van de Rehbock vergelijking, vgl. 5.12, een hoogte van $H = 2,6 \cdot 10^{-2}$ m. Gekozen wordt voor een hoogte van $3 \cdot 10^{-2}$ m zodat ruimschoots aan de voorwaarde wordt voldaan.

5.1.3 Verstopping van zandpakket tussen de lamellen

Lengte van het bezonken zandpakket tegen de flap

Het is van belang te weten hoe groot de ophoping van bezonken deeltjes onderin de doorgang tegen de flap is. Bevindt zich te veel bezonken zand onderin de doorgang, dan kan brugvorming ontstaan. Deze brugvorming betekent dat het zandpakket zich klem zet tussen de lamellen door het te groot worden van de grondspanningen. Deze grote grondspanningen in een zandpakket worden is de bezonken zand laag te groot, dan is de doorstroombaan te klein, waardoor de doorstroomsnelheid door de doorgang hoog is, met als gevolg een korte bezinktijd en opwerveling.

De lengte van het bezonken zand langs de lamellen tegen de flap, $h_{bz/}$, wordt door de volgende factoren bepaald.

- Niveauverschil: hieruit is te herleiden hoe groot de kracht is die de flap onder op het pakket uitoefend.
- Wandwrijving: schuifkracht langs de onderlamel door normaalspanning van zandpakket.
- Inklemmingswrijving langs beide lamellen door grondspanningen veroorzaakt door het gewicht van het zandpakket.

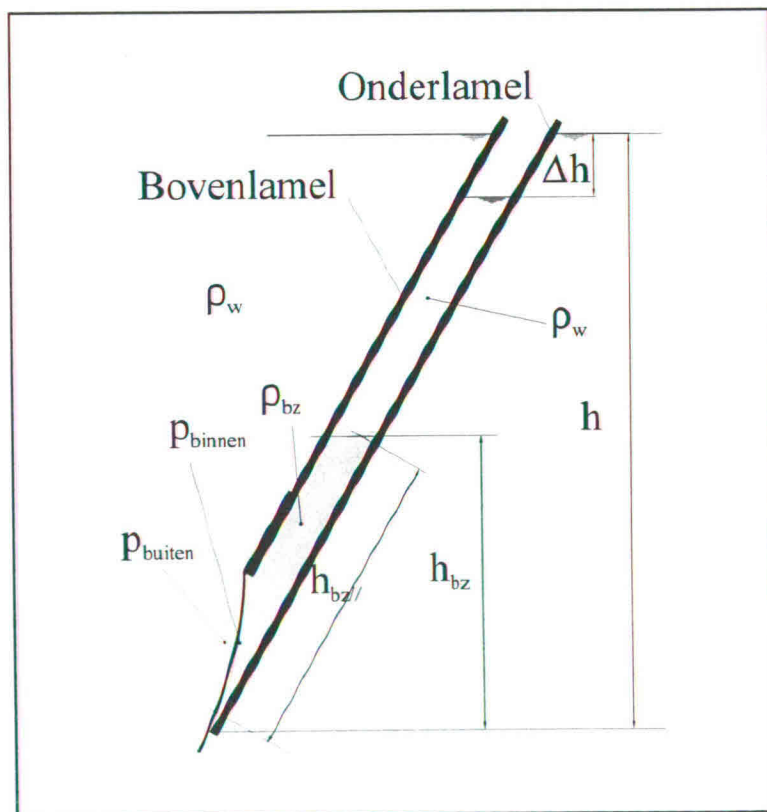
Niveauverschil

De nevenstaande afbeelding geeft een situatieschets van de niveauverschillen.

Het zal gedurende de proeven blijken dat het op de onderlamel neergeslagen zand gelijk langs de lamellen naar beneden stroomt. De bovenkant van het bezonken zandpakket staat niet onder een vlakke helling.

Op de foto's in subbijlage D3 is het bezonken zandbed voor verschillende lamellendoorgangssituaties te zien.

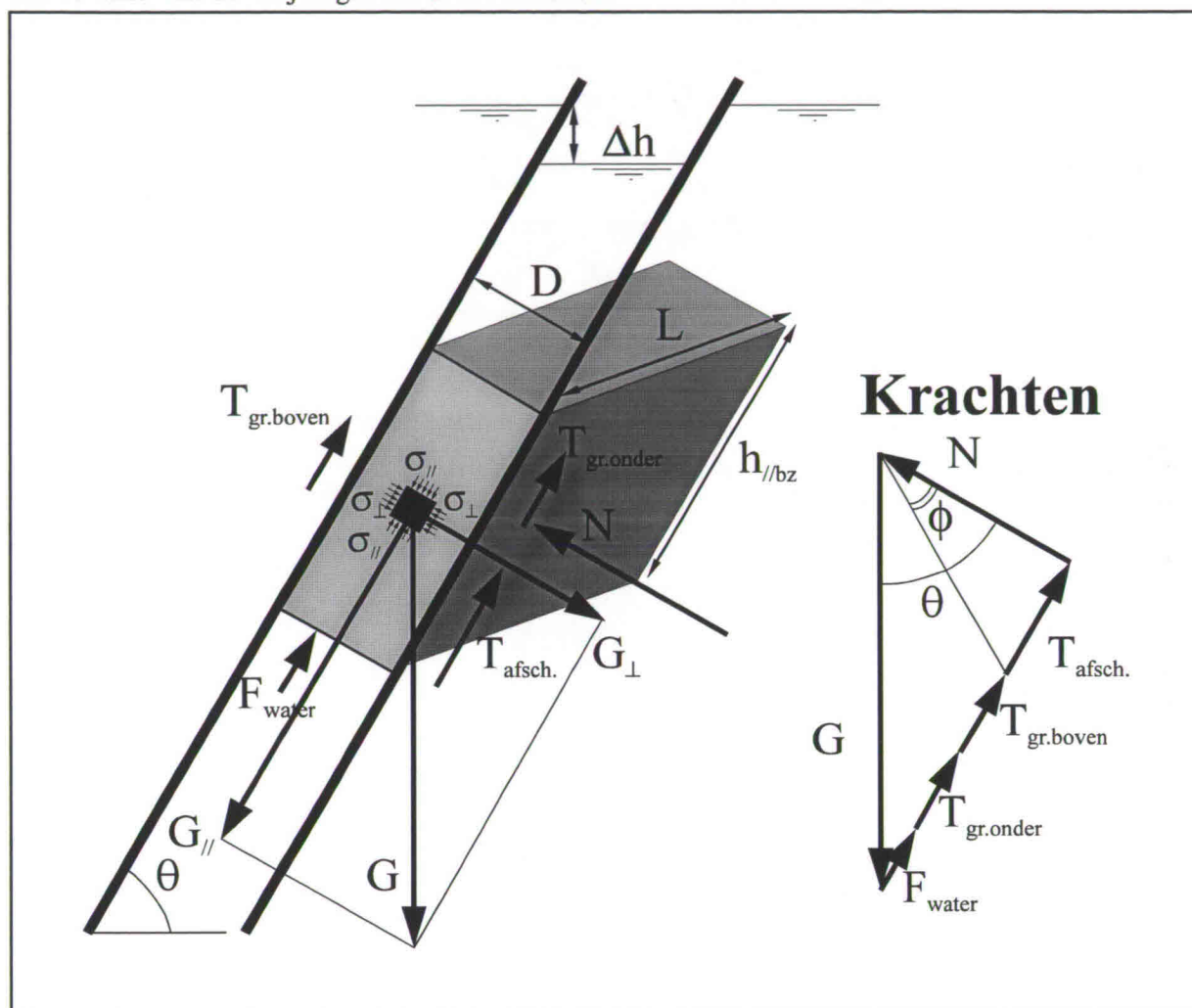
Verder in deze subparagraaf zullen een aantal vereenvoudigingen in de modellering worden aangebracht, zodat op eenvoudige wijze kan worden berekend of brugvorming kan optreden. Hierbij wordt aangenomen dat zich een in rust verkerend zandpakket in de doorgang tussen de lamellen ingeklemd bevindt. In werkelijkheid zal de situatie gunstiger zijn. Het zandpakket zal makkelijker kunnen bewegen door bijvoorbeeld invloed van sloopstralingen.



afb. 5.5: Zijaanzicht lamellendoorgangdoorsnede

Berekening van de evenwichtshoogte, $h_{bz//}$, van het zandpakket

Afbeelding 5.6 geeft de krachten die van belang zijn voor het berekenen van de evenwichtshoogte, $h_{bz//}$, weer. Het zand tussen de lamellen wordt voorgesteld door een kubusvormig zandpakket met de afmetingen die in de afbeeldingen worden aangegeven. De zwaartekracht op dit zandpakket, G , is de aandrijvende kracht die het pakket langs de lamellen neerwaarts wil verplaatsen. Deze kracht kan worden ontbonden in een evenwijdige component, $G_{//}$, die de kracht in de bewegingsrichting bij neerwaarts glijden uitoefend, en een loodrechte component, G_{\perp} , die tegen wordt gewerkt door de normaalkracht N van de onderlamel. Deze normaalkracht doet een afschuifkracht ontstaan die aan de hand van de wrijvingshoek is te berekenen.



afb. 5.6: Krachtenoverzicht bij brugvorming in een lamellendoorgang

Het zandpakket tussen de lamellen is in evenwicht als de krachten evenwijdig aan de lamellen in evenwicht zijn volgens de volgende vergelijking.

$$G_{//} = F_{\text{water}} + T_{\text{afsch.}} + T_{\text{gr.onder}} + T_{\text{gr.boven}} \quad (5.13)$$

De component van de zwaartekracht evenwijdig aan de lamellen is gelijk aan:

$$G_{//} = (\rho_{bz} - \rho_w) \cdot g \cdot D \cdot L \cdot \sin\theta \cdot h_{bz//} \quad (5.14)$$

De weerstandskrachten langs de lamellen

De waterdruk tegen de flap aan de onderkant van het zandpakket is:

$$F_{\text{water}} = \rho_w \cdot g \cdot L \cdot \Delta h \cdot D \quad (5.15)$$

De afschuifkracht langs de onderlamel is veroorzaakt door de normaalkracht op de onderlamel is:

$$T_{\text{afsch.}} = N \cdot \tan\phi = \cos\theta \cdot G \cdot \tan\phi = (\rho_{\text{bz}} - \rho_w) \cdot g \cdot L \cdot \tan\phi \cdot \cos\theta \cdot D \cdot h_{\text{bz//}} \quad (5.16)$$

Door de evenwijdig aan de lamellen gerichte kracht, $G_{//}$ treden korrelspanningen evenwijdig en loodrecht op de lamellen op.

Voor de gemiddelde korrelspanning, $\sigma'_{//}$, ten gevolge van $G_{//}$ geldt:

$$\overline{\sigma'_{//}} = \frac{1}{2} \cdot (\rho_{\text{bz}} - \rho_w) \cdot g \cdot \sin\theta \cdot h_{\text{bz//}}$$

Uitgaande van de bezwijktoestand van de grond volgt met behulp van de theorie van de K-factor een normaalspanning, σ'_{\perp} :

$$\tau = \tan\phi \cdot \sigma'_{\perp} \quad \wedge \quad \sigma'_{\perp} = K \cdot \sigma'_{//} \quad \Rightarrow \quad \tau = \tan\phi \cdot K \cdot \sigma'_{//}$$

De K-factor [VERRIJT: 165] bij actieve gronddruk wordt bij een hoek van inwendige wrijving van 30° berekend.

$$K = \frac{1 - \sin\phi}{1 + \sin\phi} \quad \wedge \quad \phi = 30^\circ \quad \Rightarrow \quad K = \frac{1}{3}$$

De normaalspanning, σ'_{\perp} , geeft via de wrijvingshoek, ϕ , een schuifspanning, τ . Zeer ruwe lamelwanden worden aangenomen. De totale schuifkracht op beide lameloppervlakken, $2 \cdot T_{\text{gr.}}$, ten gevolge van deze schuifspanningen is:

$$2 \cdot T_{\text{gr.}} = T_{\text{gr.onder}} + T_{\text{gr.boven}} = 2 \cdot L \cdot h_{\text{bz//}} \cdot \tau = (\rho_{\text{bz}} - \rho_w) \cdot g \cdot L \cdot \sin\theta \cdot K \cdot \tan\phi \cdot h_{\text{bz//}}^2 \quad (5.17)$$

Invullen van de voorgaande vergelijkingen 5.14 tot en met 5.17 in evenwichtsvergelijking 5.13 levert na enig omwerken de evenwijdige zandbedhoogte, $h_{bz//}$, waarbij brugvorming begint op te treden als functie van de lamelafstand, D , de lamelhoek, θ , en het niveauverschil, Δh .

Herschrijven van vergelijkingen 5.14 tot en met 5.17 levert:

$$G_{//} = g \cdot L \cdot (\rho_{bz} - \rho_w) \cdot D \cdot \sin\theta \cdot h_{bz//}$$

$$F_{water} = g \cdot L \cdot \rho_w \cdot \Delta h \cdot D$$

$$T_{afsch.} = g \cdot L \cdot (\rho_{bz} - \rho_w) \cdot \tan\phi \cdot \cos\theta \cdot D \cdot h_{bz//}$$

$$2 \cdot T_{gr.} = g \cdot L \cdot (\rho_{bz} - \rho_w) \cdot K \cdot \tan\phi \cdot \sin\theta \cdot h_{bz//}^2$$

Het invullen van de vier voorgaande herschreven vergelijkingen in de evenwichtsvergelijking 5.13 geeft, na deling door $g \cdot L$:

$$(\rho_{bz} - \rho_w) \cdot D \cdot \sin\theta \cdot h_{bz//} = \rho_w \cdot \Delta h \cdot D + (\rho_{bz} - \rho_w) \cdot \tan\phi \cdot \cos\theta \cdot D \cdot h_{bz//} + (\rho_{bz} - \rho_w) \cdot K \cdot \tan\phi \cdot \sin\theta \cdot h_{bz//}^2$$

Dit wordt:

$$K \cdot \tan\phi \cdot \sin\theta \cdot h_{bz//}^2 + (\tan\phi \cdot \cos\theta - \sin\theta) \cdot D \cdot h_{bz//} + \frac{\rho_w}{\rho_{bz} - \rho_w} \cdot \Delta h \cdot D = 0 \quad (5.18)$$

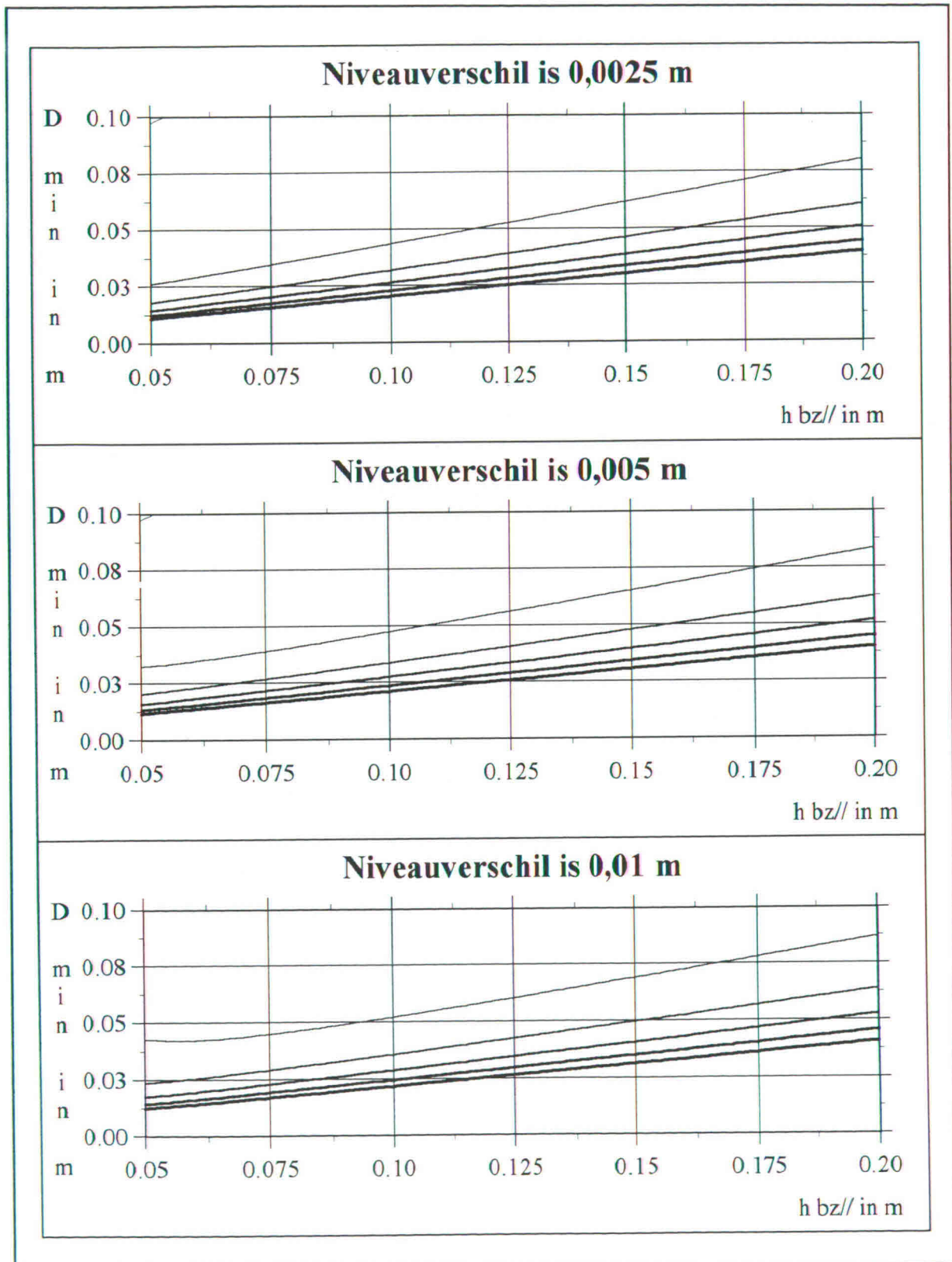
Het meest logische is de evenwijdige bezonkenzandhoogte, $h_{bz//}$, als functie van de variabelen, D , θ en Δh , te schrijven. Echter gezien de term in vergelijking 5.18 waarin de evenwijdige bezonkenzandhoogte kwadratisch voorkomt leidt dit tezamen met de goniometrische factoren in de termen tot een gecompliceerde uitwerking, die bovendien lastig is te doorzien.

Gekozen wordt om de minimale lamelafstand, $D_{min.}$, waarbij verstopping begint op te treden als functie van de andere drie variabelen, $h_{bz//}$, θ en Δh , te schrijven.

$$D_{min.} = \frac{K \cdot \tan\phi \cdot \sin\theta \cdot h_{bz//}^2}{(\sin\theta - \tan\phi \cdot \cos\theta) \cdot h_{bz//} - \frac{\rho_w}{\rho_{bz} - \rho_w} \cdot \Delta h}$$

De hoek van inwendige wrijving is, $\phi = 30^\circ$, de K-factor, $K = 1/3$, en de dichtheid van zandbed is $\rho_{bz} = 1,9 \cdot \rho_w$. Dit invullen geeft:

$$D_{min.} = \frac{\frac{1}{3} \cdot \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot \sin\theta \cdot h_{bz//}^2}{(\sin\theta - \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot \cos\theta) \cdot h_{bz//} - 1,11 \cdot \Delta h} \quad (5.19)$$



afb. 5.7: Grafieken met de minimale plaatafstand bij drie verschillende niveauverschillen, tegen de evenwijdige bezonkenzandlengte, weergegeven bij zes verschillende lamelhoeken volgens vgl. 5.19

40° (alleen in eerste twee grafieken, linksboven) is de dunste curven, vervolgens 50°, 60°, 70°, 80° en 90° is de dikste curve

Minimale lamelafstand bij bepaalde lamellendoorgang

Uit de grafieken in afbeelding 5.7 is te zien wat de invloed van de lamelhoek, het niveauverschil en de evenwijdige bezonkenzandlengte op de minimale lamelafstand is. De waarden van het niveauverschil zijn 0,0025, 0,005 en 0,01 m, deze komen overeen met de niveauverschillen bij de modelproeven met de lamellendoorgang, die verderop in dit hoofdstuk worden beschreven. De lamellengte bedraagt ongeveer 0,10 m bij deze modelproefopstelling, zoals is te zien in bijlage B, afbeelding B2. Aangenomen wordt dat de zandlaag evenwijdig aan de lamellen in de orde van grote van de flaplengte zal zijn. De bezonkenzandlaaglengte is langs de horizontale assen uitgezet met een bereik van 0 tot 0,20 m. De lamelafstand is weergegeven langs de verticale assen van 0 tot 0,20 m. Bij de modelproeven bedroegen de lamelafstanden 0,025 m en 0,01 m.

De grafieken in afbeelding 5.7 zijn verkregen door te rekenen volgens vergelijking 5.19. Duidelijk is de stijging van de minimale lamelafstand bij toename van de evenwijdige zandpakketlengte waar te nemen. Verder is duidelijk te zien dat een vergroting van de lamelhoek, dikkere lijnen, een kleinere minimale lamelafstand geeft. Door onderlinge vergelijking van de drie grafieken is te zien dat een toenemend niveauverschil een grotere minimale lamelafstand geeft.

De drie in de vorige alinea beschreven effecten zijn volgens verwachting, aangezien een grotere zandbedlengte de inklemming door vergroting van de grondspanningen doet toenemen. Een toenemende grondspanning veroorzaakt een moeilijker neerwaarts bewegen van het zandpakket. Vergroting van de lamelhoek betekent dat de lamellen verticaler staan, waardoor de schuifspanning die door de normaalkracht van het zandpakket op de onderlamel worden uitgeoefend kleiner zijn. Tenslotte betekent een groter niveauverschil een grotere waterdruk onder tegen de flap, met als gevolg dat het zandpakket een grotere kracht naar beneden om de flap te openen moet leveren.

De minimale lamelafstanden die uit de afleiding in deze paragraaf volgen met als resultaat vergelijking 5.19, geven waarschijnlijk een tamelijk negatief beeld van de verstoppingseffecten in de lamellendoorgang. Bij de lamellendoorgang is ook altijd de doorgaande stroom, u_d , afbeelding 5.2, aanwezig en bovendien zijn altijd vooral in de praktijk trillingen aanwezig waardoor het zandpakket zich niet makkelijk kan schrap zetten tussen twee opeenvolgende lamellen.

Wordt de lamel in langsrichting beschouwd dan is tevens uit modelproeven gebleken dat op de plaatsen waar inklemming optreedt een steeds groter wordende zandophoping ontstaat. Wordt deze ophoping te groot dan wordt de dwarsdoorsnede waardoor de doorgaande stroming gaar zo klein dat uitschuring ontstaat die deze ophoping weer doet afbrokkelen. Het ontstaan van ophoping is duidelijk zichtbaar op foto's D7, D10, D12 en D13 in bijlage D.

Bij de afleiding van de minimale lamelafstand in deze subparagraaf is de situatie van het lamellenbezinkstelsel met flappen sterk vereenvoudigd, om tot een rekenkundige benadering van deze minimale lamelafstand te kunnen komen. Met name het wigvormige zandpakket dat onder in de lamellendoorgang is buiten beschouwing gelaten. Het verdere mechanisme dat de flap doet opengaan is ook zeer eenvoudig weergegeven. Doch geeft de afleiding in ieder geval inzicht in de orde van grote van verstopping, zodat hier bij het ontwerpen van lamellendoorgangen rekening mee kan worden gehouden.

5.1.4 Stijfheid en sterkte

Doorbuiging van de lamellen

De grootste doorbuiging vindt plaats halverwege de lamellengte, als de lamel over de breedte van 1 m niet wordt ondersteund. Deze doorbuiging wordt veroorzaakt door het drukverschil tussen het niveau binnen en buiten de lamel. Bij het toepassen van een enkele doorgang worden beide lamellen belast op doorbuiging door de waterdrukken aan weerszijden van de lamellen. In dit geval zal de onderlamel minder doorbuigen doordat het pakket van neergedaalde deeltjes op de lamel de doorbuiging door de overdruk van het mengsel aan de buitenzijde tegenwerkt.

Bij een lamellensysteem dat meerdere doorgangen telt, zoals de uiteindelijke proefopstelling behoeven alleen de twee buitenste lamellen extra te worden verstevigd en worden de andere lamellen enkel door het neergedaalde deeltjespakket op doorbuiging belast.

Voor de berekening van de maximale doorbuiging worden de plaatsen als aan weerszijde ingeklemd met over de hele breedte een gelijk verdeelde belasting beschouwd.

Voor de maximale doorbuiging, δ_{\max} geldt [GERE AND TIMOSHENKO]:

$$\delta_{\max} = \frac{1}{384} \cdot \frac{Q \cdot L^3}{E \cdot I}$$

Het kwadratisch oppervlakte moment, I is:

$$I = \frac{b \cdot t^3}{12}$$

De totale kracht, Q is:

$$Q = b \cdot L \cdot \Delta p$$

met b is de breedte langs de lamellengte als het ware.

Voor de maximale uitwijking geldt dus:

$$\delta_{\max} = \frac{1}{32} \cdot \frac{\Delta p \cdot L^4}{E \cdot t^3} \quad (5.20)$$

Maximale uitwijking bij de enkele doorgang

Allereerst wordt de maximale buiging berekend als de lamellen alleen aan de uiteinden worden ondersteund.

Het drukverschil tussen de binnen en de buitenzijde is als het niveau buiten de lamel

$\Delta h = 5 \cdot 10^{-2}$ m hoger is dan binnen als volgt te bepalen:

$$\Delta p = \rho_m \cdot g \cdot \Delta h$$

Invullen van $\rho_m = 1,1 \cdot 10^3$ kg/m³ geeft: $\Delta p = 539$ N/m²

De lamellen worden 1 m lang genomen in plaats van 0,8 m, zodat aan weerszijde enige ruimte is voor het plaatsen van instroom en uitstroom constructies. De dikte van de plexiglasplaten moet circa $t = 5 \cdot 10^{-3}$ m zijn en de elasticiteitsmodulus, $E_{\text{plexiglas}} = 3 \cdot 10^9$ N/m².

Invullen van de hierboven vermelde waarden in vergelijking 5.20 geeft: $\delta_{\text{max}} = 4 \cdot 10^{-3}$ m

De maximale doorbuiging moet kleiner zijn dan $5 \cdot 10^{-4}$ m dit betekent dat voor de maximale niet ondersteunde lengte, L^* , geldt:

$$B^* < \sqrt[4]{\frac{32 \cdot E_{\text{plexiglas}} \cdot t^3 \cdot \delta_{\text{max}}}{\Delta p}} \quad (5.21)$$

Invullen van de vergelijking geeft: $B^* > 0,32$ m. Voor de constructie kan om de 0,2 m een ondersteuning door middel van een verbinding tussen de lamellen worden aangebracht. Dit gebeuren door middel van een boutverbindingen. Het doorbuigingsverloop zal door enigszins anders zijn dan volgens de aan weerszijde ingeklemde situatie, echter toch zal het effect ongeveer hetzelfde zijn voor de maximale buiging.

Maximale uitwijking bij het modelsysteem

Het modelsysteem heeft met de 11 doorgangen, 12 lamellen, waarbij de twee buitenste lamellen zoals eerder besproken het zwaarst op doorbuiging worden belast. De lamellen van dit systeem zullen worden vervaardigd van staal, dat een veel hogere elasticiteitsmodulus heeft dan plexiglas. In hoeverre de lamellen van dit systeem worden belast wordt als volgt berekend.

De dikte van de stalen platen is, $t = 3 \cdot 10^{-3}$ m. De platen zijn minder lang, namelijk $L = 0,8$ m, Voor het drukverschil wordt wederom $\Delta p = 539$ N/m² genomen. De elasticiteitsmodulus van staal is, $E_{\text{staal}} = 2,1 \cdot 10^{11}$ N/m².

Invullen van vergelijking 5.20 geeft voor de maximale doorbuiging van de buitenste lamellen, $\delta_{\text{max}} = 1 \cdot 10^{-3}$ m. Bij de enkele doorgang werd de toelaatbare maximale doorbuiging gesteld op $0,5 \cdot 10^{-3}$ m, echter aangezien nu de maximale doorgang niet extreem veel wordt overschreden, en het maken van extra ondersteuning ingewikkeld is kan worden overwogen geen extra ondersteuning te plaatsen. Is deze doorbuiging niet aanvaardbaar dan kunnen op de twee buitenste lamellen strips worden gelast ter verhoging van de stijfheid. Deze strips kunnen het best aan de buitenzijde worden bevestigd, zodat de stroming in de buitenste doorgangen niet wordt verstoord.

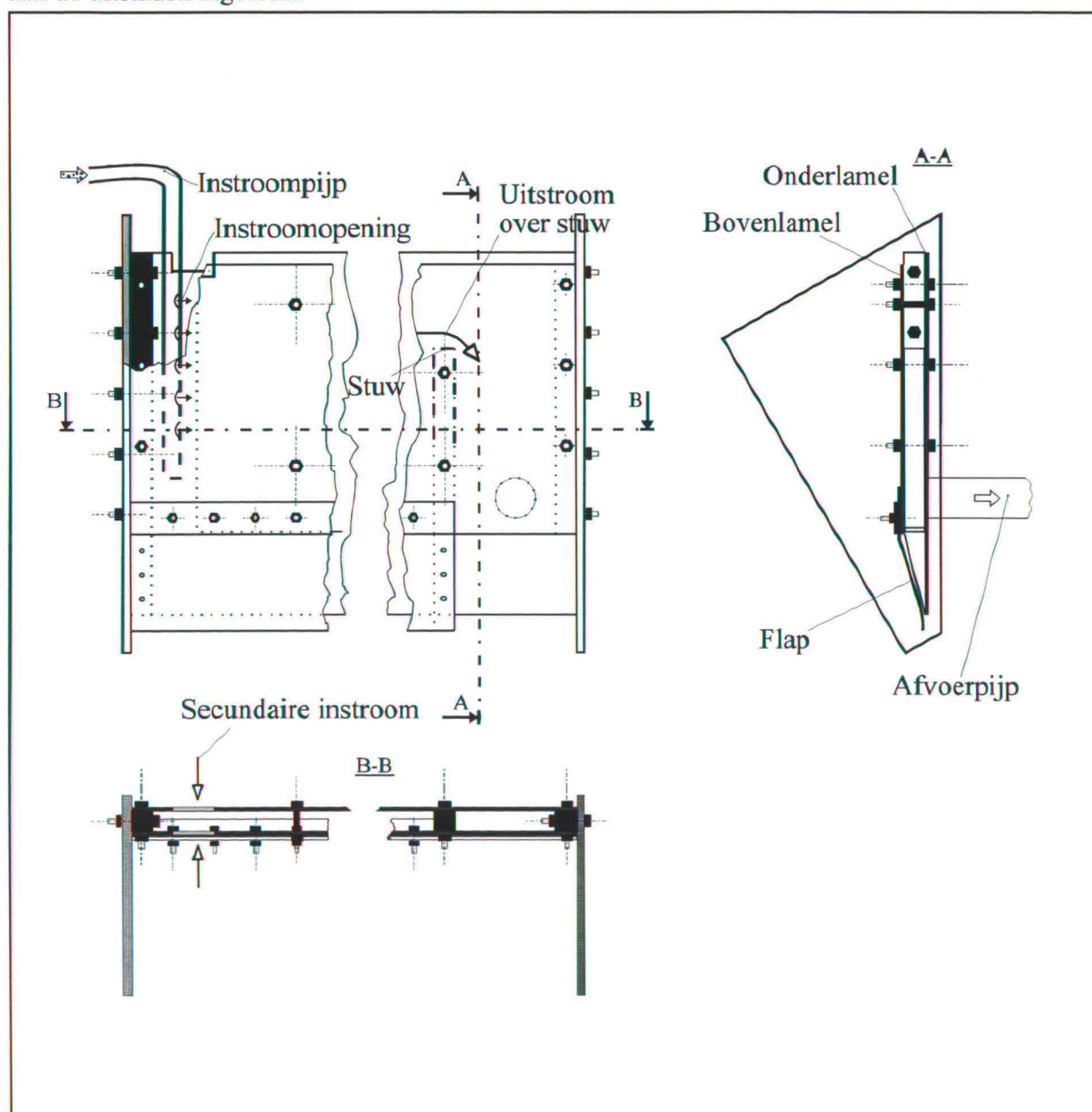
5.2 Proefuitvoering

In deze paragraaf worden achtereenvolgens besproken, het ontwerp van de lamellendoorgang en de beproevingswijze op het überhaupt functioneren van het systeem

5.2.1 Ontwerp van lamellenbezinker met flap

Op basis van de vorige paragraaf en op basis van de mogelijkheden die de HAM-research faciliteiten bieden wordt in deze paragraaf uiteengezet hoe de proefconstructie tot stand komt.

In bijlage B staan constructie tekeningen, die zijn gebruikt bij het vervaardigen van de lamellendoorgang. De uiteindelijke constructie (afb. 5.7 en subbijlagen D3 en D4) is qua voor het proces van belang zijnde afmetingen identiek aan dit ontwerp. Echter zijn andere afmetingen en materialen in het vervaardigde model anders geworden. De twee zijplaten zijn bijvoorbeeld ook in plexiglas uitgevoerd en de flap is in plaats van met schroeven met behulp van een lijmverbinding aan de uiteinden afgedicht.



afb. 5.8: Lamellendoorgang ontwerp, enkele doorgang

5.2.2 Beproeving van de lamellendoorgang

Testen van de flapwerking

Allereerst wordt de doorgang in de bak gehangen en wordt gekeken naar in hoeverre lek optreedt. Enige lek zou optreden aangezien de flap met name aan de korte zijden tegen de onderlamel niet goed afsloot. De lange zijden sluiten voldoende af. De plexiglas platen zijn door middel van boutverbinding op elkaar aangesloten zonder pakking of lijmlaag. Dit levert een geringe lek op. Het voordeel van het niet lijmen is dat de opstelling eenvoudig is te demonteren, bijvoorbeeld ten behoeve van het plaatsen van een derde lamel in het midden. De lekkage leverde een stuwhoogte van ongeveer $0,5 \cdot 10^{-2}$ m op, dit komt overeen met een debiet van ongeveer $5 \cdot 10^{-5}$ m³/s.

Vervolgens wordt de bak zo gehangen dat een niveauverschil evenwijdig aan de lamellen over de lamellen ontstaan van circa 4 cm. De bak wordt van boven gevuld met kleine hoeveelheden zand. Wanneer de doorgang voor meer dan de helft met zand is gevuld blijkt de flap nog gesloten te zijn. Wordt de opstelling geschud dan vloeit een beetje suspensie door de flap.

Voor een goede werking van het proces moet het niveau verschil kleiner dan $4 \cdot 10^{-2}$ m zijn. Om dit verschil te verkleinen zonder de lamellendoorgang in hoogte te hoeven veranderen wordt het niveau binnen de lamellendoorgang verhoogd door middel van een watertoevoer via een slang. Bij een niveauverschil van tussen de halve en hele centimeter blijkt de flap open te gaan en stroomt het pakket langzaam naar beneden tot een deel van ongeveer $3 \cdot 10^{-2}$ m overblijft.

Testen van het stromingsverloop

Nu wordt in de opstelling een instroom bevestigd, waardoor leidingwater met een debiet van ongeveer $0,5 \cdot 10^{-3}$ m³/s instroomt. De hoogte van de lamellendoorgang ten opzichte van de bak wordt zo ingesteld, dat een niveauverschil van ruim een halve cm ontstaat. De flap blijkt door de waterdruk en eigen gewicht en stijfheid goed te sluiten. Wederom worden van bovenaf hoeveelheden zand in de lamel gestrooid. De flap blijkt open te gaan wanneer ongeveer $4 \cdot 10^{-2}$ m tot $5 \cdot 10^{-2}$ m zand beneden is opgehoopt.

Aangezien het systeem en bovenal de flap naar verwachting functioneert wordt de opstelling zo gemaakt dat een zandwatermengsel vanuit een grote bak met behulp van een klein pompsysteem via de instroom in de lamellendoorgang belandt. Gedurende lange tijd blijkt dit systeem goed te functioneren, zodat besloten wordt de proefopstelling zo te maken dat de ingaande dichtheden en debieten controleerbaar en instelbaar worden.

Aansluiten systeem op bestaande pompsysteem

De installatie wordt aangesloten op het pompsysteem van de opstelling waarmee de hopperbeladingsproeven zoals eerder aan de orde gekomen worden uitgevoerd. Het voordeel hiervan is dat de ingaande dichtheden tamelijk nauwkeurig kunnen worden ingesteld. Een probleem is dat dit systeem is ingericht voor debieten van $8 \cdot 10^{-3}$ m³/s en $16 \cdot 10^{-3}$ m³/s. Aangezien bij de lamellendoorgang sprake is van 1 zestiende van deze debieten zal het systeem zo moeten worden gemaakt dat een toevoer met zulke lage debieten wordt verkregen. Dit wordt opgelost door de toevoer vanaf de pomp met behulp van een klep in te stellen op $6 \cdot 10^{-3}$ m³/s. Een lager debiet is niet mogelijk met deze pomp en bovendien zullen de leidingen snel verzanden.

Het grootste deel van de 6 l/s zal worden gebypassed, zodat door middel van knijpen met kranen de debieten van 0,5 l/s en 1 l/s ongeveer kunnen worden ingesteld. De verliezen van het systeem door lekken blijken toch aanzienlijk te zijn, ongeveer $0,15 \cdot 10^{-3}$ m³/s. Dit is veel ten

opzichte van het doorstromende debiet van $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Vooral de flap wordt aan de zijden beter afgedicht door middel van lijm.

Niet eenvoudig te veranderen zijn de geometrische aspecten van de opstelling, zoals de hoek, de lamelafstand en het niveauverschil.

De lamellen zullen onder twee verschillende hoeken worden getest, namelijk 60° en 45° . Standaard is de opstelling gemaakt voor de in de literatuur veel voorkomende waarde van 60° , echter de opstelling kan eenvoudig worden geroteerd.

De lamelafstand kan ook op twee wijzen worden ingesteld, standaard was deze $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ met een doorgang. Ook is het mogelijk twee doorgangen met lamelafstanden van $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ te krijgen door plaatsen van een extra lamel met een dikte van $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ tussen de twee buitenste lamellen.

Het niveauverschil is in principe niet moeilijk te veranderen. Het wordt bepaald door hoogte plaatsing ten opzichte van de overvloei van de bak en door het instromende debiet. De lamellendoorgang zal uit praktisch oogpunt en uit het probleem dat er te veel proeven ontstaan steeds op dezelfde hoogte ten opzichte van de bak worden gehouden. Bovendien maakt het mijns inziens niet heel veel uit, mits zich een laag van ruim $2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ bezonken deeltjes continu tegen de flap bevindt. Deze laag moet niet te hoog worden aangezien de doorgang voor het mengsel te klein wordt, waardoor hoge doorstromingsnelheden met als gevolg een korte bezinktijd en veel opwerveling ontstaan.

Variatie van de proeven

Aanvankelijk was het de bedoeling de lamellendoorgang te testen bij twee verschillende debieten ($0,5$ en $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$), vier verschillende ingaande dichtheden ($1,1$, $1,2$, $1,3$ en $1,4 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$), twee lamelhoeken en twee lamelafstanden (2×10 en 25 mm). Dit brengt het aantal verschillende proeven op 32.

Uiteindelijk blijkt na enkele proefnamen dat de totale proefopstelling niet eenvoudig is te regelen bij dergelijke lage debieten. Met name de debietregeling vormt een probleem, het debiet is niet eenvoudig af te stellen door het knijpen van de kranen op het punt waar de stromen ten behoeve van de bypass worden gesplitst. Besloten wordt het debiet door de doorgang zo goed mogelijk op $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ in te stellen. Vervolgens wordt de ingaande dichtheid ingesteld op $1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, waarna circa tien minuten stationair door de doorgang wordt gedraaid zodat met name de secundaire stroom zich in kan stellen.

De doorgang zal nog wel worden getest met de twee lamelafstanden, enkele doorgang ($D = 25 \text{ mm}$, bijlage B, afb. B1) en dubbele doorgang ($D = 2 \times 10 \text{ mm}$, bijlage B, afb. B6). In plaats van bij een tweetal hoeken, 45° en 60° , zal bij een verticale stand, 90° , worden getest. Uit de lamelwerking bij deze verticale stand valt dan af te leiden of het lamellensysteem inderdaad een verbetering oplevert. Het aantal proeven is nu dus teruggebracht naar zes.

5.3 Resultaten en interpretatie

D in mm	θ	ρ_{in} in 10^3 kg/m^3 <small>\approx IJking afb.C3</small>	$\rho_{uit, gem}$ in 10^3 kg/m^3	Q_{gem} in $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$D_{max.}$ in m vgl. 5.6	OV _{flap} in % vgl. 3.2
2x10	45°	1,24	1,002	0,43	1,4	0,8
	60°-1	$\approx 1,25$	1,009	0,41	1,0	4
	60°-2	1,24	1,019	0,47	0,9	8
	90°	1,22	1,073	0,41	n.v.t.	32
25	45°-1	$\approx 1,25$	1,018	0,52	0,14	7
	45°-2	$\approx 1,25$	1,001	0,40	0,19	0,4
	60°-1	$\approx 1,25$	1,010	0,59	0,09	4
	60°-2	$\approx 1,25$	1,012	0,54	0,10	5
	90°	$\approx 1,25$	1,053	0,50	n.v.t.	22

tab. 5.3: Gegevens uit de proeven bij enkele en dubbele doorgangen en bij diverse hoeken

Controle op lamelafstand

In de bovenstaande tabel staat weergegeven onder $D_{max.}$ wat de maximale waarde van de doorgang mag zijn. Bij de dubbele doorgang en bij de enkele doorgang zal deze waarde respectievelijk groter dan $10 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ en $25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ moeten zijn. De waarden voor $D_{max.}$ kunnen worden verkregen door het invullen van de onderstaande vergelijking, die voortkomt uit vergelijkingen 5.2 en 5.6:

$$D_{max.} = \frac{w_0 \cdot L \cdot \cos\theta \cdot A_d}{Q_{gem}}$$

Er geldt:

$$A_{d, 2x10 \text{ mm}} = 0,3 \cdot 2 \cdot 0,01 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_{d, 25 \text{ mm}} = 0,3 \cdot 0,025 = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$L = 0,8 \text{ m}$$

$$D_{2x10, max.} = 8,64 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\cos\theta}{Q_{gem}} \quad \wedge \quad D_{25, max.} = 1,08 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\cos\theta}{Q_{gem}}$$

Gemeten uitgaande dichtheid lager dan waterdichtheid

In bijlage C is bij diverse proeven de aan de hand van de maatbekers bepaalde dichtheid kleiner dan de waterdichtheid. Vermoedelijk komt dit door het ontstaan van een onnauwkeurige meting door de aanwezigheid van luchtbellens in de maatbekers. Een kleine hoeveelheid luchtbellens heeft bij de lage te meten dichtheden een grote invloed. Dit probleem kan waarschijnlijk worden opgelost door de maatbeker te schudden, waardoor bijvoorbeeld lucht die zich onder de bezonkenlaag in de maatbeker bevindt de gelegenheid krijgt te ontsnappen.

5.3.1 Lamelwerking

Of de lamellen werken blijkt uit de vergelijking van de doorgangen opgesteld onder een hoek, 45° en 60° , met de verticale stand, 90° . Blijkens tabel 5.3 en de afbeeldingen C1 en C2 uit de bijlage lijkt de lamel inderdaad te functioneren. In de verticale stand, wanneer de lamel niet als bezinker functioneert blijken zowel de enkele als de dubbele doorgang in alle gevallen veel grotere overvloeiverliezen te geven. Dit duidt erop dat de lamellenbezinker werkt. Opgemerkt dient te worden dat de flap ook in de verticale stand goed afsluit, nu niet meer door zijn eigen gewicht, die toch verwaarloosbaar was, maar enkel door niveau verschil in en buiten de doorgang.

Verondersteld overvloeiverlies bij verticale doorgang, $\theta = 90^\circ$

Als wordt verondersteld dat ideale bezinking volgens het model van Camp optreedt, dan kan het overvloeiverlies als volgt worden bepaald.

De verblijftijd, t_{verblijf} van een deeltjes in de doorgang bedraagt:

$$t_{\text{verblijf}} = \frac{L}{u_d} = \frac{L}{\frac{Q}{A_d}} = \frac{L \cdot A_d}{Q}$$

De afstand, Δz , die een deeltje gedurende het verblijf in de doorgang neerwaarts kan afleggen is gelijk aan het produkt van de bezinksnelheid en de verblijftijd:

$$\Delta z = t_{\text{verblijf}} \cdot w_0 = \frac{L \cdot A_d \cdot w_0}{Q}$$

Voor de grote van de dwarsdoorgang geldt:

$$A_d = B \cdot D$$

Uit de twee voorgaande vergelijkingen volgt:

$$\Delta z = \frac{L \cdot B \cdot w_0}{Q} \cdot D$$

Het overvloeiverlies is nu te schrijven als is het quotiënt van de weg die een deeltje neerwaarts kan afleggen gedurende de verblijftijd, Δz , en de totale verticale afstand die gelijk is aan de lamelbreedte, B .

$$OV_{\text{berekend}} = 1 - \frac{\Delta z}{B} = 1 - \frac{L \cdot w_0}{Q} \cdot D$$

Invullen van $L = 0,8 \text{ m}$, $w_0 = 18 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, $Q = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ en $D_{2 \times 10} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ of $D_{25} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ geeft: $OV_{2 \times 10, \text{ berekend}} = 42 \%$ (Bij $Q = 0,41 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ is $OV_{2 \times 10, \text{ berekend}} = 30 \%$) en $OV_{25, \text{ berekend}} = 28 \%$.

Deze waarden wijken enigszins af van de gedurende de proefnamen gevonden waarden, tabel 5.3: $OV_{2 \times 10, \text{ gemeten}} = 32\%$ en $OV_{25, \text{ gemeten}} = 22\%$. Bij de dubbele doorgang, $D = 2 \times 10$, was het debiet echter geen $0,41 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ in plaats van $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, waardoor berekende tussen haakjes in de vorige alinea vermelde berekende overvloeiverlies met het gemeten moet worden vergeleken. Vooral het overvloeiverlies bij de dubbele doorgang blijkt volgens het Camp model niet veel af te wijken..

Verstopping van zandpakket

Bij het construeren van een lamellenbezinkstelsel moet rekening worden gehouden met verstopping in de lamellendoorgang door ophoping van zand onder in de doorgang. Dit zand veroorzaakt een zandpakket dat door de waterdruk tegen de flap, de wrijving langs de onderlamel en de verklemming door grondspanningen niet neerwaarts kan bewegen. Dit probleem is te voorkomen door een niet te grote lamelafstand, niet te kleine lamelhoek, niet te groot niveauverschil. Aangezien deze drie factoren een groot zandpakket in de doorgang veroorzaken, met als gevolg de verklemming, die het zandpakket steeds groter doet worden zodat verstopping kan ontstaan. Echter door de verkleining van de dwarsdoorgang van de lamellendoorgang zullen de stroomsnelheden toenemen, waardoor het zandpakket van boven wordt uitgeschuurd en weggedrukt.

5.3.2 Flapwerking

Flap open laten blijkt de proefopstelling niet geschikt voor te zijn. Het instromende mengsel daalt gelijk bij de instroom naar de bodem van de doorgang, alwaar het naar beneden de bak instroomt. Mogelijkerwijs is dit een dichtheidstroming veroorzaakt door de hogere dichtheid van het instromende mengsel ten opzichte van de rest van de mengsels in de doorgang.

Aan de uitstroomzijde, lamelstuwzijde, stroomt mengsel met een lage dichtheid uit de modelhopper in de doorgang. Dit mengsel vormt het uitstromende mengsel, waardoor het overvloeiverlies zonder flap volgens deze proefopstelling nihil is.

In werkelijkheid zou het mengsel niet zo stromen. Het mengsel dat via de instroom de doorgang instroomt heeft een lagere dichtheid dan het mengsel lager in de doorgang dan wel lager in de hopper. Het mengsel zal dus bij de instroom niet neerwaarts gaan stromen. Verder zou als aan de uitstroomzijde mengsel van onderin de hopper naar boven de doorgang in zou stromen, dit juist mengsel met een hoge dichtheid zijn. In tegenstelling tot het mengsel met een zeer lage dichtheid in de proefopstelling.

Met deze opstelling is het effect van de flappen niet aan te tonen.

5.3.3 Combinatie van lamel en flap

Weliswaar is het veronderstelde positieve effect van de flap niet bewezen, toch blijkt het systeem als geheel goed te functioneren. Een stationair proces stelt zich in waarbij bij een bepaald niveau verschil constant een bepaalde hoeveelheid bezonken deeltjes tegen de flap aan ligt. Wordt de dichtheid van het doorstromende mengsel laag, bijvoorbeeld bij waterdraaien, dan sluit de flap volledig af, waardoor geen nutteloos mengsel onder het lamellensysteem kan komen.

Aanvankelijk was verondersteld dat de flap moeilijk waterdicht was te maken, waardoor het niveauverschil ook niet kan worden verkregen, met als gevolg dat de flap niet afsluit. Bij de proefnamen bij een debiet van circa $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ blijkt de lek, gemeten bij volle en bij lege flap zonder instroom, nooit meer dan 10 % van het eerder genoemde debiet te bedragen.

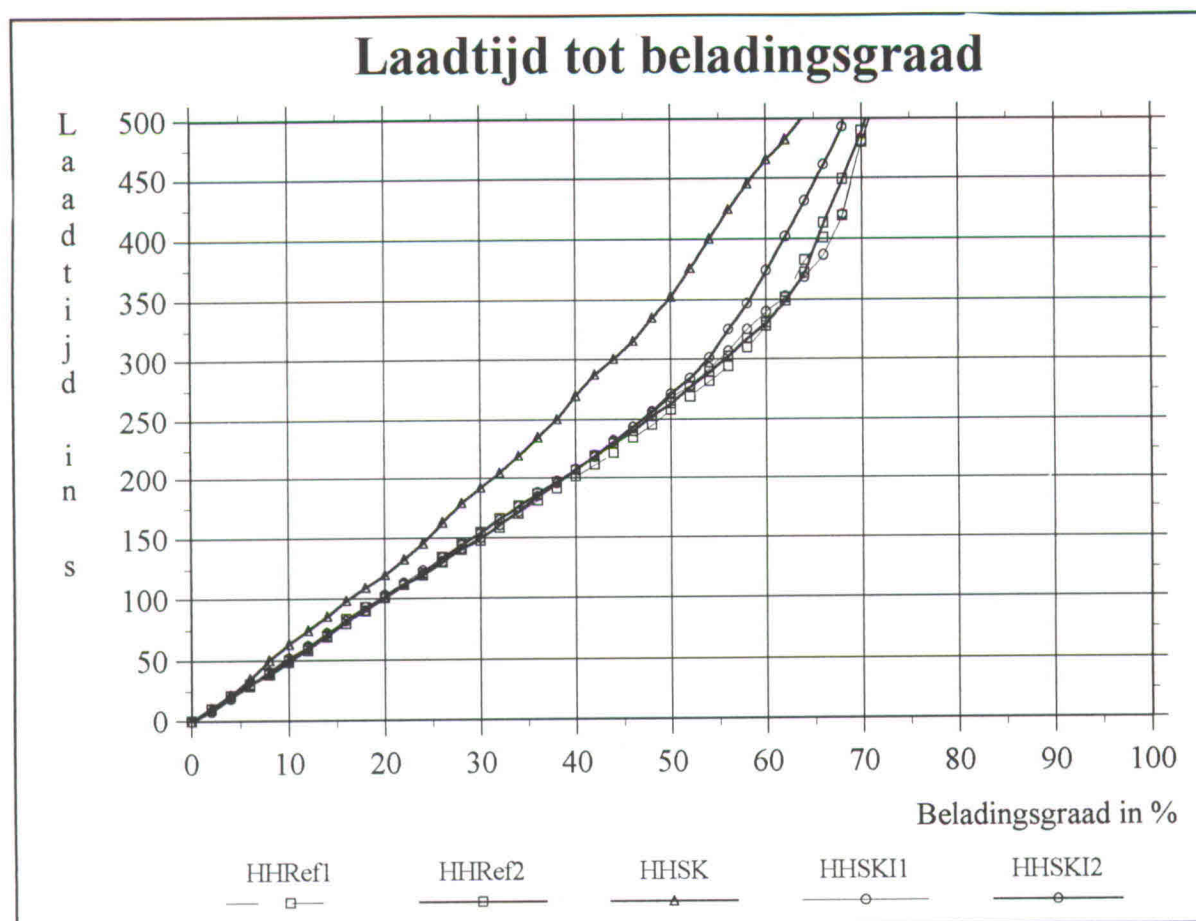
6 Resultaten en interpretatie

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de referentie configuratie en de schottenkerend vergeleken. Tevens worden de resultaten van de lamellenbezinker met flappen in het kort weer aangehaald.

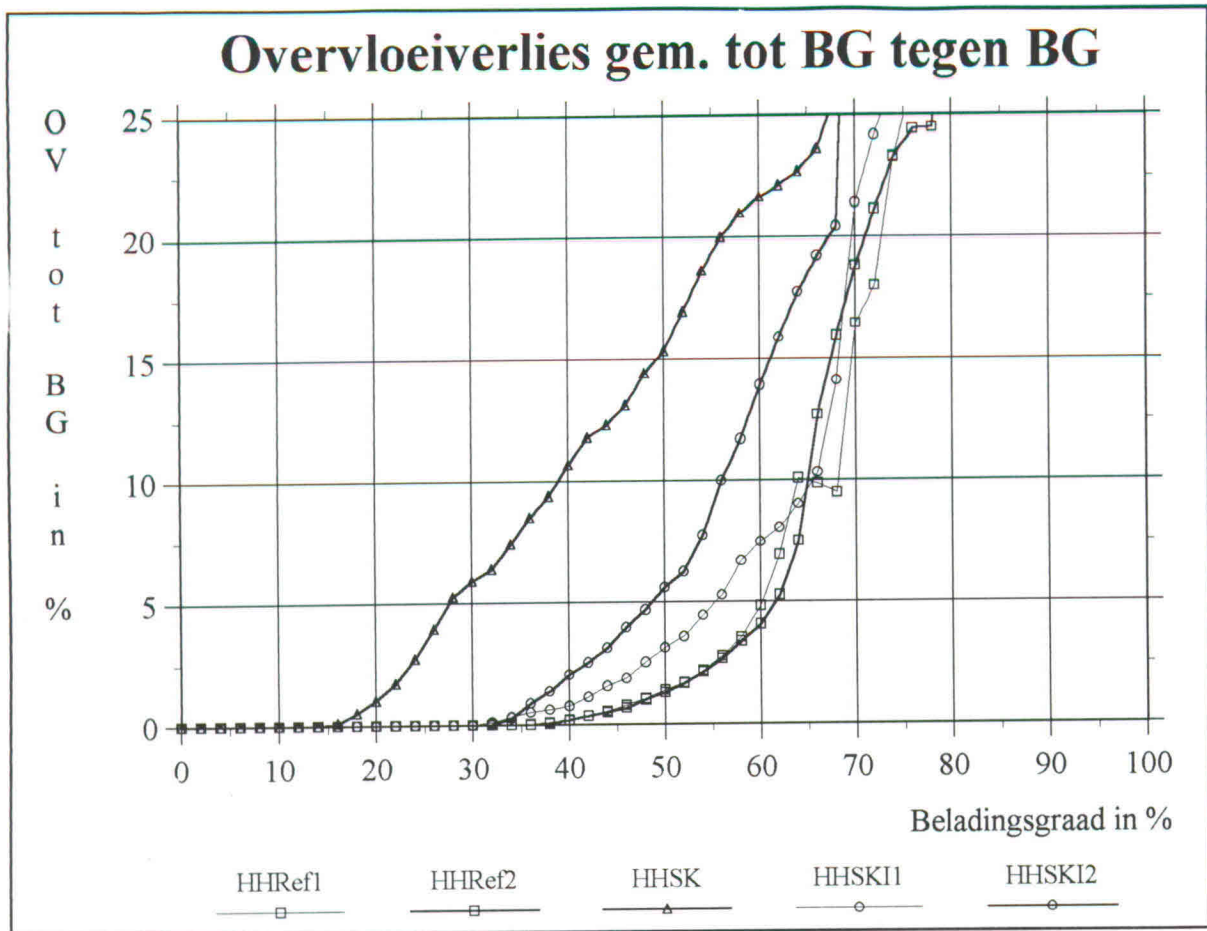
6.1 Referentie configuratie en schottenkerend

Zoals eerder vermeld wijkt de ingaande dichtheid af bij vooral de proeven met de referentie configuratie die bij lage ingaande dichtheid zijn uitgevoerd. Alleen de proeven waarbij de dichtheid en het debiet beiden hoog zijn worden beschouwd.

Hoog debiet



afb. 6.1: Laadtijd tot beladingsgraad bij de proeven bij hoog debiet en hoge dichtheid



afb. 6.2: Overvloeiverlies gemiddeld tot BG tegen BG bij hoog debiet en hoge dichtheid

In grafiek in afbeelding 6.1 is te zien, dat de laadtijd tot een bepaalde beladingsgraad voor de referentie proef en de schottenkerende proef niet significant verschillen. Echter uit de grafiek in afbeelding 6.2 blijkt dat het overvloeiverlies bij een bepaalde beladingsgraad wel ongunstiger is bij het intermitterend laden.

Laag debiet

De proeven bij laag debiet zijn, afgezien van het feit dat weinig resultaten beschikbaar zijn niet interessant. De proeven hebben zoals eerder in dit rapport beschreven laten zien, dat het laden bij het hoge debiet en de hoge dichtheid het meest gunstig is.

6.2 Lamellenbezinker met flappen

Lamelwerking

Uit de grafieken in afbeeldingen C1 en C2 blijkt dat het lamellensysteem functioneert, zoals inmiddels in paragraaf 5.3 is beschreven. De lamellendoorgang werkt niet bij verticale opstelling, $\theta = 90^\circ$. Dit blijkt uit het overvloeiverlies over de lamellendoorgang dat voor de dubbele doorgang 32 % en voor de enkele doorgang 22 % bedroeg. Het hogere overvloeiverlies bij de dubbele doorgang is te verklaren door de grotere doorstroomsnelheid veroorzaakt door het kleinere dwarsoppervlak.

Bij het onder een hoek opstellen van de lamellendoorgang, 45° en 60° blijkt het overvloeiverlies gemiddeld over alle proeven bij deze hoeken gedaan dat het overvloeiverlies ruim 4 % over de lamellendoorgang bedraagt.

Flapwerking

De werking van de flap is niet aangetoond met de in dit onderzoek uitgevoerde proeven, doordat de opstelling niet geschikt hiervoor bleek. Dit werd inmiddels in subparagraaf 5.3.2 beschreven.

Verstopping

In verband met het optreden van verstopping, zoals uit de proeven met de lamellendoorgangen is gebleken moet de doorgang aan een aantal eisen voldoen. De lamelafstand mag niet te klein zijn in verband met de verhouding tussen massa van het zandpakket en de schuifspanningen langs de lamellen. Verder moeten de lamellen verticaal genoeg zijn in verband met de normaalkracht van het zandpakket en het zandpakket dat zich ophoopt onderin de doorgang mag niet te groot zijn in verband met de grootte van de korrelspanningen die het pakket inklemmen.

Conclusies

Referentie configuratie en schottenkerend

Hoge dichtheid

Het is gebleken dat het laden bij hoge dichtheid gunstig is bij het laden van een bij aanvang met water gevulde modelhopper. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat het instromende mengsel door dichtheidstroming sneller neerwaarts zakt. Verder zijn de menglagen bij de instroom stabiel, door het grotere dichtheidsverschil tussen de instroom en het mengsel dat zich in de bak bevindt. Tenslotte is de bak meer gevuld met nuttige lading op het moment dat het eerste ingestromende mengsel de overvloed begint te bereiken.

Intermitterend laden

Uit de resultaten van de schottenkerend intermitterend en niet intermitterend proeven kan worden geconcludeerd, dat het intermitterend laden gunstiger is. Echter zal het in de praktijk niet eenvoudig zijn te bepalen wanneer moet worden geschakeld. Bij de proeven was de suspensiestroom over het zandbed bij de uitstroom visueel moeilijk of soms helemaal niet waarneembaar.

Schottenkerend

Het beladen met schottenkerend is minder goed dan het laden met de referentie configuratie. Volgens het model van Camp zou een even grote hoeveelheid deeltjes moeten bezinken. Waarschijnlijk is de schottenkerende beladingswijze slechter door het minder vloeiend verlopen van de stromingen, veroorzaakt door de omkering van de stroming.

Lamellenbezinker met flappen

Lamellen

De lamellen die onder een hoek van ongeveer 45° tot 60° worden opgesteld geven een veel beter bezinkresultaat, dan bij de verticale opstelling (90°) het geval is. Bij de verticale opstelling van de lamellen is het overvloeiverlies over een lamellendoorgang een veelvoud van hetzelfde overvloeiverlies bij de lamellen onder een hoek geplaatst.

Flappen

De flappen lijken te functioneren, echter of het toepassen van de flappen daadwerkelijk een veel beter bezinkendement oplevert zal nader moeten worden onderzocht. Het is verstandig bij verdere proeven met modellen of prototypen de lamellen dusdanig op te stellen dat de flappen kunnen worden verwijderd.

Verstopping

Onderin de lamellendoorgang kan verstopping ontstaan door de ophoping van zand, des te meer zand ophoopt, des te meer het zandpakket zich inklemt tussen de lamellen. Deze inklemming wordt veroorzaakt door de schuifspanning langs de onderlamel, de schuifspanningen langs beide lamellen door de verhoogde korrelspanningen door het gewicht van het zandpakket en door het waterniveauverschil dat de flap dichtdrukt. Echter dit verstoppingsprobleem zal in de praktijk meevallen door de doorstroming in langsrichting van de lamellen.

Combinatie lamellen en flappen

Het combineren van de lamellen en flappen is tevens constructief tamelijk eenvoudig te realiseren. De flappen werken door verandering van het drukverschil over de flap. Voor een goede opbouw van dit drukverschil mag in het systeem niet te veel lek optreden. Met name het waterdicht maken van de flapbevestiging leek aanvankelijk een probleem te zijn. Bij de proefopstelling van de lamellendoorgang met flap is de lek in alle gevallen kleiner dan 10 % van het debiet geweest. Dit is een acceptabele hoeveelheid lek, aangezien het systeem in de praktijk ook niet volledig waterdicht zal zijn.

Referenties

CAMP T.R., *Sedimentation and the design of settling tanks*, Trans American Society of Civil Engineering, 1946.

GERE AND TIMOSHENKO, *Mechanics of materials*, PWS Engineering, Boston, Massachusetts, 1984.

HUISMAN L., *Sedimentation and flotation mechanical filtration*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, 1973.

KONING J. DE, *Constant Tonnage Loading Systems of Trailing Suction Hopper Dredgers*, Internationale Cursus: Modern Dredging, 1977.

MEEUWISSEN M.J.P., *Stagerapport: Modelbeunbezinking, variatie van debiet en inlaatsysteem*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Werktuigbouwkunde, 1992.

MEEUWISSEN M.J.P., *Eerste afstudeerrapport: Sedimentatiesystemen voor sleepopperzuigers 1*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Werktuigbouwkunde, 1993.

MEINEMA K., *Lamellenbezinkers tussen beluchting en nabezinking*, Technische Universiteit, Faculteit der Civiele Techniek, 1992.

VRIES M. DE, *Inleiding Vloeistofmechanica, b70*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, 1984.

VELDEN E.T.J.M VAN DER, *Coastal Engineering, b7*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, 1990.

VERRUIJT A., *Grondmechanica*, Delftse Uitgevers Maarschappij b.v., 1990.

Ward A.S., *Lamella, inclined plate or tube separators*, Solid Liquid Separation Technologie, Technological Institute KVIV, 1992.

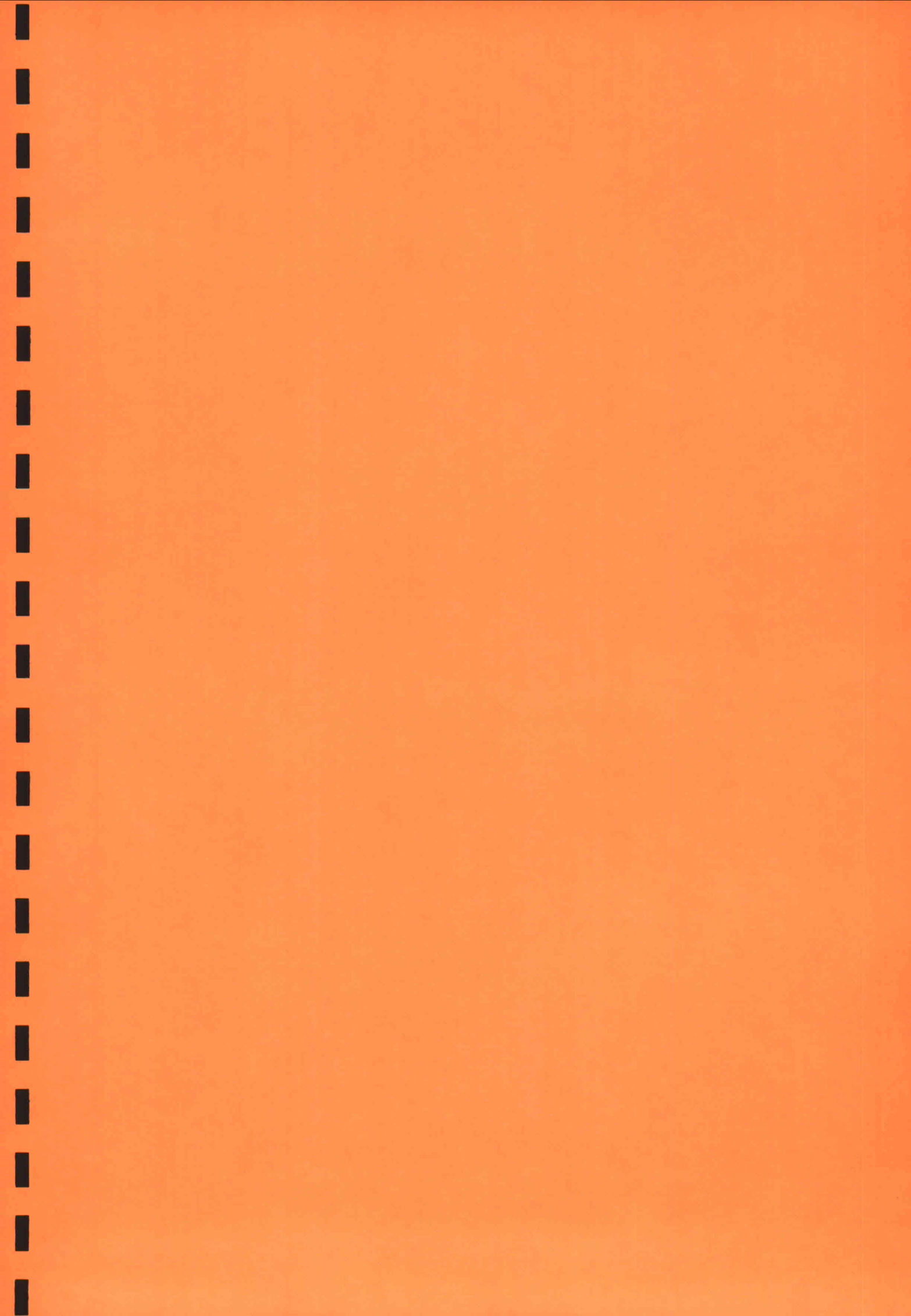
RIJN VAN L.C., *Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans*, University of Utrecht, The Netherlands, 1990.

Symbolen

δ	m	uitwijking	
θ	°	lamelhoek	
ν	m ² /s	kinematische viscositeit	
ρ	kg/m ³	dichtheid mengsel	
ρ_{bz}	kg/m ³	dichtheid bezonken zand	1,9·10 ³
ρ_w	kg/m ³	dichtheid water	1,0·10 ³
ρ_z	kg/m ³	dichtheid zand	2,65·10 ³
σ'	N/m ²	korrelspanning	
τ	N/m ²	schuifspanning	
τ_0	N/m ²	schuifspanning wand	
ϕ	°	wrijvingshoek	30
A	m ²	oppervlak lamellen totaal	
b	m	breedte niet ondersteund	
B	m	lamelbreedte	
BG	%	beladingsgraad	
BS	kg/s	beladingsnelheid	
C	√m/s	Chezy coëfficiënt	
D	m	lamelafstand loodrecht	
d_{50}	μm	korreldiameter	
D_h	m	lamelafstand horizontaal	
D_v	m	lamelafstand verticaal	
E	N/m ²	elasticiteitsconstante	
F	N	kracht	
f_0		Darcy-Weisbach coëfficiënt	
g	m/s ²	gravitatie versnelling	9,8
G	N	zandpakket zwaartekracht	
h	m	hoogte verticaal	
H	m	stuwhoogte Rehbock	
I	m ⁴	kwadratisch oppervlakte moment	
K		K-factor van actieve gronddruk	
L	m	lamellengte	
m	1/s	Rehbockstuw constante	1,08
M	kg	massa	
n		aantal doorgangen	
N	N	zandpakket normaalkracht	
OV	%	overvloeiverlies	
p	N/m ²	druk	
Q	m ³ /s	debiet	
Re		Reynoldsgetal	
t	m; s	dikte plaat; tijd	
T	N	zandpakket schuifkracht	
u_d	m/s	snellheid doorstroom	
V	m/s	snellheid	
w_0	m/s	korrelsnellheid ongehinderde val	
z	m	positie verticaal van deeltje	

Indices

bz	bezonken zand	m	model
d	doorgang, dwars op doorstroom	p	praktijk
i	ingaaende stroom	u	uitgaande stroom



Bijlage A: Overvloeiverlies en laadtijd

Proefcodes		M_{\max} in kg	$\rho_{\text{in, gem.}}$ in 10^3 kg/m^3	tot BG = 50 %		
				$\rho_{\text{in, gem}}$ in 10^3 kg/m^3	t_{laden} in s	OV _{gem} in %
HH Ref 1	1307A	2596	1,31	1,43	258	1,4
HH Ref 2	1307B	2796	1,23	1,42	264	1,3
HH SK	1-2705	2533	1,29	1,37	353	15
HH SKI 1	1-0806	2727	1,27	1,43	268	3,1
HH SKI 2	2-0806	2545	1,27	1,43	272	5,6
HL Ref	1207B	2654	1,21	1,28	421	7,8
HL SK	1-0306	2447	1,20	1,20	690	21
HL SKI	1-0906	2456	1,23	1,32	355	3,2
LH Ref	0807A	2773	1,31	1,43	505	0,0
LH SK	1-0406	3382	1,43	1,44	571	0,0
LL Ref 1	0607A	1397	1,17	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
LL Ref 2	0707B	2431	1,24	1,25	915	3,7
LL Ref 3	1207A	2142	1,23	1,25	952	7,9
LL SK	2-2705	1604	1,20	1,20	1145	11

tab. A1: Alle laadproeven

HHSKI1: Schakelingen om de 0,1 m zandbedverhoging

HHSKI2 en HLSKI: Schakelingen aan de hand van visuele waarneming van de suspensiestroom

Verkorte aanduidingen

- HH Hoog debiet ($Q_i = 16 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$) en Hoge dichtheid ($\rho_i = 1,4 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$)
 HL Hoog debiet ($Q_i = 16 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$) en Lage dichtheid ($\rho_i = 1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$)
 LH Laag debiet ($Q_i = 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$) en Hoge dichtheid ($\rho_i = 1,4 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$)
 LL Hoog debiet ($Q_i = 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$) en Hoge dichtheid ($\rho_i = 1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$)

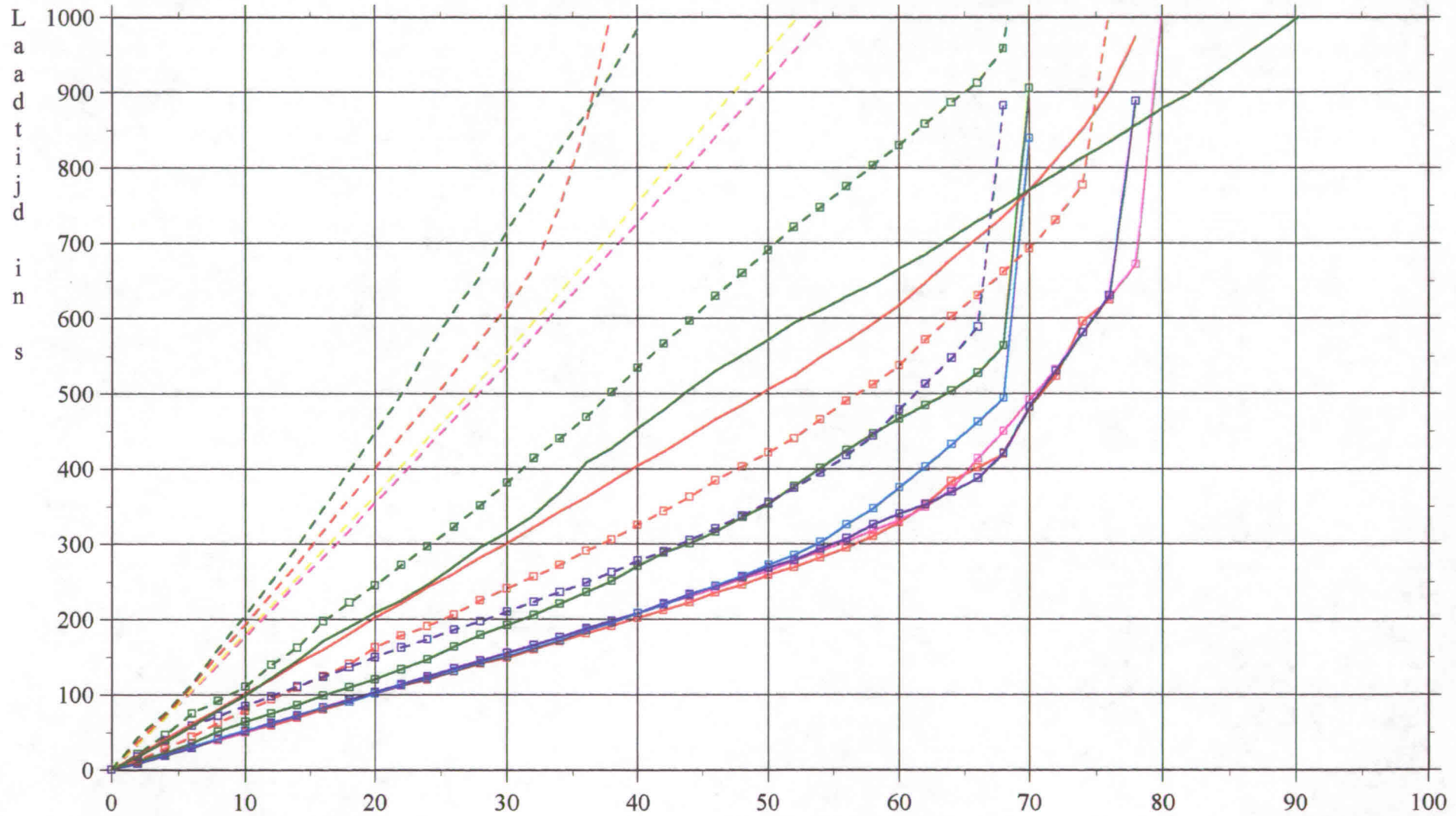
Ref Referentie configuratie

SK SchottenKerend

SKI SchottenKerend Intermitterend

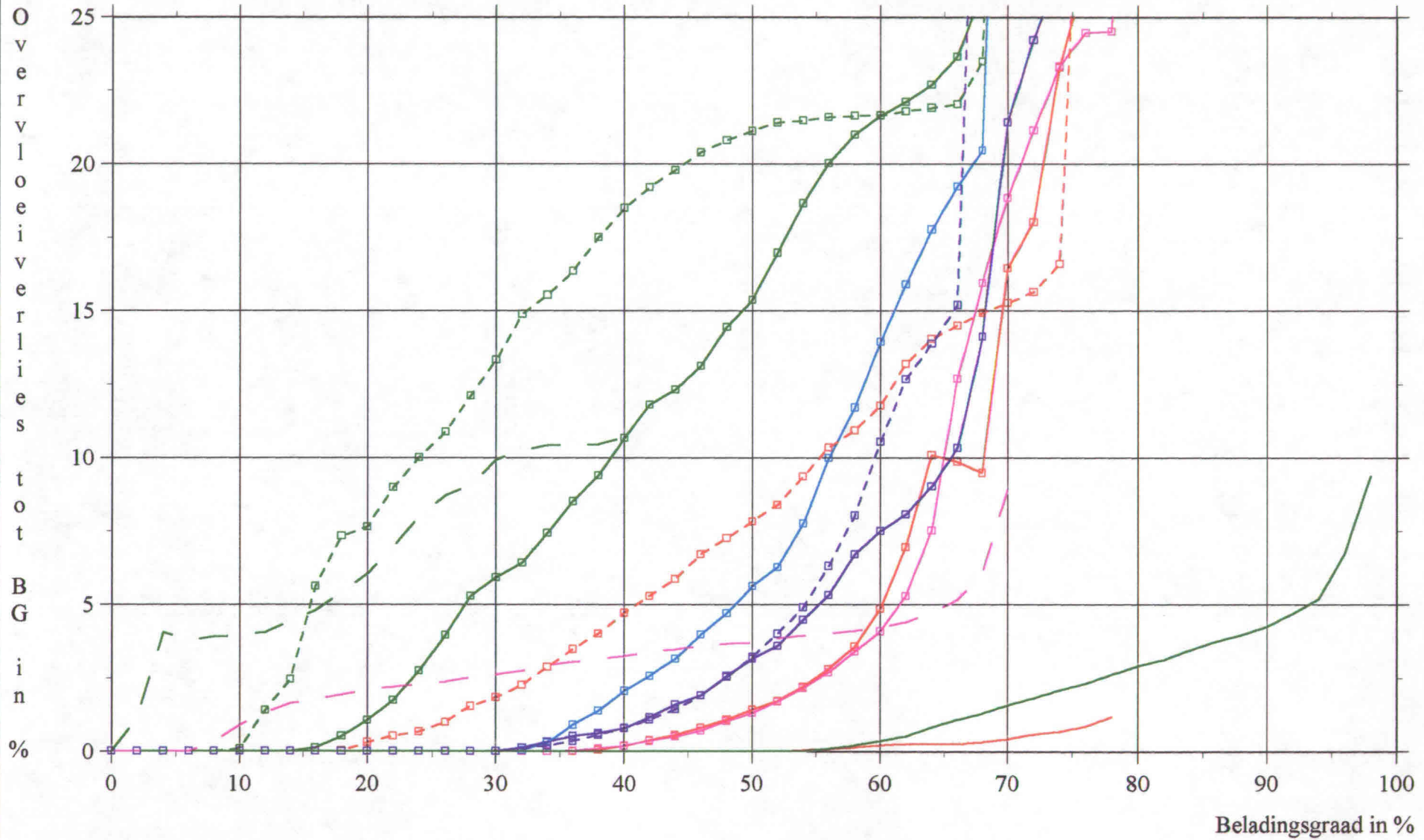
Laadtijd tot beladingsgraad

pagina A2



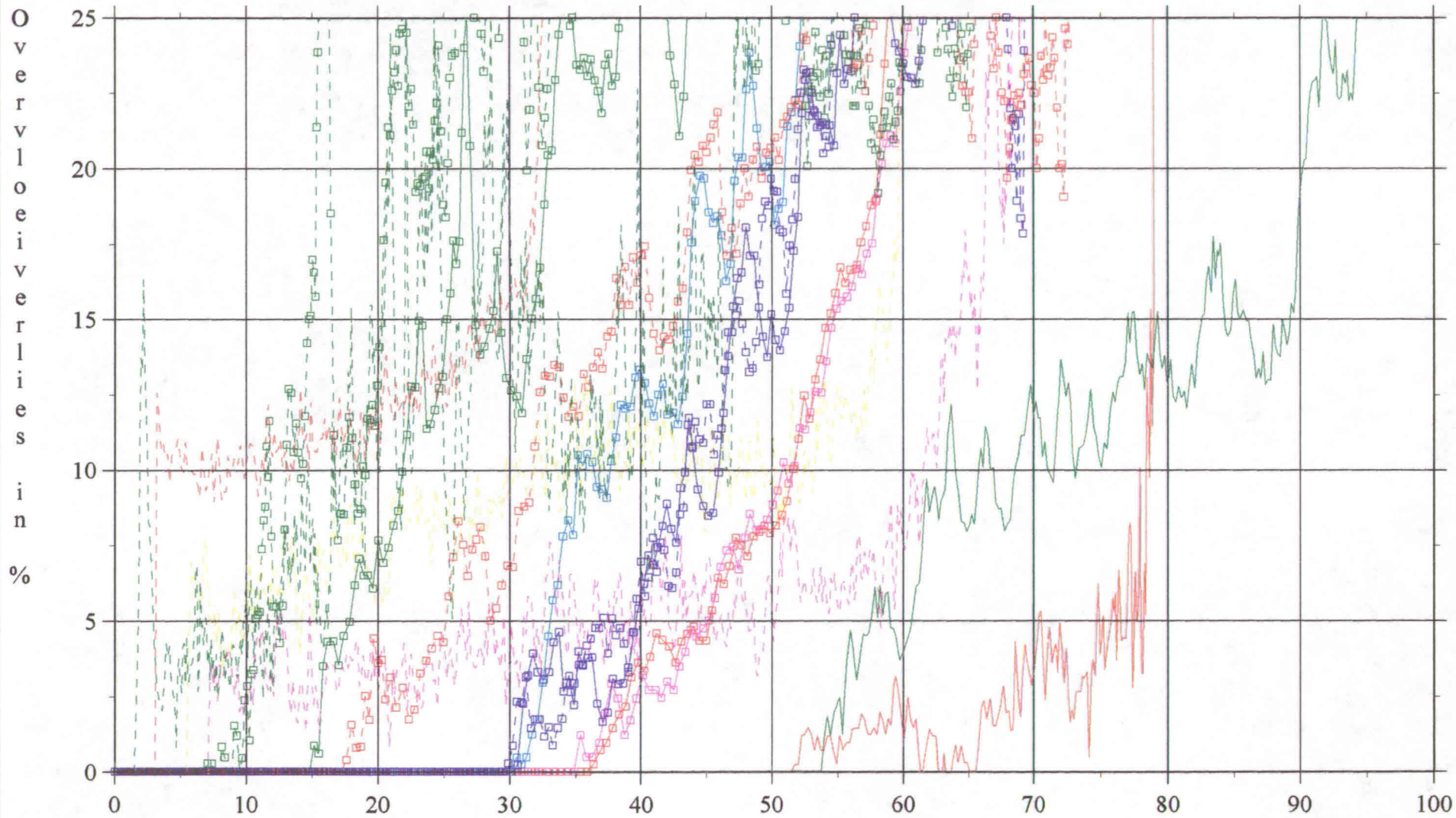
HHRef1 HHRef2 HHSK HHSKI1 HHSKI2 HLRef HLSK HLSKI LHRef LHSK LLRef1 LLRef2 LLRef3 LLSK

Overvloeiverlies gem. tot BG tegen BG



HHRef1 HHRef2 HHSK HHSKI1 HHSKI2 HLRef HLSK HLSKI LHRef LHSK LLRef2 LLSK

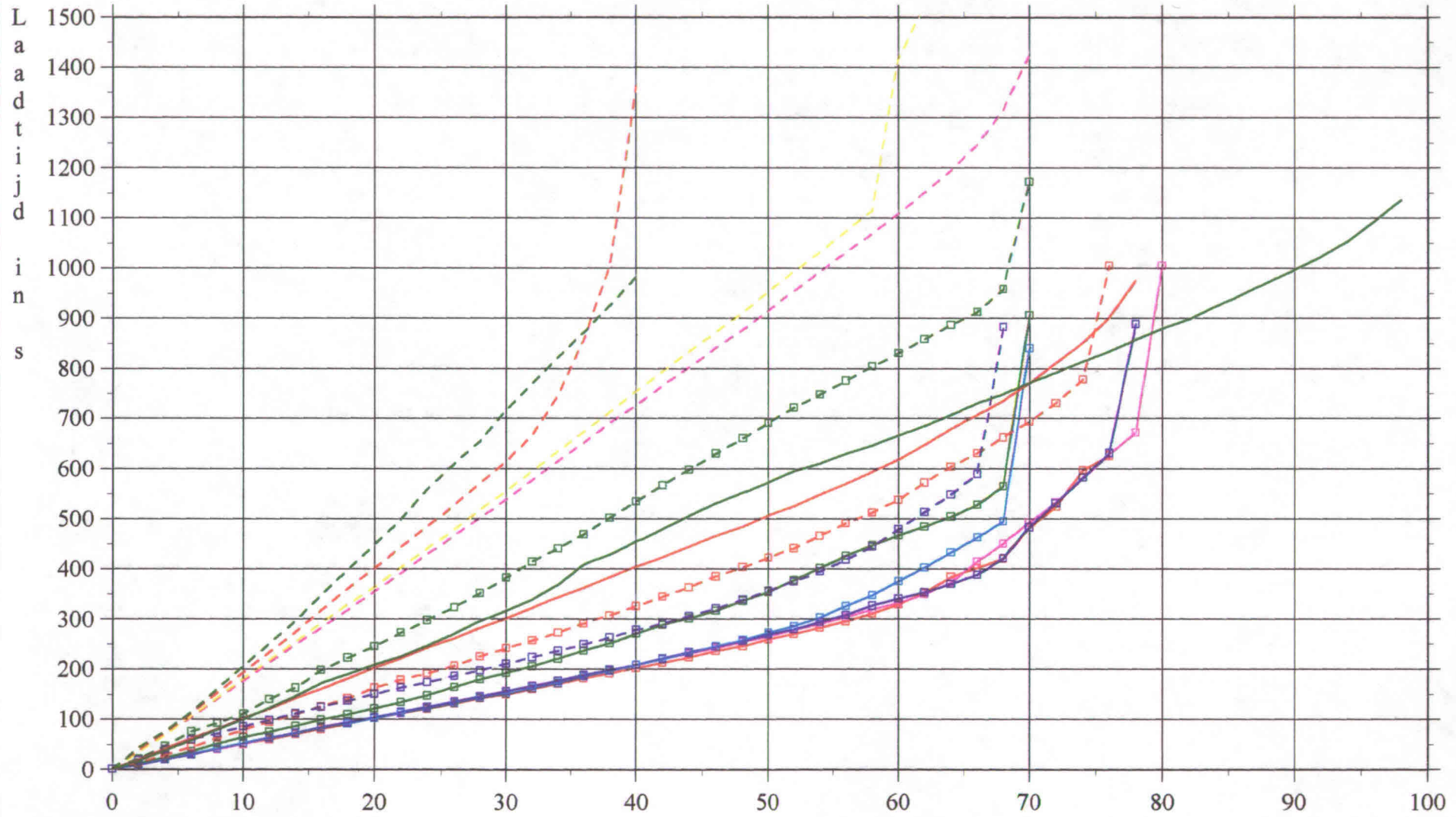
Overvloeiverlies tegen BG



HHRef1 HHRef2 HHSK HHSKI1 HHSKI2 HLRef HLSK HLSKI LHRef LHRef LLRef1 LLRef2 LLRef3 LLSK

—□— —□— —□— —□— —□— —□— —□— —□— —□— —□— —□— —□— —□— —□—

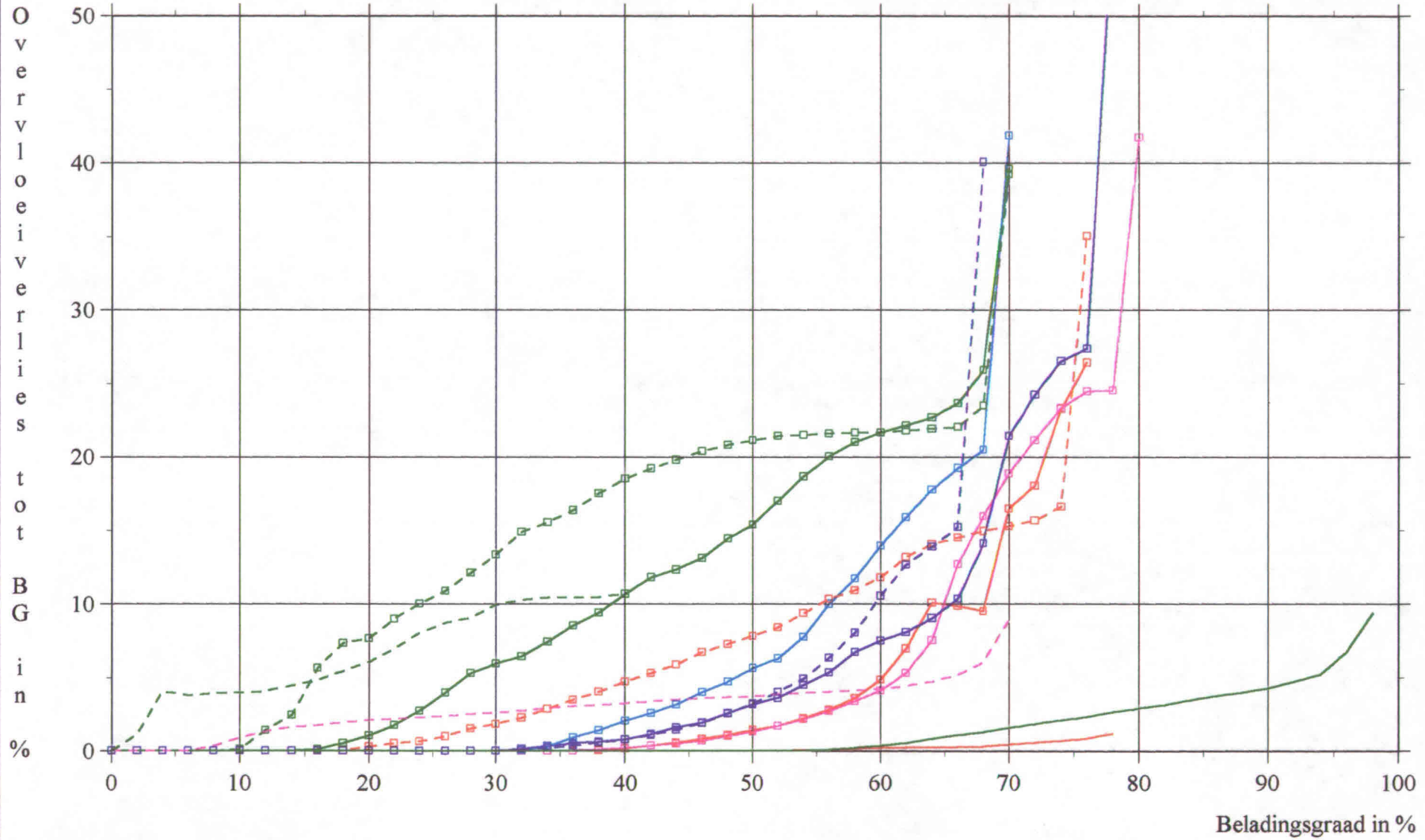
Laadtijd tot beladingsgraad



Legend:

- HHRef1 (Red solid line with squares)
- HHRef2 (Pink dashed line with squares)
- HHSK (Green dashed line with squares)
- HHSKI1 (Blue dashed line with squares)
- HHSKI2 (Blue solid line with squares)
- HLRef (Red dashed line with squares)
- HLSK (Green solid line with squares)
- HLSKI (Blue dashed line with squares)
- LHRef (Red solid line with squares)
- LHSK (Green solid line with squares)
- LLRef1 (Red dashed line with squares)
- LLRef2 (Pink dashed line with squares)
- LLRef3 (Yellow dashed line with squares)
- LLSK (Green dashed line with squares)

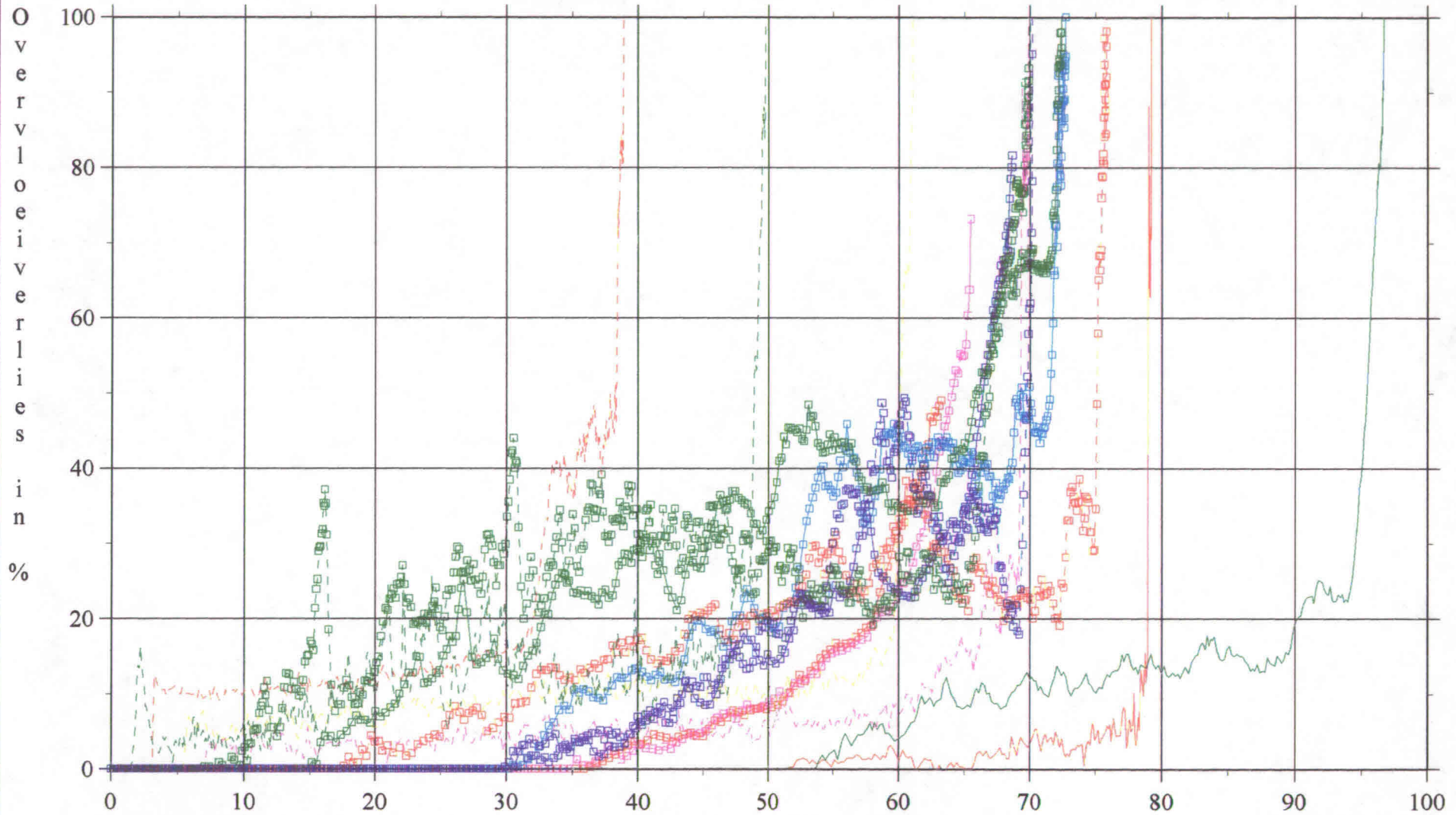
Overvloeiverlies gem. tot BG tegen BG



HHRef1 HHRef2 HHSK HHSKI1 HHSKI2 HLRef HLSK HLSKI LHRef LHSK LLRef2 LLSK

Overvloeiverlies tegen BG

pagina A7



HHRef1 HHRef2 HHSK HHSKI1 HHSKI2 HLRef HLSK HLSKI LHRef LHSK LLRef1 LLRef2 LLRef3 LLSK

Bijlage B: Ontwerp van lamellenbezinker

Inhoud

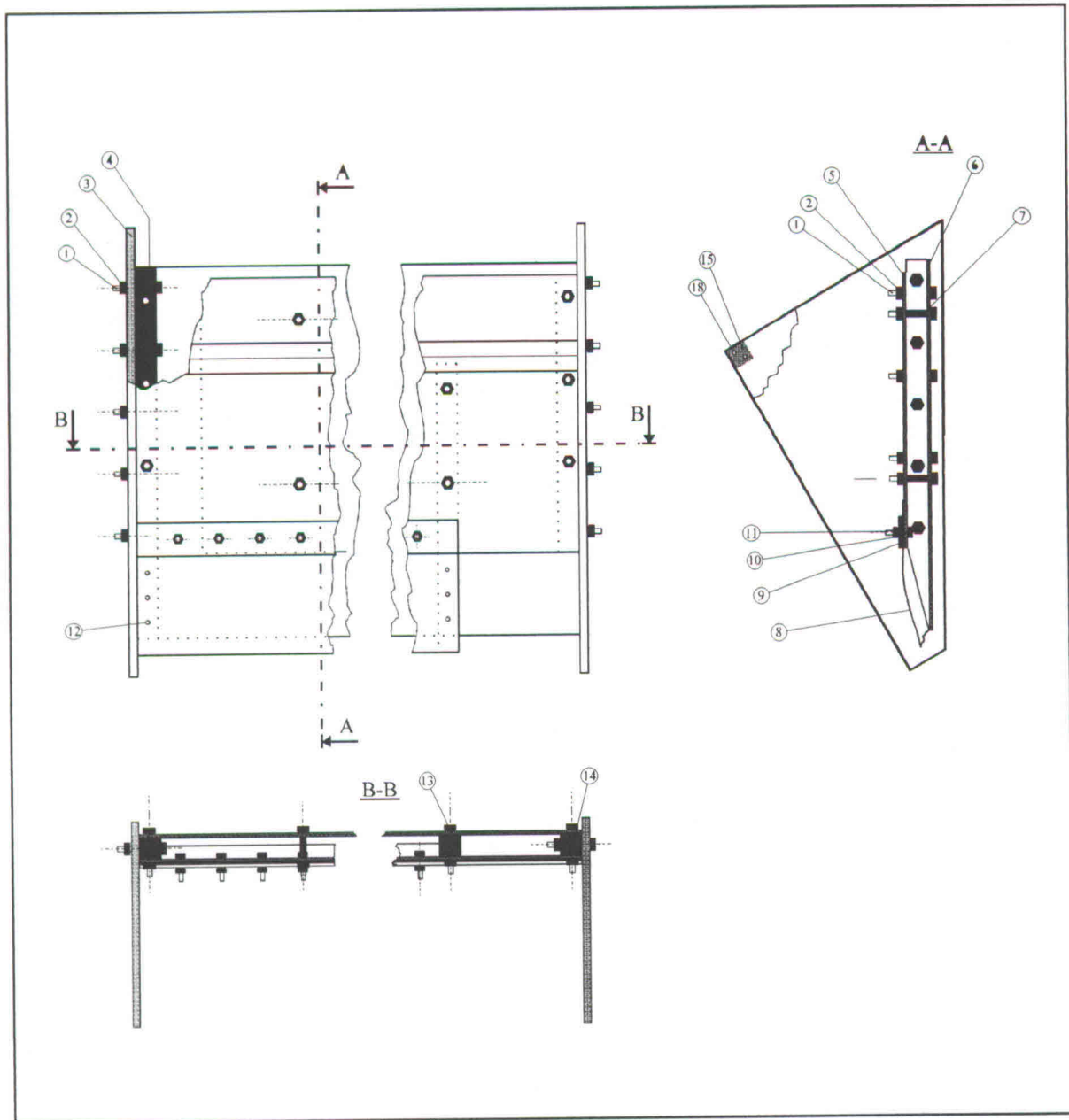
B1	Onderdelen	B2
B2	Enkele lamellendoorgang	B3
	Overzicht	B3
	Zijaanzicht	B4
	Vooraanzicht gedeeltelijk	B5
	Vooraanzicht	B6
	Bovenaanzicht gedeeltelijk	B7
B3	Dubbele lamellendoorgang	B8

B1 Onderdelen

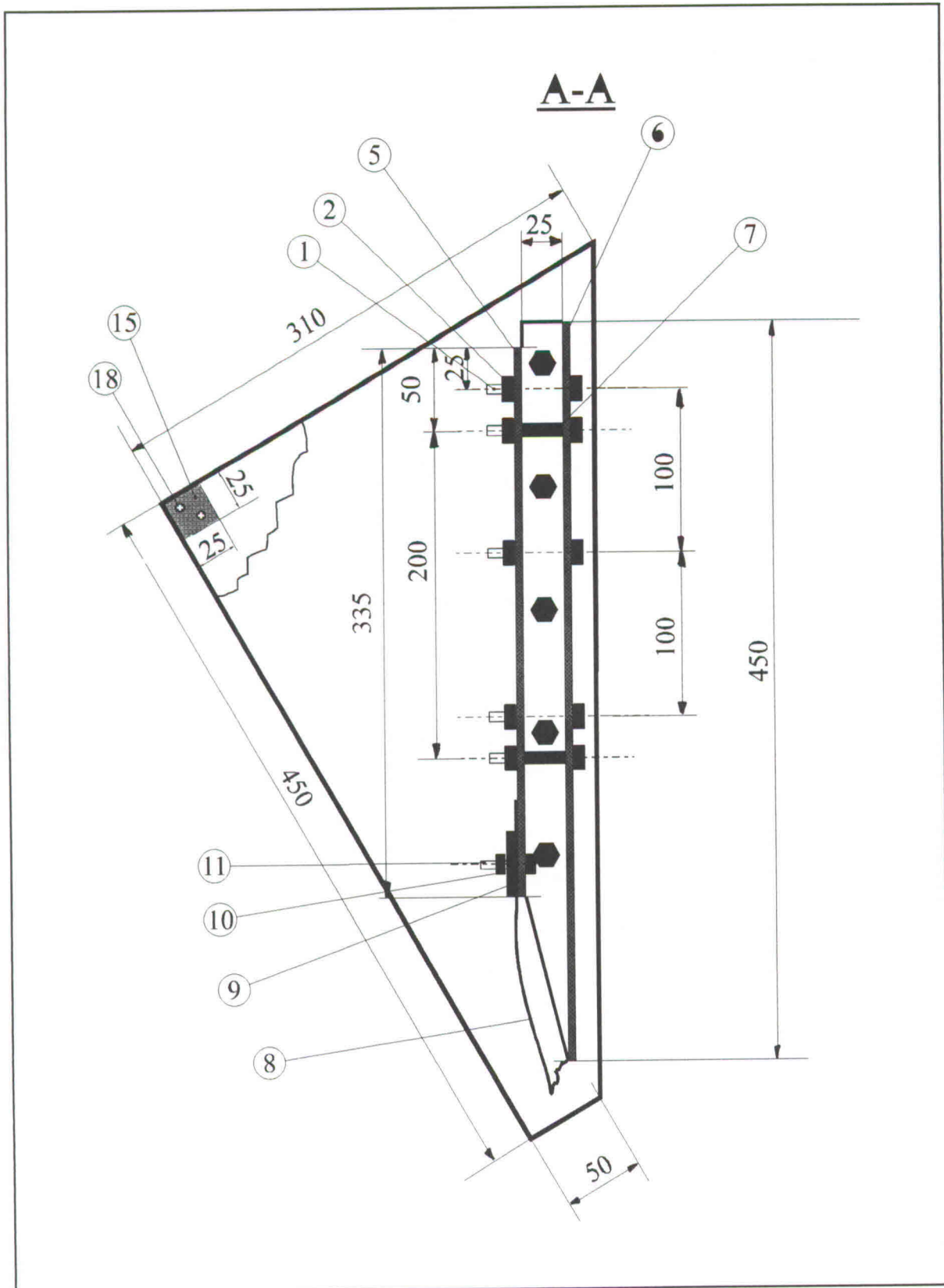
Stuk-nummer	Aantal	Benaming	Afmetingen	Materiaal
1	24	Bout	M5 x 60	metaal
2	24	Moer	M5	metaal
3	2	Zijplaat	zie afbeelding	waterbestendig hout
4	1	Linkerbalk	zie afbeelding	waterbestendig hout
5	1	Bovenlamel	800 x 450 x 6	doorzichtig plexiglas
6	1	Onderlamel	800 x 335 x 6	doorzichtig plexiglas
7	6	Bus	lengte = 25; $d_{in} = 7$	metaal
8	1	Flap	850 x 200 x 2	flexibel rubber
9	1	Strip	850 x 40 x 5	waterbestendig hout
10	16	Bout	M4 x 35	metaal
11	16	Moer	M4	metaal
12	6	Houtschroef	$l = 20$	metaal
13	1	Middenbalk	zie afbeelding	waterbestendig hout
14	1	Rechterbalk	350 x 25 x 25	waterbestendig hout
15	1	Langsbalk	1000 x 25 x 25	waterbestendig hout
16	1	Middenlamel	725 x 340 x 6	doorzichtig plexiglas
17	12	Bus	lengte 10; $d_{in} = 7$	metaal
18	4	Houtschroef	lengte 40	metaal

tab. B1: Onderdelen lamellendoorgang

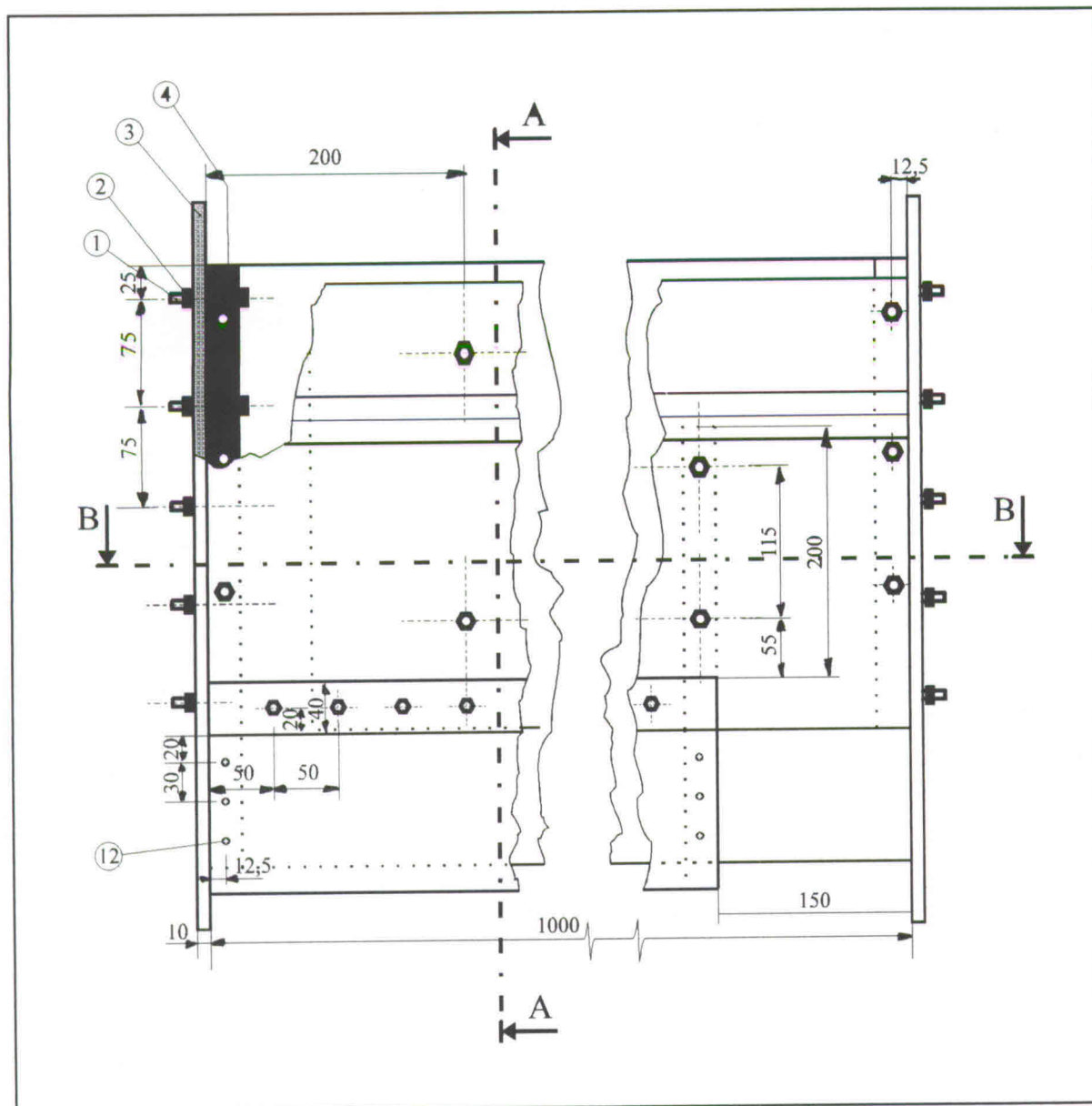
B2 Enkele lamellendoorgang



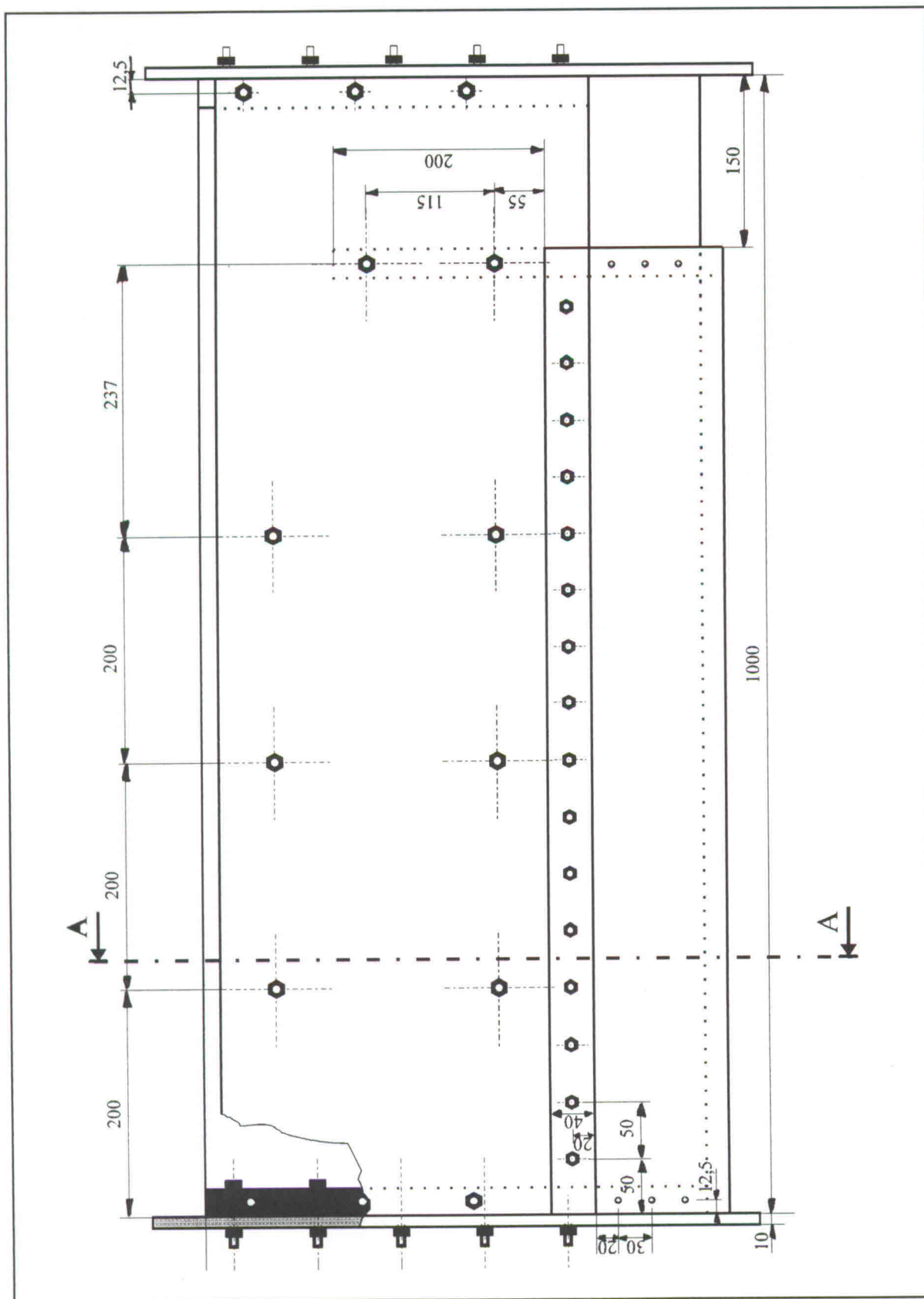
afb. B1: Overzicht enkele lamellendoorgang



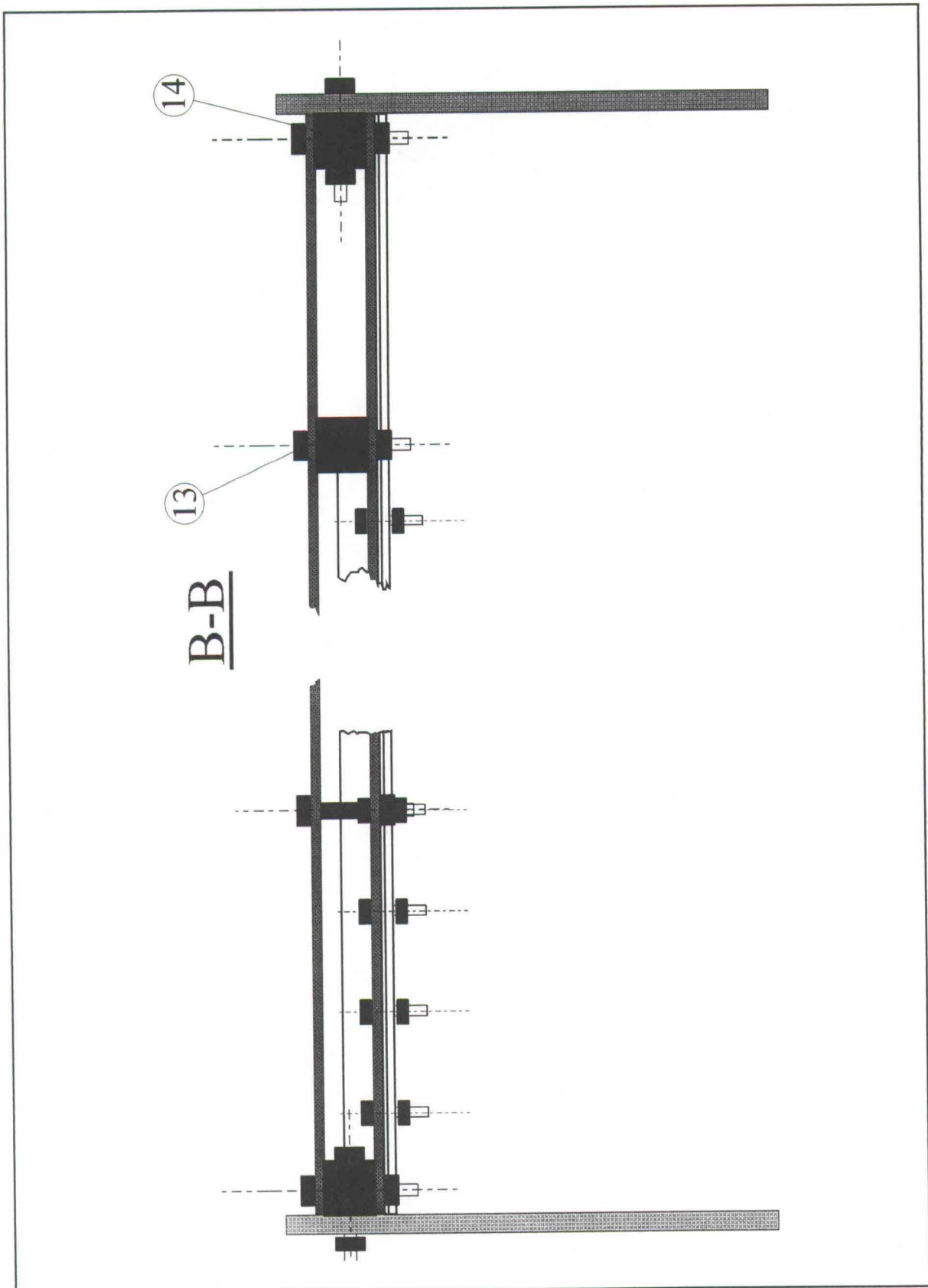
afb. B2: Zijaanzicht dwarsdoorsneden enkele lamellendoorgang



afb. B3: Gedeeltelijk vooraanzicht enkele lamellendoorgang

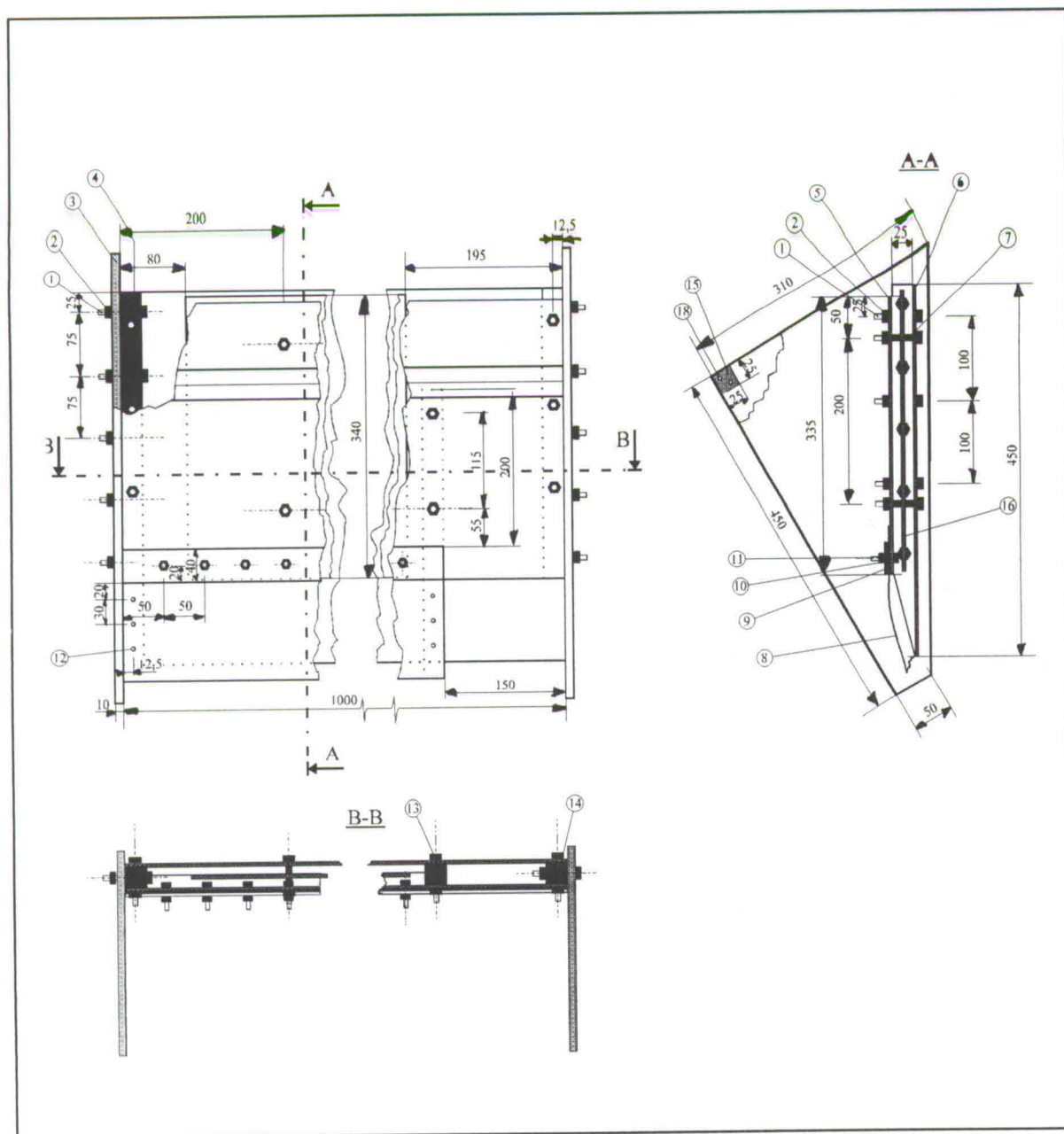


af. B4: Vooraanzicht enkel lamellendoorgang



afb. B5: Bovenaanzicht dwarsdoorsnede enkele lamellendoorgang

B3 Dubbele lamellendoorgang



afb. B6: Overzicht dubbele lamellendoorgang

Bijlage C: Proeven met lamellenbezinker

Inhoud

C1	Dubbele doorgang, $D = 2 \times 10$ mm	C2
	45°	c2
	60° - 1	c3
	60° - 2	c4
	90°	c5
	Grafiek van uitgaande dichtheid tegen bijbehorend debiet	c6
C2	Enkele doorgang, $D = 25$ mm	C7
	45° - 1	c7
	45° - 2	c8
	60° - 1	c9
	60° - 2	c10
	90°	c11
	Grafiek van uitgaande dichtheid tegen bijbehorend debiet	c12
C3	IJking bochtmeter	C13

C1 Dubbele lamellendoorgang, $D = 2 \times 10$ mm

45° 2x10 mm				Maatbekers			Emmer vultijd in s			ρ_{gem}	Q	h_{in}
nr.	M in g	V in ml	ρ_{gem} in $\cdot 10^3$ kg/m ³	Voor	Na	gem.	$\cdot 10^3$ kg/m ³	$\cdot 10^{-3}$ m ³ /s	$\cdot 10^{-3}$ m			
A1	1004	765	0,992	38	43	40,5	0,988	0,46				
A2	926	690	0,984									
B1	1028	790	0,984	43	45	44	0,989	0,43				
B2	1016	810	0,995									
C1	992	790	0,991	45	46	45,5	0,992	0,41				
C2	1011	735	0,993									
D1	1017	830	0,995	46	42	44	1,001	0,43	50			
D2	1022	835	1,006									
E1	1002	810	1,012	42	42	42	1,012	0,45				
E2	980	790	1,011									
F1	965	780	1,004	42	46	44	1,003	0,43	50			
F2	964	780	1,003									

tab.C1: Gegevens van lamellendoorgang bij $\theta = 45^\circ$ en $D = 2 \times 10$ mm

45° 2x10 mm			
Maatbekers			ρ_{gem} in
nr.	M in g	V in ml	$\cdot 10^3$ kg/m ³
A1			
A2	884	525	1,213
B1	1273	830	1,231
B2	1166	770	1,242
C1	1036	670	1,234
C2	1176	695	1,288

tab.C2: Gemiddelde ρ_{in} bij $\theta = 45^\circ$ en $D = 2 \times 10$ mm

60° 2x10 mm-1				Maatbekers			Emmer vultijd in s			ρ_{gem}	Q	h_{in}
nr.	M in g	V in ml	ρ_{gem} in $\cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$	Voor	Na	gem.	$\cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$	$\cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$\cdot 10^{-3} \text{ m}$			
A1	1028	780	1,004	37	40	38,5	0,998	0,49	48			
A2	1091	850	0,993									
B1	1023	780	0,99	40	52	46	0,990	0,41				
B2	874	670	0,991									
C1	891	685	0,996	52	46	49	0,996	0,39	52			
C2	998	720	0,996									
D1	1071	880	1	47	47	47	1,004	0,40				
D2	1059	870	1,008									
E1	970	785	1,004	47	46	46,5	1,014	0,41				
E2	1047	845	1,025									
F1	1078	880	1,018	46	49	47,5	1,018	0,40	59			
F2	1118	920	1,017									

tab.C3: Gegevens van lamellendoorgang bij $\theta = 60^\circ$ en $D = 2 \times 10 \text{ mm} - 1$

60° 2x10 mm-2				Maatbekers			Emmer vultijd in s			ρ_{gem}	Q	h_{in}
nr.	M in g	V in ml	ρ_{gem} in $\cdot 10^3$ kg/m ³	Voor	Na	gem.	$\cdot 10^3$ kg/m ³	$\cdot 10^{-3}$ m ³ /s	$\cdot 10^{-3}$ m			
A1	1190	935	1,011	47	45	46	1,004	0,41				
A2	1109	865	0,997									
B1	978	735	0,989	45	40	42,5	0,993	0,45				
B2	957	750	0,996									
C1	1000	795	0,995	40	42	41	0,998	0,46				
C2	1017	735	1,001									
D1	1134	915	1,031	42	43	42,5	1,024	0,45				
D2	1087	890	1,017									
E1	1202	1005	1,015	43	39	41	1,017	0,46		48		
E2	1082	885	1,018									
F1	1065	870	1,015	39	38	38,5	1,014	0,49		48		
F2	1049	855	1,014									

tab.C4: Gegevens van lamellendoorgang bij $\theta = 60^\circ$ en $D = 2 \times 10$ mm - 2

60° 2x10 mm-2			
Maatbekers			ρ_{gem} in
nr.	M in g	V in ml	$\cdot 10^3$ kg/m ³
A1	1032	630	1,249
A2	884	525	1,213
B1	1273	830	1,231
B2	1166	770	1,242
C1	1036	670	1,234
C2	1176	695	1,288
Gemiddelde waarde van de dichtheid			1,243

tab.C5: Gemiddelde ρ_{in} bij $\theta = 60^\circ$ en $D = 2 \times 10$ mm - 2

90° 2x10 mm				Emmer vultijd in s			ρ_{gem}	Q	h_{in}
nr.	M in g	V in ml	ρ_{gem} in $\cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$	Voor	Na	gem.	$\cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$	$\cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$\cdot 10^{-3} \text{ m}$
A1	1006	710	1,072	47	48	47,5	1,066	0,40	73
A2	957	670	1,06						
B1	987	700	1,051	48	51	49,5	1,048	0,38	
B2	962	720	1,044						
C1	963	730	1,033	51	45	48	1,034	0,40	
C2	897	595	1,035						
D1	1093	845	1,067	45	49	47	1,078	0,40	74
D2	1188	925	1,088						
E1	940	690	1,099	49	46	47,5	1,100	0,40	
E2	946	695	1,101						
F1	940	700	1,083	46	47	46,5	1,079	0,41	80
F2	1042	800	1,075						

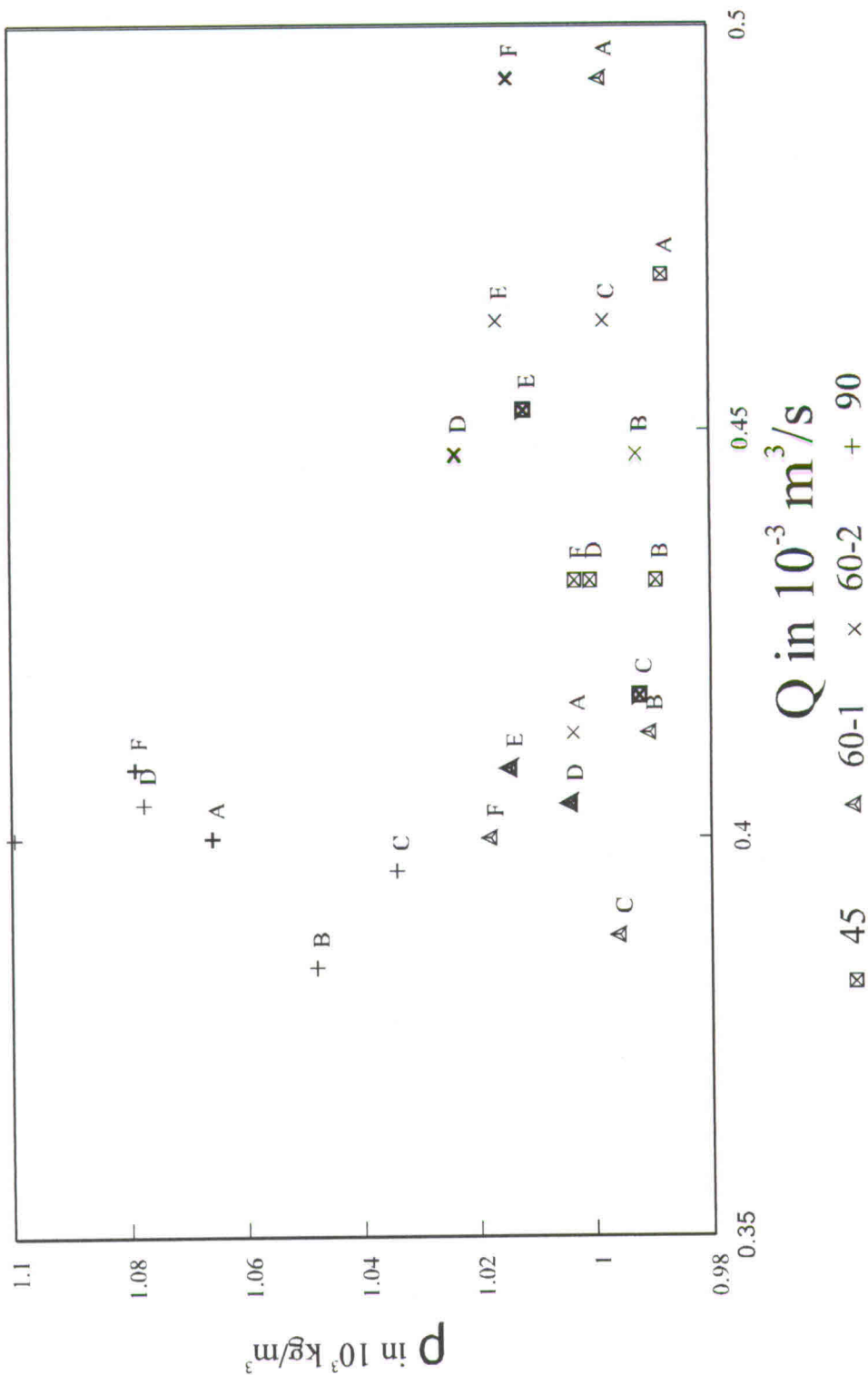
tab.C6: Gegevens van lamellendoorgang bij $\theta = 90^\circ$ en $D = 2 \times 10 \text{ mm}$

90° 2x10 mm			
Maatbekers			ρ_{gem} in
nr.	M in g	V in ml	$\cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
A1	991	635	1,175
A2	971	585	1,238
B1	1077	670	1,233
B2	848	535	1,193
C1	1116	740	1,226
C2	1060	625	1,246
Gemiddelde waarde van de dichtheid			1,218

tab.C7: Gemiddelde ρ_{in} bij $\theta = 90^\circ$ en $D = 2 \times 10 \text{ mm}$

Uitgaande dichtheid tegen debiet

$D = 2 \times 10 \text{ mm}$



afb. C1: Uitgaande dichtheid tegen bijbehorend debiet bij 2 x 10 mm

C2 Enkele lamellendoorgang, $D = 25$ mm

45° 25 mm-1				Emmer vultijd in s			ρ_{gem}	Q	h_{in}
Maatbekers				Voor	Na	gem.	$\cdot 10^3$ kg/m ³	$\cdot 10^{-3}$ m ³ /s	$\cdot 10^{-3}$ m
nr.	M in g	V in ml	ρ_{gem} in $\cdot 10^3$ kg/m ³						
A1	1040	775	1,026	70	50	60	1,009	0,32	42
A2	1100	860	0,992						
B1	1127	880	0,995	50	46	48	0,994	0,40	
B2	1079	875	0,993						
C1	1026	820	0,996	46	43	44,5	1,000	0,43	
C2	1165	880	1,005						
D1	1101	910	1,000	42	38	40	1,007	0,48	
D2	1044	850	1,014						
E1	1093	895	1,018	38	37	37,5	1,016	0,51	32
E2	1068	875	1,014						
F1	1073	880	1,013	37	36	36,5	1,019	0,52	
F2	966	765	1,025						

tab.C8: Gegevens van lamellendoorgang bij $\theta = 45^\circ$ en $D = 25$ mm - 1

45° 25 mm-2				Emmer vultijd in s			ρ_{gem}	Q	h_{in}
nr.	M in g	V in ml	ρ_{gem} in $\cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$	Voor	Na	gem.	$\cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$	$\cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$\cdot 10^{-3} \text{ m}$
A1	994	750	0,999	53	48	50,5	0,993	0,37	
A2	928	690	0,987						
B1	1192	950	0,991	48	47	47,5	0,988	0,40	34
B2	1038	840	0,986						
C1	980	780	0,988	47	46	46,5	0,994	0,40	
C2	1010	730	0,999						
D1	1018	835	0,990	46	47	46,5	1,003	0,40	33
D2	1091	895	1,016						
E1	953	765	1,008	47	51	49	1,014	0,38	
E2	966	770	1,019						
F1	990	805	1,004	51	50	50,5	1,005	0,38	
F2	987	800	1,006						

tab.C9: Gegevens van lamellendoorgang bij $\theta = 45^\circ$ en $D = 25 \text{ mm} - 2$

60° 25 mm-1				Emmer vultijd in s			ρ_{gem}	Q	h_{in}
nr.	M in g	V in ml	ρ_{gem} in $\cdot 10^3$ kg/m ³	Voor	Na	gem.	$\cdot 10^3$ kg/m ³	$\cdot 10^{-3}$ m ³ /s	$\cdot 10^{-3}$ m
A1	1151	895	1,012	34	29	31,5	1,009	0,60	
A2	1071	820	1,005						
B1	1142	890	1,001	30	30	30	1,001	0,63	
B2	1156	945	1,001						
C1	1187	960	1,019	30	30	30	1,013	0,63	
C2	1072	785	1,008						
D1	1062	865	1,007	37	37	37	1,015	0,51	
D2	1026	825	1,023						
E1	1049	855	1,014	37	40	38,5	1,019	0,49	
E2	1108	905	1,024						
F1	1054	855	1,020	38	42	40	1,017	0,48	
F2	993	800	1,014						

tab.C10: Gegevens van lamellendoorgang bij $\theta = 60^\circ$ en $D = 25$ mm - 1

60° 25 mm-2				Emmer vultijd in s			ρ_{gem}	Q	h_{in}
Maatbekers				Voor	Na	gem.	$\cdot 10^3$ kg/m³	$\cdot 10^{-3}$ m³/s	$\cdot 10^{-3}$ m
nr.	M in g	V in ml	ρ_{gem} in $\cdot 10^3$ kg/m ³						
A1	1099	850	1,005	38	37	37,5	1,002	0,51	45
A2	1072	825	1,000						
B1	1149	905	0,992	37	34	35,5	0,992	0,54	43
B2	1038	835	0,992						
C1	1169	965	0,995	34	36	35	0,998	0,54	
C2	1137	855	1,001						
D1	1110	920	0,999	36	34	35	0,963	0,54	
D2	910	785	0,927						
E1	1088	890	1,018	34	34	34	1,017	0,56	
E2	1115	920	1,015						
F1	1047	850	1,018	34	35	34,5	1,016	0,55	
F2	1085	890	1,015						

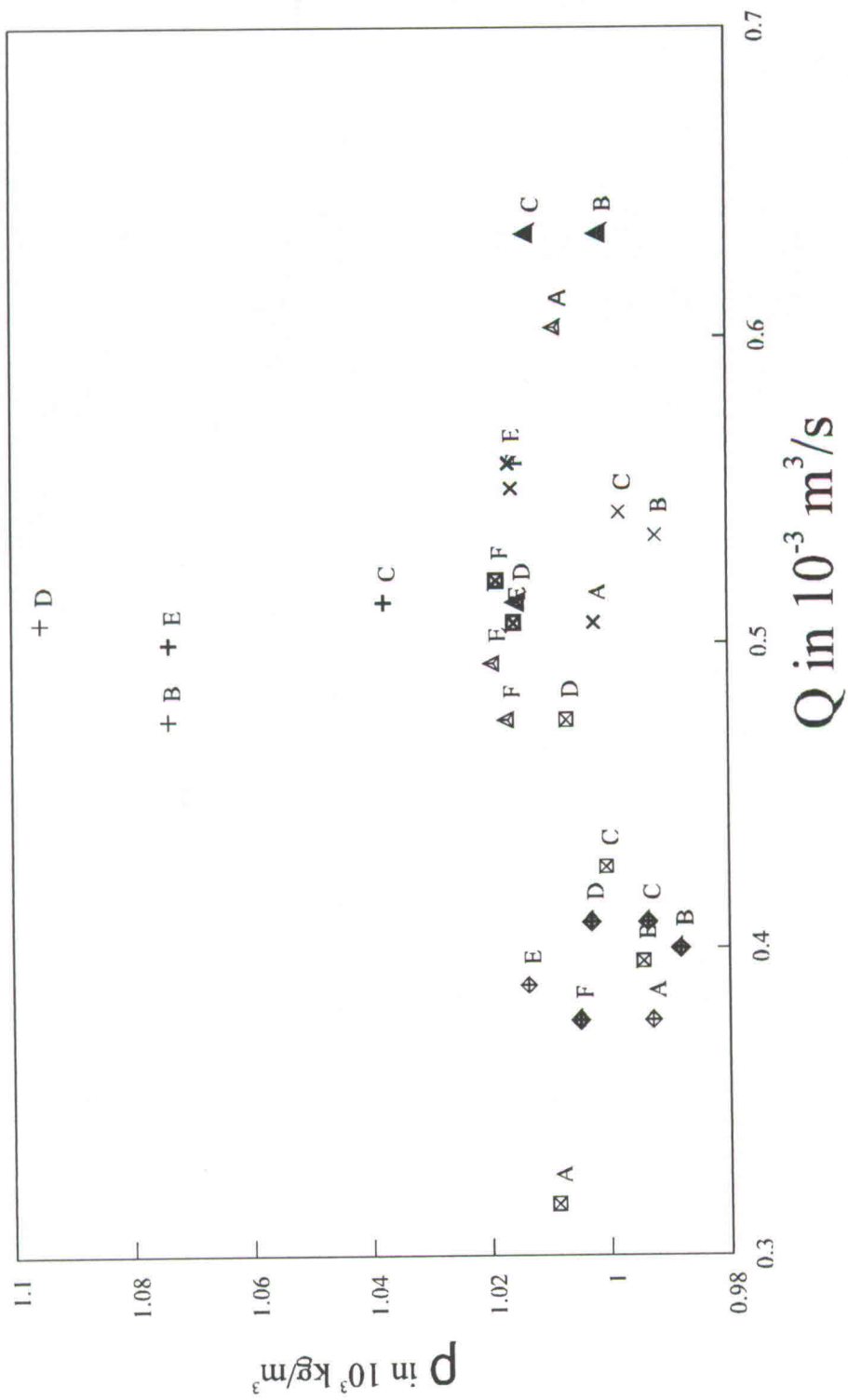
tab.C11: Gegevens van lamellendoorgang bij $\theta = 60^\circ$ en $D = 25$ mm - 2

90° 25 mm				Emmer vultijd in s			ρ_{gem}	Q	h_{in}
nr.	M in g	V in ml	ρ_{gem} in $\cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$	Voor	Na	gem.	$\cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$	$\cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$\cdot 10^{-3} \text{ m}$
A1	1074	750	1,105	37	42	39,5	1,103	0,48	75
A2	1045	725	1,101						
B1	1279	945	1,088	42	38	40	1,074	0,48	75
B2	1005	750	1,06						
C1	1112	870	1,038	38	36	37	1,038	0,51	
C2	1194	880	1,038						
D1	1146	875	1,091	36	39	37,5	1,095	0,51	71
D2	1314	1030	1,099						
E1	1138	890	1,074	39	37	38	1,074	0,50	
E2	1038	960	wijkt af						
F1	1279	980	1,119	37	39	38	1,116	0,50	
F2	1167	885	1,113						

tab.C12: Gegevens van lamellendoorgang bij $\theta = 90^\circ$ en $D = 25 \text{ mm}$

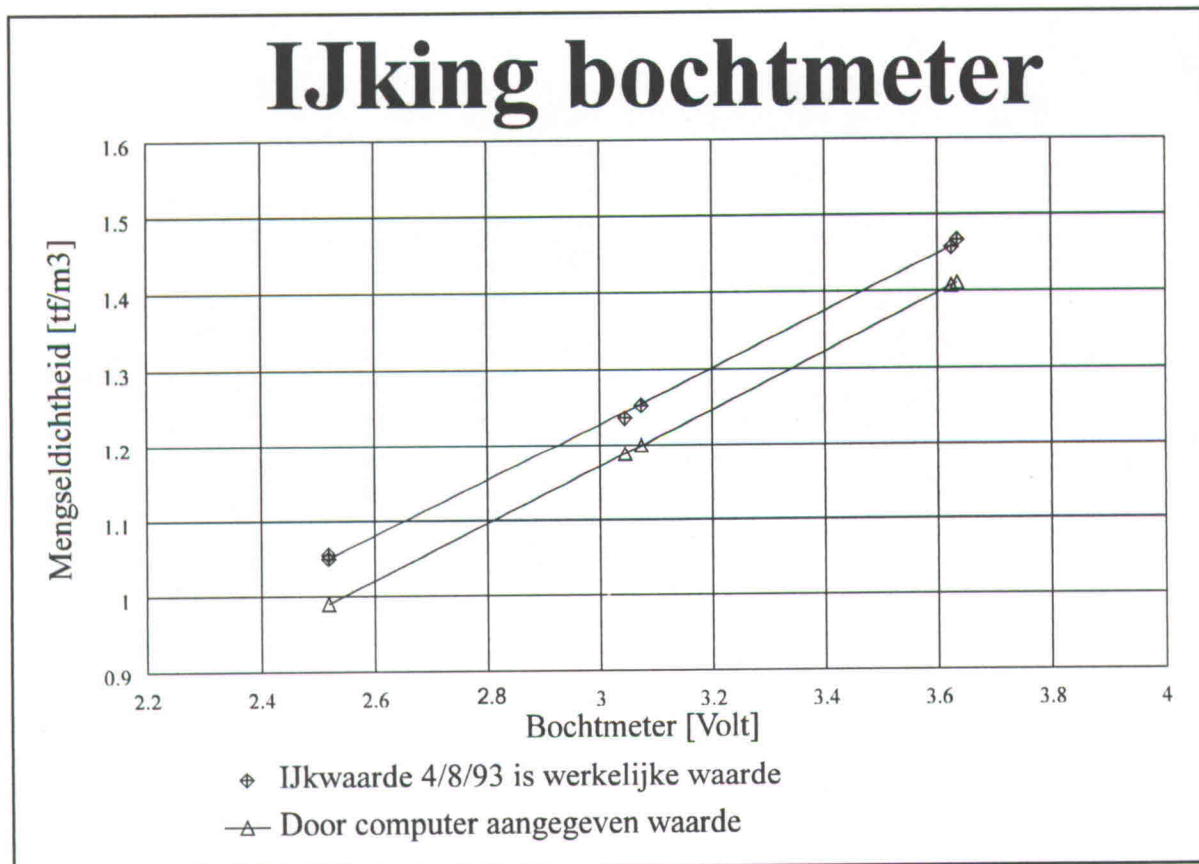
Uitgaande dichtheid tegen debiet

$D = 25 \text{ mm}$



afb. C2: Uitgaande dichtheid tegen bijbehorend debiet bij $D = 25 \text{ mm}$

C3 IJking bochtmeter



afb. C3: IJkgrafiek ten behoeve van de metingen met de bochtmeter

Bijlage D: Foto's

Inhoud

D1	De proefopstelling	D2
D2	Schottenkerende configuratie	D3
D3	Lamellendoorgang, lage $\rho_{instroom}$	D5
D4	Lamellendoorgang, $\rho_i \approx 1,25 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$	D7

D1 De proefopstelling

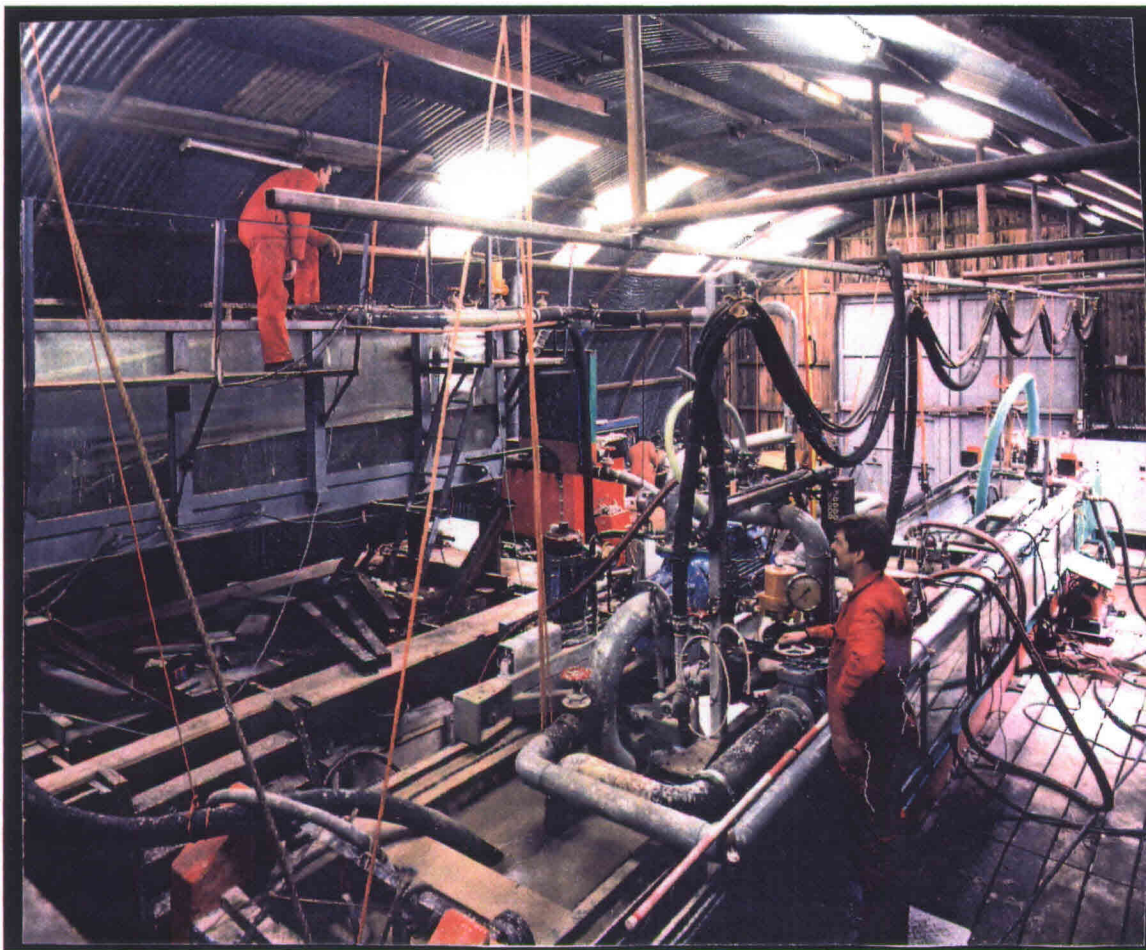


foto D1: De proefopstelling

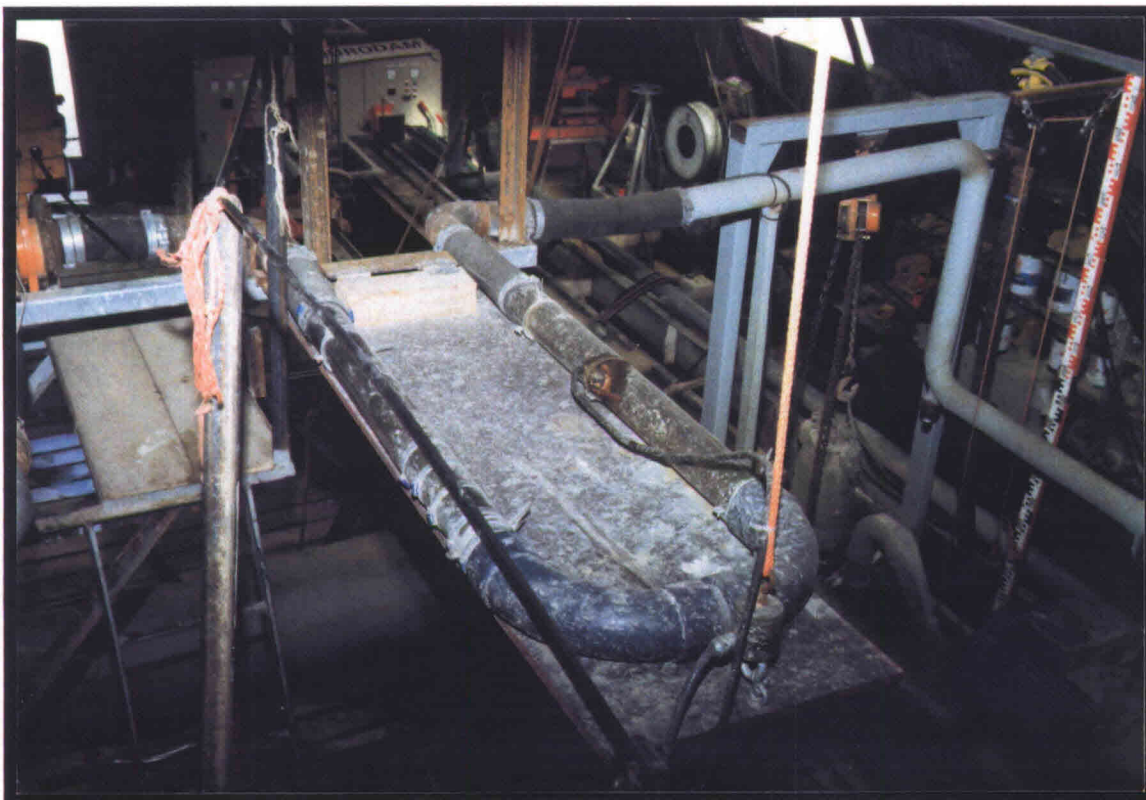


foto D2: De bochtmeter

D2 Schottenkerende configuratie



foto D3: Schottenkerende configuratie, niet intermitterend

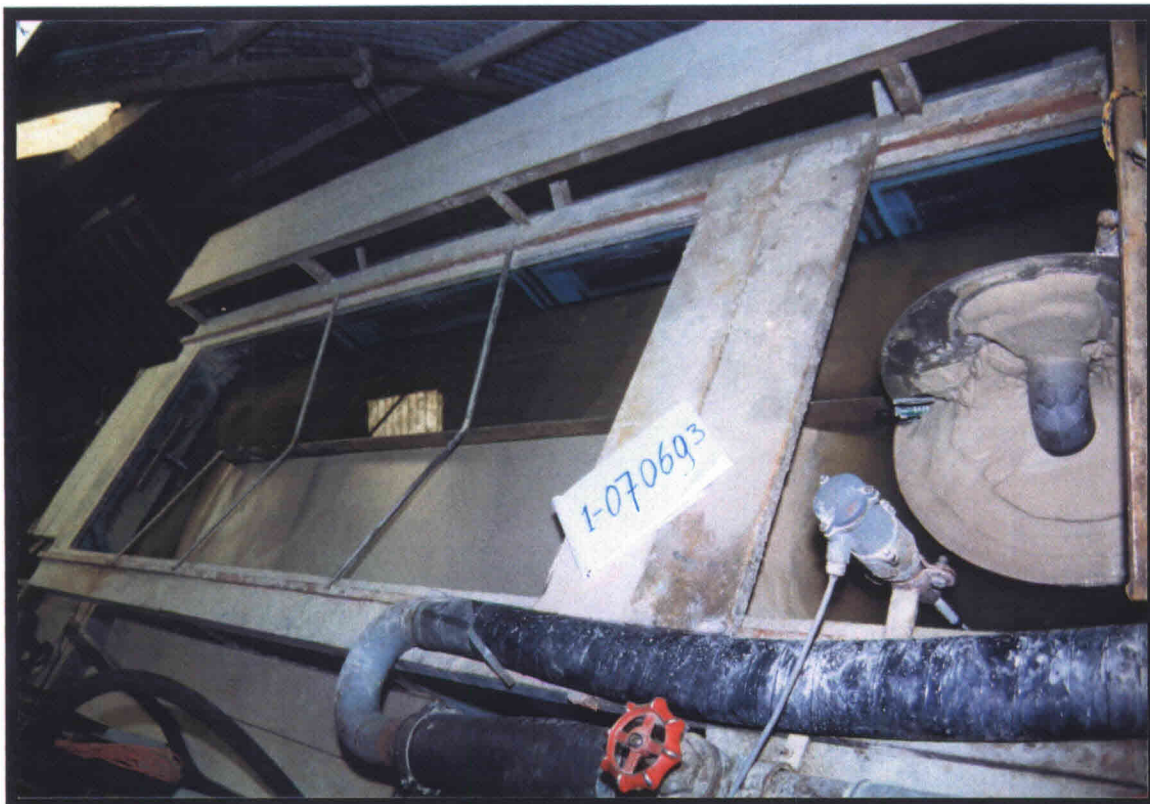


foto D4: Omklapklep ten behoeve van het intermitterend beladen bij schottenkerend

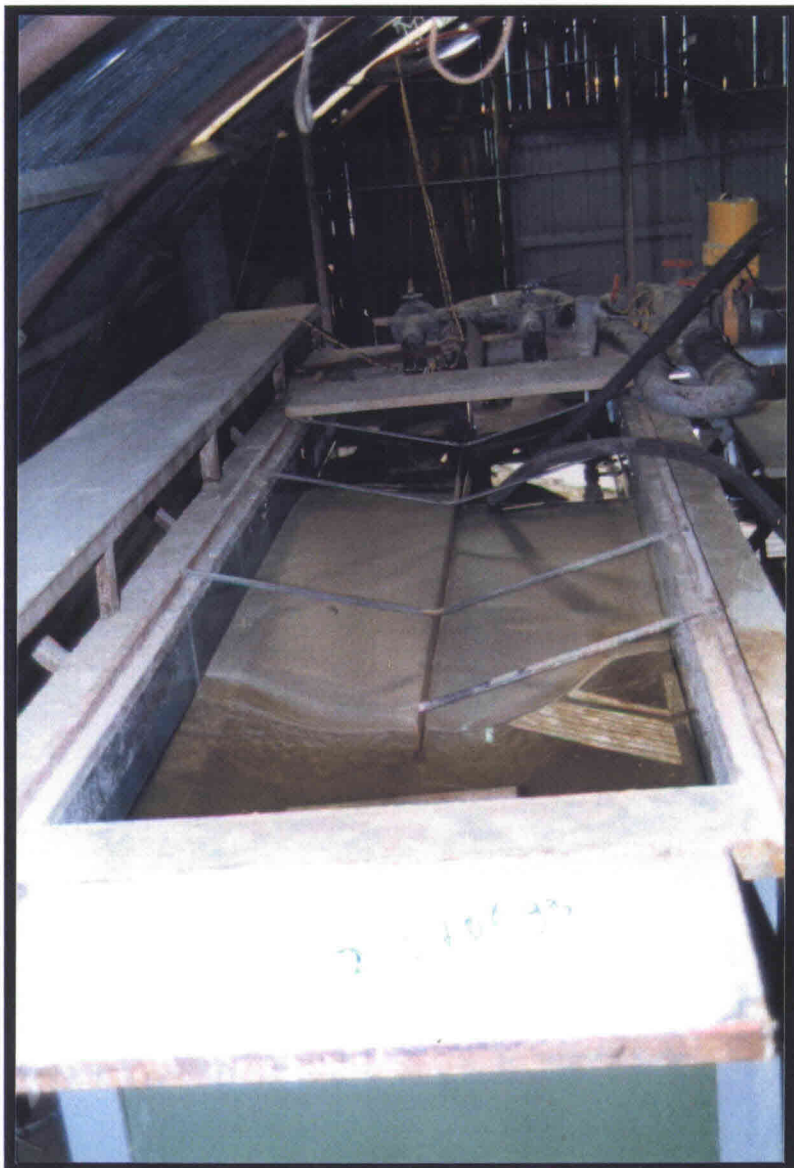


foto D5: Schottenkerend intermitterend beladend



foto D6: Bezonden zandlaag na schottenkerend beladen
Sedimentatiesystemen voor sleeppopperzuigers 2

D3 Lamellendoorgang, lage ρ_{instroom}

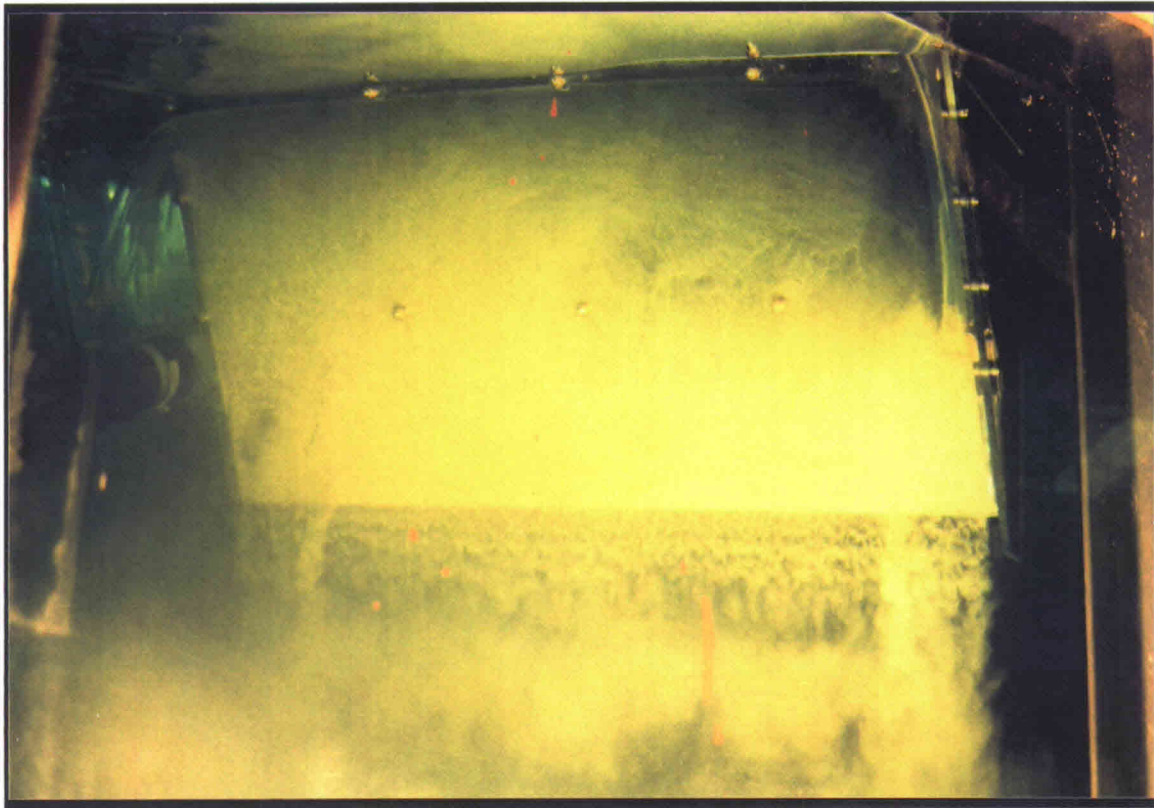


foto D7: Lamellendoorgang vanaf onderlamel gezien, grote wervels treden op

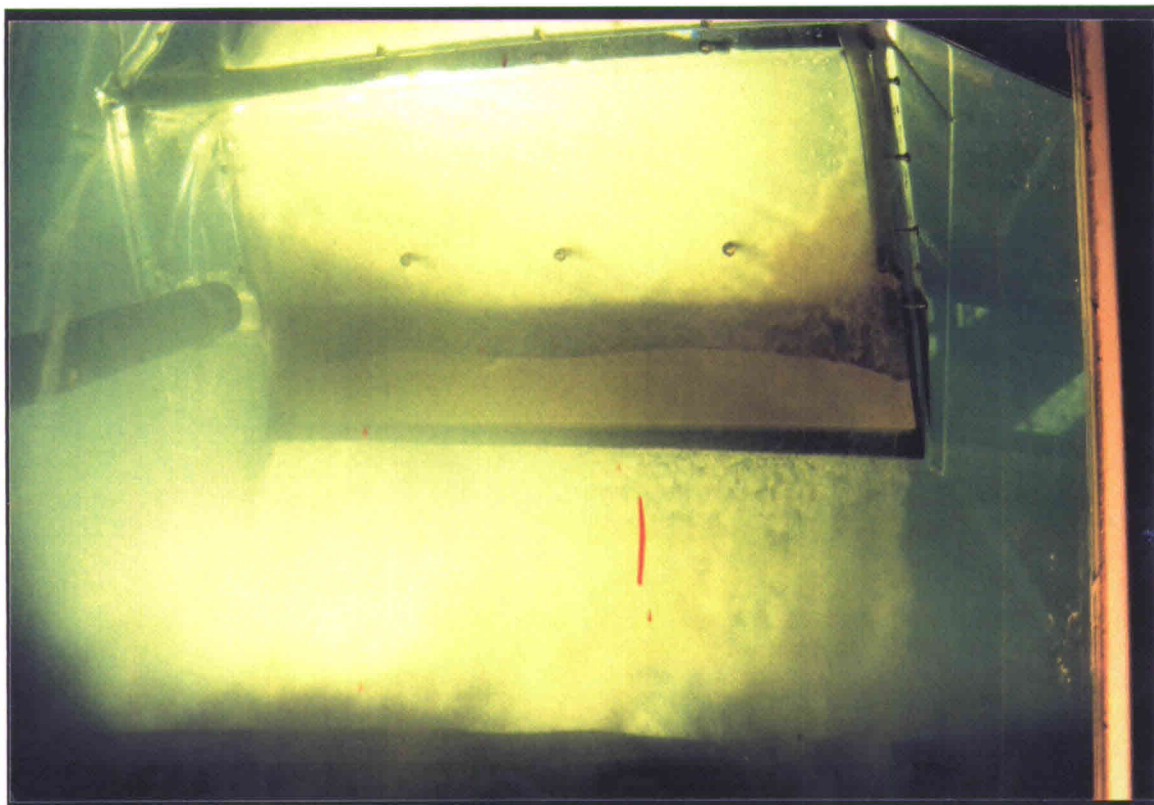


foto D8: Lamellendoorgang bij instroom van mengsel met lage dichtheid

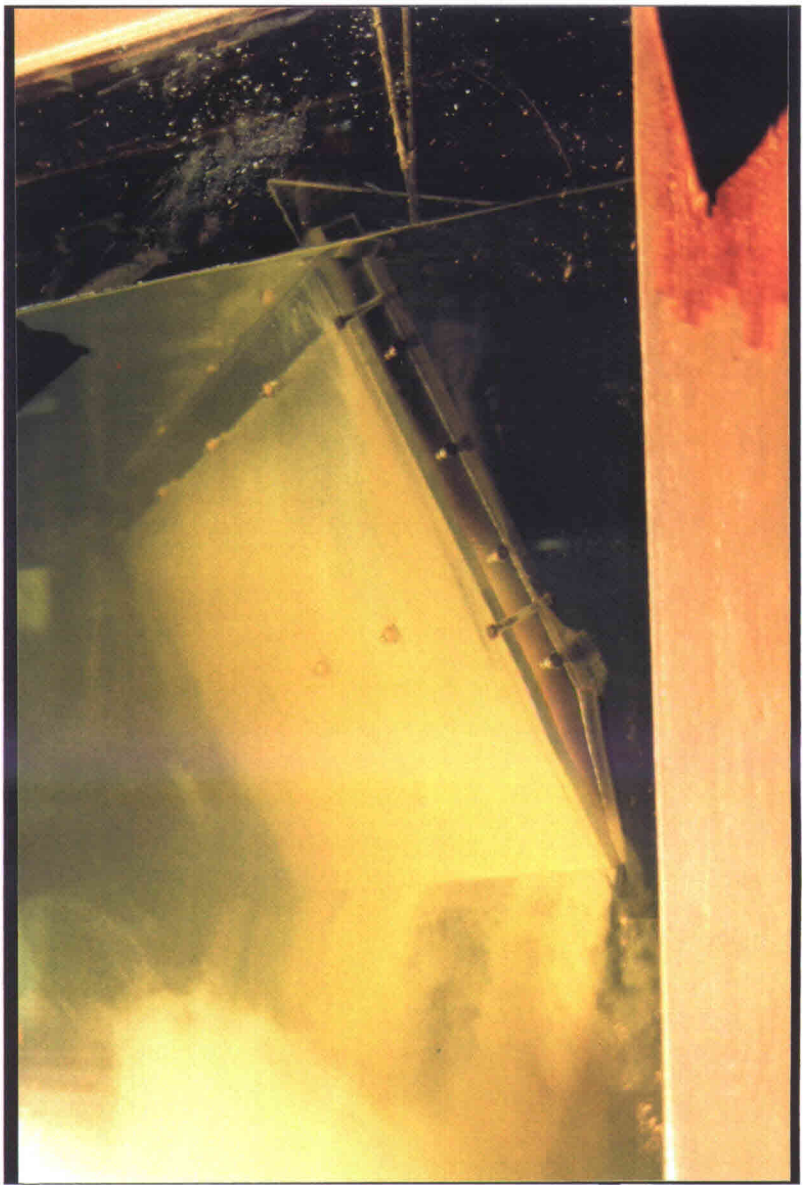


foto D9: Zijaanzicht bij de instroom

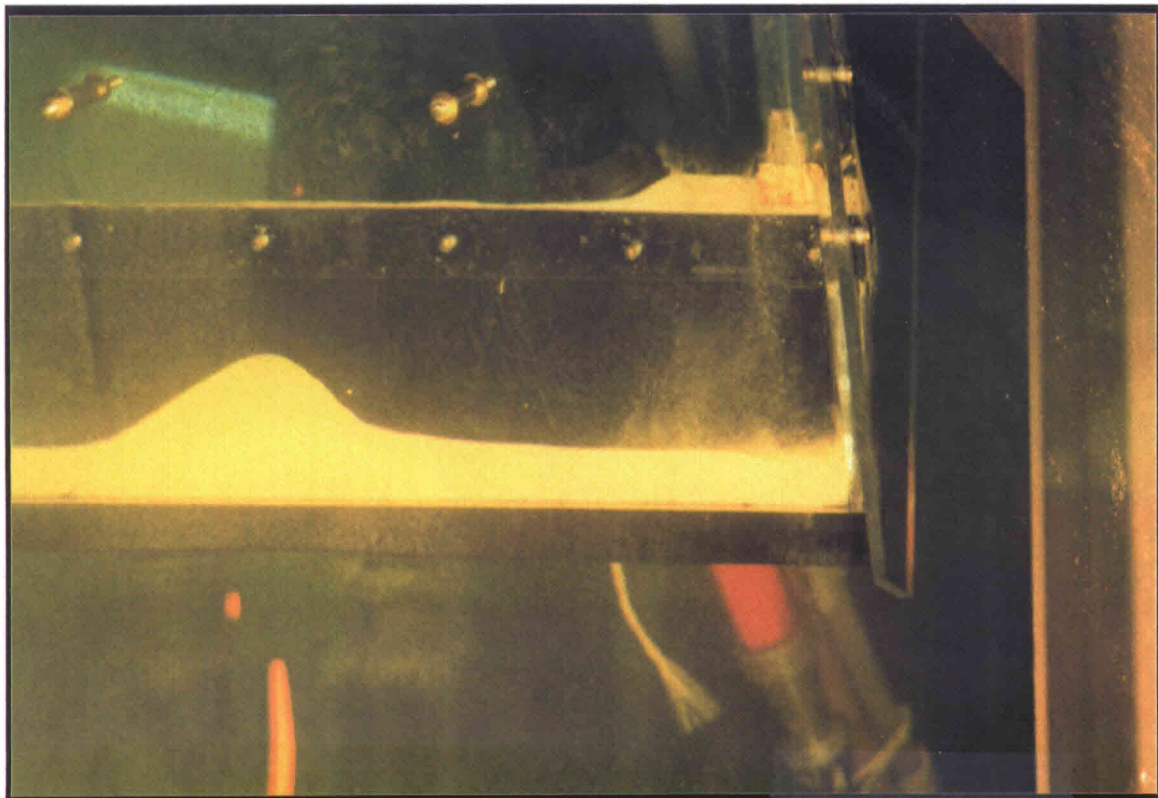


foto D10: Flap bij de instroomzijde gedurende waterdraaien

D4 Lamellendoorgang, $\rho_i \approx 1,25 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

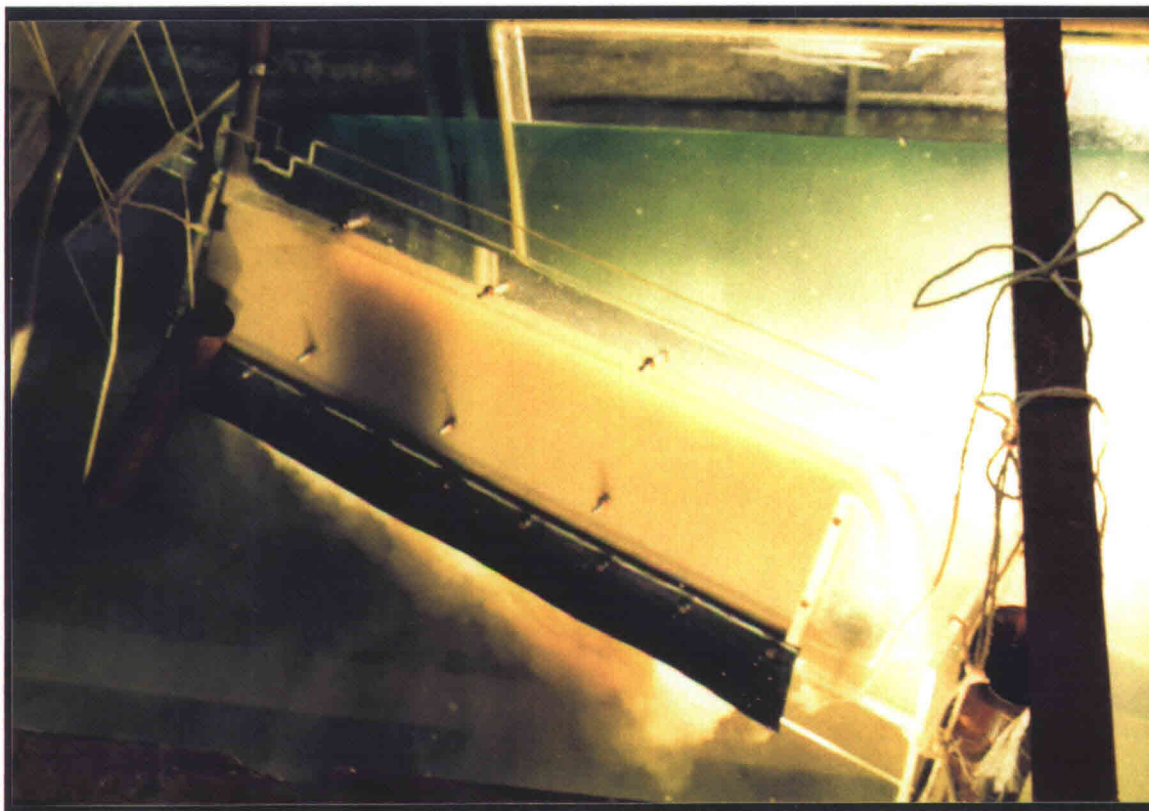


foto D11: Aanzicht lamellendoorgang van boven gezien

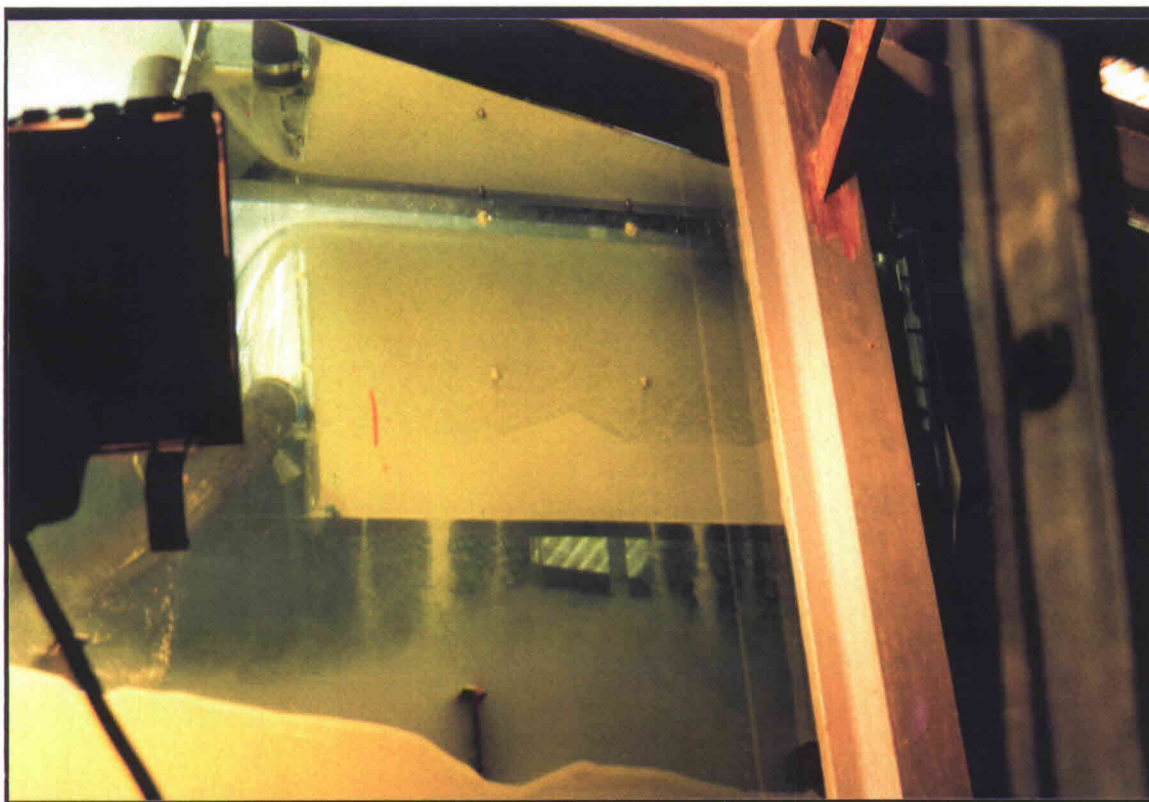


foto D12: Lamellendoorgang bij aanvang laden



foto D13: Flap aan zijde van de uitstroom

Bijlage E: Laadproeven

Inhoud

E1	Hoog debiet en hoge dichtheid	E2
E2	Hoog debiet en lage dichtheid	E12
E3	Laag debiet en hoge dichtheid	E18
E4	Laag debiet en lage dichtheid	E22

Verkorte aanduidingen

- HH Hoog debiet ($Q_i = 16 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$) en Hoge dichtheid ($\rho_i = 1,4 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$)
HL Hoog debiet ($Q_i = 16 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$) en Lage dichtheid ($\rho_i = 1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$)
LH Laag debiet ($Q_i = 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$) en Hoge dichtheid ($\rho_i = 1,4 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$)
LL Laag debiet ($Q_i = 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$) en Lage dichtheid ($\rho_i = 1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$)

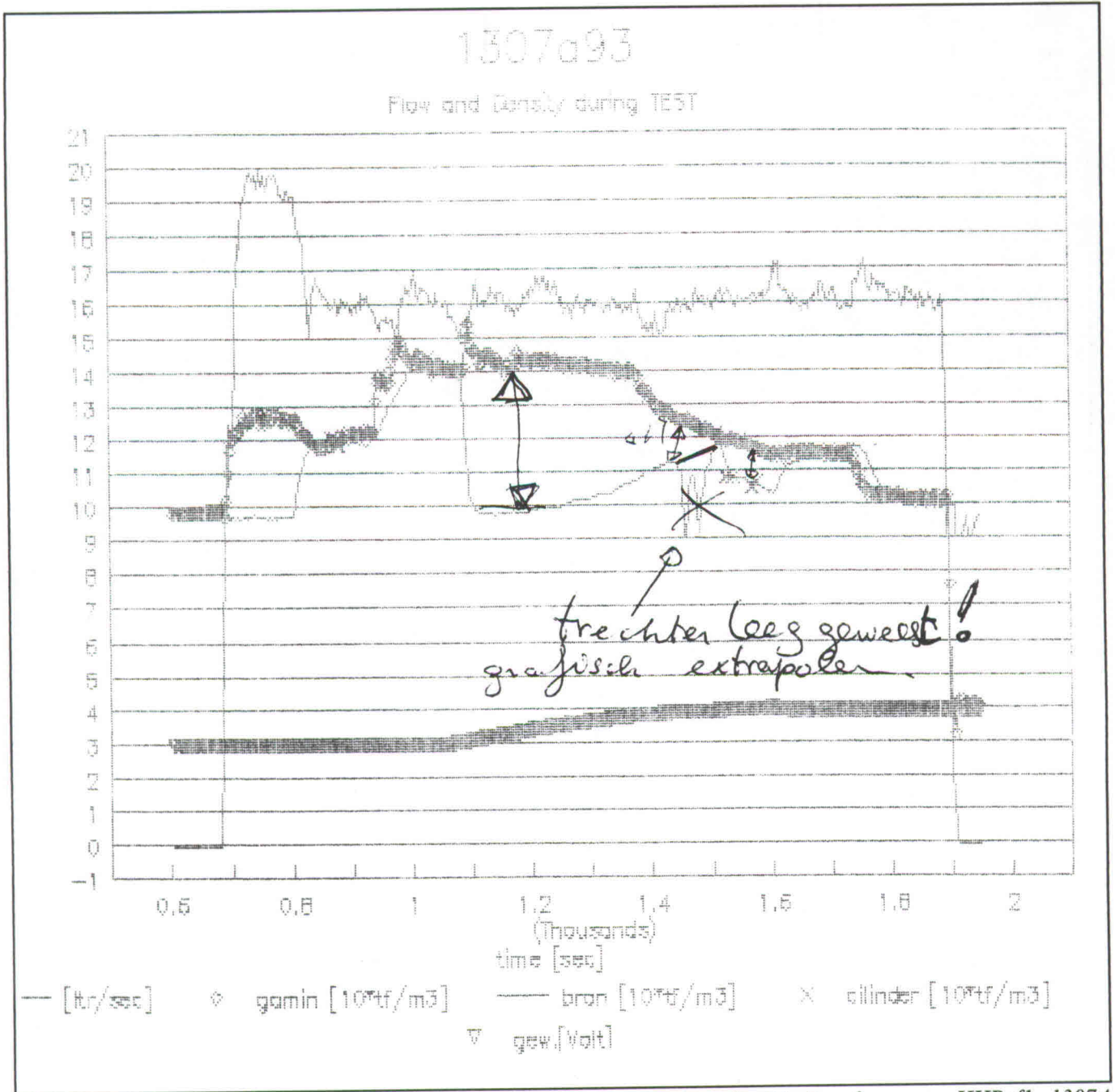
- Ref Referentie configuratie
SK SchottenKerend
SKI SchottenKerend Intermitterend

Proefcodes		Pagina
HHRef1	1307A	E2
HHRef2	1307B	E4
HHSk	1-2705	E6
HHSKI1	1-0806	E8
HHSKI2	2-0806	E10
HLRef	1207B	E12
HLSK	1-0306	E14
HLSKI	1-0906	E16
LHRef	0807A	E18
LHSK	1-0406	E20
LLRef1	0607A	E22
LLRef2	0707B	E24
LLRef3	1207A	E26
LLSK	2-2705	E28

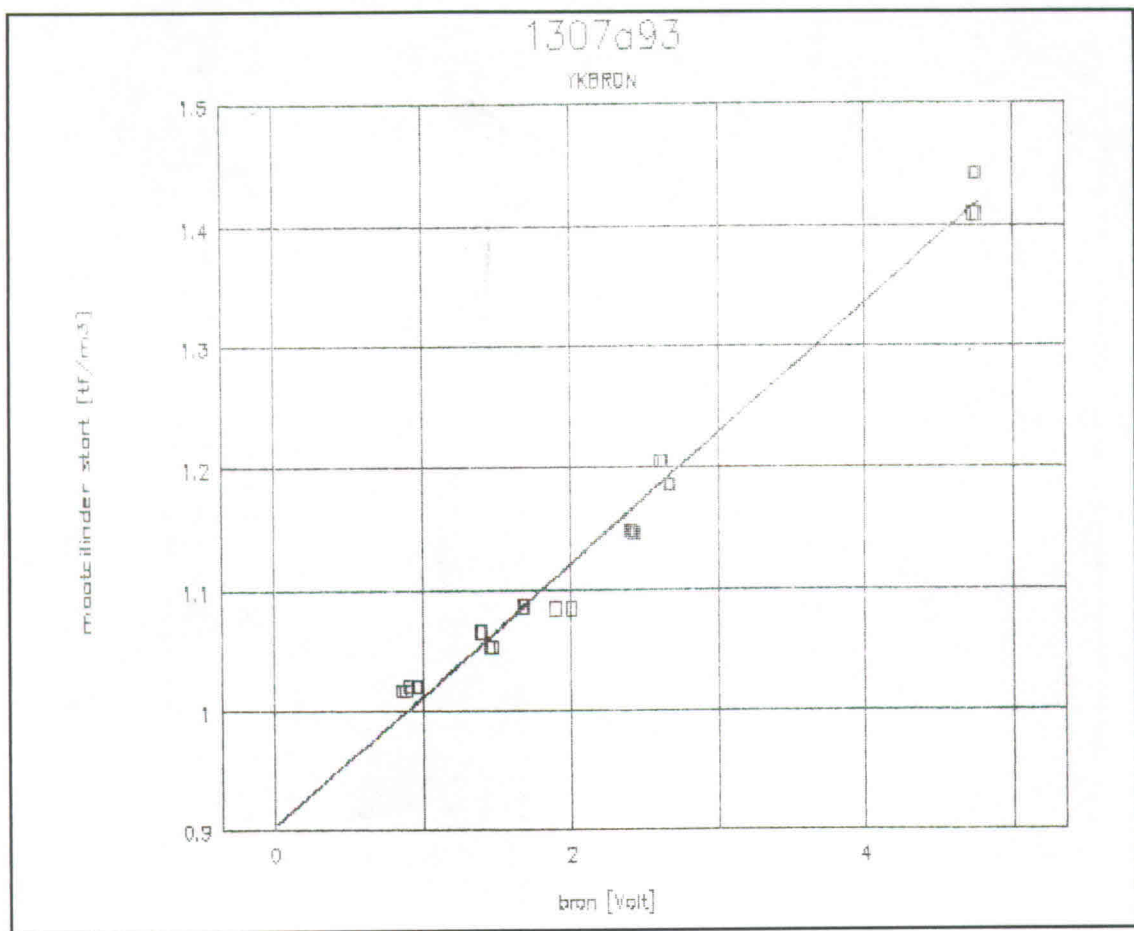
tab. E1: Laadproeven met pagina's

E1 Hoog debiet en hoge dichtheid

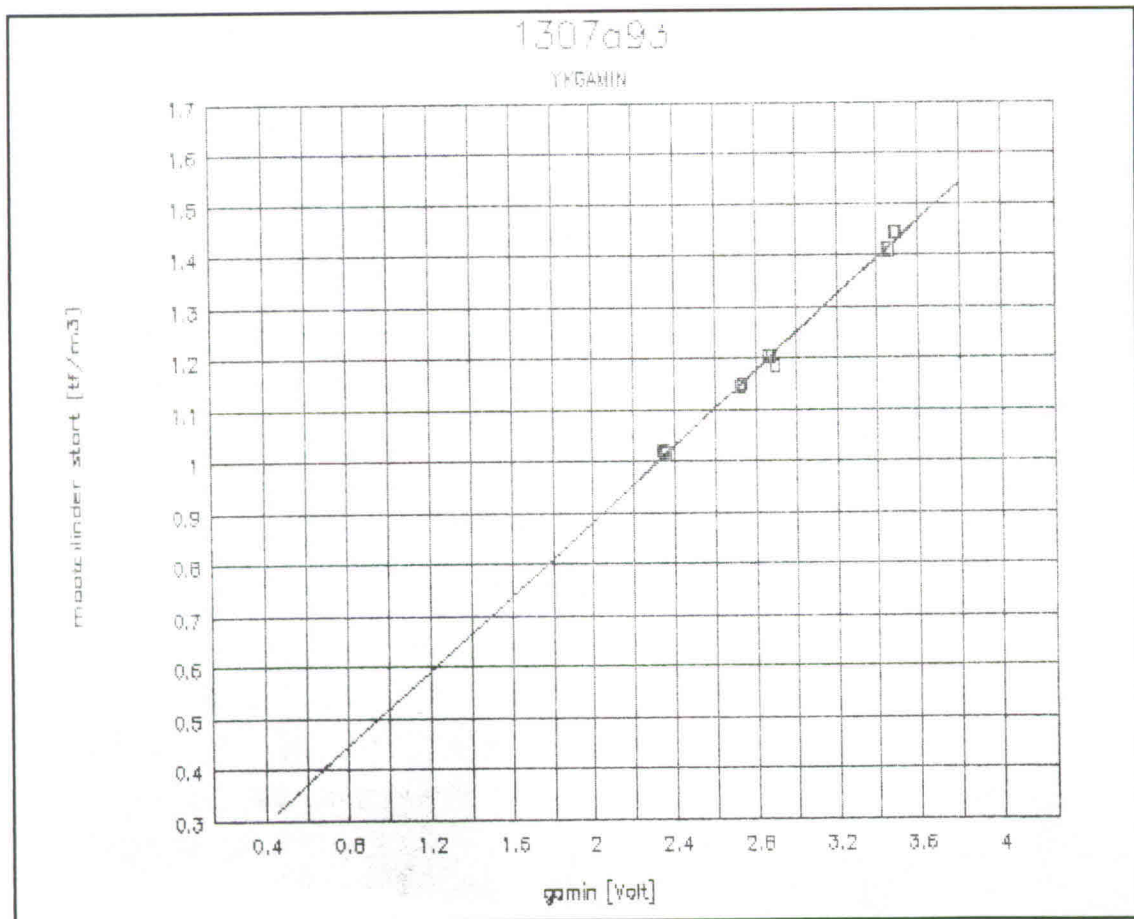
HHRef1, 1307A



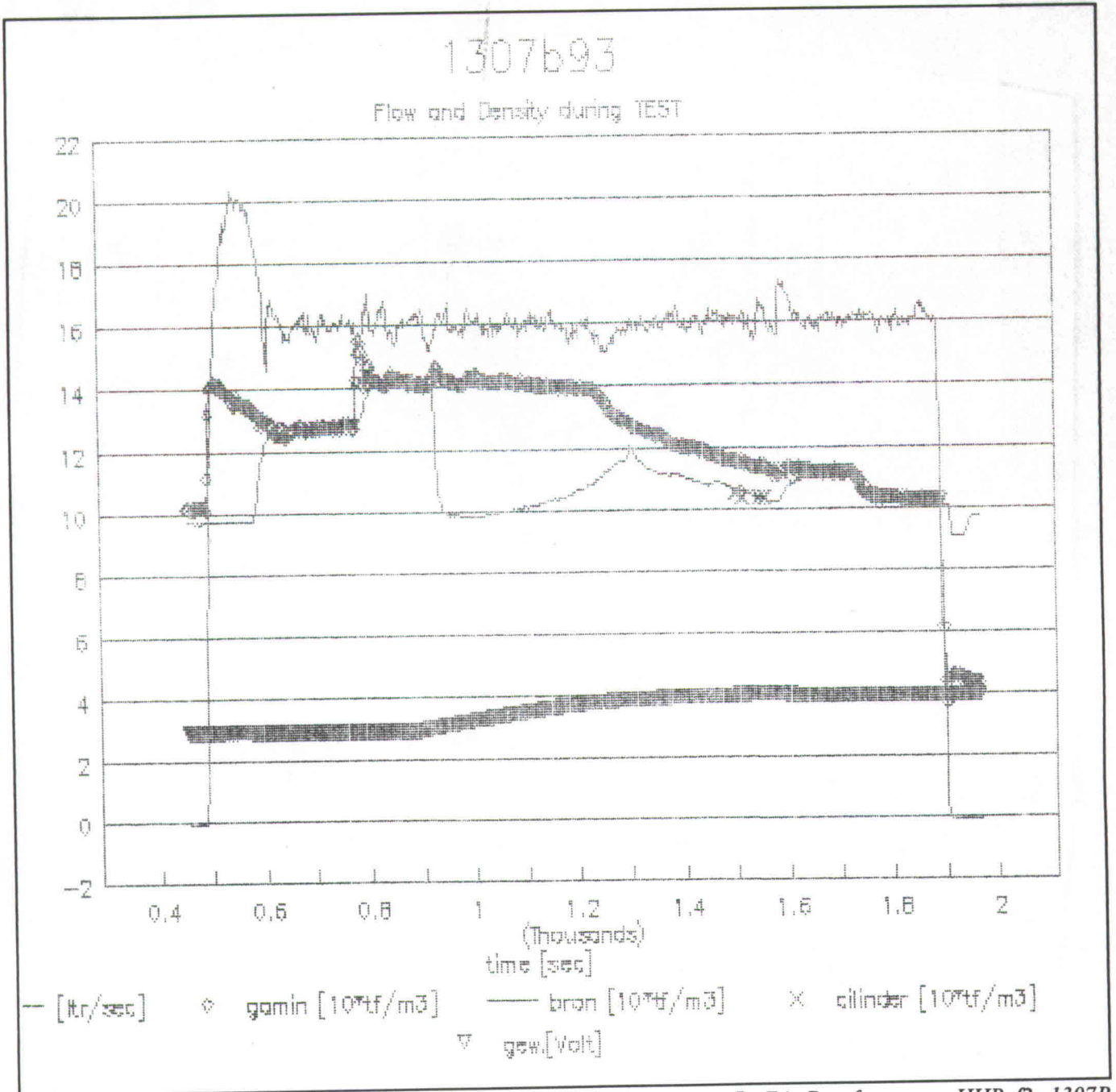
afb. E1: Proefgegevens HHRef1, 1307A



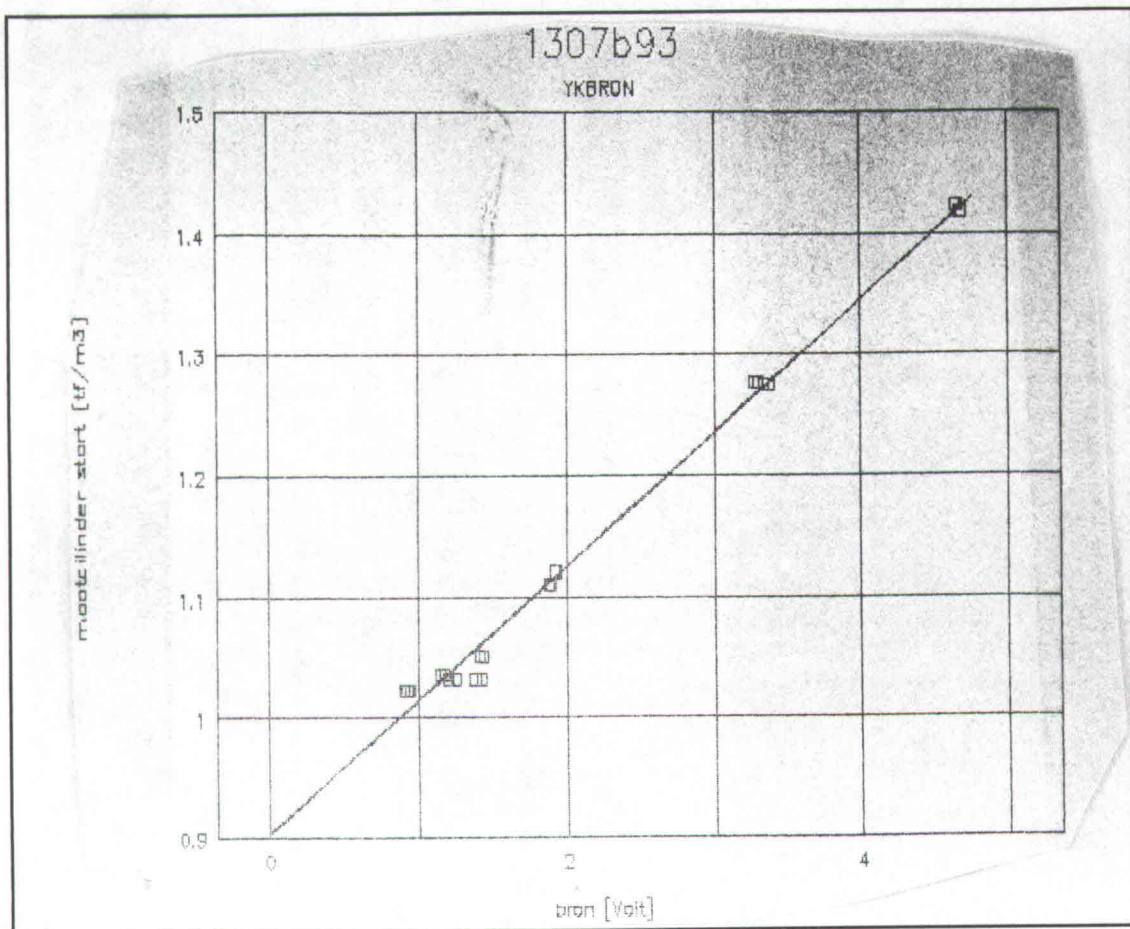
afb. E2: IJking bronmeter HHRef1, 1307A



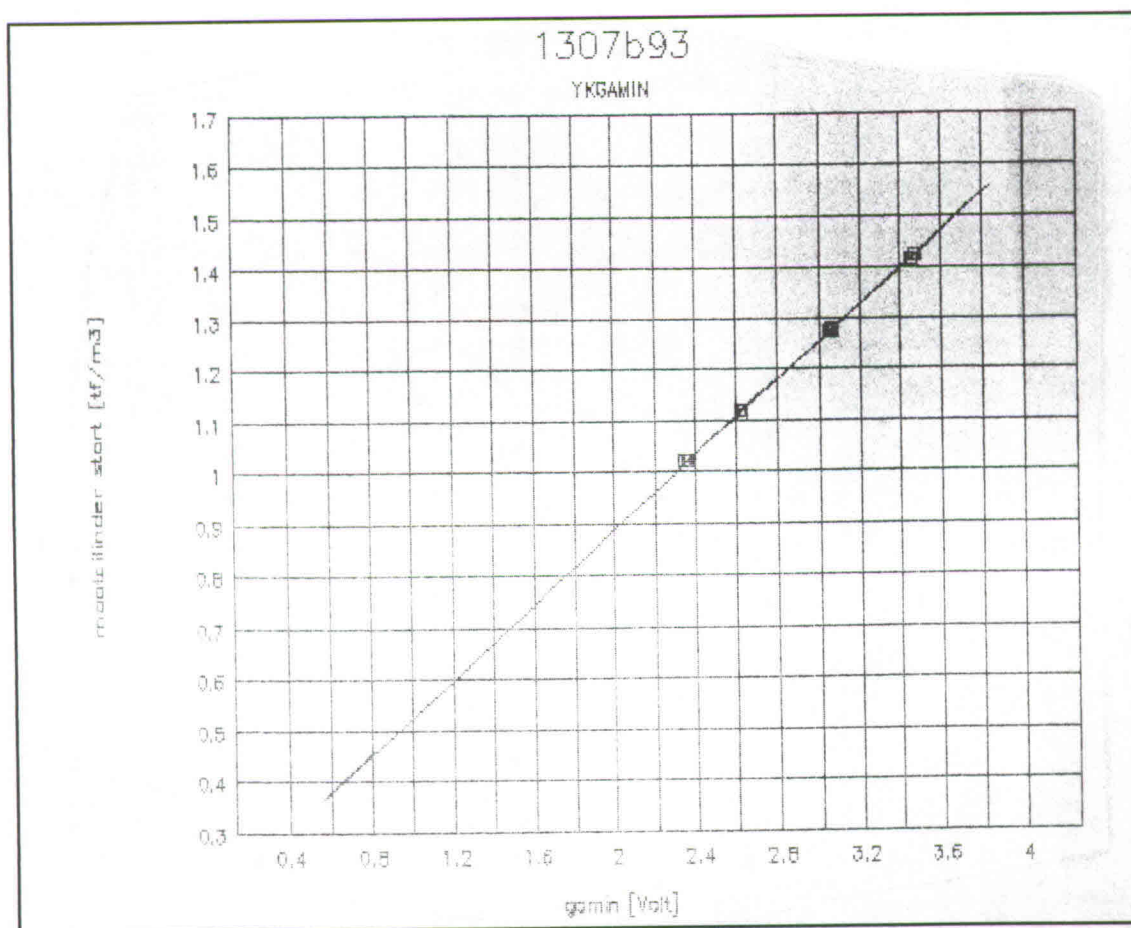
afb. E3: IJking bochtmeter HHRef1, 1307A



afb. E4: Proefgegevens HHRef2, 1307B



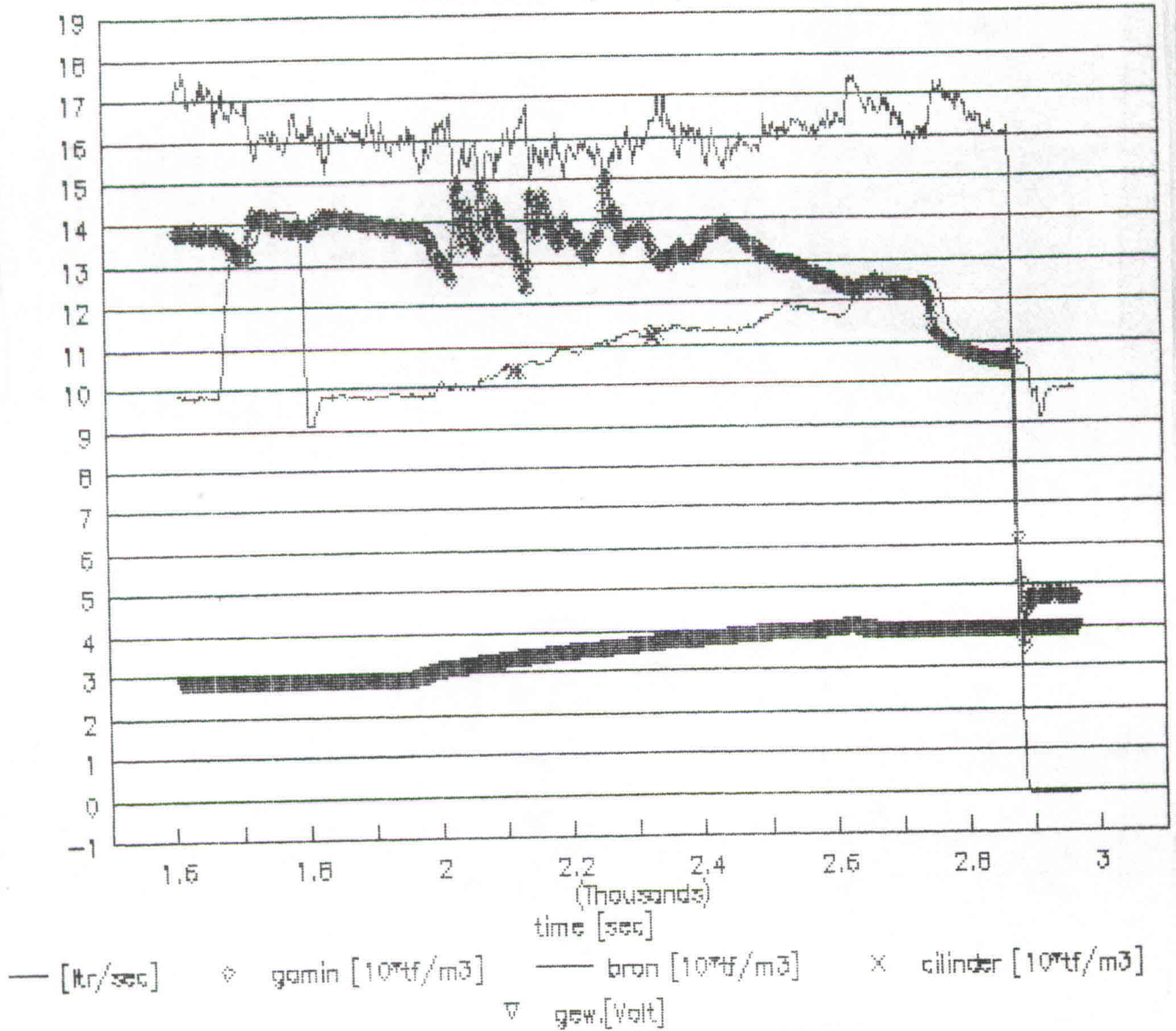
afb. E5: IJking bronmeter HHRef2, 1307B



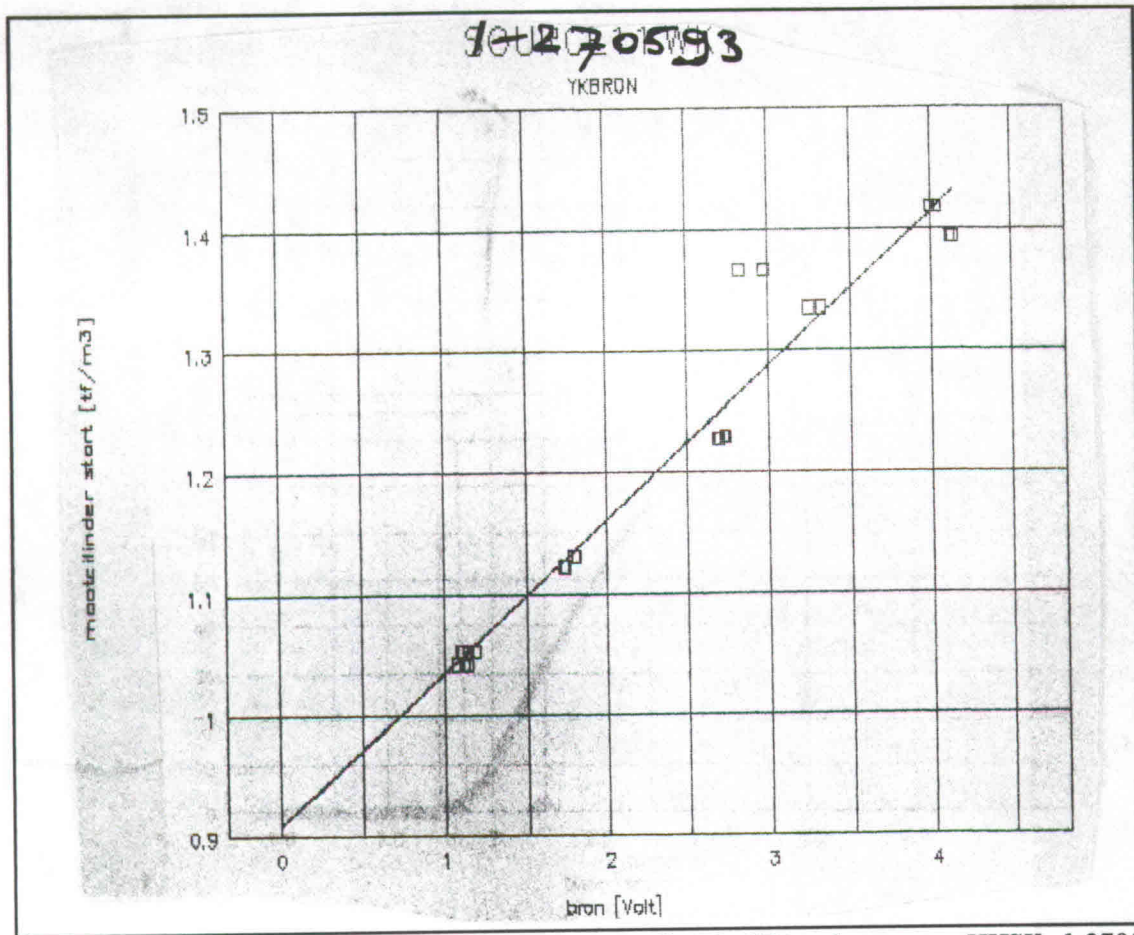
afb. E6: IJking bochtmeter HHRef2, 1307B

BOU2705.931

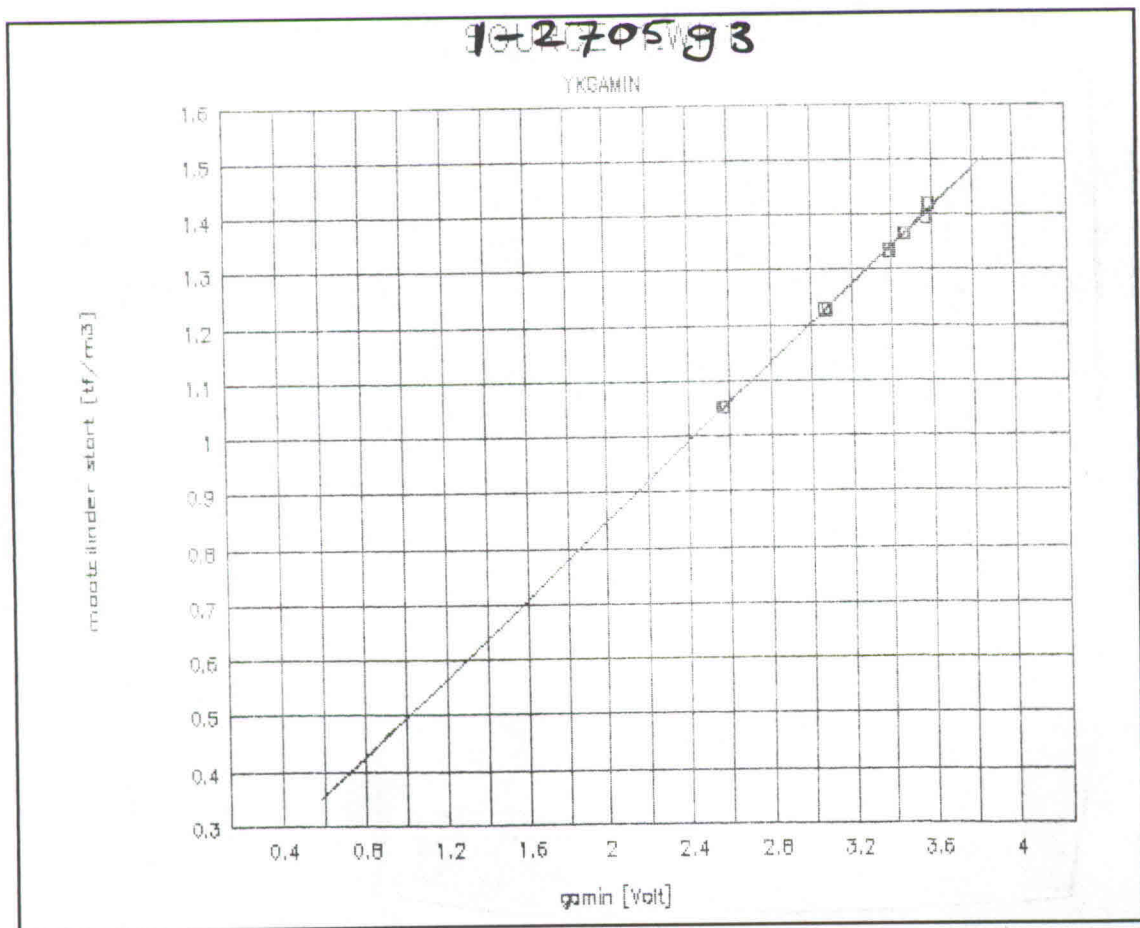
Flow and Density during TEST



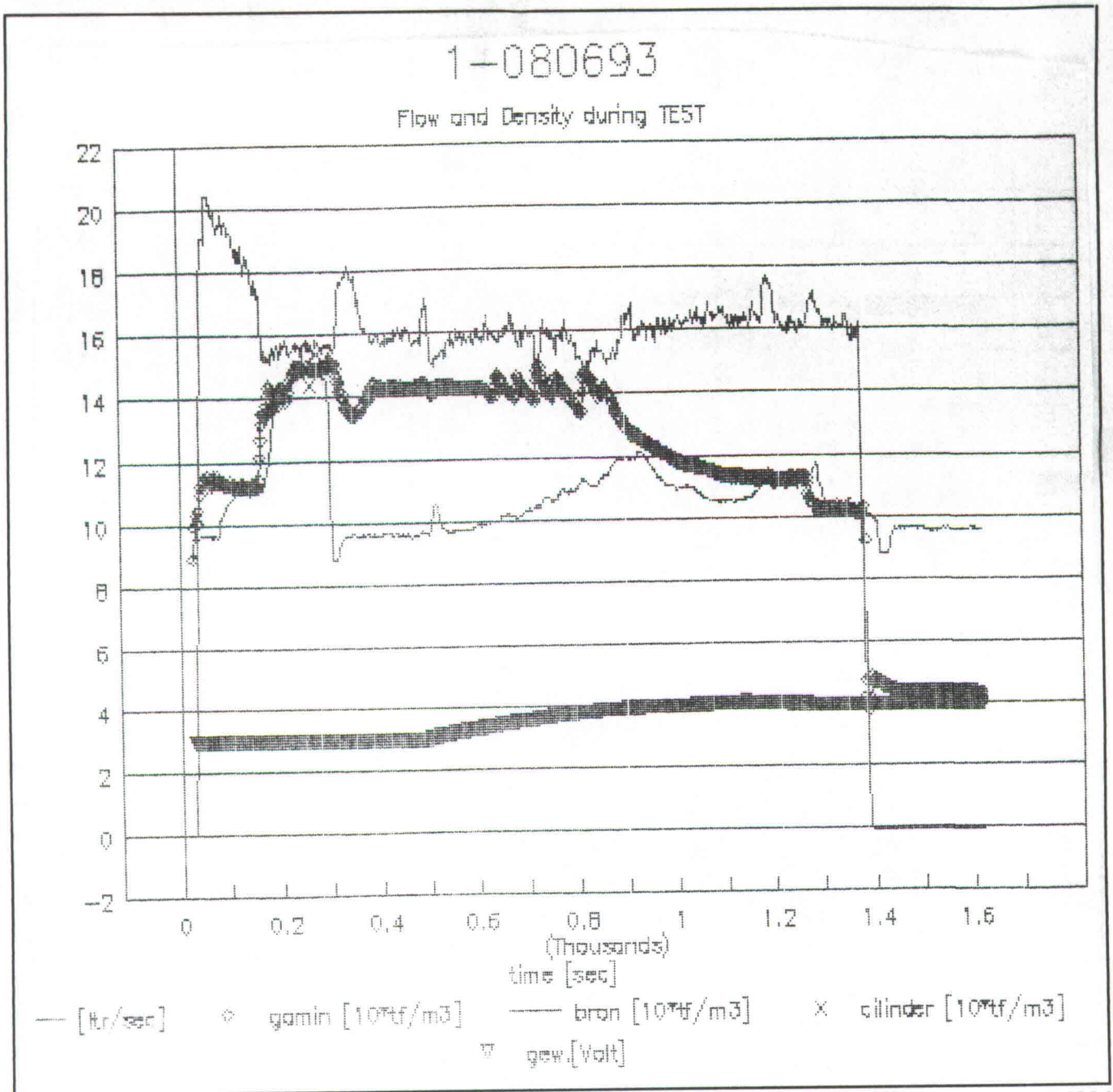
afb. E7: Proefgegevens HHSK, 1-2705



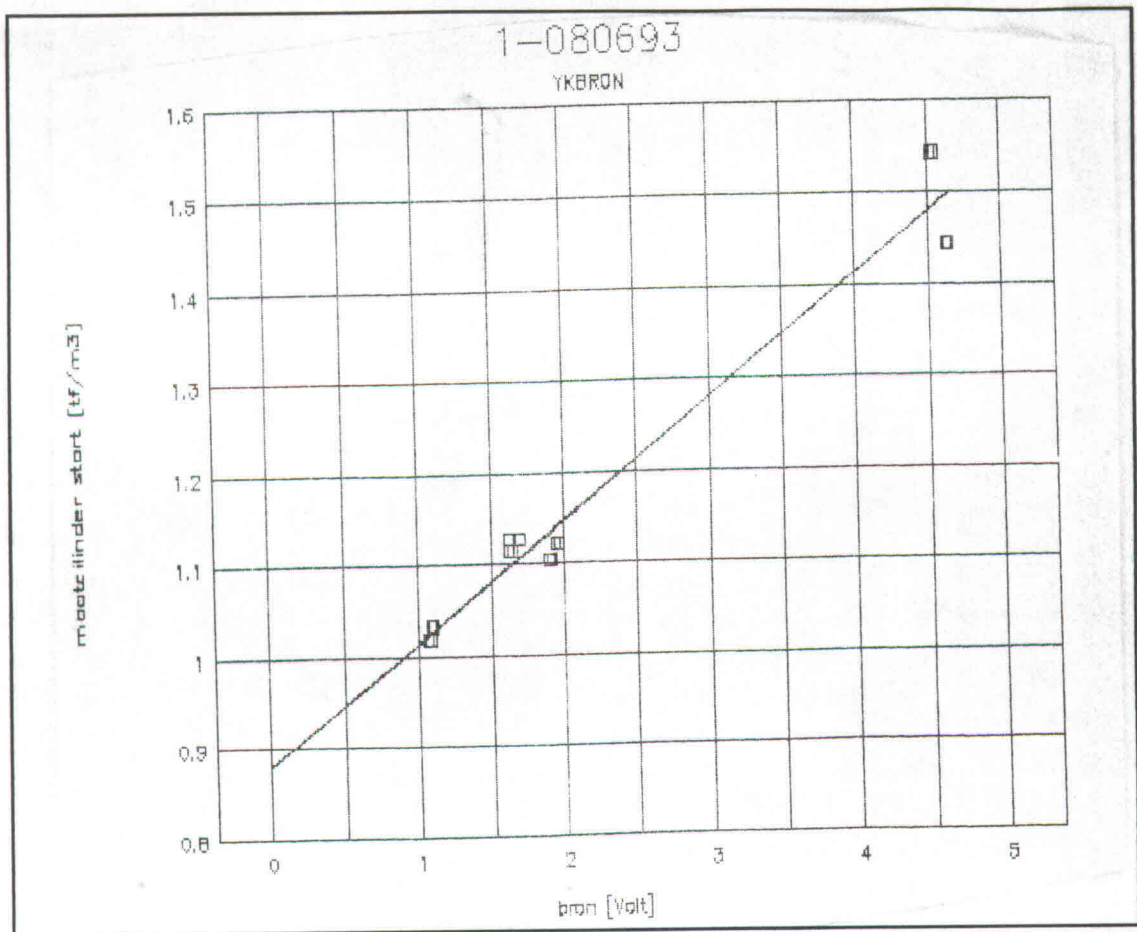
afb. E8: Ljking bronmeter HHSK, 1-2705



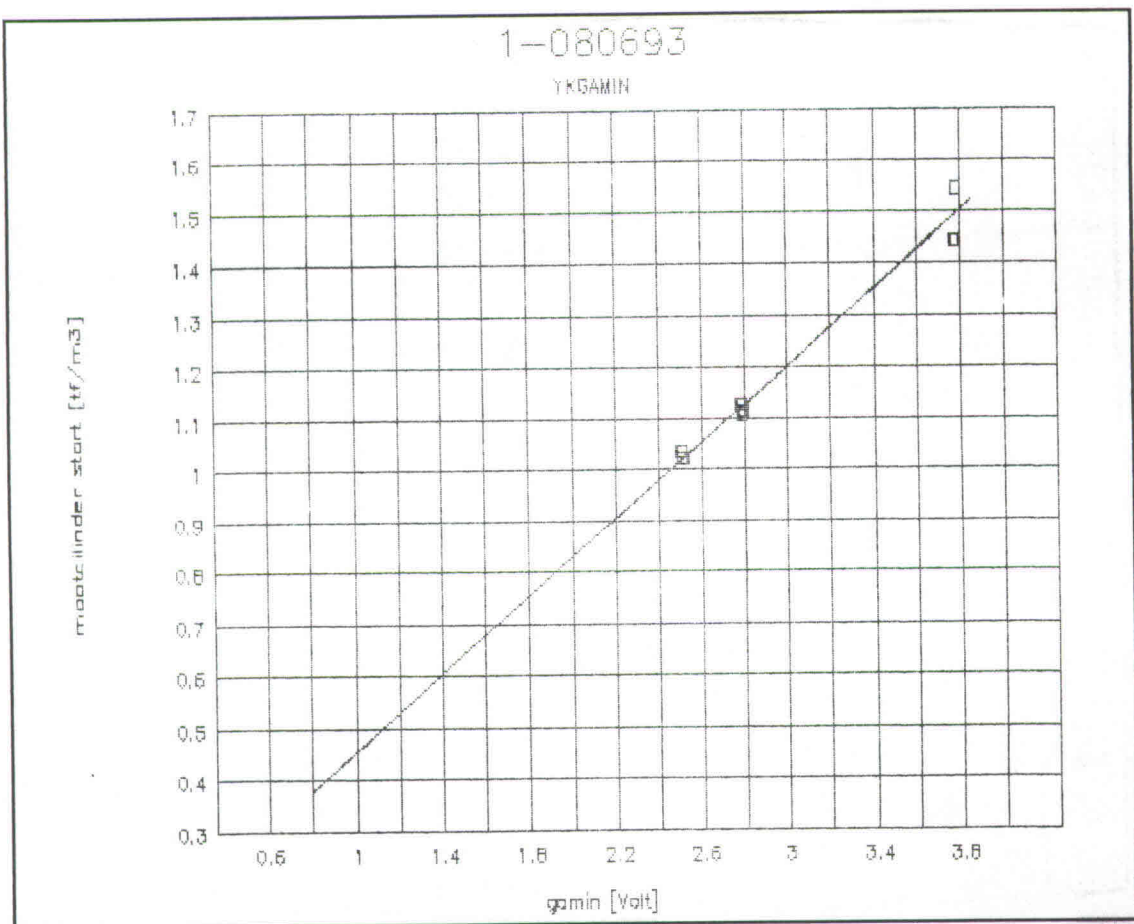
afb. E9: Ljking bochtmeter HHSK, 1-2705



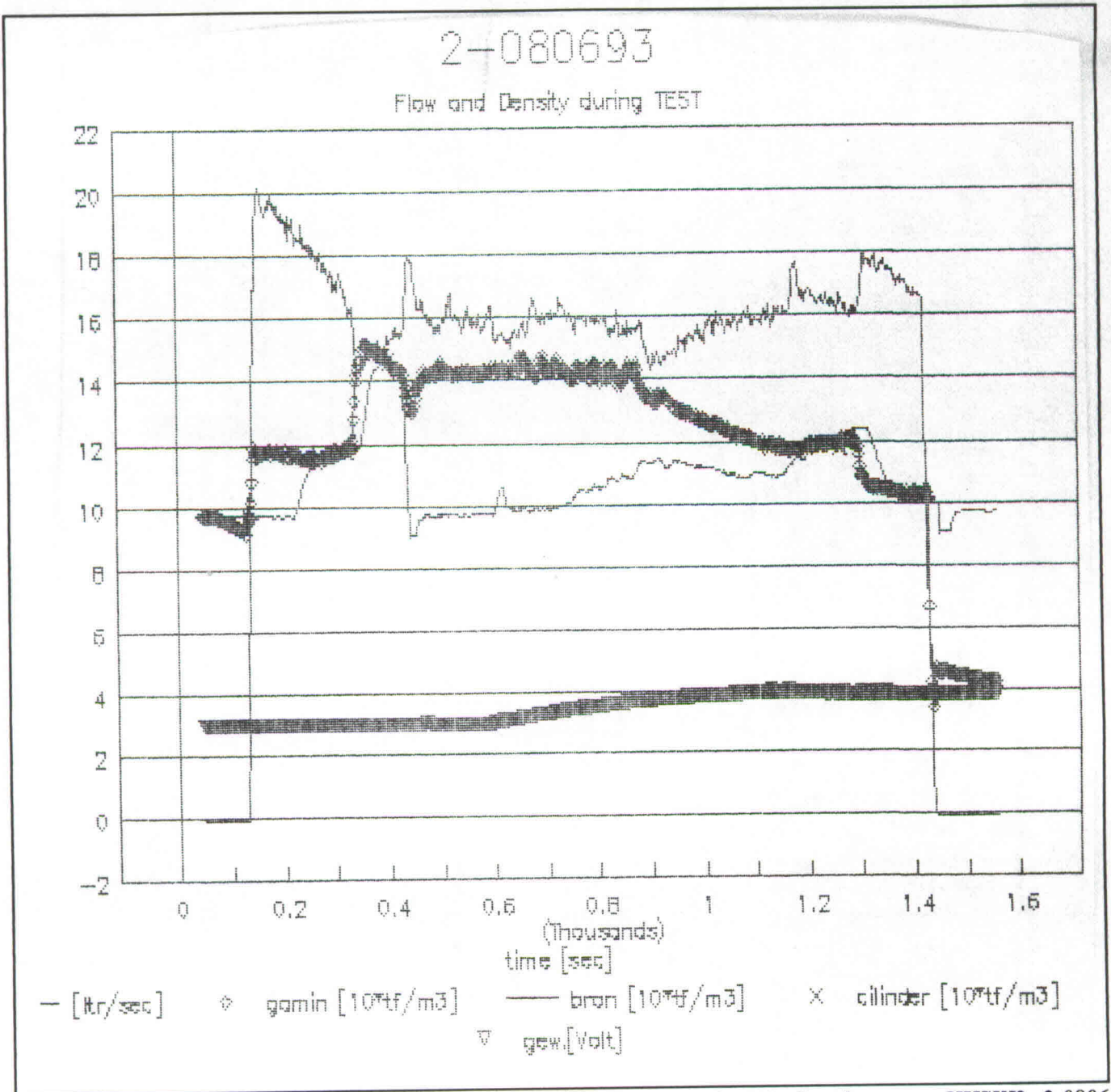
afb. E10: Proefgegevens HHSK11, 1-0806



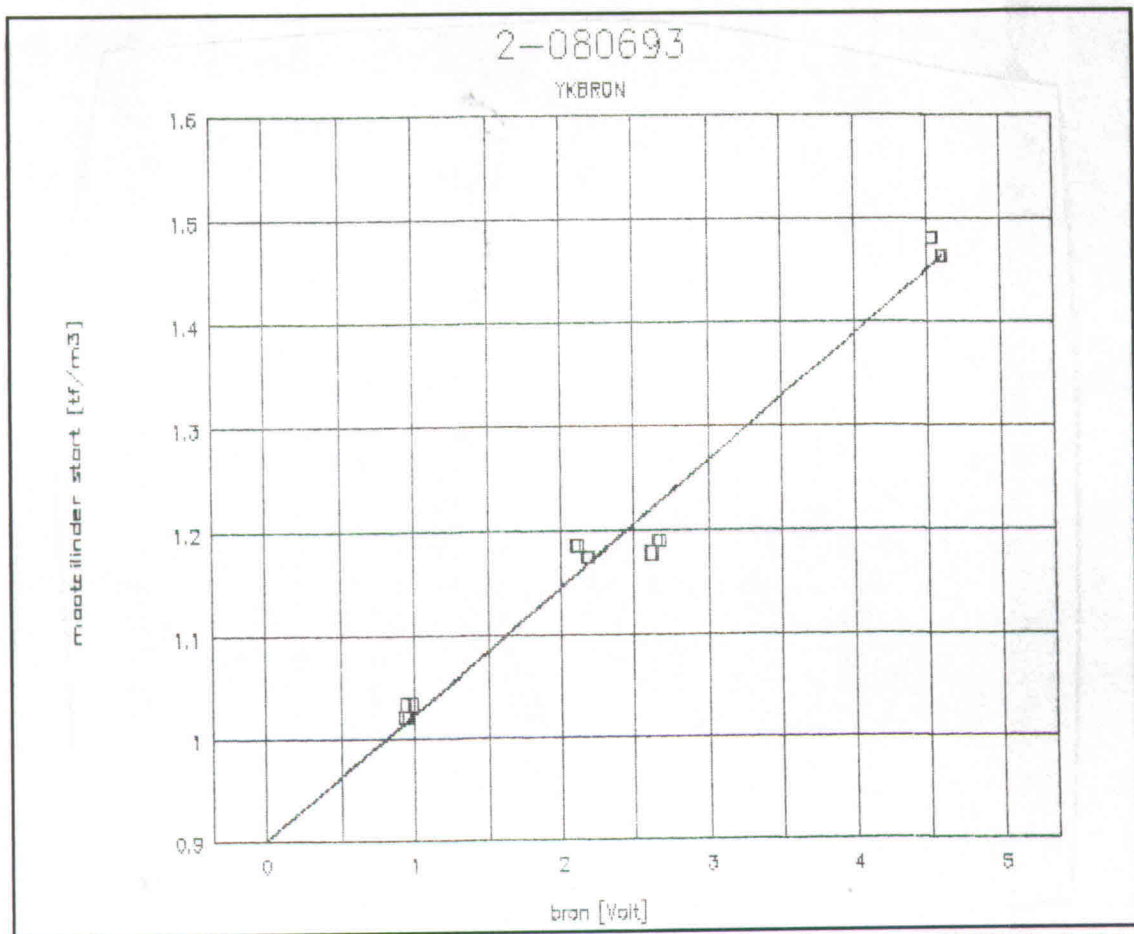
afb. E11: Lijking bronmeter HHSK11, 1-0806



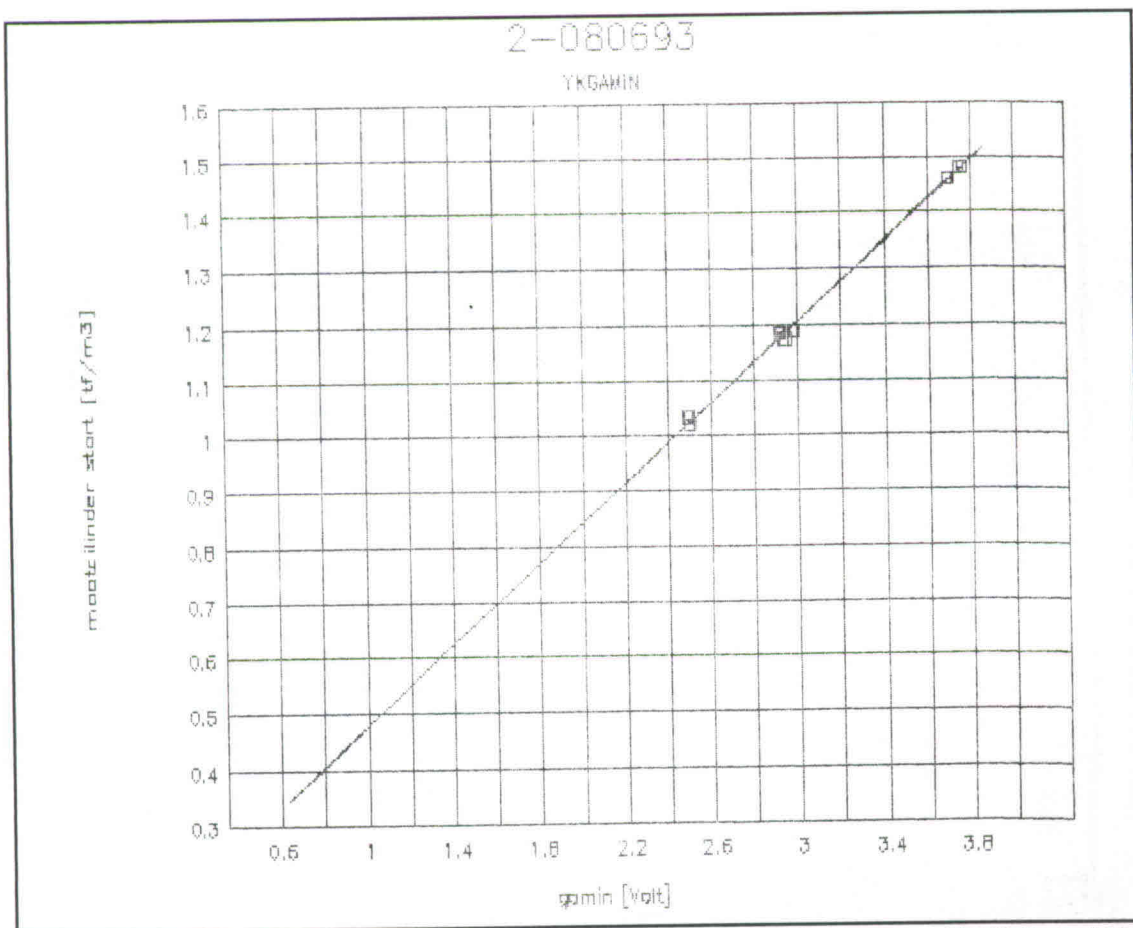
afb. E12: Lijking bochtmeter HHSK11, 1-0806



afb. E13: Proefgegevens HHSKI2, 2-0806



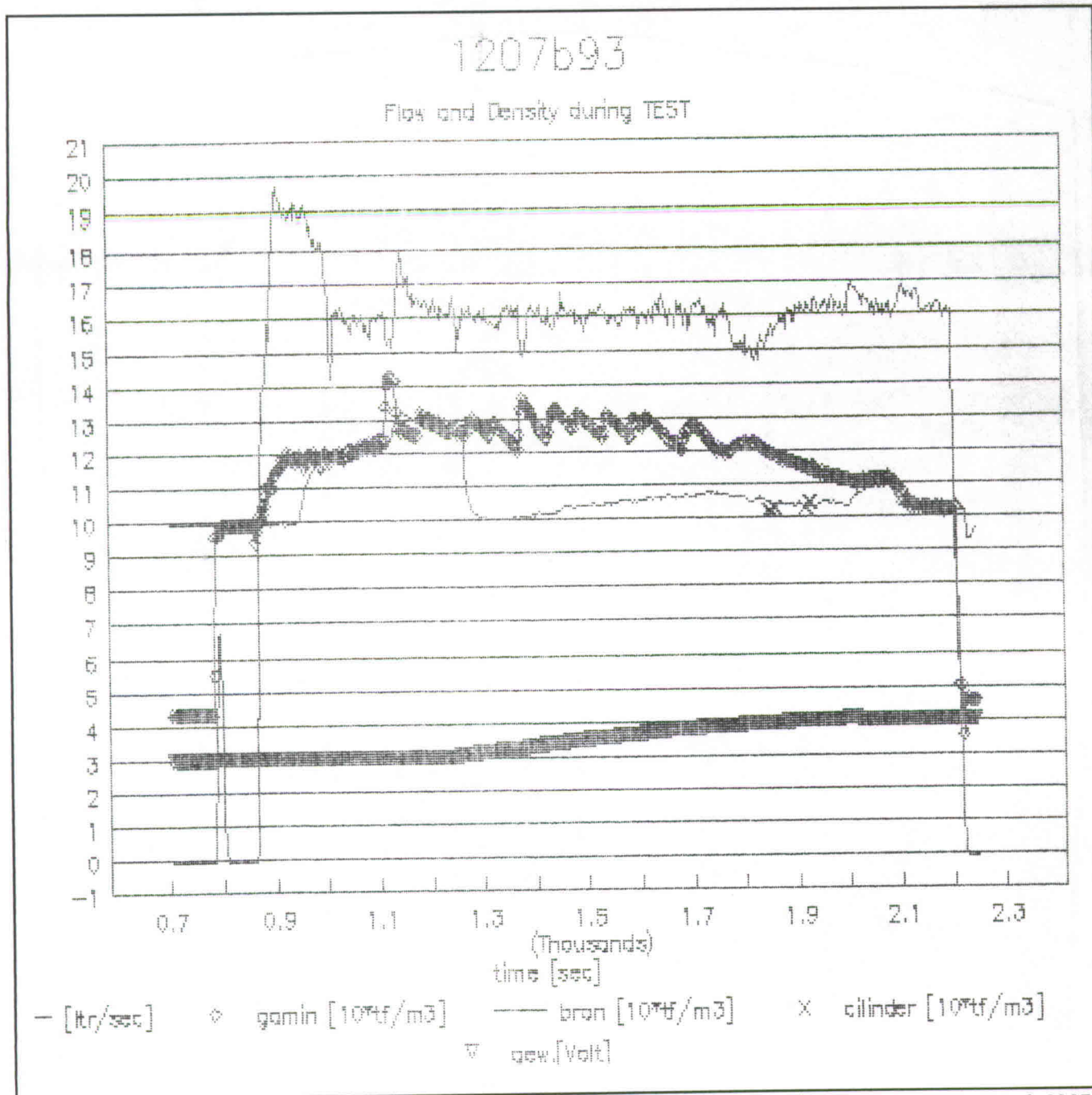
afb. E14: Lijking bronmeter HHSKI2, 2-0806



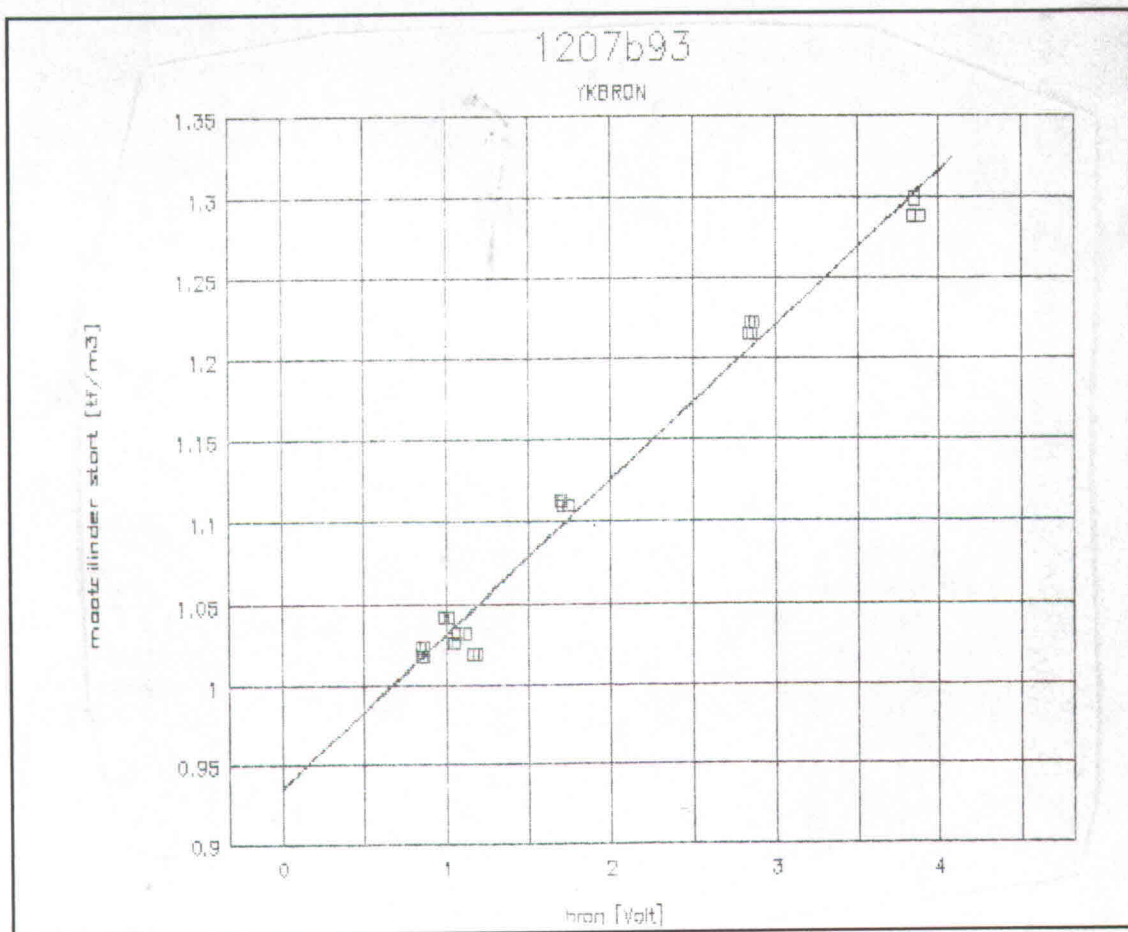
afb. E15: Lijking bochtmeter HHSKI2, 2-0806

E2 Hoog debiet en lage dichtheid

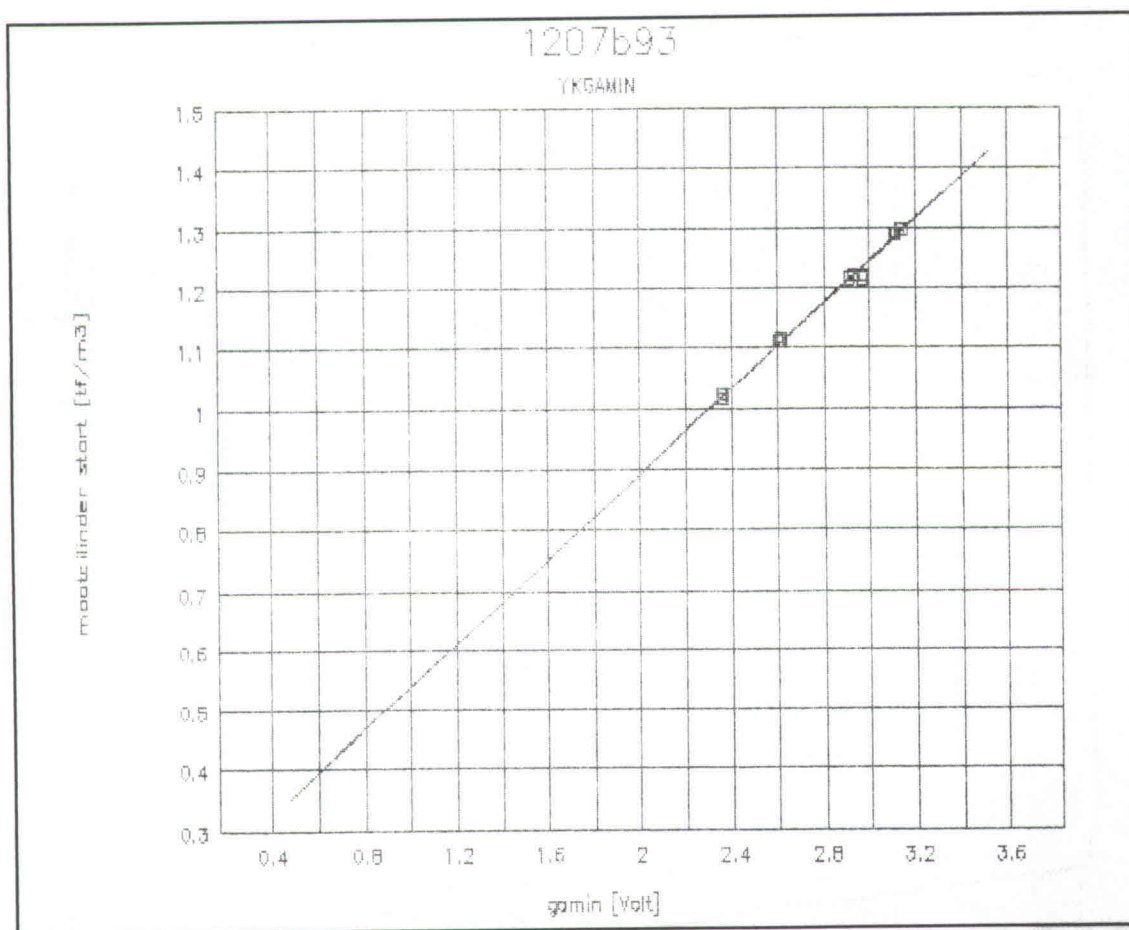
HLRef, 1207B



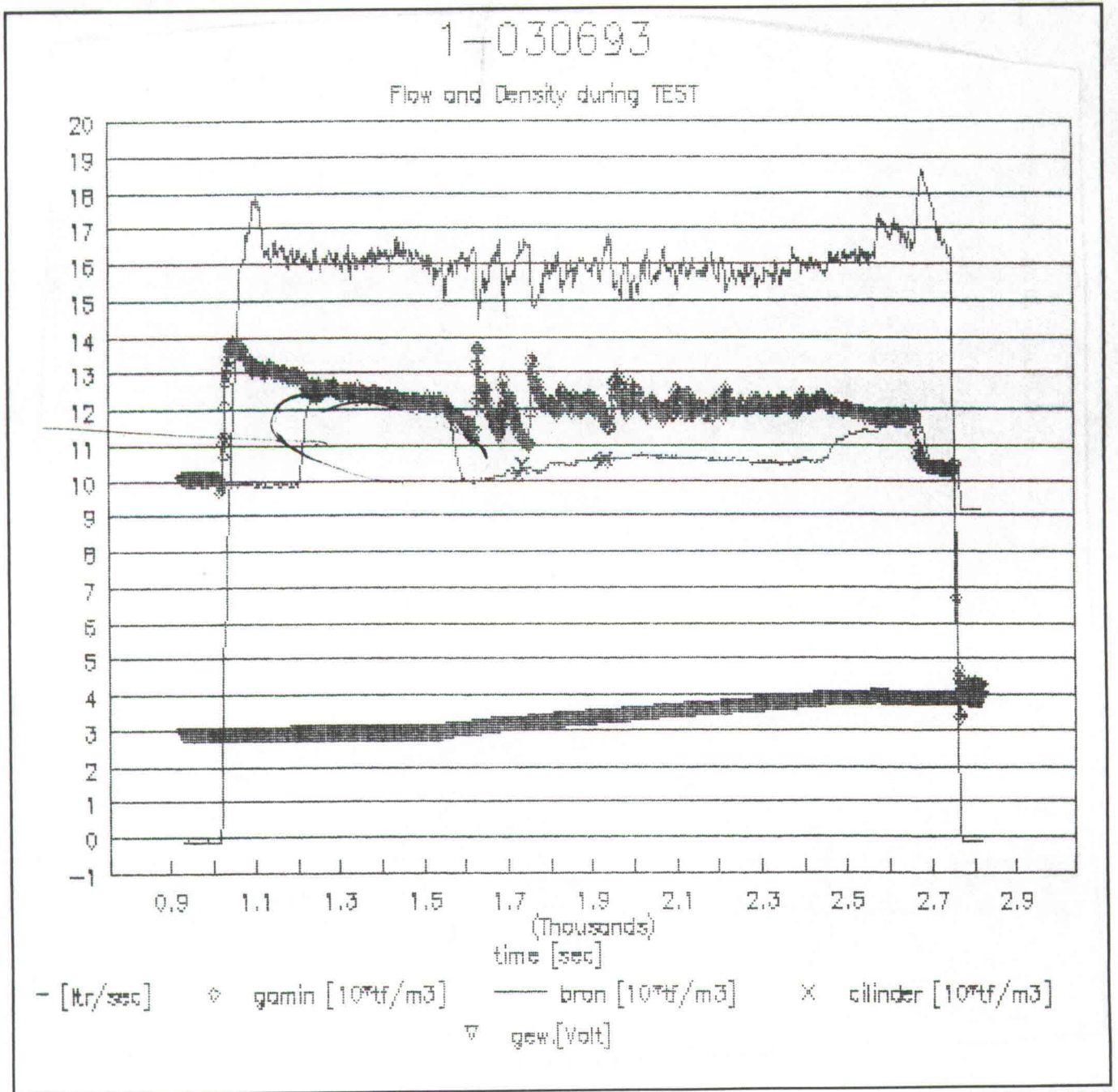
afb. E16: Proefgegevens HLRef, 1207B



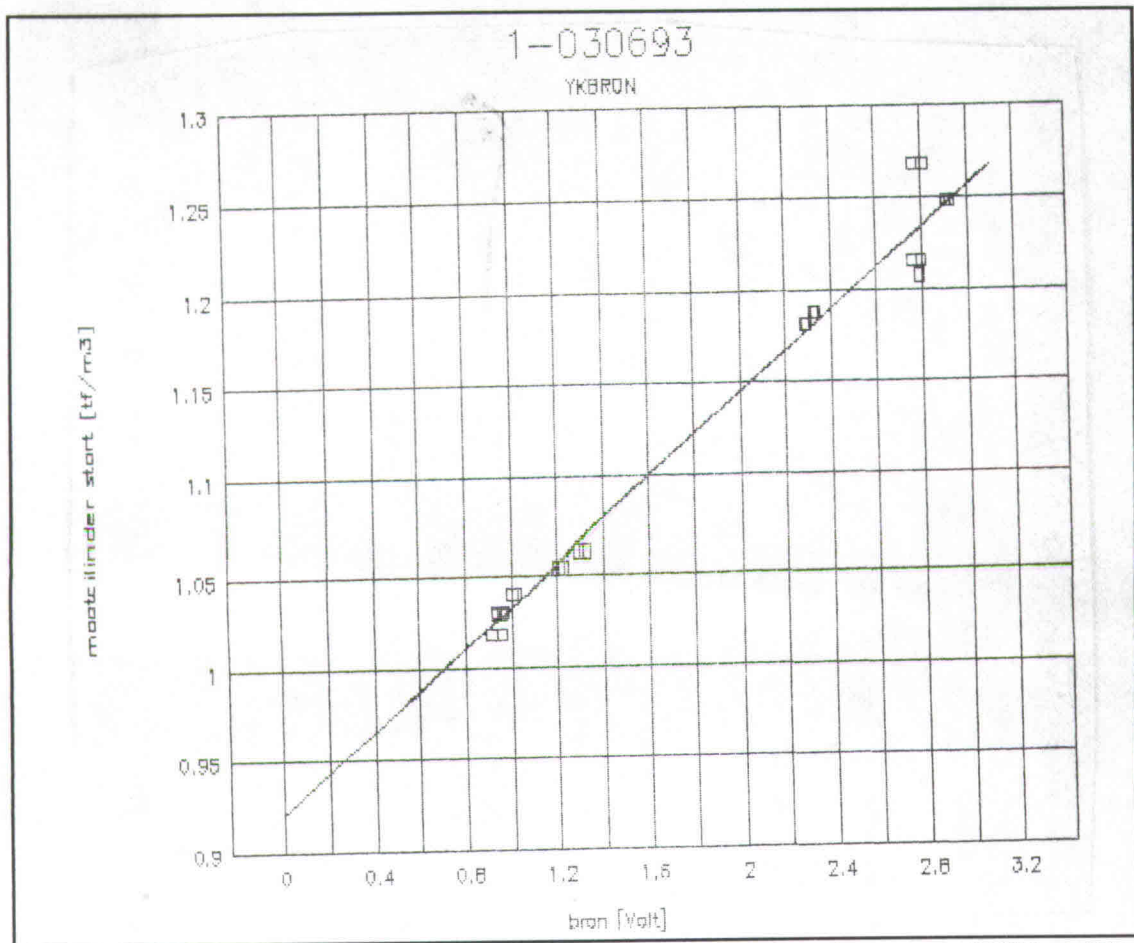
afb. E17: IJking bronmeter HLRef, 1207B



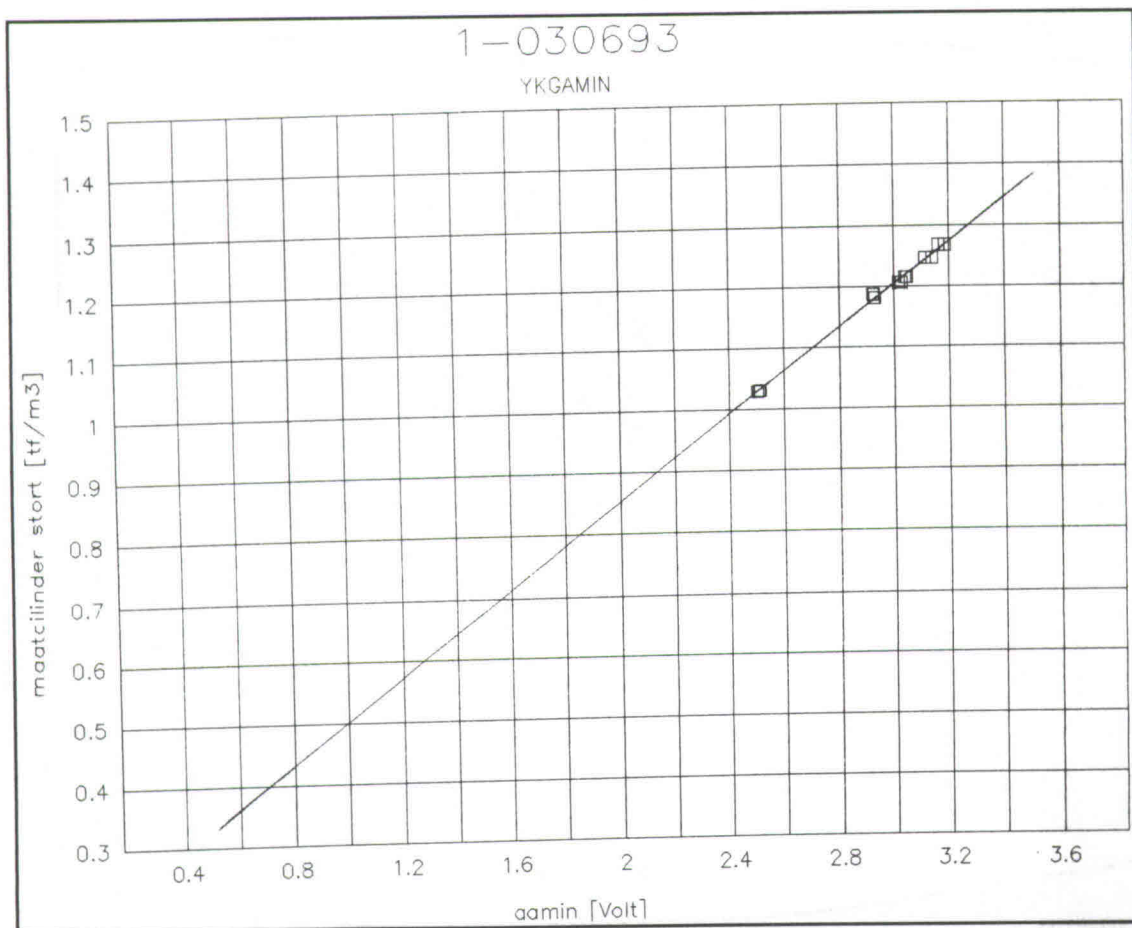
afb. E18: IJking bochtmeter HLRef, 1207B



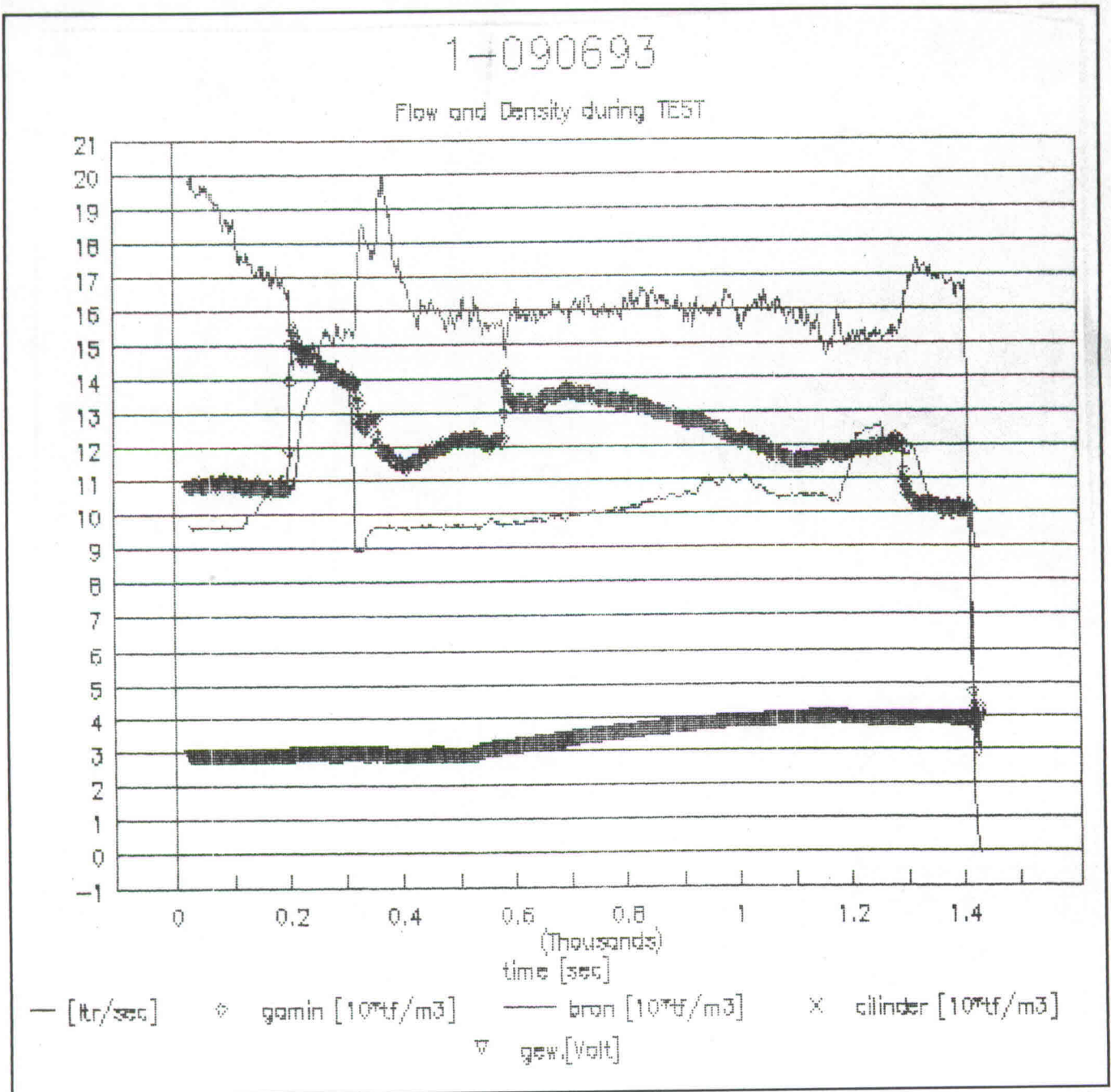
afb. E19: Proefgegevens HLSK, 1-0306



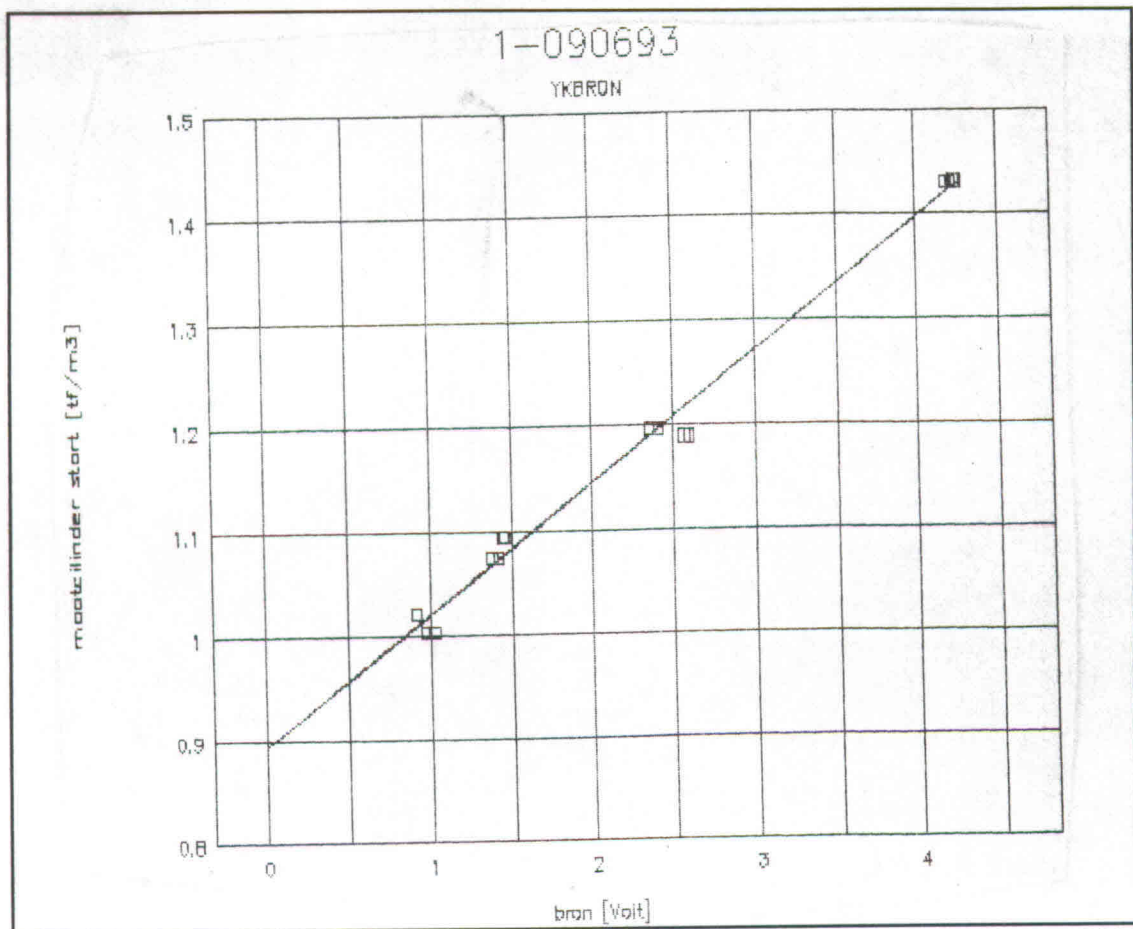
afb. E20: IJking bronmeter HLSK, 1-0306



afb. E21: IJking bochtmeter HLSK, 1-0306



afb. E22: Proefgegevens HLSKI, 1-0906



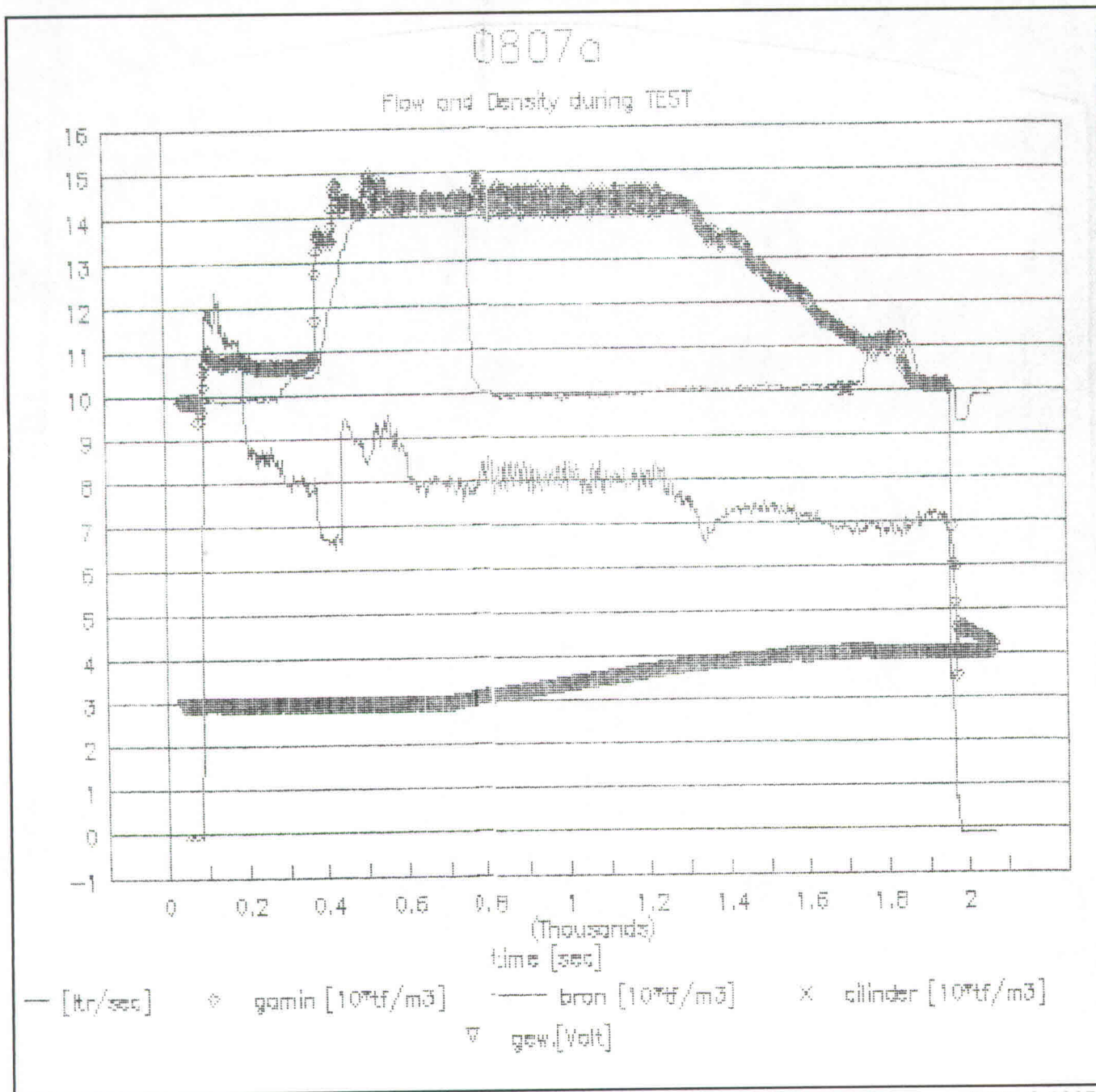
afb. E23: Ljking bronmeter HLSKI, 1-0906



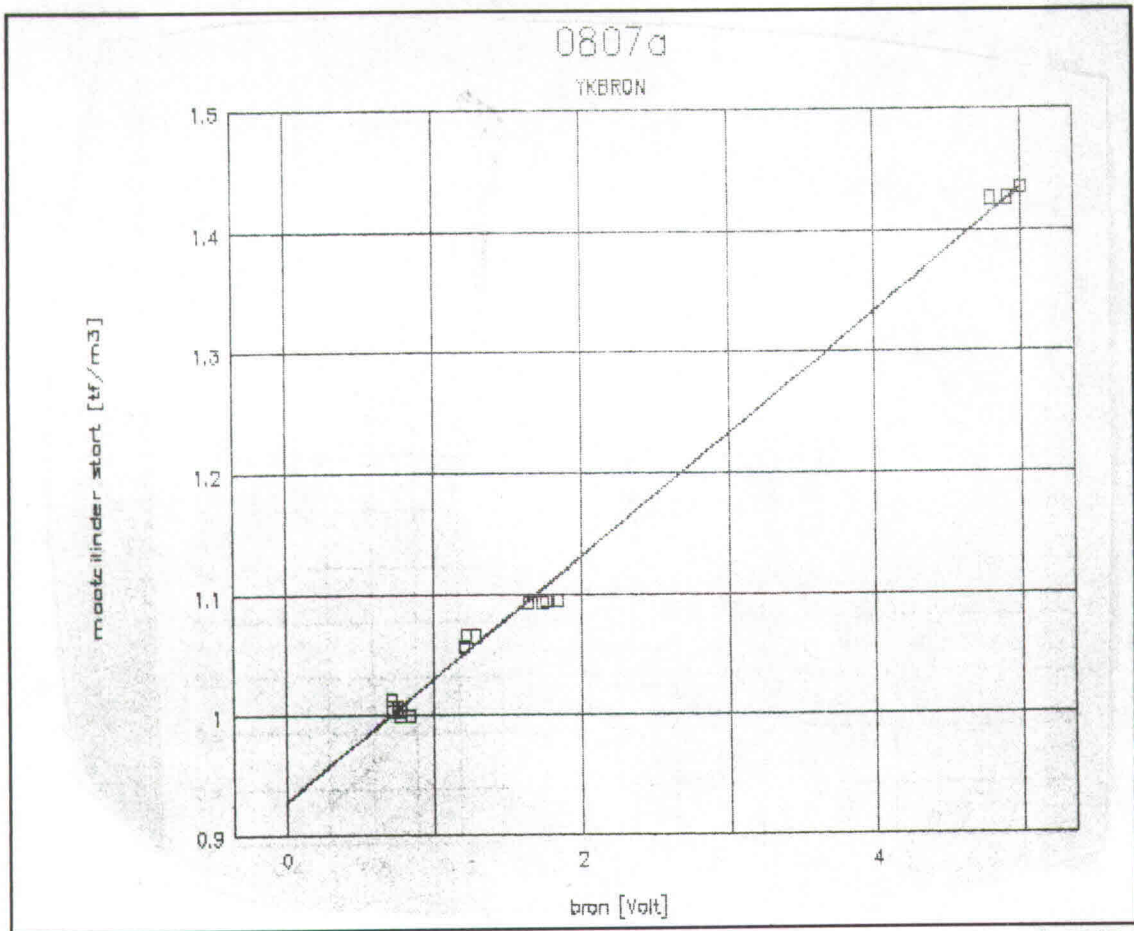
afb. E24: Ljking bochtmeter HLSKI, 1-0906

E3 Laag debiet en hoge dichtheid

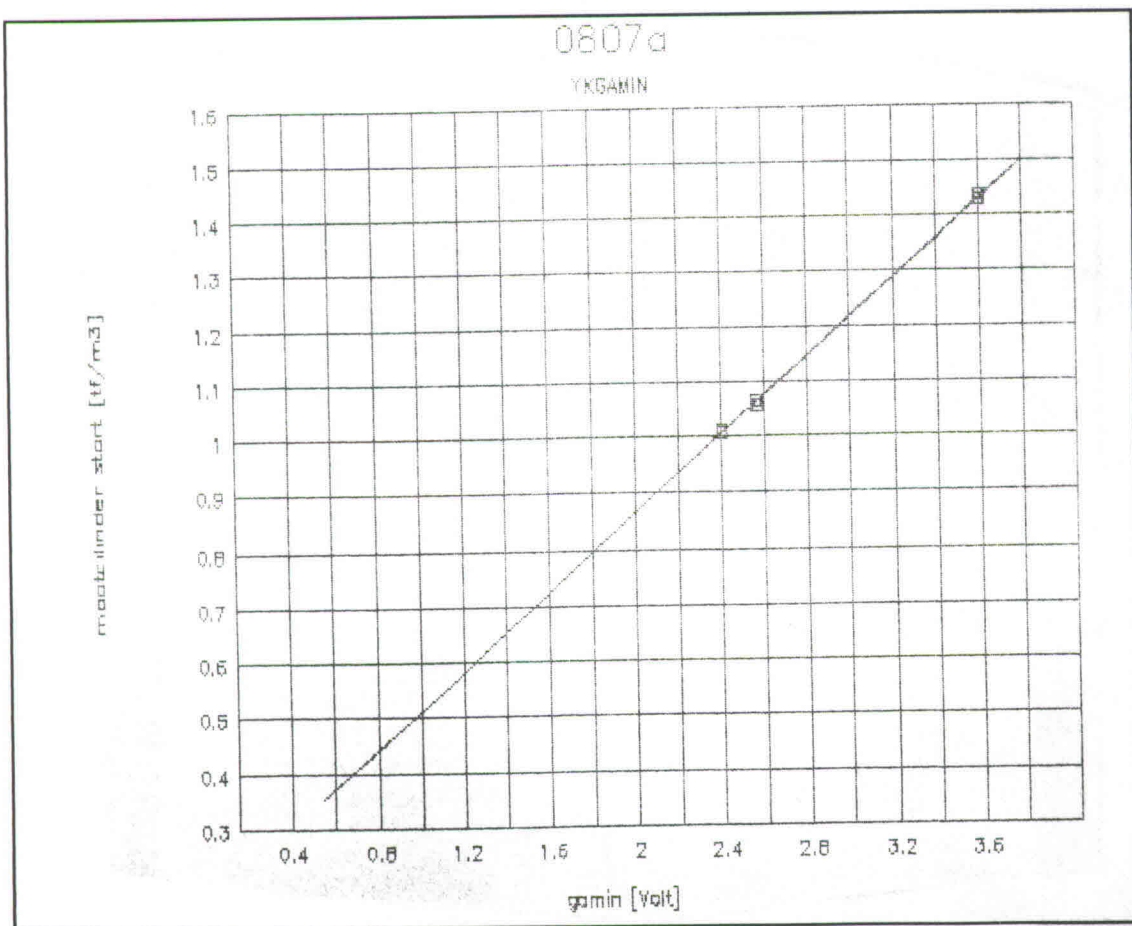
LHRef, 0807A



afb. E25: Proefgegevens LHRef, 0807A



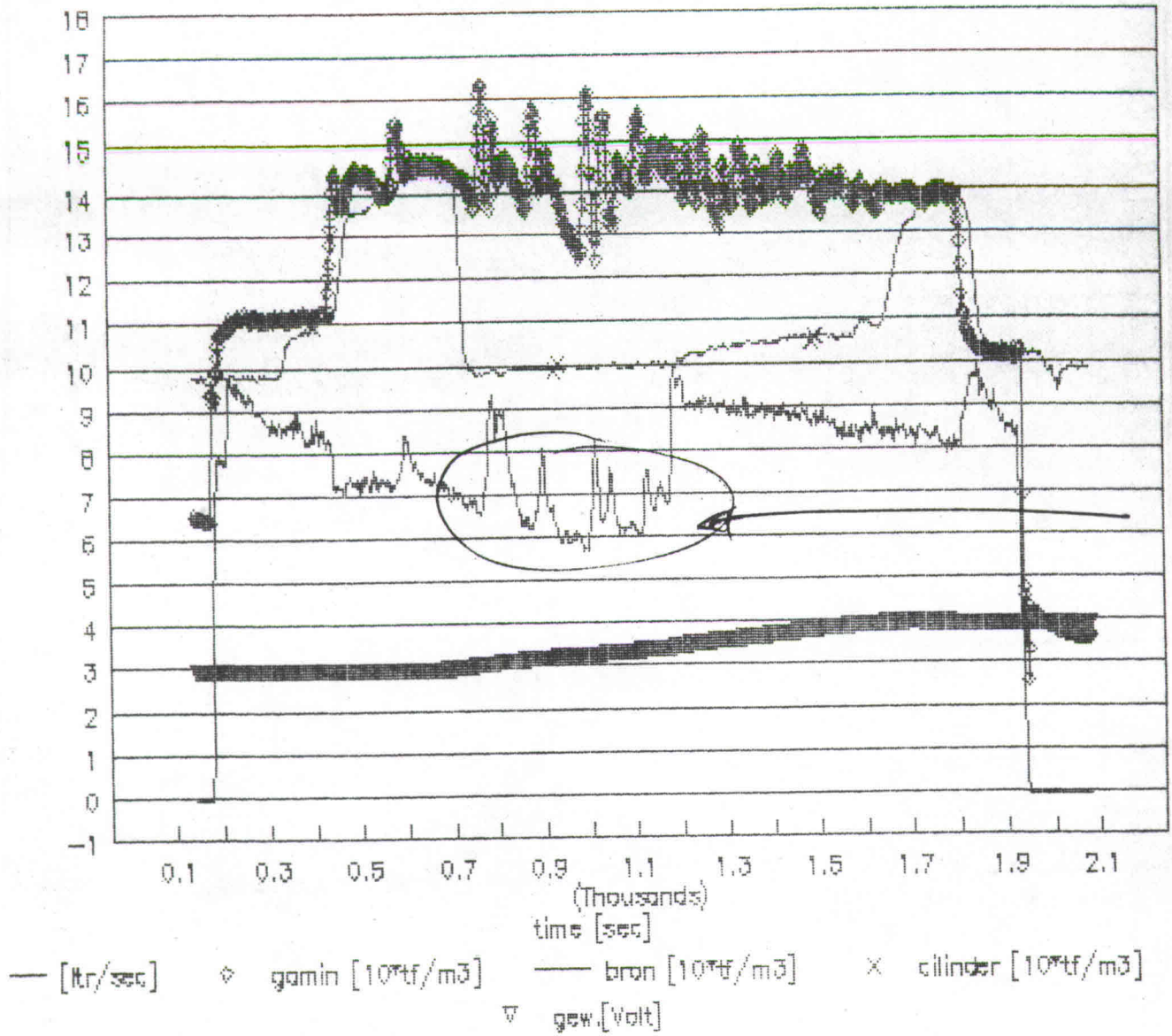
afb. E26: IJking bronmeter LHRef, 0807A



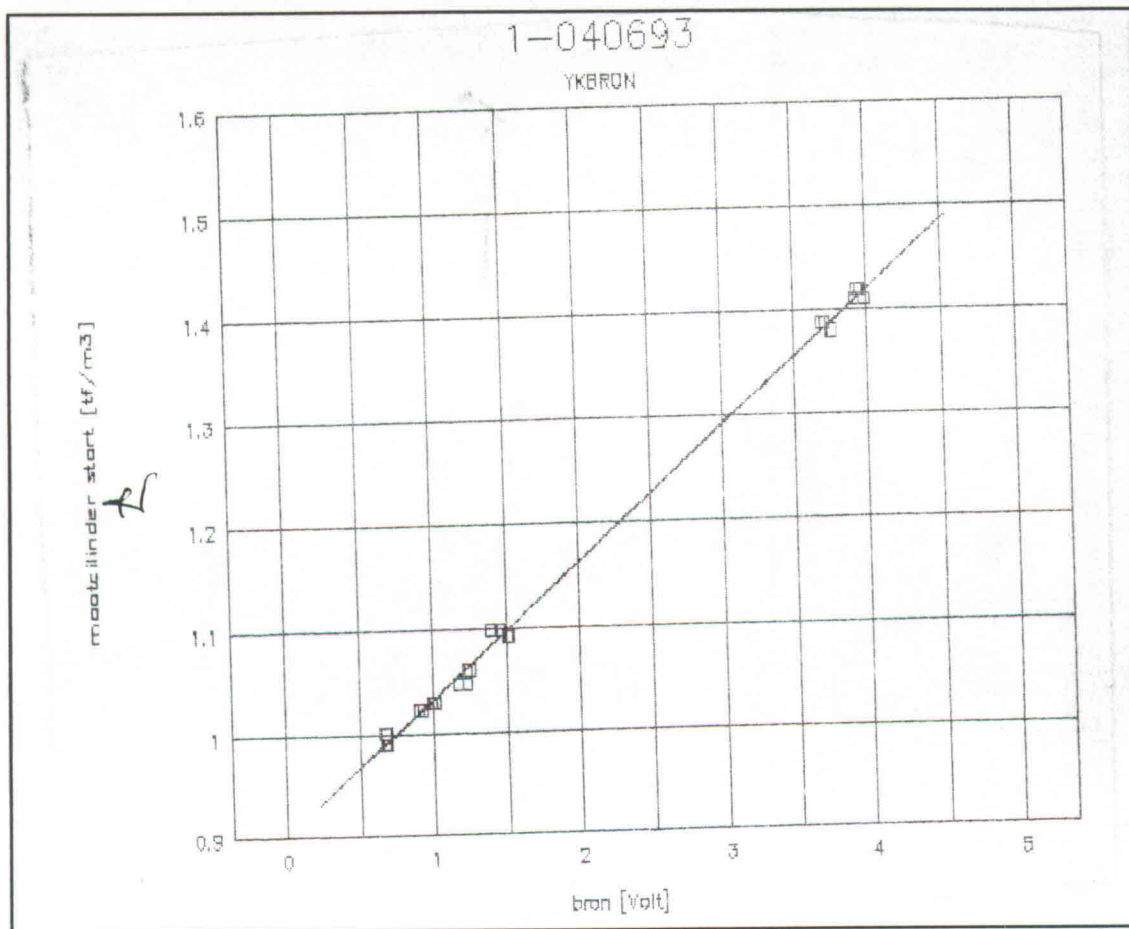
afb. E27: IJking bochtmeter LHRef, 0807A

1-040693

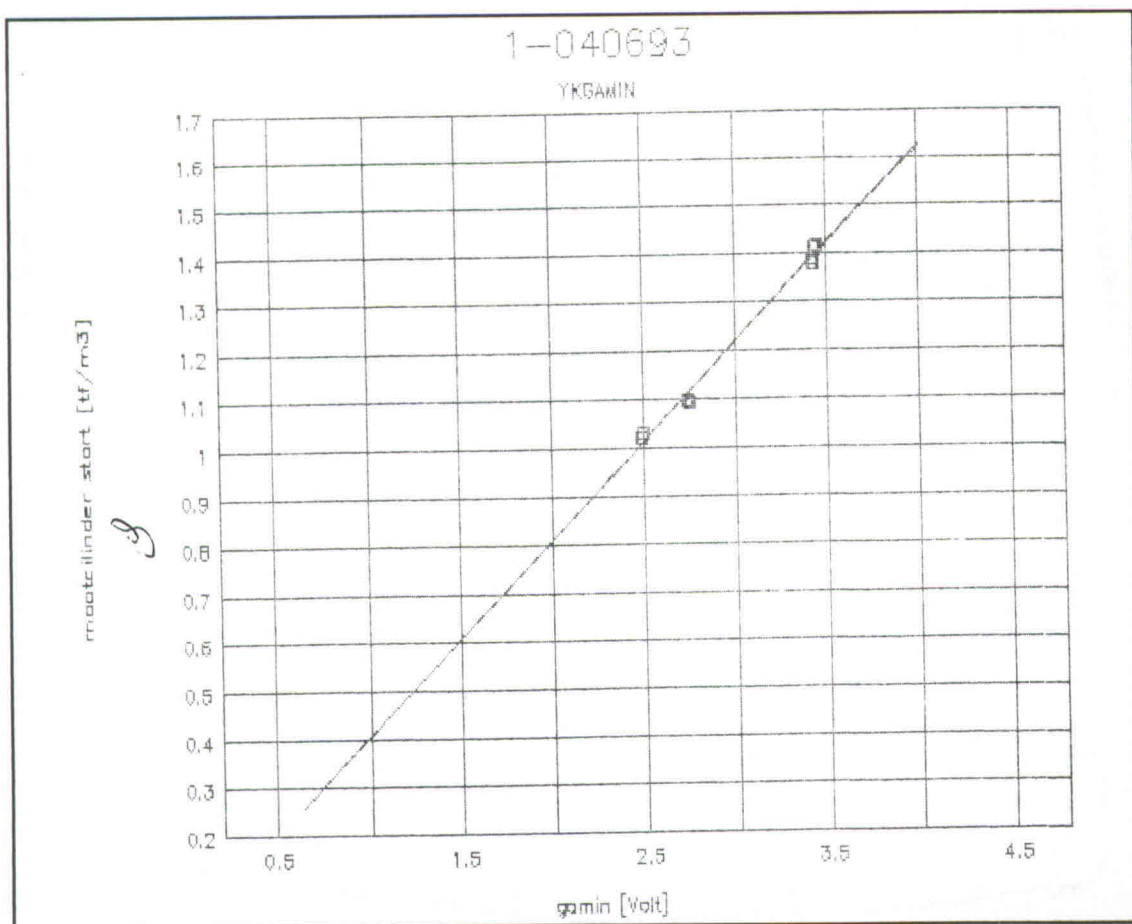
Flow and Density during TEST



afb. E28: Proefgegevens LHSK, 1-0406



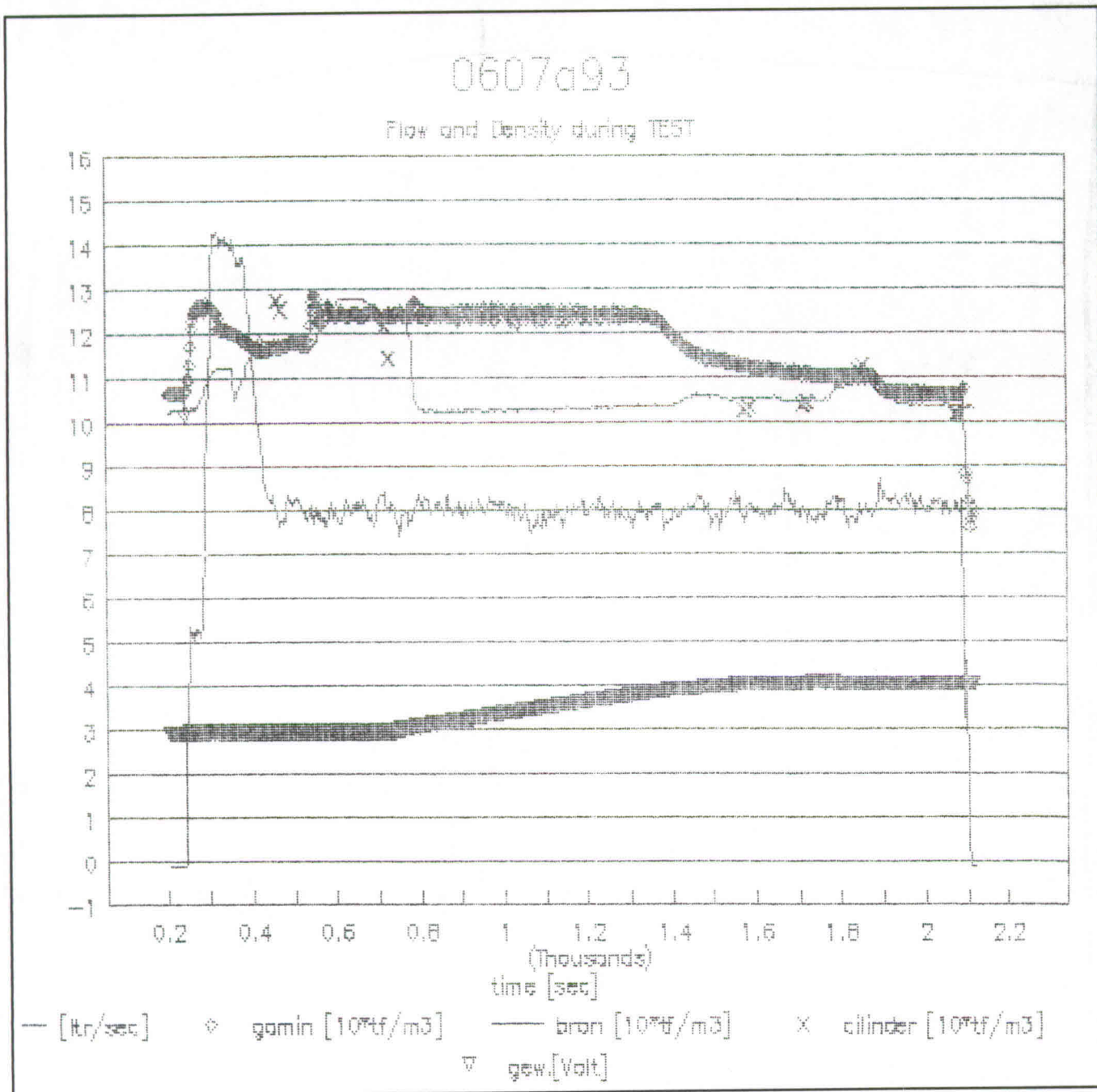
afb. E29: IJking bronmeter LHSK, 1-0406



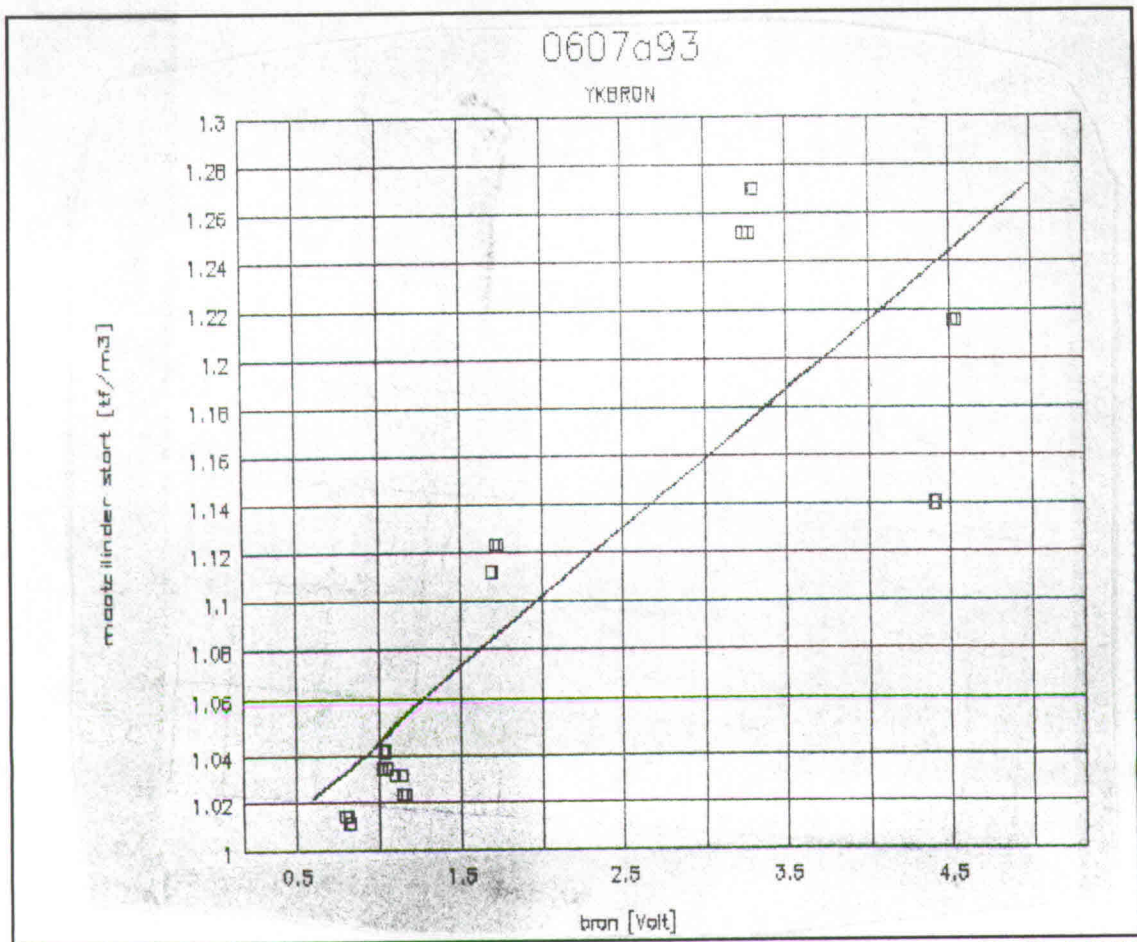
afb. E30: IJking bochtmeter HHSK, 1-0406

E4 Laag debiet en lage dichtheid

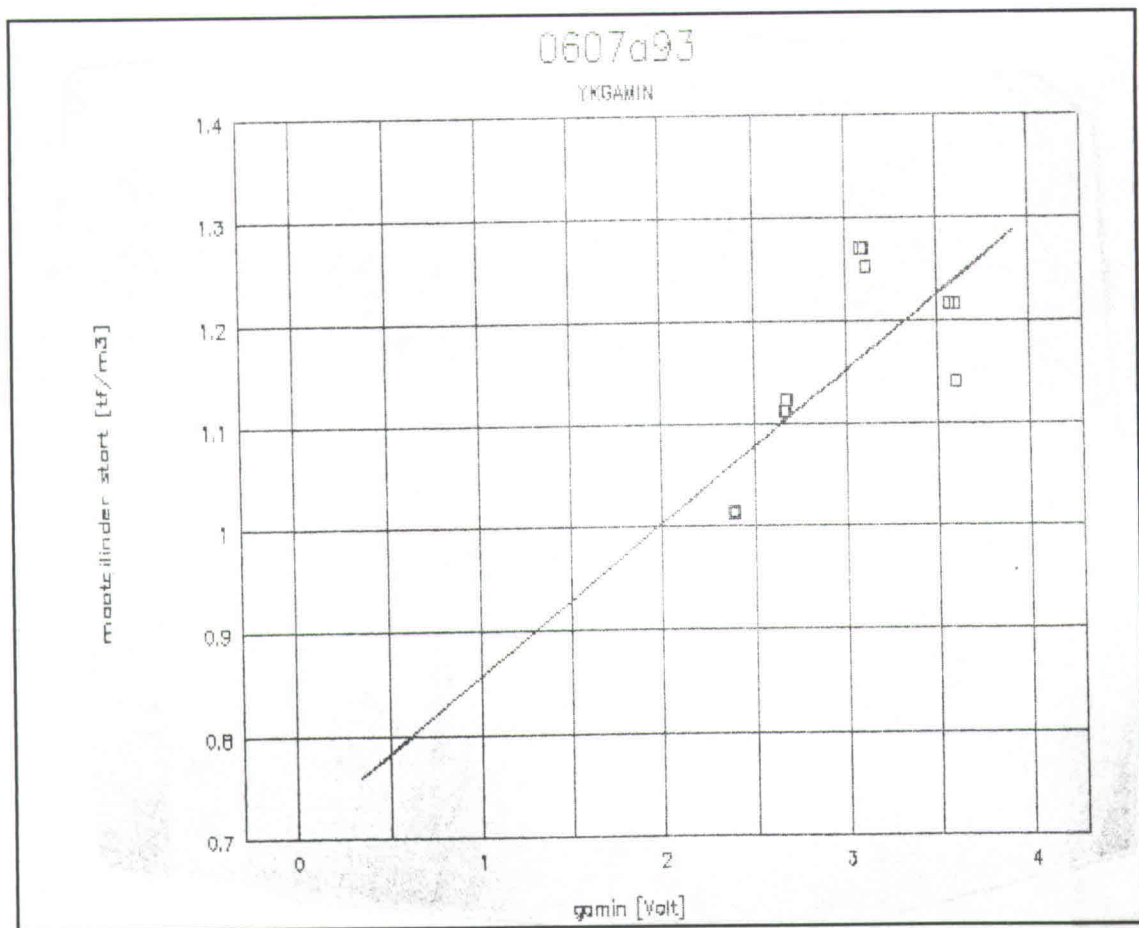
LLRef1, 0607A



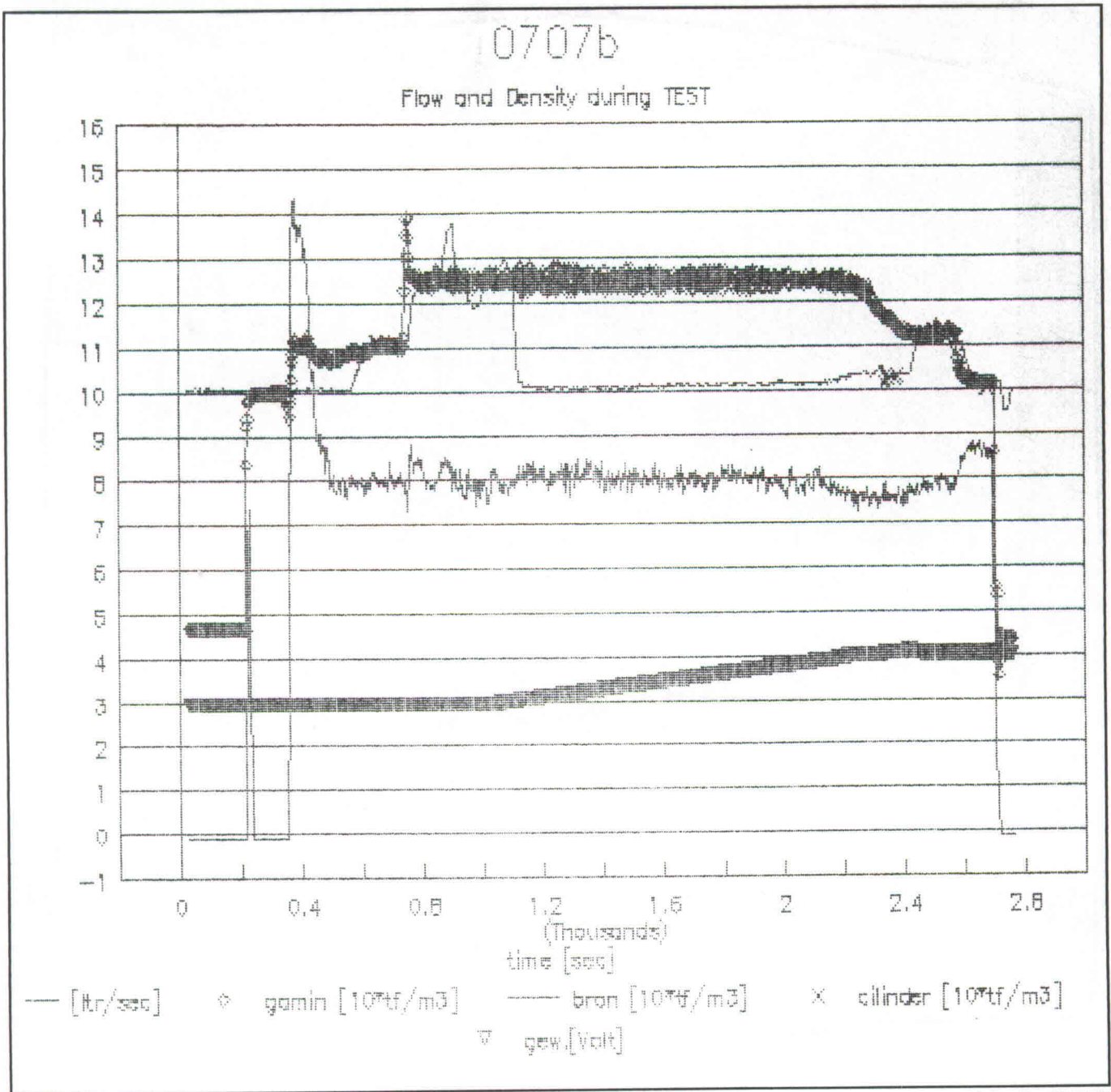
afb. E31: Proefgegevens LLRef1, 0607A



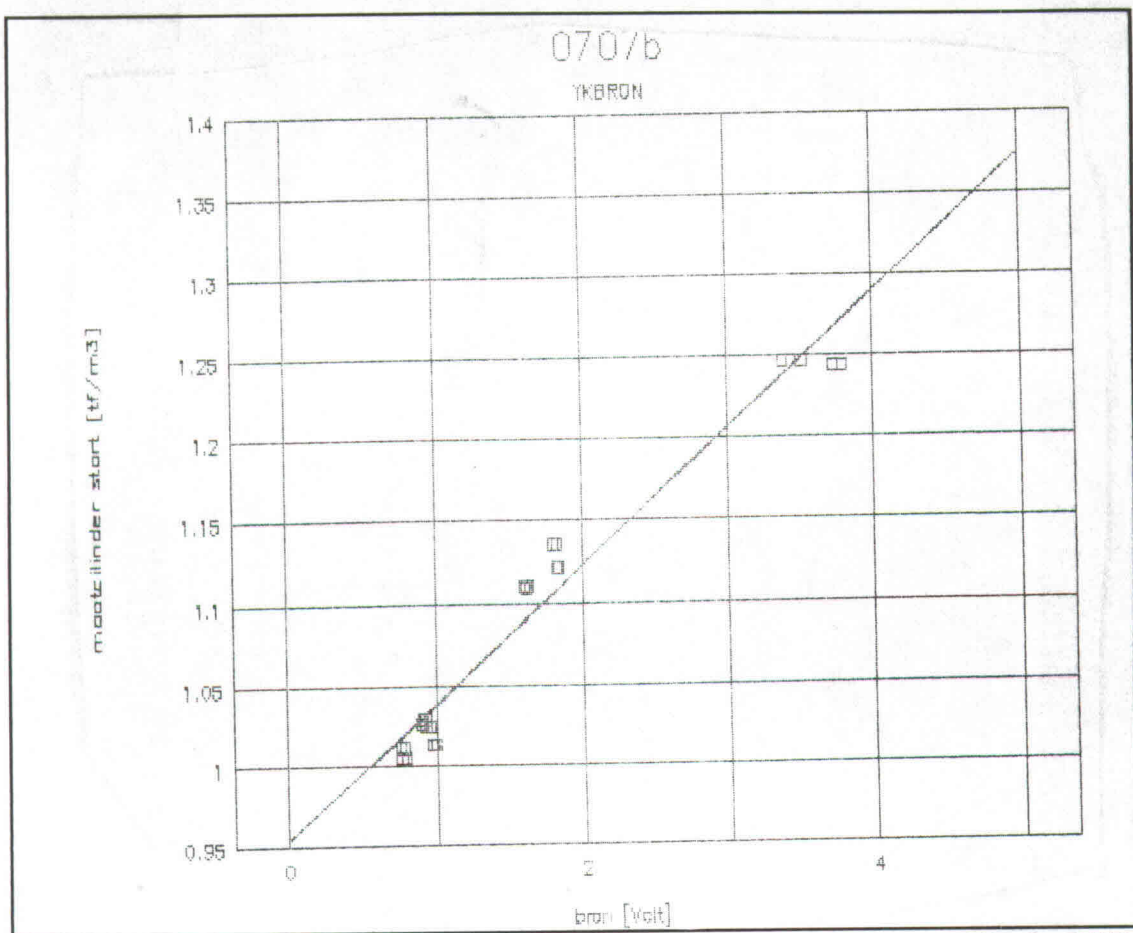
afb. E32: Lijking bronmeter LLRef1, 0607A



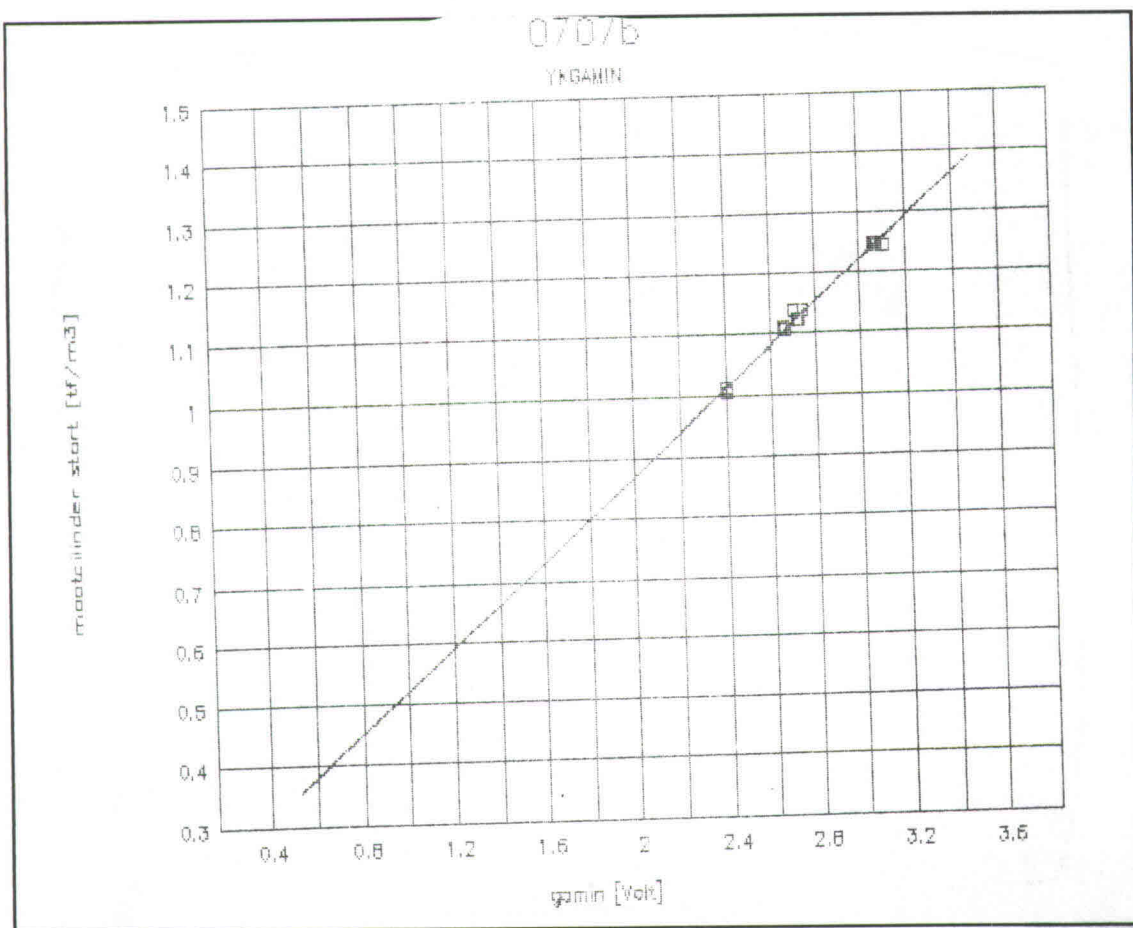
afb. E33: Lijking bochtmeter LLRef1, 0607A



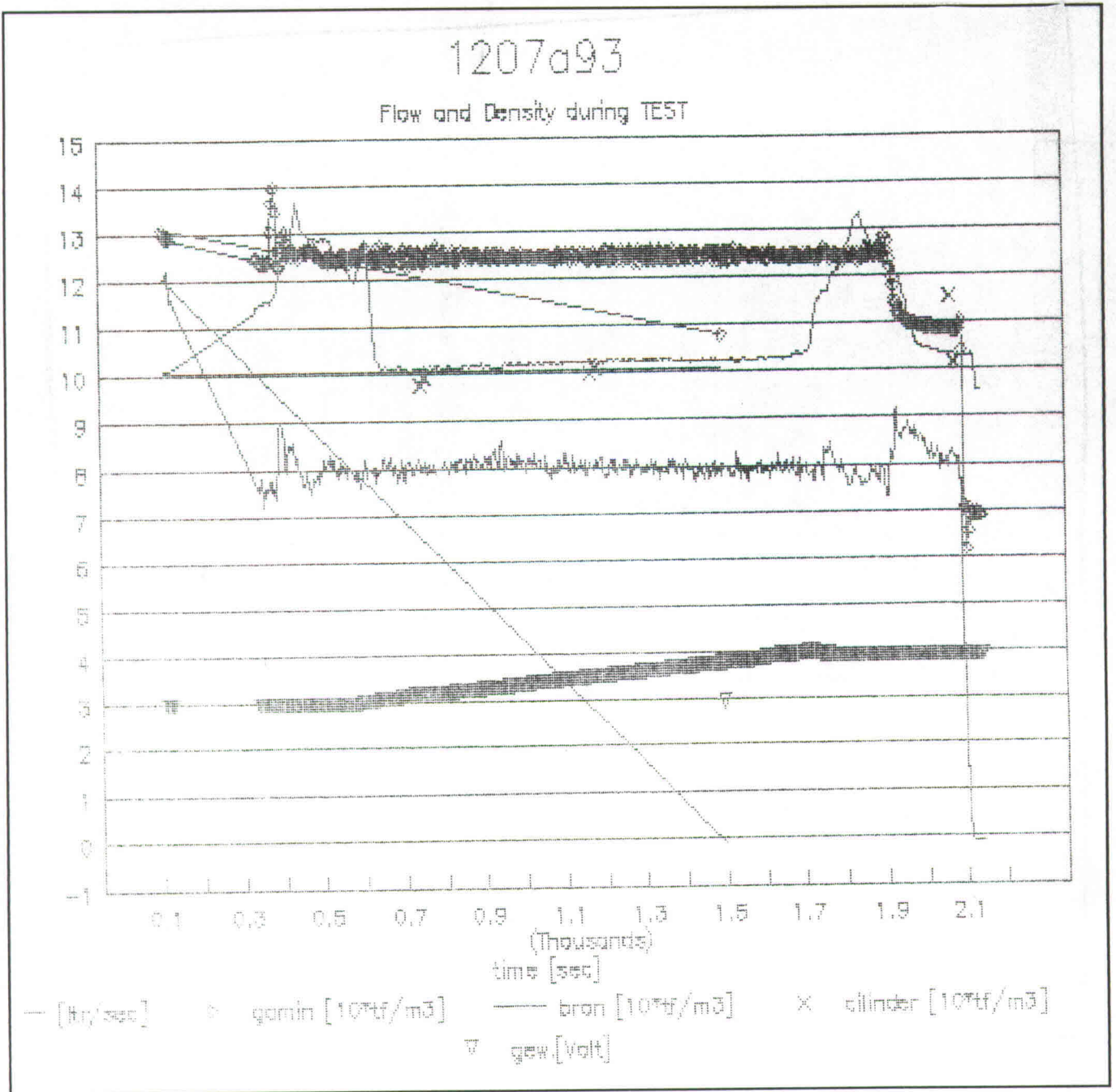
afb. E34: Proefgegevens LLRef2, 0707B



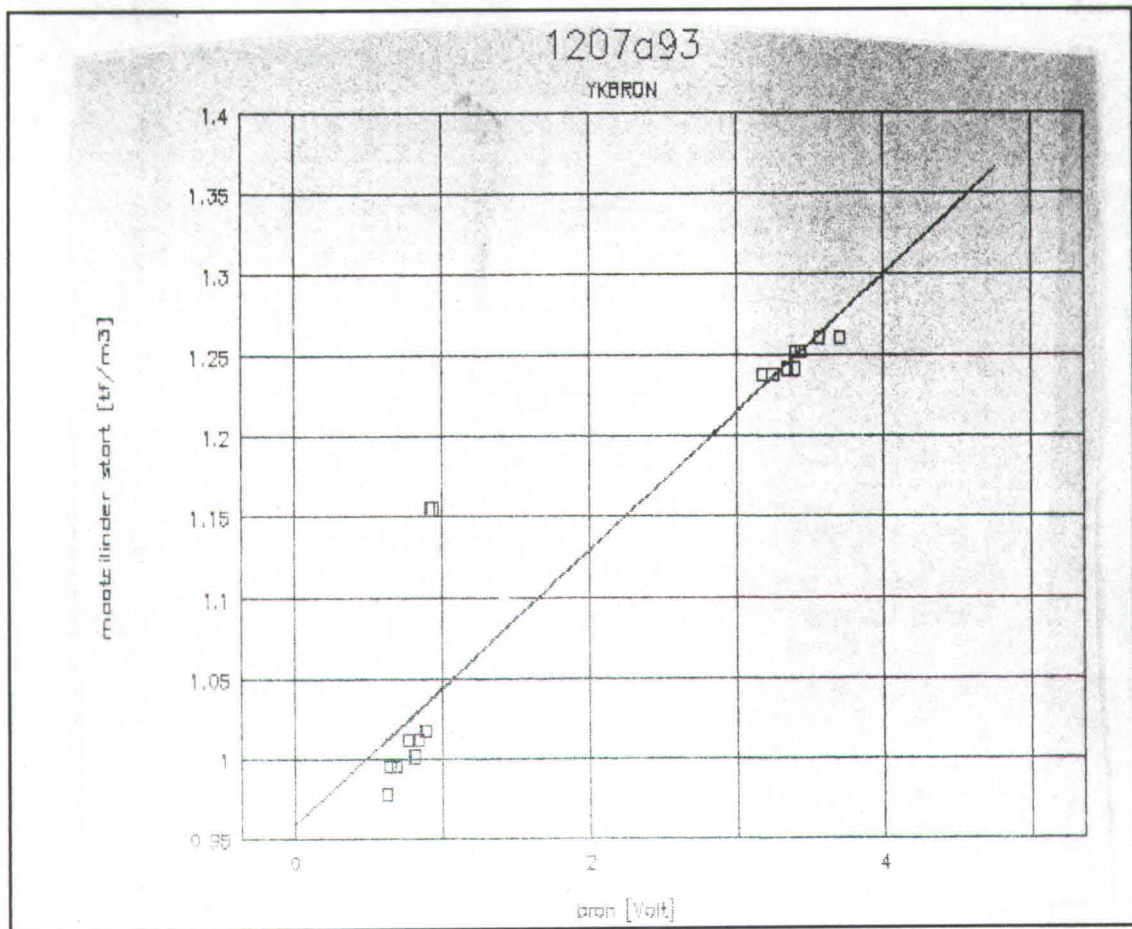
afb. E35: IJking bronmeter LLRef2, 0707B



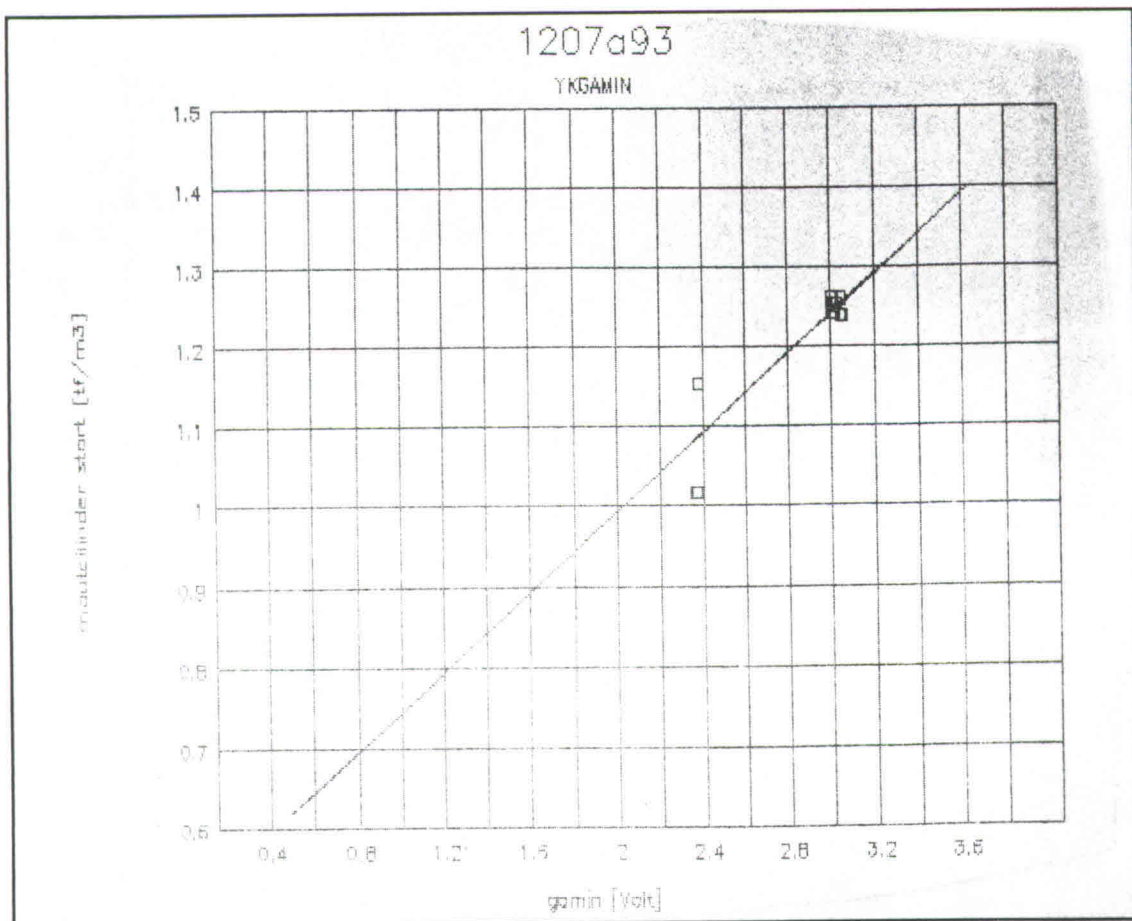
afb. E36: IJking bochtmeter LLRef1, 0707B



afb. E37: Proefgegevens LLRef3, 1207A



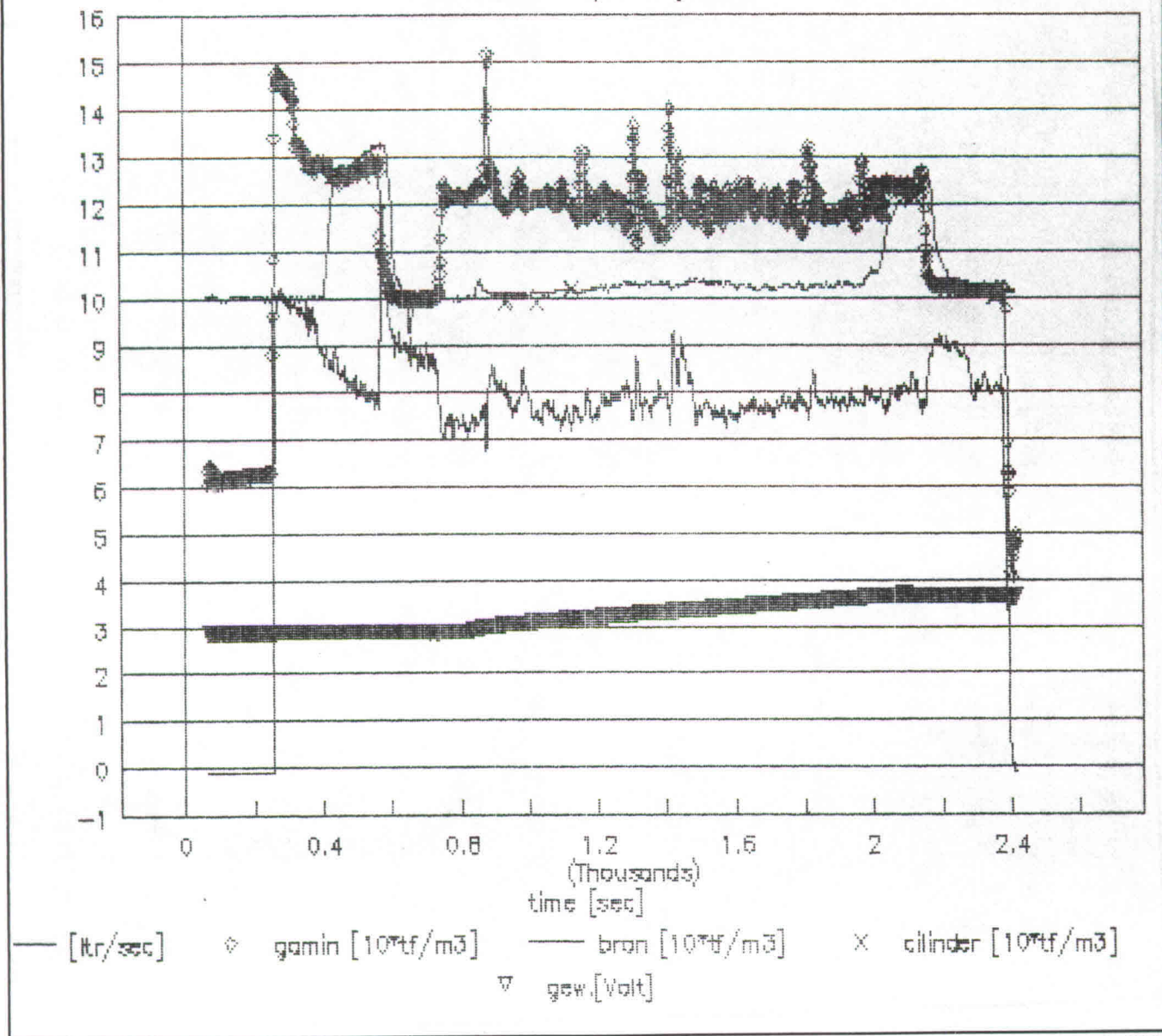
afb. E38: IJking bronmeter LLRef3, 1207A



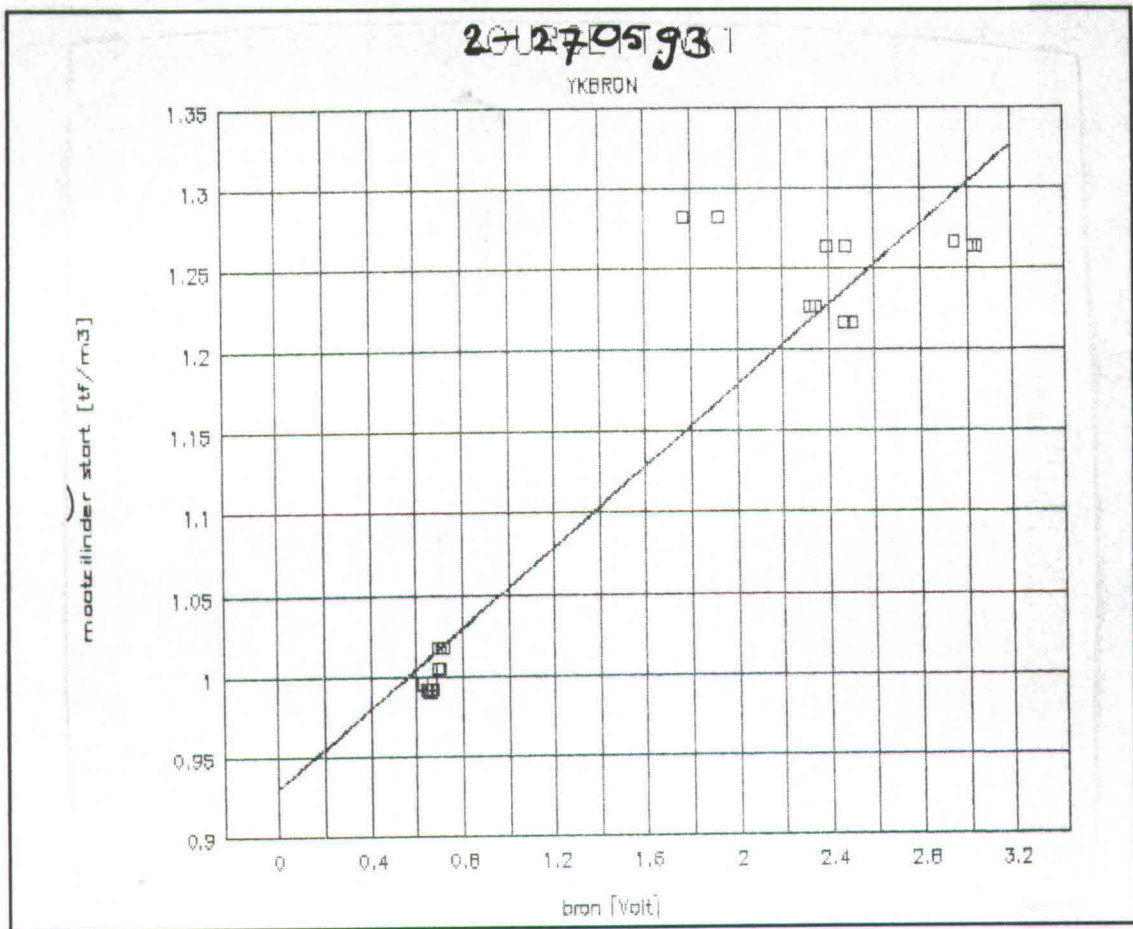
afb. E39: IJking bochtmeter LLRef3, 1207A

2-2705.93

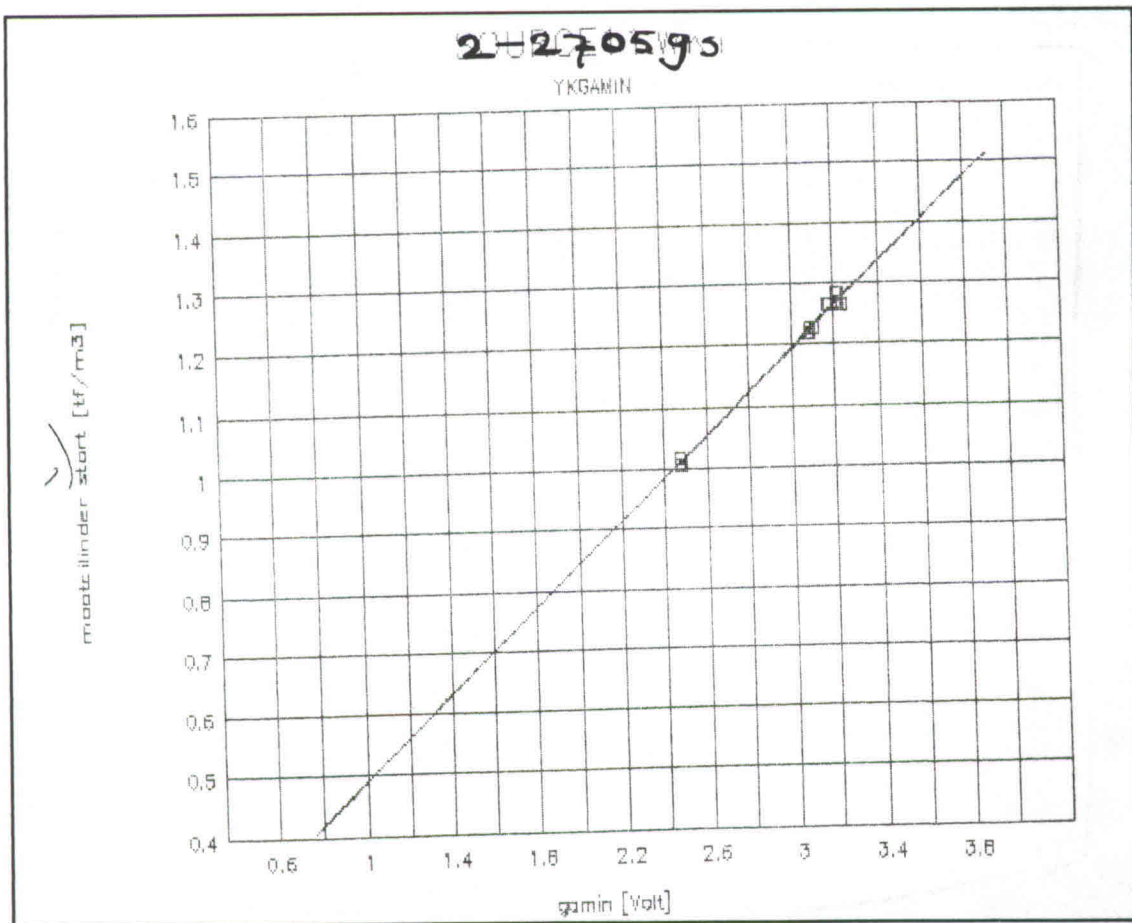
Flow and Density during TEST



afb. E40: Proefgegevens LLSK, 2-2705



afb. E41: Ljking bronmeter LLSK, 2-2705



afb. E42: Ljking bochtmeter LLSK, 2-2705



