



Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat

Dienst Weg- en Waterbouwkunde, TAW-A3

Grasdijken

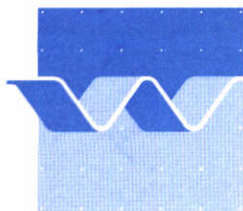
Aanvullende analyse van de waterbeweging op het binnentalud

Mei 1996

Grasdijken

Aanvullende analyse van de waterbeweging op het binnentalud

M. Klein Breteler en G.M. Smith



waterloopkundig laboratorium | WL

1. Rapport nr.	2. Serie nr. TAW-A3	3. Ontvanger catalogusnummer	
4. Titel en sub-titel Grasdijken: Aanvullende analyse van de waterbeweging op het binnentalud		5. Datum rapport Mei 1996	6. Code uitvoerende organisatie H 1565/H 1991
7. Schrijvers M. Klein Breteler en G.M. Smith	8. Nr. rapport uitvoerende organisatie		
9. Naam en adres opdrachtnemer Waterloopkundig Laboratorium Voorsterweg 28, Marknesse Postbus 152, 8300 AD Emmeloord		10. Projectnaam TAWA/GR/ERO	11. Contractnummer 3100/2005
12. Naam en adres opdrachtgever Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde Postbus 5044, 2600 GA Delft		13. Type rapport	14. Code andere opdrachtgever
15. Opmerkingen Projectbegeleider DWW: ir. J.J.W. Seiffert			
16. Samenvatting Het onderhavige verslag betreft een aanvullende analyse van het Deltagootonderzoek met een grasdijk met kruinbreedte van 2 m en binnentalud van 1:2,5. De analyse heeft betrekking op de waterbeweging op het binnentalud tijdens overslaande golven: 1. Is het geïntegreerde product van snelheid en waterlaagdikte per golf gelijk aan het gemeten overslagvolume bij onregelmatige golven ($q_{\text{golf}} = \int_0^T v d dt$)? 2. Is het mogelijk het luchtgehalte van het overslaande water te bepalen uit het verschil in gemeten stijghoogte met een drukopnemer en het gemeten wateroppervlak met een laagdiktemeter? 3. Hoe verhouden zich de snelheden op het binnentalud tijdens onregelmatige golfaanval tot de snelheden die gemeten zijn tijdens het kleinschalig modelonderzoek van de Afsluitdijk (van der Meer 1987)? Hoe ontwikkelt zich de snelheid op het binnentalud? Is er sprake van een uniforme snelheid?			
17. Trefwoorden Grasdijken, golfoverslag, waterlaagdikte, snelheid, luchtgehalte		18. Distributiesysteem	
19. Classificatie	20. Classificatie deze pagina	21. Aantal blz.	22. Prijs

Inhoud

Lijst van tabellen

Lijst van figuren

Lijst van symbolen

	blz.
1 Inleiding	1
2 Samenvatting en conclusies	2
3 Modelopstelling en instrumentatie van kruin en binnentalud	4
4 Analyse	6
4.1 Geïntegreerd product van snelheid en waterlaagdikte per golf	6
4.2 Luchtgehalte	9
4.3 Snelheid op het binnentalud	11
4.3.1 Literatuuroverzicht	11
4.3.2 Analyse van de huidige metingen	13
5 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	15

Referenties

Tabellen

Figuren

Lijst van tabellen

- 1 Locatie van de instrumenten (voor laagdiktemeter is het snijpunt van instrument en talud gegeven)
- 2 Geselecteerde proeven
- 3 Overslagvolume volgens geïntegreerd product van snelheid en laagdikte (V_1) en volgens overslagbak (V_2)
- 4 Overslagvolume volgens geïntegreerd product van snelheid en laagdikte (V_1) en volgens overslagbak (V_2)
- 5 Overslagvolume volgens geïntegreerd product van snelheid en laagdikte (V_1) en volgens overslagbak (V_2)
- 6 Overslagvolume volgens geïntegreerd product van snelheid en laagdikte (V_1) en volgens overslagbak (V_2)
- 7 Luchtgehalte per proef op basis van drukregistratie en laagdiktemeting

Lijst van figuren

- 1 Langsdoorsnede dijkprofiel
- 2 Binnentalud en instrumentatie bij de overslagproeven
- 3 SHM 1; SHM 2 en SHM 3 registraties
- 4 SHM 4 registratie
- 5 LDM 2 en SHM 4
- 6 Overslagvolumes
- 7 LDM 2 en DRO 2
- 8 Laagdikte, drukhoogte- en verschil-registraties: Proef P126, golf 24.2
- 9 Laagdikte, drukhoogte- en verschil-registraties: Proef P126, golf 27.1
- 10 Laagdikte, drukhoogte- en verschil-registraties: Proef P126, golf 28.1
- 11 Laagdikte, drukhoogte- en verschil-registraties: Proef P109, golf 10.2
- 12 Luchtgehaltenes
- 13 Snelheid op kruin en binnentalud
- 14 SHM 4 piek snelheid-overschrijdingskromme (Rayleigh) gerelateerd aan aantal inkomende golven
- 15 Snelheids-overschrijdingskromme SHM 4
- 16 Snelheids-overschrijdingskromme
- 17 Snelheids-overschrijdingskromme gebaseerd op faseverschillen van LDM 1, LDM 2 en LDM 3

Lijst van symbolen

$c_{2\%}$	=	frontsnelheid op de kruin en het binnentalud die door 2% van de inkomende golven wordt overschreden	(m/s)
g	=	versnelling van de zwaartekracht	(m/s ²)
h	=	waterstand t.o.v. gootbodem	(m)
H_s	=	significante hoogte van inkomende golven	(m)
d	=	laagdikte van lucht-water mengsel op een bepaald locatie op de dijk als functie van de tijd	(m)
p	=	gemeten druk ten opzichte van de atmosferische druk	(Pa)
Q_{golf}	=	overslagvolume in één golf per m dijk lengte	(m ²)
n_l	=	luchtgehalte (deel van totale volume van lucht-water-mengsel dat bestaat uit lucht)	(-)
t	=	tijd	(s)
t_{begin}	=	tijdstip waarop de overslag van de betreffende golf bij het instrument aankomt	(s)
t_{cind}	=	tijdstip waarop de overslag van de betreffende golf bij het instrument weer voorbij is	(s)
T	=	golfperiode van afzonderlijke golf	(s)
T_p	=	golfperiode bij piek van spectrum	(s)
v	=	snelheid op een bepaald locatie op de dijk als functie van de tijd	(m/s)
V_1	=	volume per golf per m dijk lengte in l/s, berekend met het geïntegreerde product van snelheid en laagdikte	
V_2	=	volume per golf per m dijk lengte in l/s, bepaald uit de registratie in de overslagbak	
z	=	niveau op de kruin of het binnentalud ten opzichte van de stilwaterlijn van het buitenwater	(m)
$z_{2\%}$	=	golfoplooppniveau dat door 2% van de golven wordt overschreden op een oneindig lang talud met helling gelijk aan het buitentalud	(m)
α	=	taludhelling	(°)
ρ	=	volumieke massa van water (ca. 1000 kg/m ³)	
ϕ	=	drukhoogte	(m)
ξ_{op}	=	brekerparameter = $\tan\alpha / \sqrt{(H_g / (1,56T_p^2))}$	(-)

1 Inleiding

In 1992 werd in de Deltagoot van het Waterloopkundig Laboratorium (WL) een grootschalig modelonderzoek uitgevoerd op een grasdijk. Met behulp van grote grasblokken uit Friesland werd een dijk van gras gemodelleerd met een buitentalud met helling van 1:4, een kruin van 2 m breedte en een binnentalud van 1:2,5. Over dit onderzoek werd tot nu toe gerapporteerd in twee verslagen:

- Smith '93 : Modelopstelling, proevenprogramma en meetresultaten.
- Meijer '94 : Analyse van golfklappen, golfploop, watersnelheden, laagdiktes en ruwheid van het talud.

Na afloop van deze analyse bleken er nog aanvullende vragen te zijn die mogelijk via de proefresultaten beantwoord zouden kunnen worden. Deze vragen hebben betrekking op de waterbeweging op het binnentalud tijdens overslaande golven:

- 1 Is het geïntegreerde product van snelheid en waterlaagdikte per golf gelijk aan het gemeten overslagvolume bij onregelmatige golven ($q_{\text{golf}} = \int_0^T v d t$)?
- 2 Is het mogelijk het luchtgehalte van het overslaande water te bepalen uit het verschil in gemeten stijghoogte met een drukopnemer en het gemeten wateroppervlak met een laagdiktemeter?
- 3 Hoe verhouden zich de snelheden op het binnentalud tijdens onregelmatige golfaanval tot de snelheden die gemeten zijn tijdens het kleinschalig modelonderzoek van de Afsluitdijk (van der Meer, 1987)?
Hoe ontwikkelt zich de snelheid op het binnentalud?
Is er sprake van een uniforme snelheid?

Het beantwoorden van deze vragen past in het kader van de ontwikkeling van kennis over de belasting van gronddeeltjes in een grastalud tijdens golfploop- en overslag. Het is uiteindelijk de bedoeling van de TAW om een rekenmodel te verkrijgen waarmee voor een willekeurige dijkgeometrie met willekeurige ruwheid de belasting op het grastalud door onregelmatige golfbelasting kan worden berekend. De belasting bestaat uit een schuifspanning of drukkracht als gevolg van het langstromende water-luchtmengsel, waarbij de taludhelling, de ruwheid, de waterlaagdikte, het luchtgehalte en stroomsnelheden belangrijke factoren zijn.

In de onderhavige aanvullende analyse worden een aantal vragen beantwoord die gezien kunnen worden als bouwstenen waarmee later het rekenmodel kan worden opgebouwd. Het is echter waarschijnlijk dat nog meer bouwstenen nodig zijn. Dit laatste komt naar voren in de aanbeveling voor vervolgonderzoek.

Het onderzoek werd uitgevoerd door G.M. Smith MSc en ir M. Klein Breteler van het WL, die samen dit verslag hebben samengesteld.

2 Samenvatting en conclusies

Na afloop van de analyse van het grootschalige modelonderzoek in de Deltagoot van WL (Meijer, 1994) bleken er nog een aantal vragen te zijn die thans met een aanvullende analyse zijn beantwoord. De vragen hebben betrekking op de waterbeweging op het binnentalud van de grasdijk. Deze dijk had een kruinbreedte van 2 m en een binnentalud met gras, van 1:2,5.

- 1 *Is het geïntegreerde product van snelheid en waterlaagdikte per golf gelijk aan het gemeten overslagvolume bij onregelmatige golven ($q_{\text{golf}} = \int_0^T v d dt$)?*

Uit de analyse van meer dan 40 afzonderlijke golven blijkt dit inderdaad het geval te zijn, mits er rekening gehouden wordt met het luchtgehalte in het water tijdens het afstromen over het binnentalud:

$$q_{\text{golf}} = \int_0^T v \cdot d (1 - n_l) dt \quad (1)$$

waarin:

n_l	=	luchtgehalte (deel van totale volume van lucht-water-mengsel dat bestaat uit lucht)	(-)
q_{golf}	=	overslagvolume in één golf per m dijk lengte	(m ²)
d	=	laagdikte van lucht-water mengsel op een bepaald locatie op de dijk als functie van de tijd	(m)
v	=	snelheid op een bepaald locatie op de dijk als functie van de tijd	(m/s)
t	=	tijd	(s)
T	=	golfperiode van afzonderlijke golf	(s)

Het luchtgehalte n_l varieert doorgaans tussen 0,3 en 0,5 met uitschieters naar 0,03 en 0,8 (zie Paragraaf 4.2). In vergelijking met literatuur over overstromende dammen blijken dit vrij normale waarden te zijn.

- 2 *Is het mogelijk om het luchtgehalte van het overslaande water te bepalen uit het verschil in gemeten stijghoogte met een drukopnemer en het gemeten wateroppervlak met een laagdiktemeter?*

Dit blijkt inderdaad mogelijk te zijn. Om tot één waarde van het luchtgehalte te komen van de metingen gedurende een golf, moet gewerkt worden met gemiddelde waarden van de laagdikten en stijghoogten. Deze twee variëren vrij sterk in die periode. Vooral de drukmetingen toonden grote fluctuaties ten gevolge van lucht en hoge turbulentie van het water-luchtmengsel. Deze fluctuaties leidden tot minder betrouwbare resultaten van het luchtgehalte, verkregen uit de druk- en laagdiktemetingen. De resultaten op basis van het geïntegreerde product van snelheid en laagdiktemeter geven echter een lager luchtpercentage.

Het gemiddelde luchtpercentage op basis van het geïntegreerde product van alle geanalyseerde golven is 0,44. Deze waarde komt erg mooi in de buurt van de

waarden die bij overstromende dammen zijn gemeten: namelijk gemiddeld 0,36 (Hager, 1990).

- 3 *Hoe verhouden zich de snelheden op het binnentalud tijdens onregelmatige golfaanval tot de snelheden die gemeten zijn tijdens het kleinschalig modelonderzoek van de Afsluitdijk (Van der Meer, 1987)? Is er sprake van een uniforme snelheid?*

De snelheid werd bepaald met behulp van de propellertype-snelheidsmeter SHM 4 en op basis van de tijdsduur dat het front nodig had om de afstand tussen twee laagdiktemeters af te leggen. De electromagnetische snelheidsmeters waren helaas niet bruikbaar (zie ook Meijer, 1994).

Deze metingen zijn in Figuur 13 ingetekend. Het blijkt dat de metingen van de passeertijd tussen de bovenste twee laagdiktemeters (LDM 1 en LDM 2) redelijk goed aansluiten op de metingen van Van der Meer (1987). Echter, de metingen van de snelheid met de passeertijd tussen de onderste twee laagdiktemeters (LDM 2 en LDM 3) zijn duidelijk lager dan de metingen van Van der Meer. Dit kan een gevolg zijn van de ruwheid van het talud en het feit dat de semi-empirische formule voor het snelheidsverloop op het binnentalud (formule 10) uitgaat van de theorie van een wrijvingsloze afstroming. Deze theorie heeft uiteraard z'n beperkingen.

Verder is er te zien dat de metingen van SHM 4 (propellor) wat hogere resultaten geven dan met de laagdiktemeters. Dit is een gevolg van het feit dat van SHM 4 de hoogste snelheidspiek per golf is geanalyseerd, terwijl met de laagdiktemeters een gemiddelde snelheid van het front verkregen wordt.

Uit het geringe verschil tussen de snelheid hoger op het talud en lager op het talud, beide bepaald met de laagdiktemeters, kan geconcludeerd worden dat er uniforme stroming is.

3 Modelopstelling en instrumentatie van kruin en binnentalud

Een uitvoerige en gedetailleerde beschrijving van de modelopstelling en instrumentatie is gegeven door Smith (1993). In dit hoofdstuk worden een aantal relevante zaken herhaald.

De dijk bestond uit een buitentalud met helling van 1:4, een kruinbreedte van 2 m en een binnentalud van 1:2,5 (zie Figuur 1). De gehele dijk bestond uit gras dat kort voor het onderzoek was gestoken uit een dijk in Friesland.

De kruinhoogte was 7 m ten opzichte van de buitenteen van de dijk en ten opzichte van de gootbodem. De waterstand bij de thans nader geanalyseerde proeven varieerde tussen 5,20 en 6,00 m ten opzichte van de gootbodem.

De opstelling van het binnentalud is getekend in Figuur 2. We zien in die tekening de volgende instrumenten op het gras (voor exacte locatie, zie Tabel 1):

- 1 Op de kruin op ca. 7,0 m boven de gootbodem:
 - laagdiktemeter LDM 1
 - snelheidsmeter SHM 1 (elektromagnetisch type)
- 2 Op het binnentalud op ca. 5,6 m boven de gootbodem:
 - laagdiktemeter LDM 2
 - snelheidsmeter SHM 2 (elektromagnetisch type)
 - drukopnemer DRO 1 (en DRO 2)
 - snelheidsmeter SHM 4 (propeller type) (niet bij alle proeven)
- 3 Op het binnentalud op ca. 4,5 m boven de gootbodem:
 - laagdiktemeter LDM 3
 - snelheidsmeter SHM 3 (elektromagnetisch type)
- 4 Overslagbak voor opvang van overslaand water, met waterstandsmeter, pomp en pompduurregistratie.

De analyse richt zich op de signalen van deze instrumenten en op de gemeten hoeveelheid overslag per golf in de overslagbak.

Het hart van snelheidsmeter SHM 4 bevond zich op circa 5 cm boven het taludoppervlak. De diameter van de propeller (eigenlijk een schroef) was circa 6 cm. Daardoor meet dit instrument geen snelheid als de laagdikte erg klein is. Het instrument heeft de neiging om een paar seconden uit te draaien als het boven water komt.

De elektromagnetische snelheidsmeters (SHM 1, 2 en 3) bevonden zich op circa 2 cm boven het taludoppervlak. Het instrument heeft de neiging dol te draaien als veel lucht in het water zit (zie ook de toelichting in Sectie 4.1).

De laagdiktemeters registreren ongeveer het oppervlak van het water-luchtmengsel. Enerzijds is er een kleine beïnvloeding door de aanwezigheid van lucht (geeft orde 1 cm lagere waarde) en anderzijds is er een kleine beïnvloeding door de opstuwning van water tegen het instrument (geeft orde 1 cm hogere waarde). Beide invloeden heffen elkaar ongeveer op.

Als er veel overslaand stuifwater is, dan geeft het instrument onbetrouwbare signalen.

De drukopnemers registreren de druk die als volgt kan worden omgerekend naar een water-niveau:

$$d = \frac{p}{(1 - n_l) \rho g} \quad (2)$$

waarin:

- p = gemeten druk ten opzichte van de atmosferische druk (Pa)
- ρ = volumieke massa van water (circa 1000 kg/m³)
- g = versnelling van de zwaartekracht (m/s²)
- n_l = luchtgehalte (deel van totale volume van lucht-water-mengsel dat bestaat uit lucht) (-)
- d = laagdikte van lucht-water mengsel (m)

De drukopnemers worden echter sterk beïnvloed door de turbulentie en de snelheidshoogte bij scheve aanstroming.

4 Analyse

4.1 Geïntegreerd product van snelheid en waterlaagdikte per golf

In theorie zou het mogelijk moeten zijn het overslagvolume per golf te berekenen door het product van snelheid en laagdikte te integreren over de gehele golfperiode:

$$q_{\text{golf}} = \int_0^T v \cdot d \, dt \quad (3)$$

met:

q_{golf}	= overslagvolume in één golf per m dijklenkte	(m ²)
v	= snelheid op een bepaald locatie op de dijk als functie van de tijd	(m/s)
d	= waterlaagdikte op een bepaald locatie op de dijk als functie van de tijd	(m)
t	= tijd	(s)
T	= golfperiode van afzonderlijke golf	(s)

Als deze formule met de metingen geverifieerd kan worden, dan levert het een belangrijke aanvulling van de kennis van de waterbeweging. Er zijn namelijk formules voor de overslag per golf (Van der Meer, 1993), voor de maximum snelheid op kruin en binnentalud en de maximum laagdikte op de kruin (Klein Breteler, 1995). Samen met deze formule kan een indruk verkregen worden van het verloop van de snelheid en de laagdikte in de tijd op het binnentalud.

Er zijn een aantal kanttekeningen te plaatsen bij deze formule:

- 1 De snelheid en waterlaagdikte zijn ter plaatse van één dwarsdoorsnede van de dijk gemeten. De kruinhoogte was hier iets lager dan elders, hetgeen bij kleine overslagdebieten tot uiting kwam in een iets grotere waterhoeveelheid die langs de instrumenten stroomde dan elders. Of dit ook het geval was bij grote overslagdebieten is niet te zeggen.
- 2 De formule is pas geldig als er geen lucht in het water zit.
- 3 Bij kleine waterlaagdikten lijkt de snelheid nul omdat het instrument boven water zit.
- 4 Bij kleine overslagdebieten blijkt er wel water over de kruin te gaan, maar niet in de overslagbak terecht te komen. Een (kleine) hoeveelheid verdwijnt dus in het talud.

Bij de analyse van de proefresultaten zullen deze aspecten in gedachte gehouden worden.

De analyse begon met een beoordeling van de bruikbaarheid van de elektromagnetische snelheidsmetingen. Dit viel helaas tegen. In Figuur 3 zijn registraties van deze snelheidsmeters gegeven. Het blijkt dat deze instrumenten te vaak "op tilt gaan" als gevolg van luchtbellen om bovenstaande integraal voldoende nauwkeurig te kunnen bepalen.

De verdere analyse is daarom volledig gericht op de propeller SHM 4. In Figuren 4 en 5 zijn voorbeelden van registraties gegeven. Hier doet zich het probleem voor dat het instrument nog een paar seconden doordraait (en een fictieve snelheid aangeeft) als het boven water komt. In de praktijk bleek dit echter een verwaarloosbare invloed te hebben omdat het gaat om kleine snelheden en kleine laagdikten. Er was daarom geen kunstmatige correctie van het signaal nodig.

Op ongeveer dezelfde plaats op het talud als SHM 4 is laagdiktemeter LDM 2 opgesteld. In Figuur 5 is een voorbeeld gegeven van het meetsignaal tijdens één van de zeer grote overslagvolumes. We zien dat het instrument tijdelijk naar de maximale waarde springt ($3199,5 < t < 3200$ s; ca. 70 cm laagdikte). Op basis van de videobeelden is vastgesteld dat dit een gevolg is van grote hoeveelheden stuifwater.

Uit de proeven blijkt dat bij kleine of matige overslagvolumes de watermassa over de kruin en langs het binnentalud stroomt. Al het water blijft hierbij in direct contact met het grasoppervlak.

Bij grote overslagvolumes stroomt een deel over de kruin en het binnentalud, maar daarnaast vliegt een niet te onderschatten deel als stuifwater over de kruin en komt ergens tussen LDM 2 en LDM 3 op het talud terecht. Bij dit soort golfoverslagprocessen kan de laagdiktemeter niet goed functioneren.

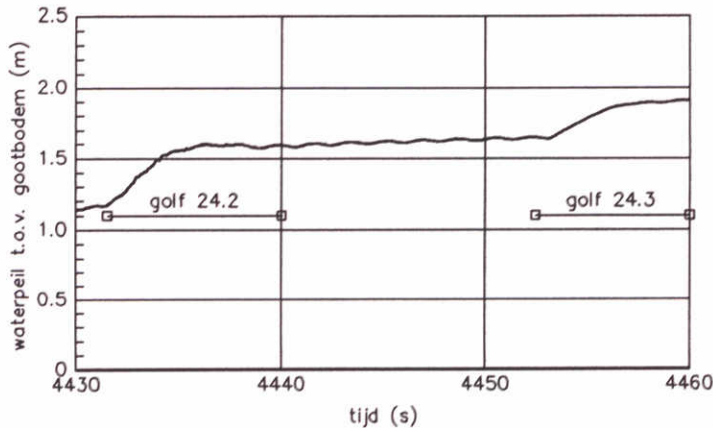
Uit de diverse proeven is de indruk ontstaan dat kleine en matige overslagvolumes een waterlaagdikte tot circa 10 à 15 cm geven. Grotere waterlaagdikten komen als stromend water niet voor, want dan vliegt het erover in de vorm van stuifwater. Uit de zes proeven die meegenomen worden in deze analyse bleek dat bij proeven P107 en P109 dit effect niet optrad. Het gemiddelde overslagdebiet bij deze proeven was klein (resp. 0,5 en 1.6 l/s/m). Bij de andere vier proeven (P112, P114, P123, P126) trad dit effect wel op. Deze proeven hadden een overslagdebiet tussen de 10 en 25 l/s/m.

Een verdere kwantificering van dit effect (wanneer treedt het precies op?) vraagt een gedetailleerde analyse van de waterbeweging op het buitentalud net voordat de betreffende golf de kruin overslaat. Die analyse valt buiten het kader van de onderhavige studie.

De analyse werd uitgevoerd op de hiervoor beschreven wijze op golven met een zo groot mogelijk overslagvolume en zonder stuifwater. Er was gekozen voor zo groot mogelijke overslagvolumes omdat de registraties dan het nauwkeurigste zijn, de snelheidsmeter een groot deel van de tijd in het water zit en het watervolume dat in het talud dringt relatief het kleinst is. Deze golven zijn geselecteerd uit de proeven die vermeld staan in Tabel 2.

Tevens is een analyse uitgevoerd van de volumes per golf, voor dezelfde golven, op basis van de waterstand-registraties in de overslagbak. Voor deze analyse werd het volume water berekend tussen de tijd waarop de golf voor het eerst werd geregistreerd in de overslagbak, tot de tijd waarop geen verdere stijging van het waterpeil in de overslagbak werd gezien, òf tot de tijd waarop de volgende golf werd geregistreerd.

Een voorbeeld van deze berekening volgt hieronder. In onderstaande figuur staat de registratie van de waterstandsmeter in de overslagbak gedurende de golven 24.2 en 24.3 van proef P126.



Het volume per golf (per m lengte) is het waterpeilverschil tussen de begin- en eindtijden van de golf, vermenigvuldigd met de lengte van de overslagbak (1.5 m).

Omdat het waterpeil redelijk constant was vóór en na de golven is het volume per golf niet sterk afhankelijk van de keuze van deze tijden. De berekeningen van de volumes zijn voor deze twee golven in onderstaande tabel weergegeven.

golf	t_1 (s)	t_2 (s)	h_1 (m)	h_2 (m)	Δh (m)	$Vol = \Delta h \cdot L$ (m ³ /m)
24.2	4431.0	4440.0	1.170	1.593	0.423	0.634
24.3	4452.0	4460.0	1.646	1.910	0.264	0.396

t_1 = begintijd golf

t_2 = eindtijd golf

h_1 = begin waterstand

h_2 = eind waterstand

Δh = waterstandsverschil (= $h_2 - h_1$)

Vol = volume per golf, per m dijk lengte

L = afmeting overslagbak = 1.50 m

De resultaten van de proeven 114, 126, 109 en 107 zijn vermeld in Tabel 3 t/m 6.

In de tabellen 3 t/m 6 valt op, dat er een tijdsverschil is tussen de begin- en eindtijden van de golven voor de twee berekeningsmethoden. Dit is de looptijd tussen ldm 2 en het begin van de registratie in de overslagbak.

In de tabellen zijn de volgende parameters gebruikt:

t_{begin} = tijdstip waarop de overslag van de betreffende golf bij het instrument aankomt (s)

t_{eind} = tijdstip waarop de overslag van de betreffende golf bij het instrument weer voorbij is (s)

V_1 = volume per golf per m dijk lengte in l/s, berekend met het geïntegreerde product van snelheid en laagdikte.

V_2 = volume per golf per m dijk lengte in l/s, bepaald uit de registratie in de overslagbak

Golf = nummer van de golf

% verschil = procentuele verschil tussen V_1 en V_2
 $= 100 \cdot (V_1 - V_2) / V_1$

In de tabellen valt ook op dat het volume in de overslagbak altijd kleiner is dan het geïntegreerde volume. Het verschil bedraagt globaal 30 tot 50% met uitschieters naar 3% en 83%. De twee volumina zijn voor elke geanalyseerde golf van proeven 107, 109, 114 en 126 tegen elkaar uitgezet in Figuur 6.

Het verschil wordt voor een klein deel veroorzaakt door de iets lagere kruin ter plaatse van de meetinstrumenten, maar kan waarschijnlijk voornamelijk verklaard worden met het luchtgehalte. De laagdiktemeter registreert immers water en lucht te zamen, terwijl de overslagbak alleen het water meet.

De invloed van lucht wordt in de volgende sectie verder uitgewerkt. Het blijkt dat de geconstateerde verschillen goed verklaard kunnen worden met de aanwezigheid van lucht. Daarom kan worden geconcludeerd dat het geïntegreerde product van snelheid en laagdikte als volgt gerelateerd is met het luchtgehalte en het overslagvolume:

$$q_{golf} = \int_0^T v \cdot d(1 - n_l) dt \quad (4)$$

Het luchtgehalte n_l varieert doorgaans tussen 0,3 en 0,5 met uitschieters naar 0,03 en 0,8 (zie Sectie 4.2).

4.2 Luchtgehalte

Bij overstromende dammen (van beton) is bekend dat het water over de kruin stroomt met een gering luchtgehalte ($n_l \approx 0$). De waterlaagdikte is daar ook gering. Bovenaan het binnentalud neemt de waterlaagdikte nog iets verder af, maar lager op het binnentalud is er een bepaald punt waar de stroming veel lucht gaat aanzuigen. Daar neemt tegelijk ook de waterlaagdikte toe tot er iets verder benedenstrooms weer een evenwicht wordt bereikt. Luchtgehaltenes van 0,3 tot 0,5 zijn hierbij heel gewoon (Hager, 1990).

Het aanzuigen van lucht begint als er een zekere turbulentie-intensiteit is bereikt en start doorgaans als de grenslaag-invloed tot aan de waterspiegel merkbaar is in de stromings-vertikaal en turbulentieverdeling.

Een vereenvoudigde formule voor het gemiddelde luchtgehalte, als er evenwicht is bereikt, luidt volgens Hager (1990):

$$n_l = 0,75(\sin\alpha)^{0,75} \quad (5)$$

waarin:

$$\alpha = \text{taludhelling } (^\circ)$$

Voor een talud van 1:2,5 geeft dit $n_l = 0,36$. Daarnaast is er ook een invloed van de ruwheid van het talud.

Een vergelijkbare situatie treedt op bij de overslaande golven. Door het brekerproces en de golfoploop zal echter het water op de kruin al vrij veel lucht bevatten. Daarom is er bij overslag wellicht geen markant punt op het binnentalud aan te wijzen waar de stroming veel lucht gaat aanzuigen, maar een hoog luchtgehalte is wel te verwachten.

Het luchtgehalte kan in principe op twee manieren met de gegeven meetopstelling bepaald worden:

- Op basis van de drukopnemers:

$$d = \frac{p}{(1 - n_l)\rho g} \quad (6)$$

- Op basis van het geïntegreerde product van snelheid en laagdikte (V_1) en het volume (V_2) in de overslagbak (V_1 is volume van water en lucht en V_2 is het volume water):

$$n = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \quad (7)$$

Voor de eerste methode is het van belang dat de stroomlijnen evenwijdig aan het talud lopen en het meetinstrument perfect in het vlak van het talud is opgesteld, zonder randjes en richeltjes waartegen het water kan opstuwen.

Een voorbeeld van een registratie van druk en waterlaagdikte is gegeven in Figuur 7. De drukhoogte is hier als volgt gedefinieerd:

$$\phi = \frac{p}{\rho g} \quad (8)$$

met:

$$\phi = \text{drukhoogte (m)}$$

We zien aan het begin van de langskomende golf ($1272,7 < t < 1274$ s) dat het signaal van de drukopnemer erg wild is. Soms is de drukhoogte veel lager dan de laagdikte, soms veel hoger en soms zelfs negatief. Dit wilde beeld moet toegeschreven worden aan de hoge turbulentie en golfverschijnselen in het front van het overslaande water.

Daarna ($1274 < t < 1277$ s) wordt het beeld wat rustiger en tekent zich een verschil af tussen drukhoogte en laagdikte. Als dit verschil geheel te verklaren is met het luchtgehalte dan geldt:

$$n_l = \frac{d - \phi}{d} \quad (9)$$

In deze uitwerking werd de gemiddelde waarde van de drukhoogte (ϕ) afgetrokken van de gemiddelde waarde van de laagdikte (d) in de interval waar dit verschil positief is.

Voorbeelden van de gebruikte signalen van enkele golven zijn in de Figuren 8 t/m 11 weergegeven. In deze figuren worden eerst de laagdikte- en druksignalen getekend en daaronder het verschil (LDM 2 - DRO 2). Tevens worden de gemiddelde waarden vermeld, die voor de berekeningen gebruikt werden.

In Tabel 7 zijn voor de geanalyseerde golven de luchtgehaltenes gegeven (in procenten). Geen golven van proef P107 zijn gebruikt in deze analyse. De reden hiervoor is dat alle over-

slaande golven van deze proef een te geringe drukregistratie gaven en het geruis in de druksignalen te groot was.

De andere methode om het luchtgehalte te bepalen sluit aan op de vorige sectie: het verschil tussen geïntegreerd product van snelheid en laagdikte en het volume in de overslagbak wordt toegeschreven aan het luchtgehalte.

De resultaten zijn voor proeven 114, 126, 109 en 107 gegeven in Tabel 3 t/m 6: het vermelde relatieve verschil tussen V_1 en V_2 is gelijk aan het luchtpercentage.

In Figuur 12 zijn de luchtpercentages volgens de ene methode en de andere methode tegen elkaar uitgezet. Helaas zien we een puntenwolk, wat er op duidt dat bij een bepaalde golf de ene methode een totaal ander luchtpercentage geeft dan de andere methode. Het blijkt verder dat luchtpercentages op basis van de drukopnemers meestal hoger zijn dan luchtpercentages op basis van het geïntegreerde product van snelheid en laagdiktemeter. Bij vrij veel golven resulteert uit de drukregistraties een extreem hoog luchtgehalte van 70 tot 90%. Op grond hiervan wordt een grotere nauwkeurigheid toegeschreven aan de luchtpercentages op basis van het geïntegreerde product van snelheid en laagdiktemeter.

Het gemiddelde luchtpercentage op basis van het geïntegreerde product van alle geanalyseerde golven is 0,44. Deze waarde komt erg mooi in de buurt van de waarden die bij overstromende dammen zijn gemeten, namelijk gemiddeld 0,36 (Hager 1990).

4.3 Snelheid op het binnentalud

4.3.1 Literatuuroverzicht

Vele onderzoekers hebben in het verleden geprobeerd de watersnelheid op dijken te meten, maar helaas is nog niemand daar volledig in geslaagd. Het probleem zit in het feit dat de waterlaag erg dun is, het water vol met luchtbelletjes zit en bovendien valt het talud tussen de golfoverslagen steeds droog. Voor de bestaande meetinstrumenten geeft dit grote problemen.

Er zijn diverse methoden bedacht om via een omweg de gewenste snelheid te meten. Door Roos (1972) is het watervolume tussen twee laagdiktemeters gebruikt. De verandering van dit volume in de tijd is een maat voor de snelheid ter plaatse van de laagdiktemeters. De nauwkeurigheid van deze methode is niet zo groot, vooral omdat de vorm van de waterspiegel tussen twee laagdiktemeters niet bekend was.

Door Klein Breteler (1989) en bij het huidige onderzoek (Smith, 1993) werd de snelheid direct gemeten met een EMS (elektromagnetische snelheidsmeter). Dit instrument heeft echter na het droogvallen circa 0,1 s nodig om weer een meetsignaal te geven, waardoor de hoogste (meest interessante) snelheid niet gemist werd. Bovendien kunnen luchtbelletjes het signaal verstoren.

Van der Meer (1987) trachtte de snelheden met een Laser-doppler snelheidsmeter te bepalen, maar dit lukte niet vanwege de geringe waterlaagdikte. Er werd vervolgens gekozen voor een methode om op basis van de laagdiktemeters de snelheid van het front van de watertong te bepalen. Een front werd herkend als het over- of onderschrijden van een laagdikte van 3,3 mm. Deze methode geeft een goed meetresultaat van de voortplantingsnelheid van het front, hoewel soms het niveau niet bereikt werd en soms de meting verstoord werd door spetters.

Sparboom e.a. (1990) en Die Küßte (1993) hebben de snelheid van het op- en neerlopende front bepaald met een golfoplopmeter. Dit werkt zonder problemen, maar geeft uiteraard niet de watersnelheid, maar alleen de voortplantingsnelheid van het front.

Metingen van Klein Breteler (1989) hebben laten zien dat de grootste watersnelheid optreedt bij het passeren van het front. Na het oplooppunt neemt vervolgens de snelheid vrijwel lineair in de tijd af tot een grote negatieve waarde is bereikt vlak voor het passeren van het neerloopfront. De voortplantingssnelheid van het front is derhalve een goede indicatie van de maximale snelheid op het talud.

In het modelonderzoek van Van der Meer (1987) werd de voortplantingssnelheid van het golfpunt gemeten met behulp van vier golfhoogtemeters. Deze meetmethode is bovenstaand beschreven. Uit de metingen blijkt dat de snelheid op de kruin wat hoger is dan op het buitentalud. Ondanks de hoge watersnelheid gaat er toch minder water per seconde over de kruin dan wordt aangevoerd aan het bovineinde van het buitentalud, omdat de waterlaagdikte op de kruin veel dunner is dan op het buitentalud. Dit betekent dat op de kruin langer water aanwezig is per golf dan op het bovineinde van het buitentalud. Op het binnentalud is dit nog weer langer.

De invloed van de brekerparameter op de snelheid, zoals die duidelijk waarneembaar is in de snelheid op het buitentalud, is op de kruin en het binnentalud verdwenen. Het blijkt dat de dimensieloze frontnelheid, $c_{2\%}/\sqrt{gH_s}$, nog slechts afhankelijk is van de dimensieloze hoogte boven de buitenwaterstand:

$$\frac{c_{2\%}}{\sqrt{gH_s}} = 1,9 \sqrt{1 - \frac{z}{z_{2\%}}} \quad (10)$$

waarin:

$c_{2\%}$	=	frontnelheid op de kruin en het binnentalud die door 2% van de inkomende golven wordt overschreden	(m/s)
z	=	niveau op de kruin of het binnentalud ten opzichte van de stilwaterlijn van het buitenwater	(m)
g	=	versnelling van de zwaartekracht	(m/s ²)
H_s	=	significante hoogte van inkomende golven	(m)
$z_{2\%}$	=	golfoplooppunt dat door 2% van de golven wordt overschreden op een oneindig lang talud met helling gelijk aan het buitentalud	(m)

Deze formule is samen met de metingen van Van der Meer (1987) in Figuur 13 gegeven. De metingen zijn uitgevoerd op een glad talud met gemiddelde helling aan de buitenzijde van 1:4 en aan de binnenzijde van 1:2,5. De kruinbreedte was $B/H_s \approx 1$. De proeven zijn uitgevoerd met onregelmatige golven met golfsteilheid $0,015 < H_s/L_{op} < 0,040$.

De vorm van de term met de plaatshoogte in de formule, namelijk $\sqrt{(1 - z/z_{2\%})}$, volgt uit een beschouwing van potentiële en kinetische energie (Klein Breteler, 1989). Na de golfklap op het talud schiet een massa water het talud op met een grote hoeveelheid kinetische energie (beweging) en geringe potentiële energie (hoogte). Tijdens het oplooppunt wordt de kinetische energie omgezet naar potentiële energie: de snelheid van de massa water neemt

af en de gemiddelde hoogte op de dijk neemt toe. Op basis van deze theorie werd de term $\sqrt{(1 - z/z_{2\%})}$ afgeleid.

Op het binnentalud stroomt de massa water weer naar beneden en gebeurt het omgekeerde: de potentiële energie wordt omgezet in kinetische energie. Daarom is de term ook toepasbaar op het afstromende water op het binnentalud.

Het uitgangspunt bij deze benadering is echter dat er weinig wrijving is. Juist bij het afstromende water kan deze wrijving dominant worden, omdat de stroomsnelheid zeer hoog wordt en de waterlaagdikte vrij klein is. Bovenstaande formule heeft daardoor een beperkte geldigheid.

De ruwheid van het talud heeft een grote invloed op de optredende watersnelheid en de voortplantingsnelheid van het front. Door Die Küßte (1993) werden op basis van metingen op kunstgras (lengte grasblad: 28 mm) en kunstmatige ruwheid (blokjes van 16x16 cm² en 14 cm hoog en h.o.h. afstand van 80 cm) de volgende conclusies getrokken voor het buitentalud:

	Oploop	Neerloop
Gras	$\frac{[c_{2\%op}]_{gras}}{[c_{2\%op}]_{glad}} \approx 0,8$	$\frac{[c_{2\%neer}]_{gras}}{[c_{2\%neer}]_{glad}} \approx 0,4$
Kunstmatige ruwheid	$\frac{[c_{2\%op}]_{ruw}}{[c_{2\%op}]_{glad}} \approx 1,0$	$\frac{[c_{2\%neer}]_{ruw}}{[c_{2\%neer}]_{glad}} \approx 0,6$

Deze invloed is dus volgens Die Küßte (1993) veel groter dan voor de golfoploop. Het onderzoek van Klein Breteler (1989) en Meijer (1994) lijken niet in tegenspraak met deze invloedsfactoren voor gras.

4.3.2 Analyse van de huidige metingen

De meetinstrumenten, die de meest betrouwbare gegevens over de optredende snelheden kunnen geven, zijn de propeller SHM 4 en de laagdiktemeters. De signalen van de elektromagnetische snelheidsmeters zijn helaas minder betrouwbaar, zoals is vermeld in Sectie 4.1 en ook door Meijer (1994) was geconstateerd.

Een methode om de snelheid op het talud te bepalen is gebaseerd op de registraties van de laagdiktemeters. In de registraties is vrij nauwkeurig het moment af te lezen waarop het front bij het instrument aankomt. Door het tijdsverschil van frontaankomst bij twee meetinstrumenten te delen door de onderlinge afstand, kan de (gemiddelde) frontsnelheid tussen de twee laagdiktemeters bepaald worden.

De resultaten zijn in de vorm van een overschrijdingskromme in Figuur 16 en 17 gegeven (proef 114: $c_{2\%} = 4,6$ m/s; proef 126: $c_{2\%} = 4,5$ m/s). Het blijkt dat de snelheid langs het talud niet toeneemt.

Deze meetpunten zijn in Figuur 13 ingetekend. Het blijkt dat de metingen hoger op het talud ($z/z_{2\%} = 0,3$; tussen LDM 1 en LDM 2) redelijk aansluiten op de metingen van Van der Meer (1987), maar de metingen lager op het talud ($z/z_{2\%} = -0,04$; tussen LDM 2 en LDM 3) zijn

duidelijk lager dan de metingen van Van der Meer. Dit laatste kan een gevolg zijn van de ruwheid van het talud en het feit dat formule (10) uitgaat van de theorie van een wrijvingsloze afstroming. Zoals in de vorige sectie al is aangegeven, heeft deze theorie z'n beperkingen. De metingen van Van der Meer zijn de gemeten snelheden op het binnentalud, die een overschrijdingspercentage van 2% hebben. Deze punten werden van de overschrijdingskrommen in zijn rapport afgeleid en de analyse daarvan werd uitgevoerd ten behoeve van een andere studie. De vergelijking van die resultaten met de huidige metingen zijn daarom gebaseerd op de 2% overschrijdingswaarden.

Het effect van de ruwheid neemt toe naarmate de snelheid hoger wordt en de laagdikte kleiner. De getekende lijn in Figuur 13 (geen ruwheid) zal daarom naar beneden buigen voor de kleinere waarden van $z/z_{2\%}$, door het effect van de ruwheid. Blijkbaar lopen we daar nu met de metingen op gras bij $z/z_{2\%} = -0,04$ tegenaan.

De huidige metingen met de laagdiktemeters spreken de juistheid van formule 10, bij toepassing hoger op het talud, niet tegen. Lager op het talud lijkt echter de ruwheid bepalend te zijn voor de snelheid.

In Figuren 14 en 15 is de overschrijdingskromme getekend van de pieksnelheid (v) van SHM 4. Op de horizontale as is het percentage van de inkomende golven vermeld. De waarden van $v_{2\%}$ kunnen ook vergeleken worden met Van der Meer (1987):

$$\begin{array}{l}
 \text{proef 114 : } v_{2\%} = 6,2 \text{ m/s} \\
 v_{2\%}/\sqrt{(gH_s)} = 1,74 \\
 z_{2\%} = 1,5H_s\xi_{op} = 1,5 \cdot 1,29 \cdot 1,78 = 3,45 \text{ m (t.o.v. SWL)} \\
 z/z_{2\%} = 0,12 \\
 \text{proef 126 : } v_{2\%} = 6,1 \text{ m/s} \\
 v_{2\%}/\sqrt{(gH_s)} = 1,64 \\
 z_{2\%} = 1,5H_s\xi_{op} = 1,5 \cdot 1,42 \cdot 1,79 = 3,81 \text{ m (t.o.v. SWL)} \\
 z/z_{2\%} = 0,11
 \end{array}$$

Deze meetpunten zijn ook ingetekend in Figuur 13. De punten lijken zeer goed aan te sluiten op formule 10, echter moet worden opgemerkt dat deze de frontnelheid ($c_{2\%}$) gebruikt. De frontnelheid is een gemiddelde snelheid tussen de laagdiktemeters en de pieksnelheid ($v_{2\%}$) is de gemeten maximale snelheid op een locatie gedurende het passeren van één golf. Waarschijnlijk is de frontnelheid lager dan de pieksnelheid.

5 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Het is uiteindelijk de bedoeling van de TAW om een rekenmodel te verkrijgen waarmee voor een willekeurige dijkgeometrie met willekeurige ruwheid de belasting op het grastalud door onregelmatige golfbelasting kan worden berekend. De belasting bestaat uit een schuifspanning of drukkracht als gevolg van het langstromende water-lucht-mengsel, waarbij de taludhelling, de ruwheid, de waterlaagdikte, het luchtgehalte en stroomsnelheden belangrijke factoren zijn.

In de onderhavige aanvullende analyse zijn een aantal vragen beantwoord die gezien kunnen worden als bouwstenen waarmee later het rekenmodel kan worden opgebouwd. Het is echter waarschijnlijk dat er nog meer bouwstenen nodig zijn. Te denken valt aan de ruwheid bij stroming van water met zeer hoog luchtgehalte over gras. Dit kan nader onderzocht worden door allereerst een literatuurstudie te verrichten naar overstromende grastaluds, zoals Hager (1990). Tevens is het te verwachten dat aanzienlijke kennis aanwezig is bij de afdeling Industriële Technologie van WL, die zich bezig houdt met stromingen door pijpleidingen. Deze stromingen zijn van allerlei aard, ook lucht-vloeistof-mengsels (zoals bier).

Vervolgens kunnen metingen verricht worden in het kantelgootje van WL. Deze kleine goot (doorstroomprofiel van enkele vierkante decimeters) kan op elke gewenste helling gesteld worden. Zo kan er snel een goed gedefinieerde afstroming van water met hoog luchtgehalte gecreëerd worden. Wellicht is het mogelijk om de onlangs in EG-kader gebruikte schuifspanningsmeter te gebruiken voor de bepaling van de belasting op de ondergrond.

Referenties

- Hager, W.H. Spillways and Bottom Outlets. Shockwaves and air entrainment in chutes. Committee on Hydraulics for Dams, sub committee 4. Stuttgart/Zürich, Draft report, april 1990.
- Klein Breteler, M. Erosie door open taludbekledingen. Snelheid op talud door brekende golven. Bijlage F, verslag modelonderzoek H657. Waterloopkundig Laboratorium, juli '89.
- Klein Breteler, M. Handboek belastingen op waterbouwkundige constructies. Hoofdstuk 5: Hydraulische belasting op de constructie. Waterloopkundig Laboratorium, onvolledig concept 1995.
- Die Küßte. Äußere Belastung als Grundlage für Planung und Bemessung von Küstenschutzwerken. EAK 1993 heft 55.
- Meer, J.W. van der. Golfverslag Afsluitdijk. Waterloopkundig Laboratorium, verslag H24, juni '87.
- Meer, J.W. van der. Golfploop en golfverslag bij dijken. Waterloopkundig Laboratorium, verslag H638, april 1993.
- Meijer, D.G. Grasdijken. Analyse van meetresultaten grootschalig modelonderzoek. Waterloopkundig Laboratorium, conceptverslag Q1584, mei 1994.
- A. Roos. Experimenteel onderzoek naar het gedrag van tegen taluds oplopende regelmatige golven. Technische Hogeschool Delft, afstudeerverslag, R/1972/6/H, 1972.
- Smith, G.M. Grasdijken. Graserosie, reststerkte en golfverslag. Waterloopkundig Laboratorium, conceptverslag H1565, jan. '93.
- Sparboom, U., J. Grune, S. Grosche and M. Haidekker. Full-scale measurements of wave run-up at sea dykes. Proceedings of Coastal engineering conf., Delft, 1990.

	x (m)	y (m)	z (m)
Achterkant kruinlijn	214,70	-	7,00
LDM 1	214,20	3,30	7,000
LDM 2	218,10	3,30	5,620
LDM 3	221,20	3,30	4,400
SHM 1	212,70	3,30	7,000
SHM 2	217,78	3,30	5,750
SHM 3	220,90	3,30	4,506
SHM 4	218,35	3,30	5,570
DRO 1	218,05	3,30	5,644
DRO 2	218,15	3,30	5,604

x = afstand vanaf middenstand van golfschot

y = afstand vanaf gootwand aan halzijde

z = hoogte boven gootbodem

Tabel 1 Locatie van de instrumenten (voor laagdiktemeter is het snijpunt van instrument en talud gegeven)

Proef	H _g (m)	T _p (s)	h (m)	Duur (s)	Q (l/s/m)	SHM 4 aanwezig
p107	1,27	4,60	5,20	3900	0,5	ja
p109	1,48	4,92	5,20	4100	1,6	ja
p114	1,29	6,49	5,20	5500	9,9	ja
p126	1,42	6,82	5,20	5700	15	ja

Tabel 2 Geselecteerde proeven

proef P114

Golf	t_{begin} (s)	t_{eind} (s)	V_1 (L/m)	V_2 (L/m)	Z verschil
20.2	749.500	755.000	475		41
	752.000	757.000		279	
20.3	755.000	762.000	919		17
	757.000	766.000		762	
21.2	1056.000	1060.000	143		55
	1060.000	1065.000		65	
21.3	1062.000	1067.000	427		30
	1065.000	1072.000		298	
21.4	1075.000	1080.000	434		36
	1077.000	1085.000		277	
22.1	1732.500	1738.000	862		55
	1735.000	1742.500		388	
22.2	1740.500	1745.000	342		49
	1742.500	1750.000		176	
22.3	1760.000	1765.000	423		67
	1763.000	1770.000		141	
23.1	2384.000	2390.000	451		49
	2387.000	2395.000		230	
23.2	2427.000	2433.000	418		23
	2430.000	2440.000		321	
23.3	2467.000	2473.000	301		33
	2469.500	2480.000		201	
23.4	2511.000	2518.000	1005		44
	2514.000	2521.000		567	
23.5	2518.000	2524.000	636		59
	2521.000	2530.000		261	
24.1	3277.000	3282.000	589		70
	3280.000	3289.000		179	
24.2	3327.000	3333.000	630		36
	3330.000	3338.000		405	
24.3	3335.000	3339.000	457		67
	3338.000	3345.000		149	
25.1	3953.000	3958.000	398		38
	3956.000	3964.000		248	
25.2	3974.500	3980.000	716		48
	3977.500	3985.000		374	
25.3	3982.500	3986.500	491		53
	3985.000	3991.000		233	
25.4	4047.500	4052.500	768		62
	4050.000	4058.000		292	

Kleinste verschil = 17%; grootste = 70%; gemiddeld verschil = 47%; standaard afwijking = 14,4%

Tabel 3 Overslagvolume volgens geïntegreerd product van snelheid en laagdikte (V_1) en volgens overslagbak (V_2)

proef P126

Golf	t_{begin} (s)	t_{eind} (s)	V_1 (l/m)	V_2 (l/m)	Z verschil
22.1	3175.000	3185.000	518		27
	3180.000	3190.000		376	
22.2	3190.000	3197.000	554		43
	3194.000	3200.000		317	
24.1	4422.000	4427.000	329		55
	4426.000	4431.500		147	
24.2	4428.000	4434.000	656		3
	4431.500	4440.000		634	
24.3	4450.000	4456.000	566		30
	4452.000	4460.000		396	
26.1	4892.000	4903.000	658		25
	4899.000	4905.000		491	
26.2	4904.000	4910.000	373		24
	4907.000	4913.000		283	
26.3	4910.000	4916.000	265		44
	4913.000	4920.000		148	
27.1	5074.500	5080.000	571		5
	5077.000	5085.000		542	
27.2	5081.500	5088.000	721		38
	5085.000	5093.000		449	
27.3	5093.000	5098.000	216		57
	5097.000	5105.000		93	
28.1	5136.000	5143.000	980		7
	5138.000	5148.000		912	
28.2	5144.500	5150.000	420		40
	5148.000	5157.000		254	
28.3	5157.500	5163.000	468		34
	5161.000	5167.000		309	

Kleinste verschil = 3%; grootste = 57%; gemiddeld verschil = 31%; standaard afwijking = 16,5%

Tabel 4 Overslagvolume volgens geïntegreerd product van snelheid en laagdikte (V_1) en volgens overslagbak (V_2)

proef P109

Golf	t_{begin} (s)	t_{eind} (s)	V_1 (l/m)	V_2 (l/m)	Z verschil
10.1	683.000	688.000	542		33
	685.000	699.000		363	
10.2	695.000	699.000	176		6
	699.000	715.000		166	
11.1	1170.000	1176.000	686		41
	1173.500	1190.000		407	
12.1	1340.500	1346.000	287		68
	1344.000	1360.000		91	
13.1	2255.500	2264.000	220		24
	2259.500	2280.000		167	
14.1	2547.000	2554.000	72		75
	2550.000	2570.000		18	
15.1	3224.000	3232.000	355		63
	3228.000	3246.000		132	
16.1	3364.000	3374.000	328		72
	3367.000	3390.000		91	
17.1	3648.500	3657.000	314		56
	3652.500	3670.000		138	

Kleinste verschil = 6%; grootste = 75%; gemiddeld verschil = 49%; standaard afwijking = 22,7%

Tabel 5 Overslagvolume volgens geïntegreerd product van snelheid en laagdikte (V_1) en volgens overslagbak (V_2)

proef P107

Golf	t_{begin} (s)	t_{eind} (s)	V_1 (l/m)	V_2 (l/m)	Z verschil
10.1	556.000	561.500	394		67
	560.000	580.000		129	
10.2	600.000	605.000	436		55
	603.000	620.000		195	
11.1	2895.000	2898.000	92		83
	2897.000	2916.000		16	

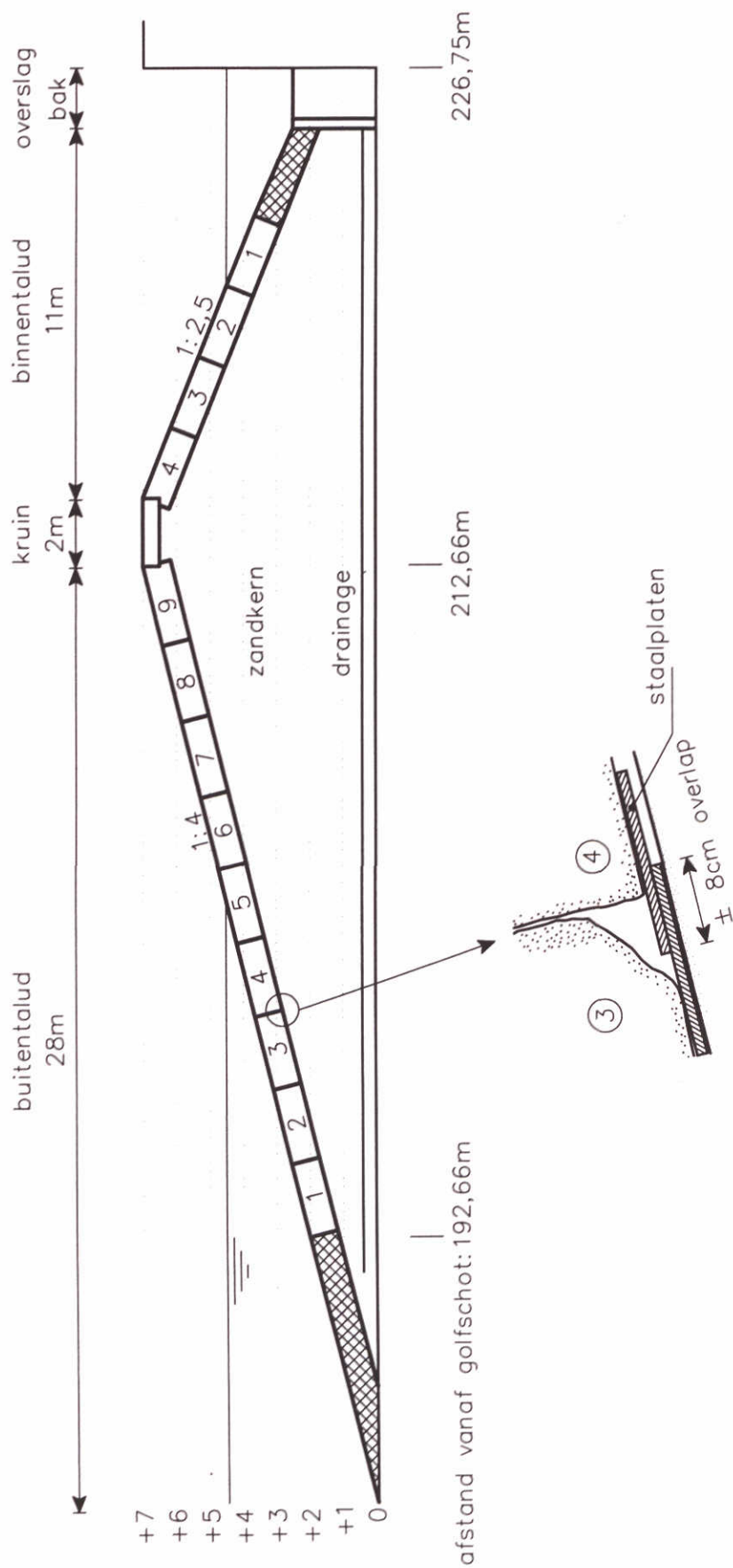
Kleinste verschil = 55%; grootste = 83%; gemiddeld verschil = 68%; standaard afwijking = 11,2%

Tabel 6 Overslagvolume volgens geïntegreerd product van snelheid en laagdikte (V_1) en volgens overslagbak (V_2)

Proef	Golf	Luchtgehalte %
126	22.1	75
	22.2	58
	24.1	68
	24.2	42
	24.3	36
	26.1	60
	26.2	46
	26.3	38
	27.1	65
	27.2	46
	27.3	56
	28.1	35
	28.2	71
	28.3	79
114	20.2	50
	20.3	40
	21.2	40
	21.3	40
	21.4	30
	22.1	50
	22.2	15
	22.3	33
	23.1	40
	23.2	35
	23.3	40
	23.4	42
	23.5	25
	109	10.1
10.2		83
11.1		71
12.1		71
13.1		83
17.1		57

kleinste luchtgehalte = 15%, grootste = 83%,
gemiddelde = 52%, standaard afwijking = 18%

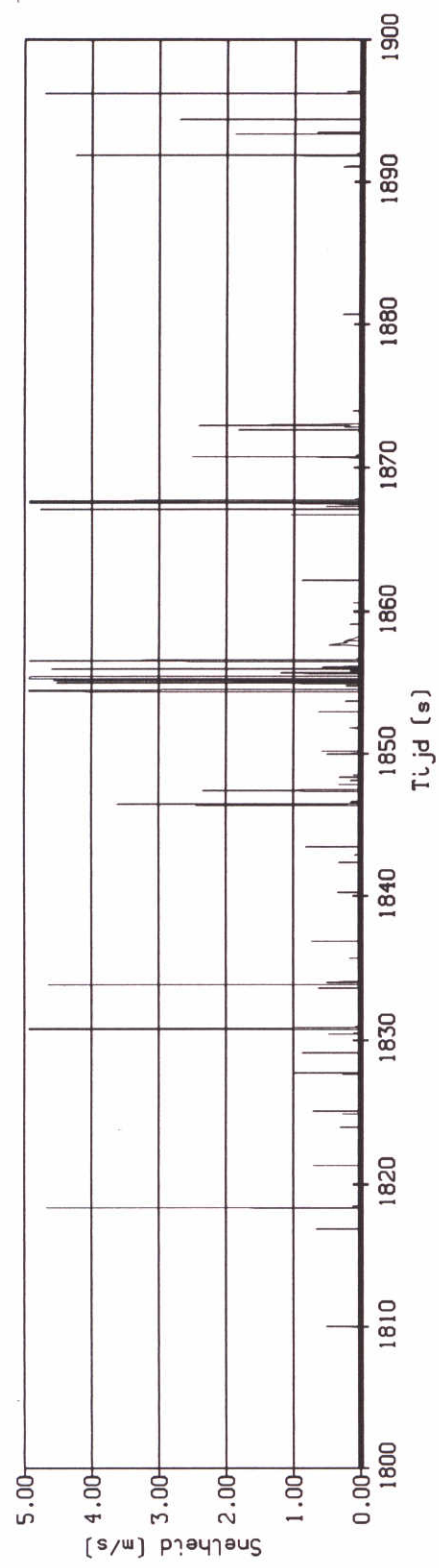
Tabel 7 Luchtgehalte per proef op basis van drukregistratie en laagdiktemeting



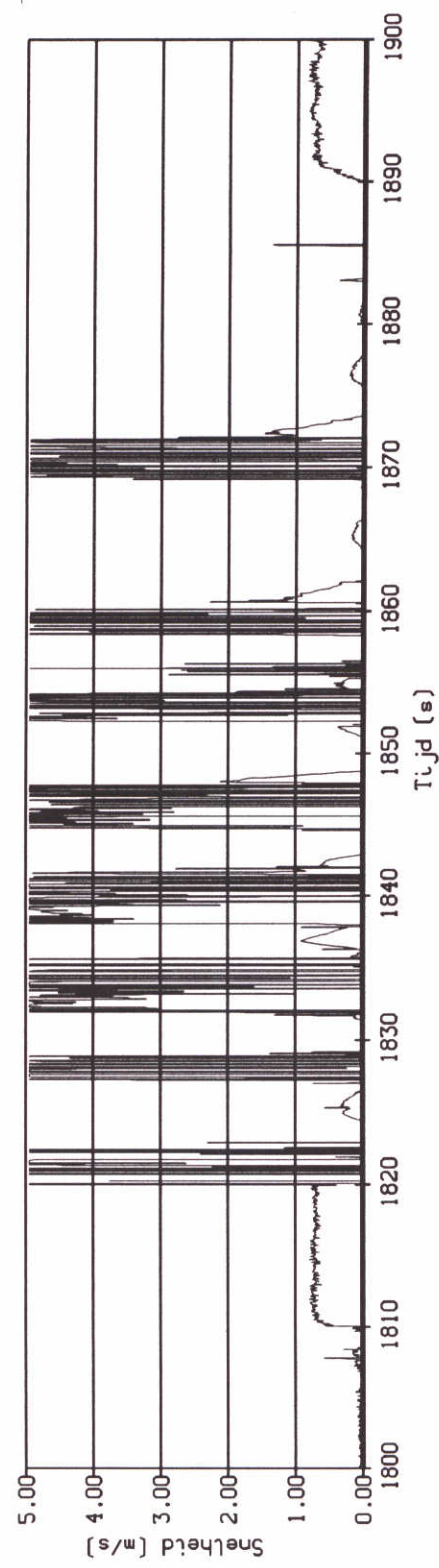
LANGSDOORSNEDE DIJKPROFIEL

SCHAAL 1: 200

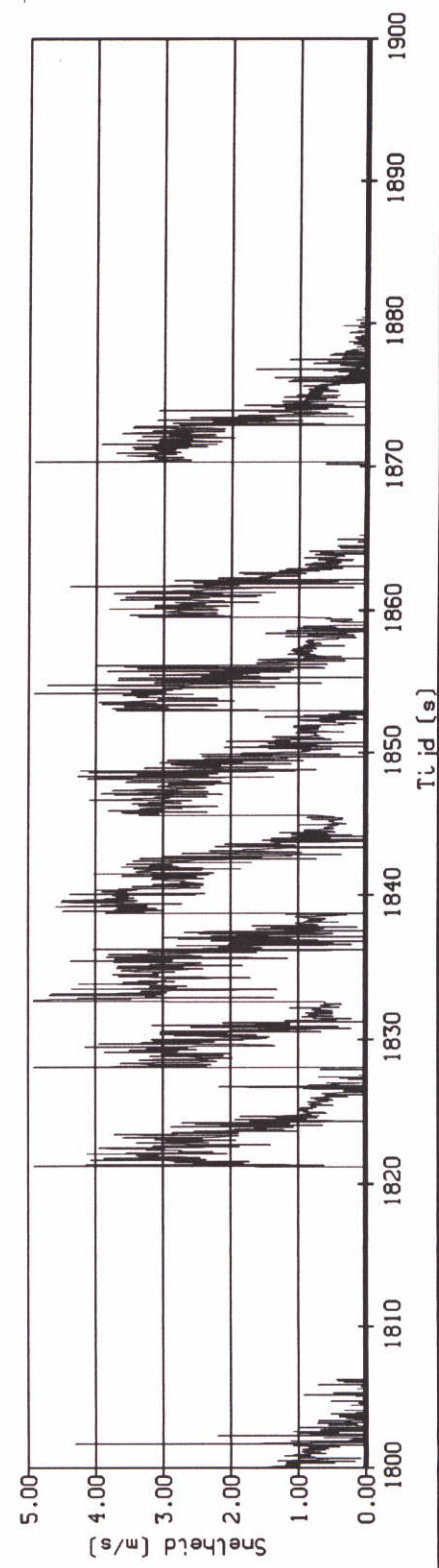
SHM 1



SHM 2

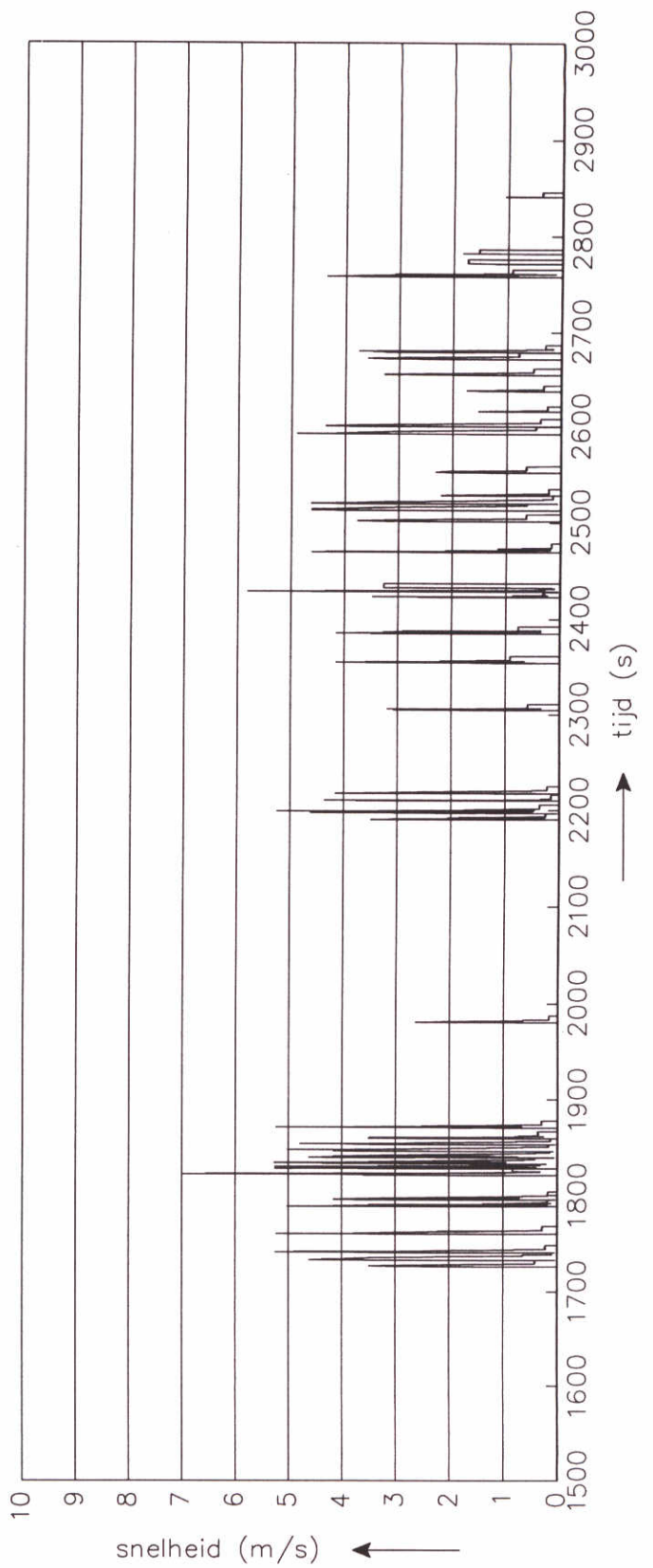
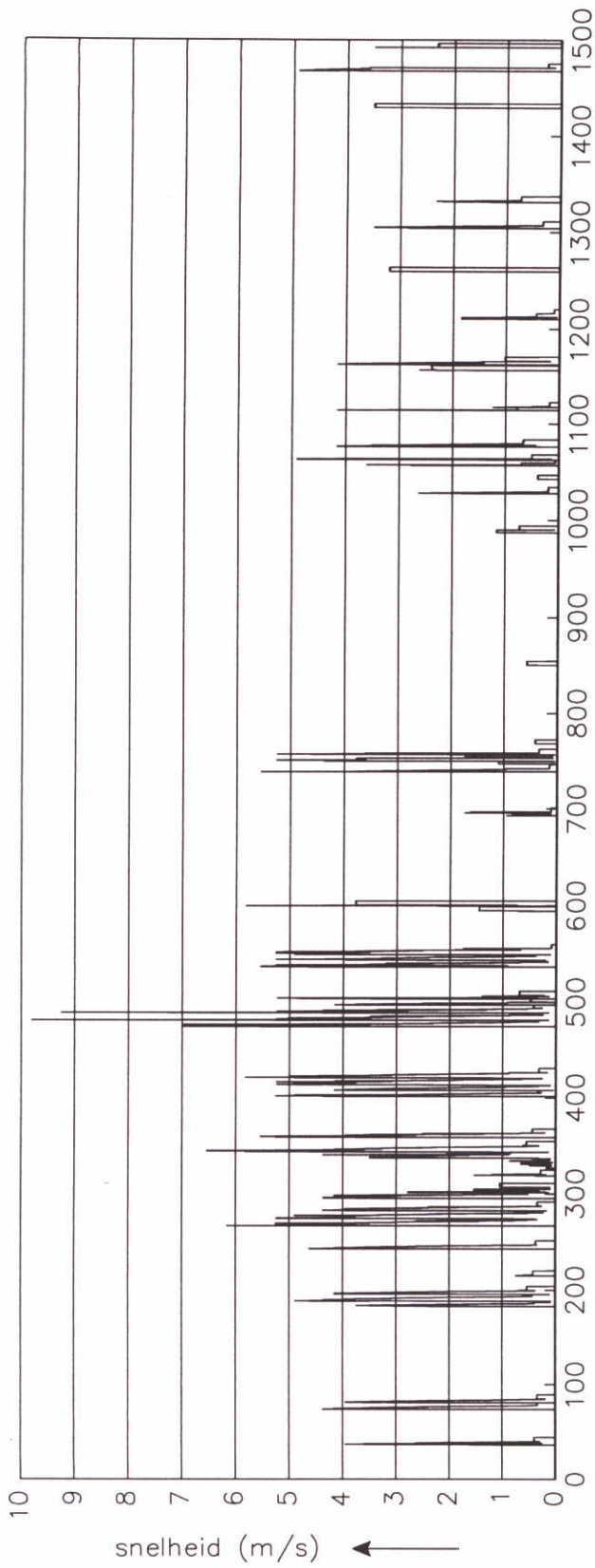


SHM 3



SHM 1; SHM 2 en SHM 3 registraties

SP114



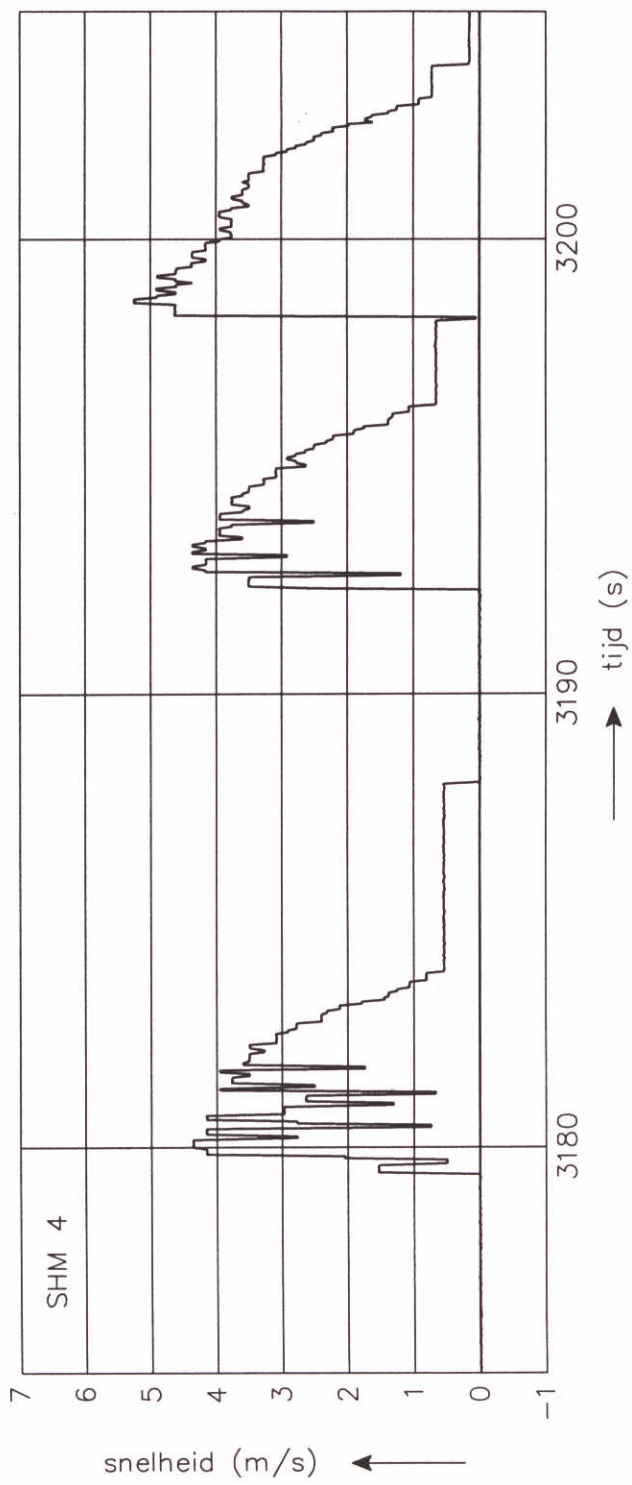
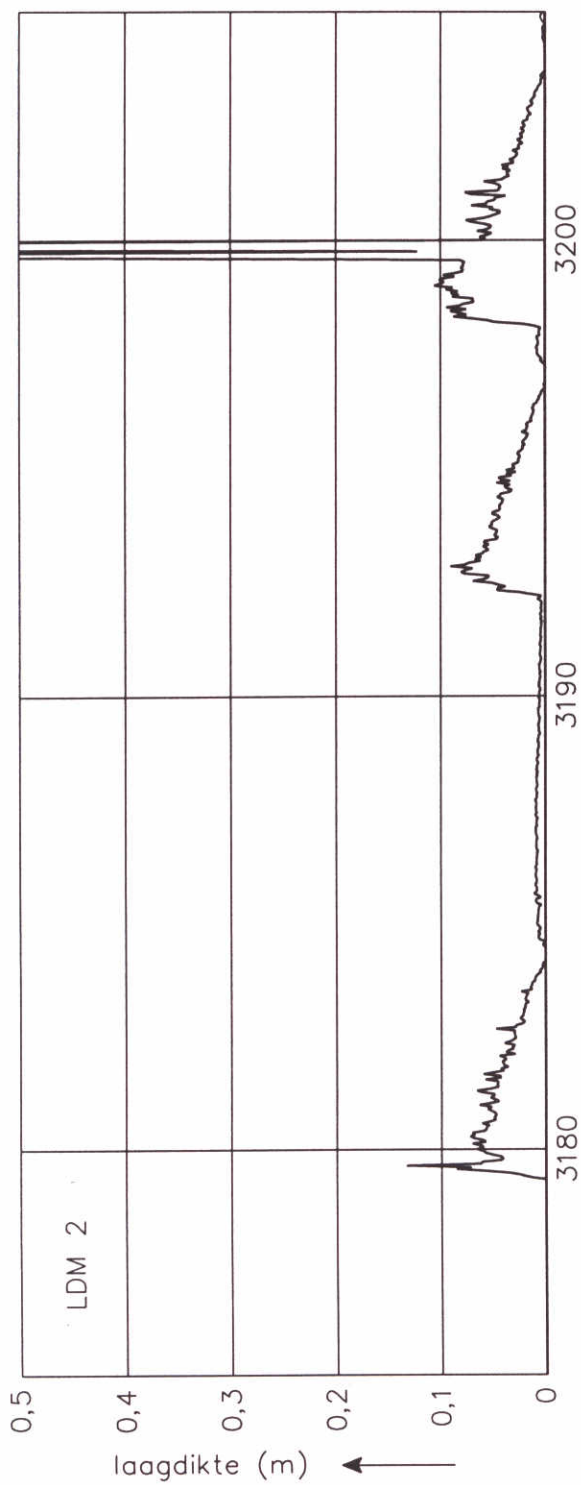
SHM 4 REGISTRATIE

SP114

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

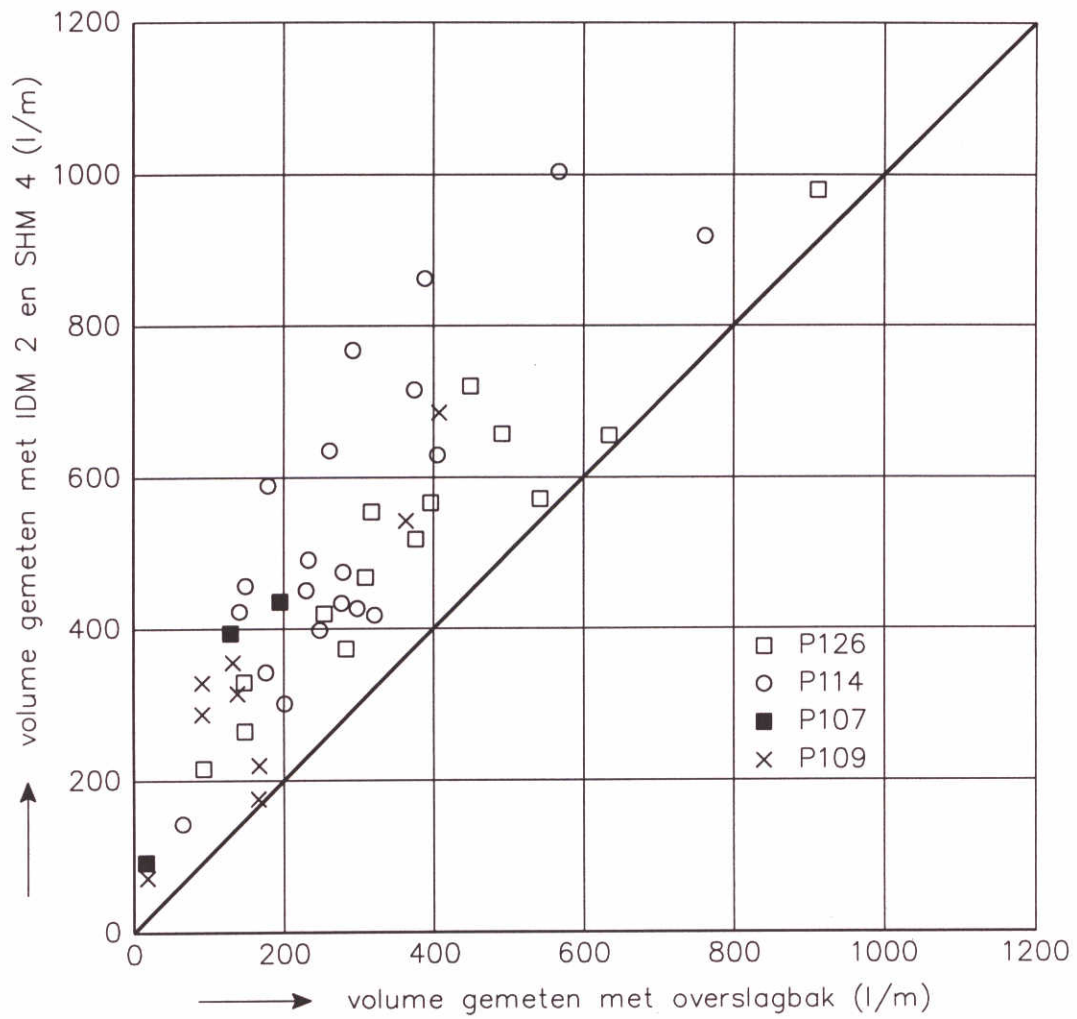
H 1991

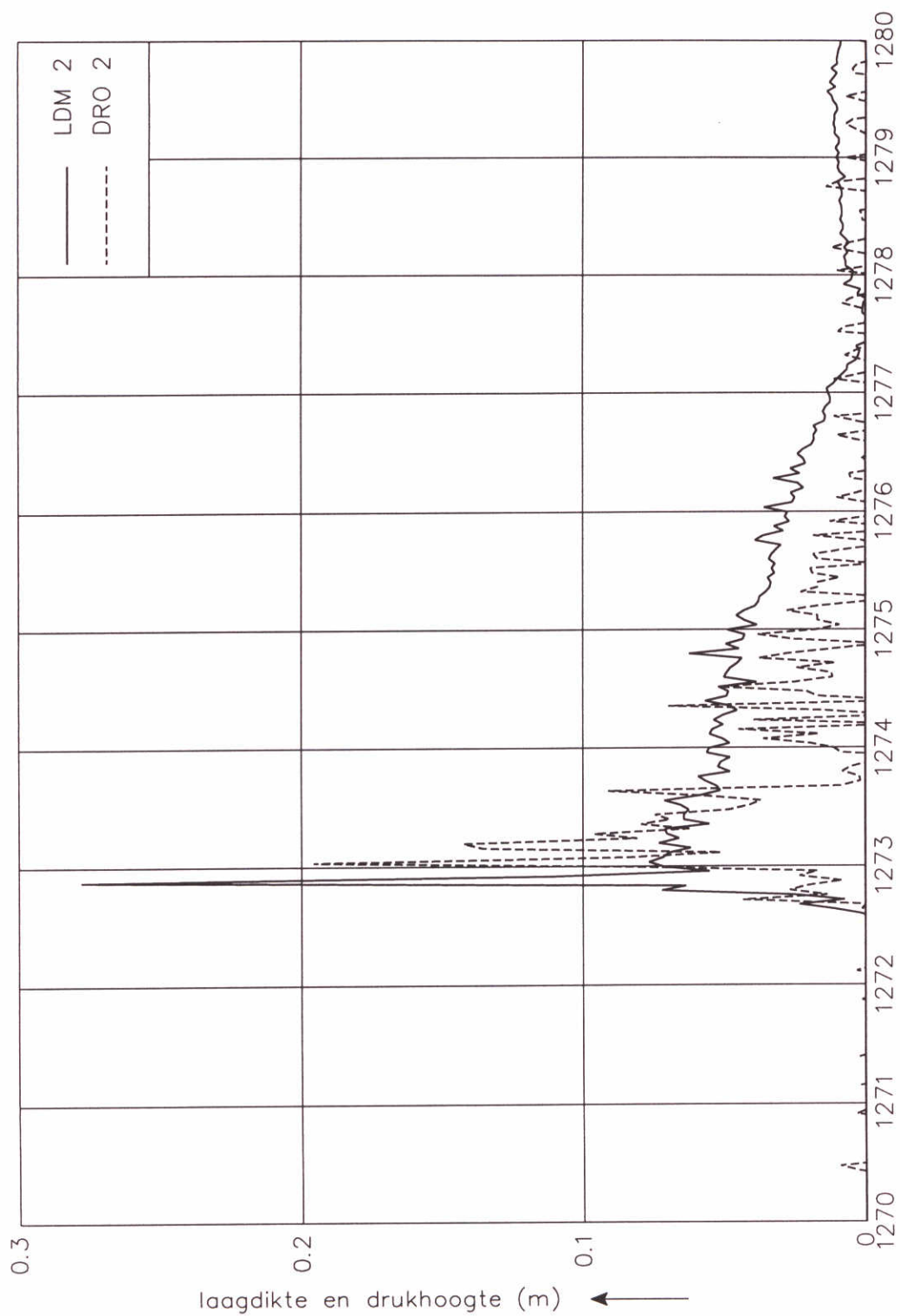
FIG. 4



LDM 2 EN SHM 4

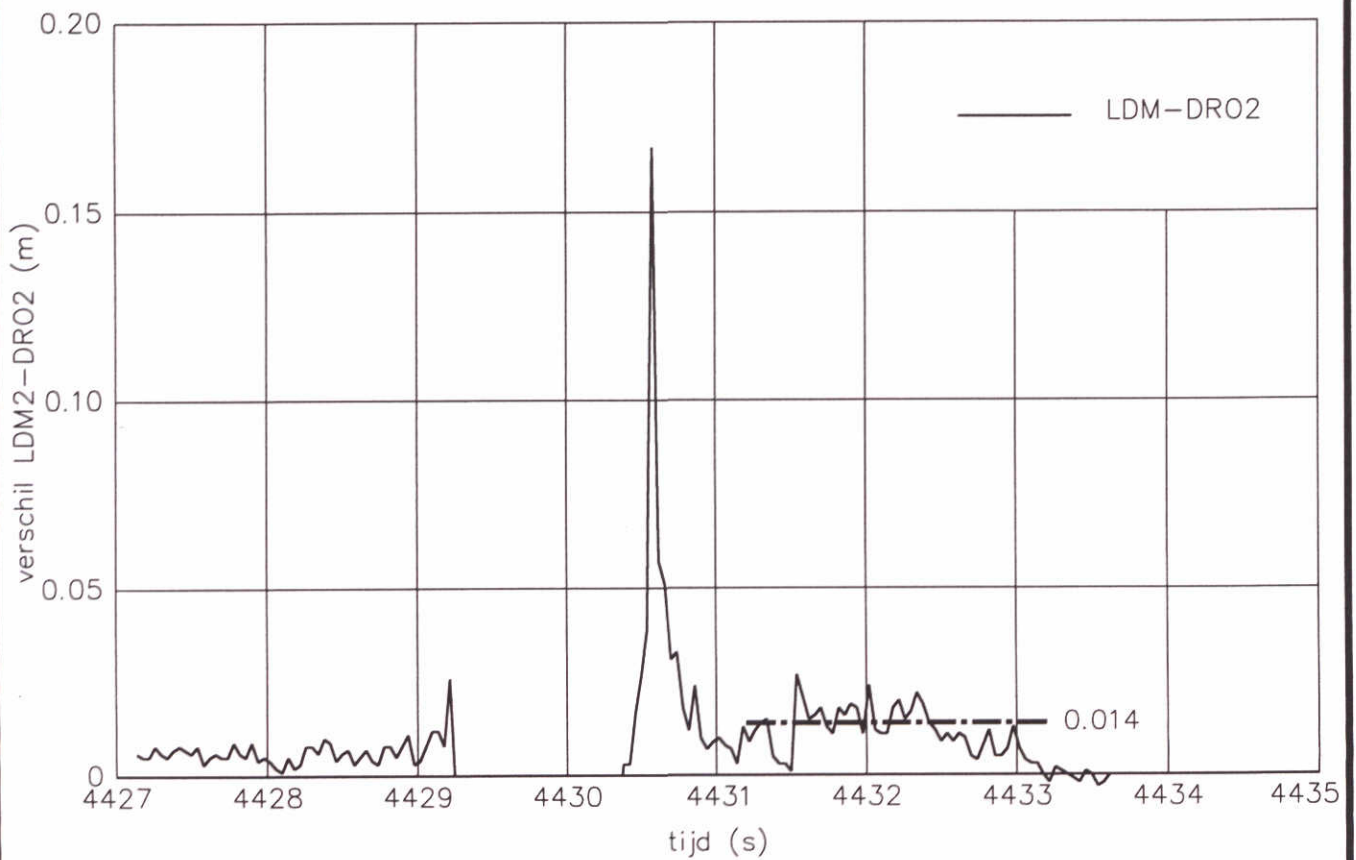
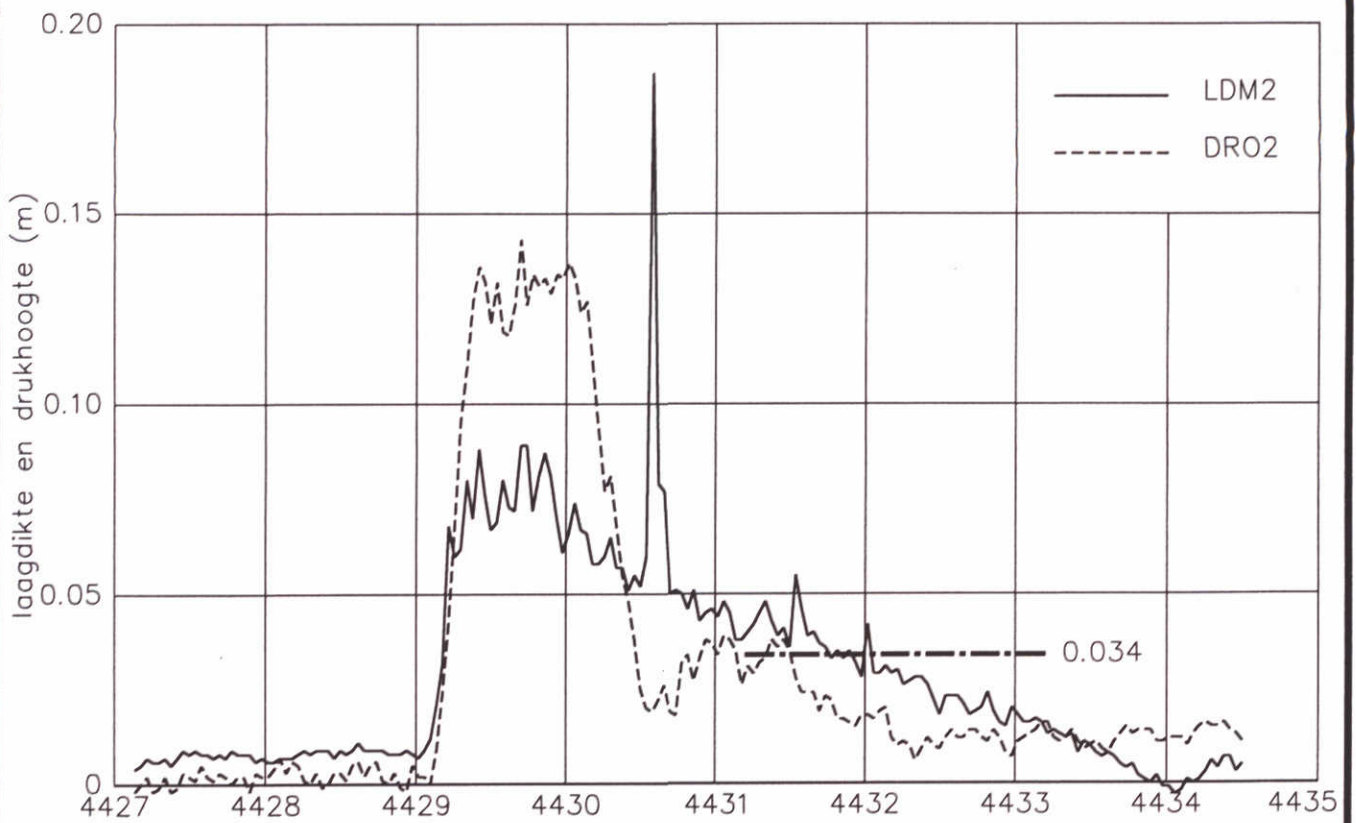
SP126





LDM 2 EN DRO 2

SP126



LAAGDIKTE-, DRUKHOOGTE- EN VERSCHIL-
REGISTRATIES

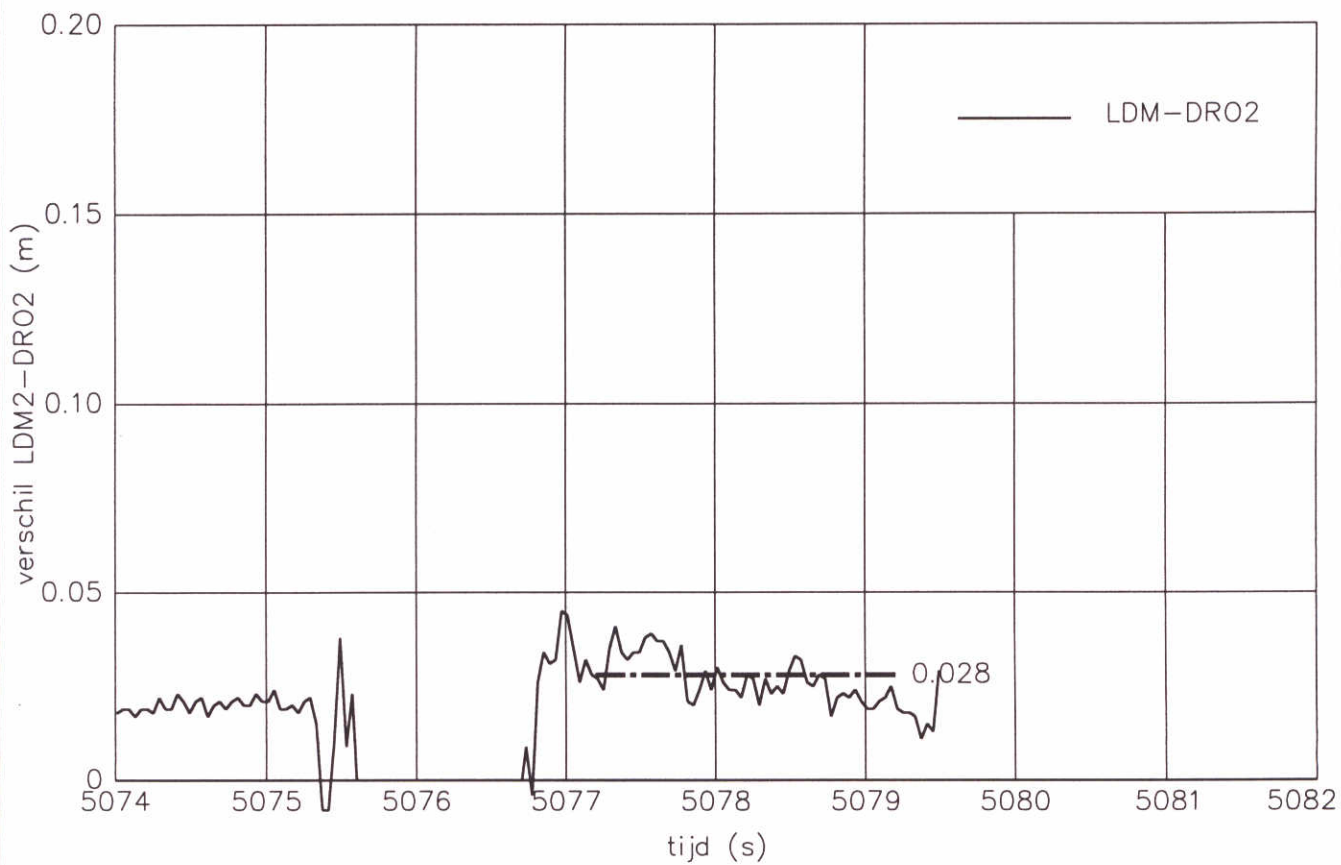
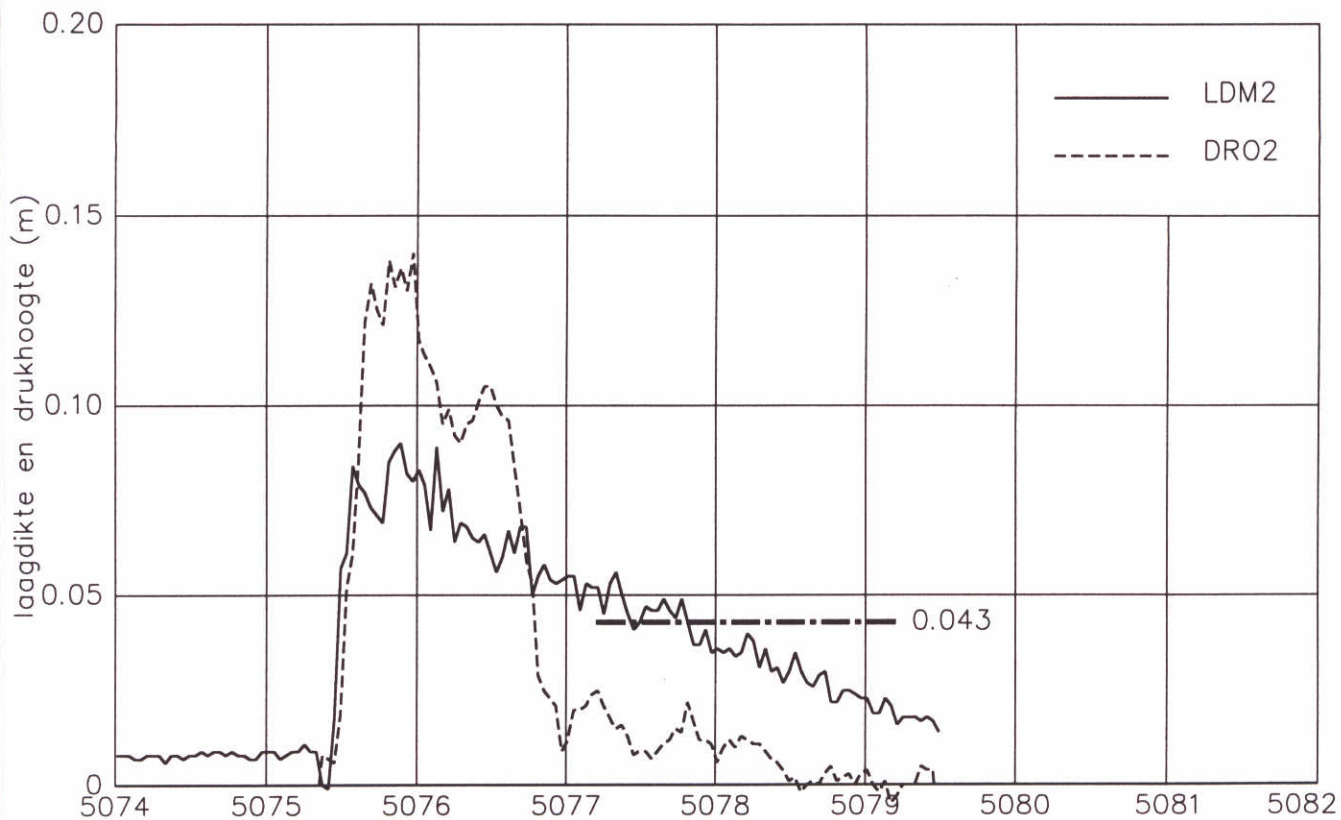
P126

GOLF 24.2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1991

FIG. 8



LAAGDIKTE-, DRUKHOOGTE- EN VERSCHIL-
REGISTRATIES

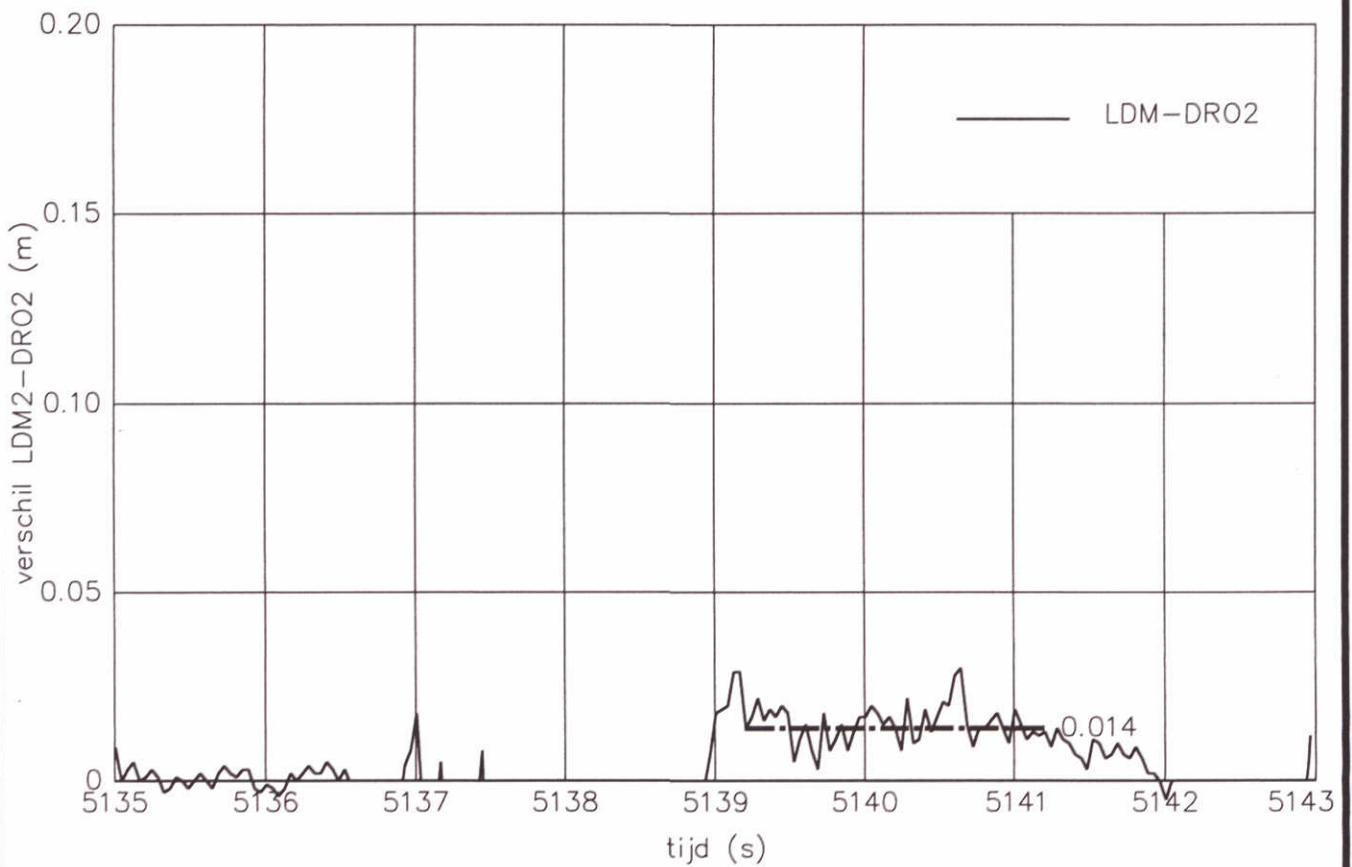
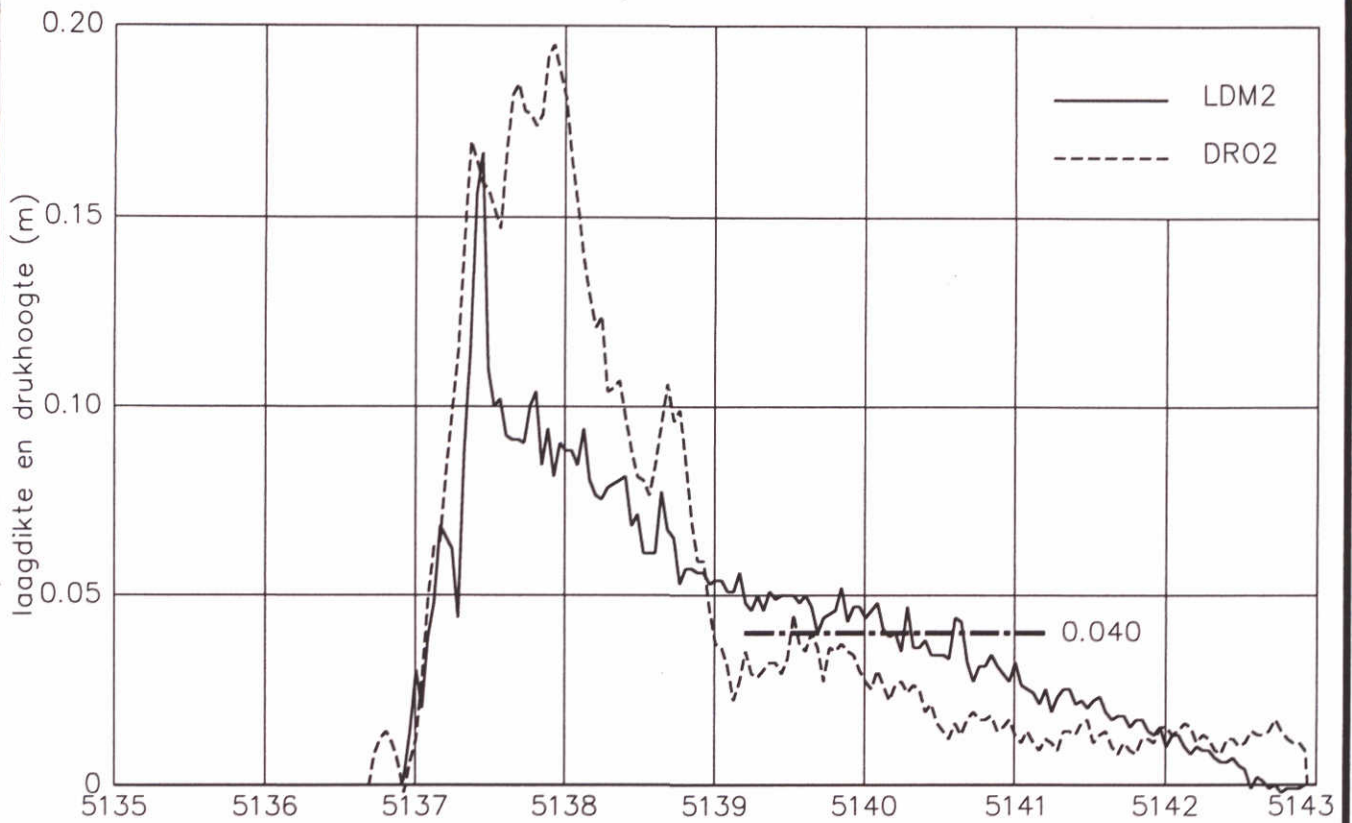
P126

GOLF 27.1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1991

FIG. 9



LAAGDIKTE-, DRUKHOOGTE- EN VERSCHIL-
REGISTRATIES

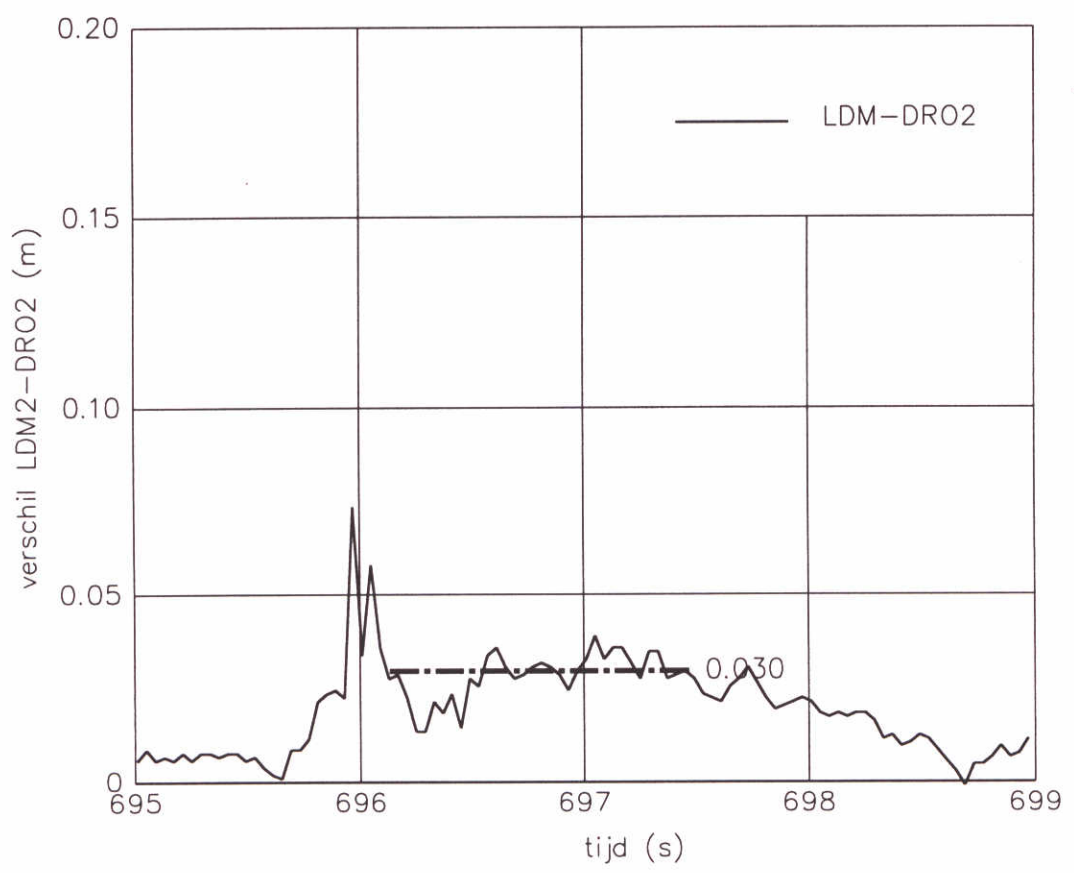
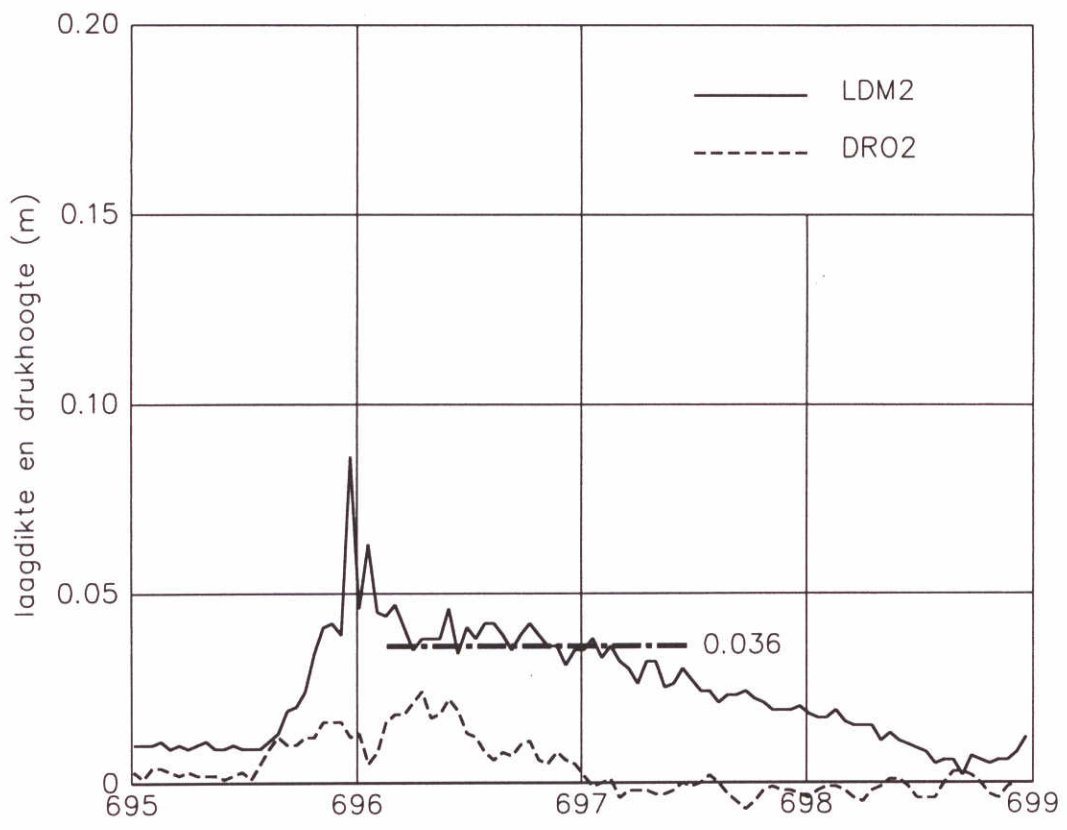
P126

GOLF 28.1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1991

FIG. 10



LAAGDIKTE-, DRUKHOOGTE- EN VERSCHIL-
REGISTRATIES

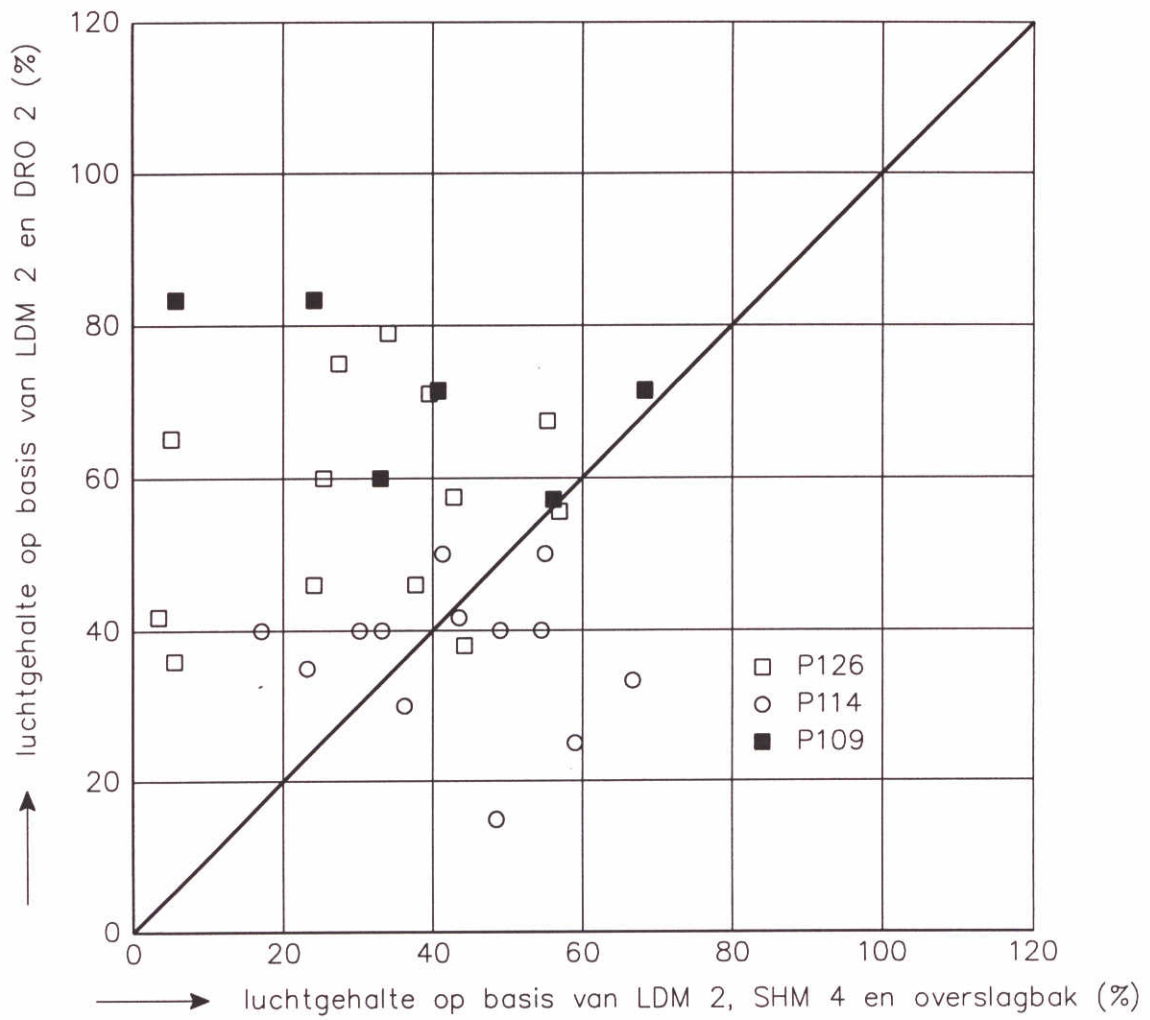
P109

GOLF 10.2

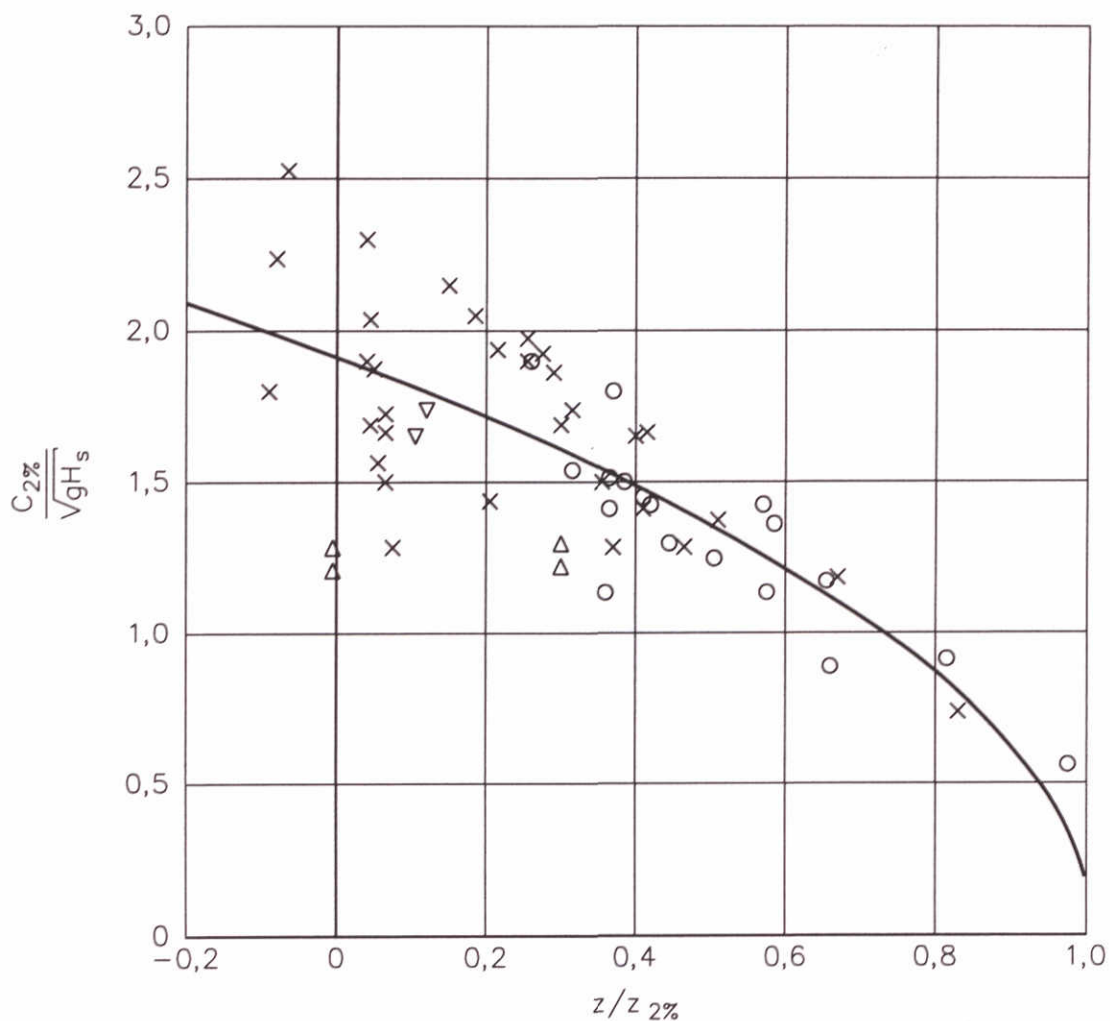
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 1991

FIG. 11

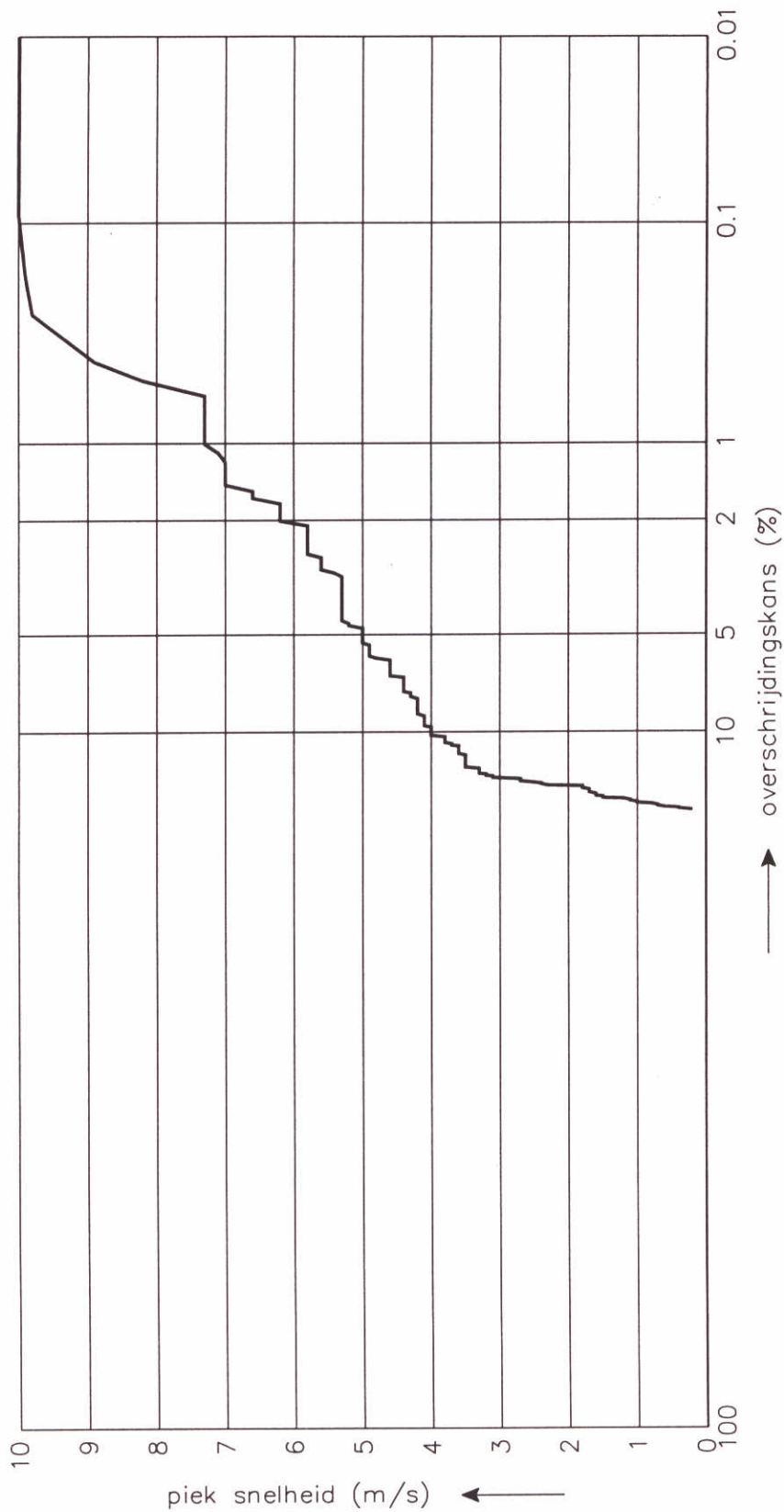


LUCHTGEHALTES



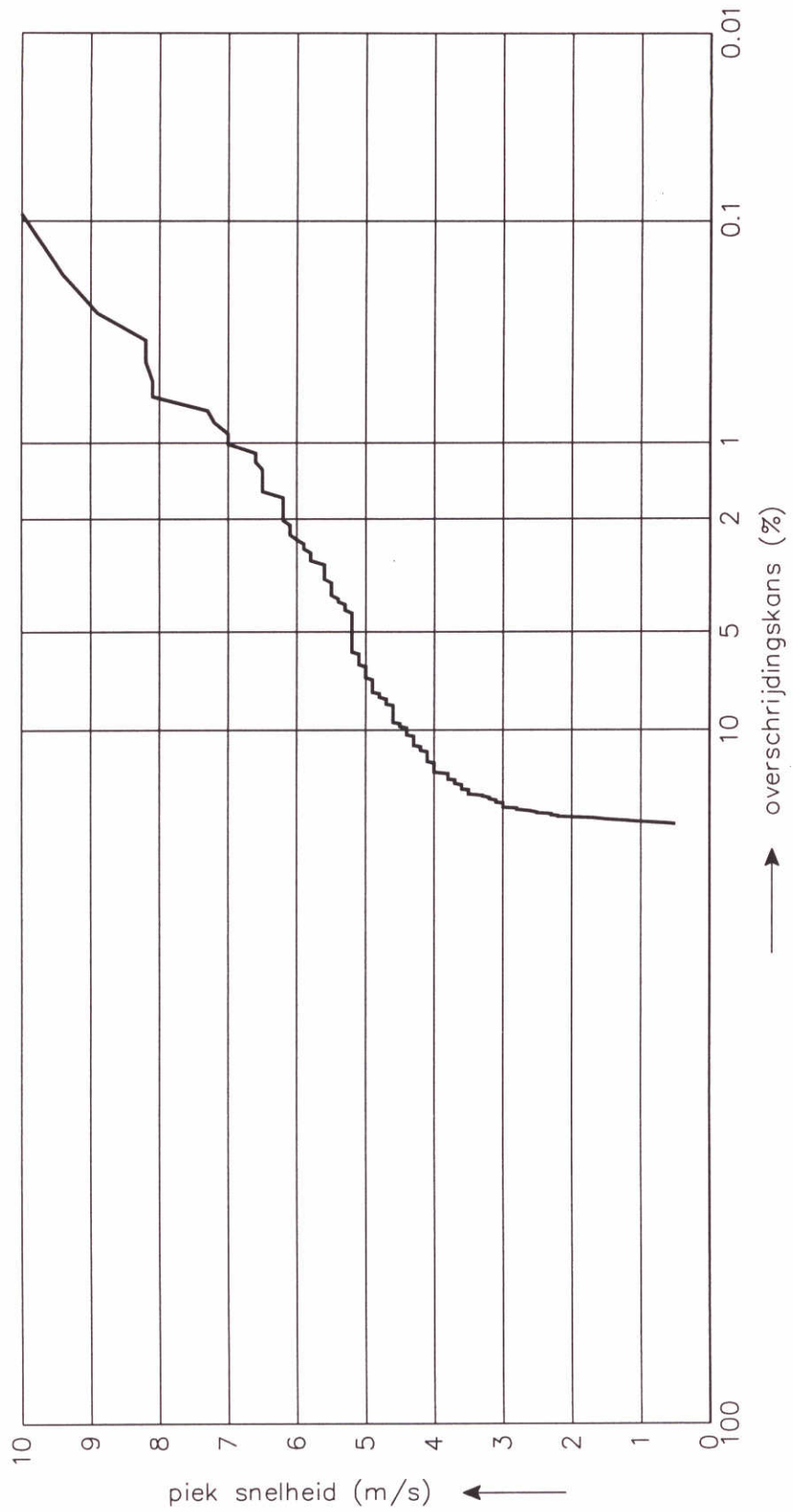
- ▽ meting SHM 4 (pieksnelheid)
 - △ meting met laagdiktemeter
 - metingen op de kruin
 - x metingen op binnentalud
- } Van der Meer '87
- formule (10)

SNELHEID OP KRUIEN EN BINNENTALUD



SHM 4 PIEK SNELHEID-OVERSCHRIJDINGSKROMME (RAYLEIGH) GERELATEERD AAN AANTAL INKOMENDE GOLVEN

P114



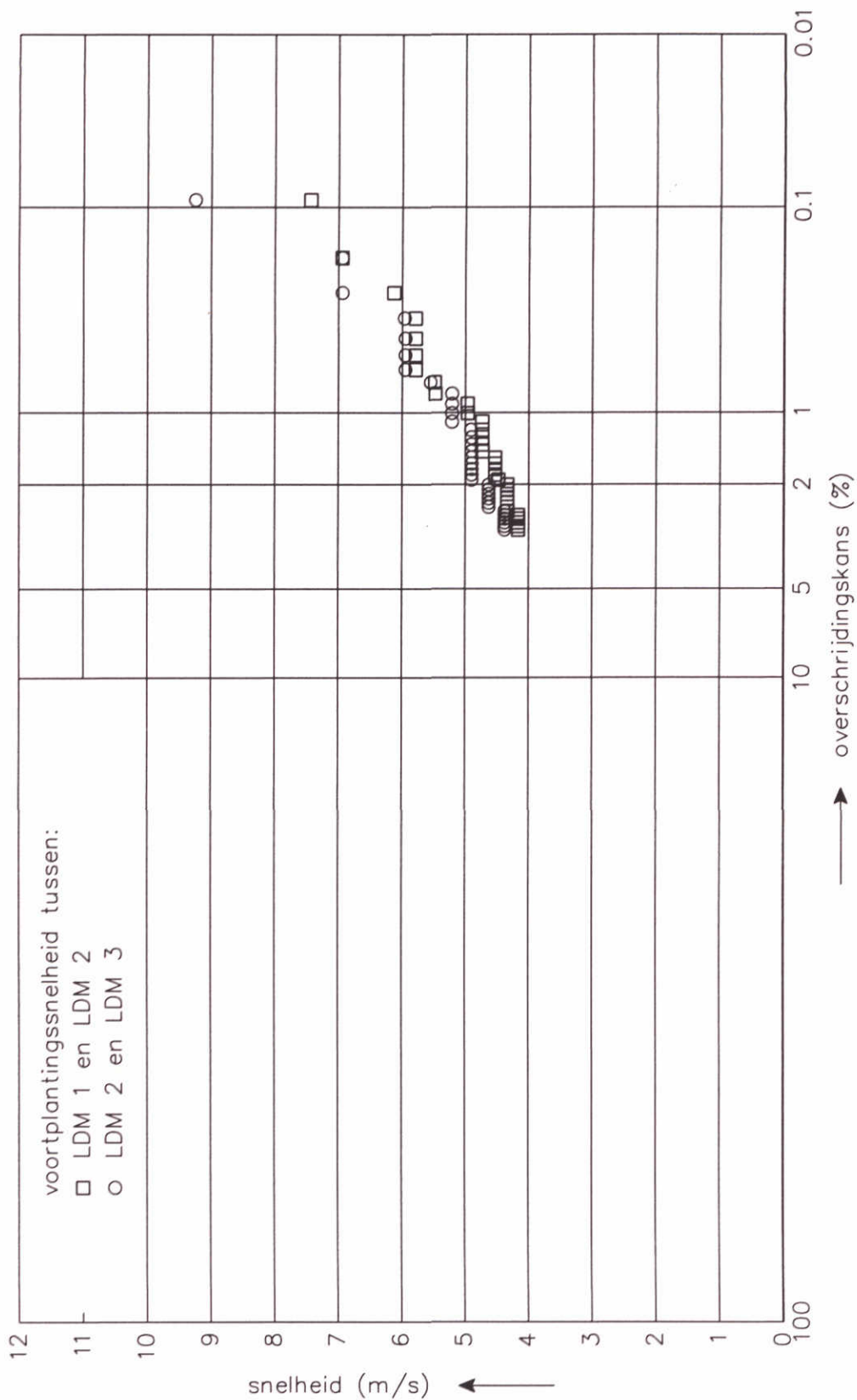
SNELHEIDS-overschrijdingskromme SHM 4

P126

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

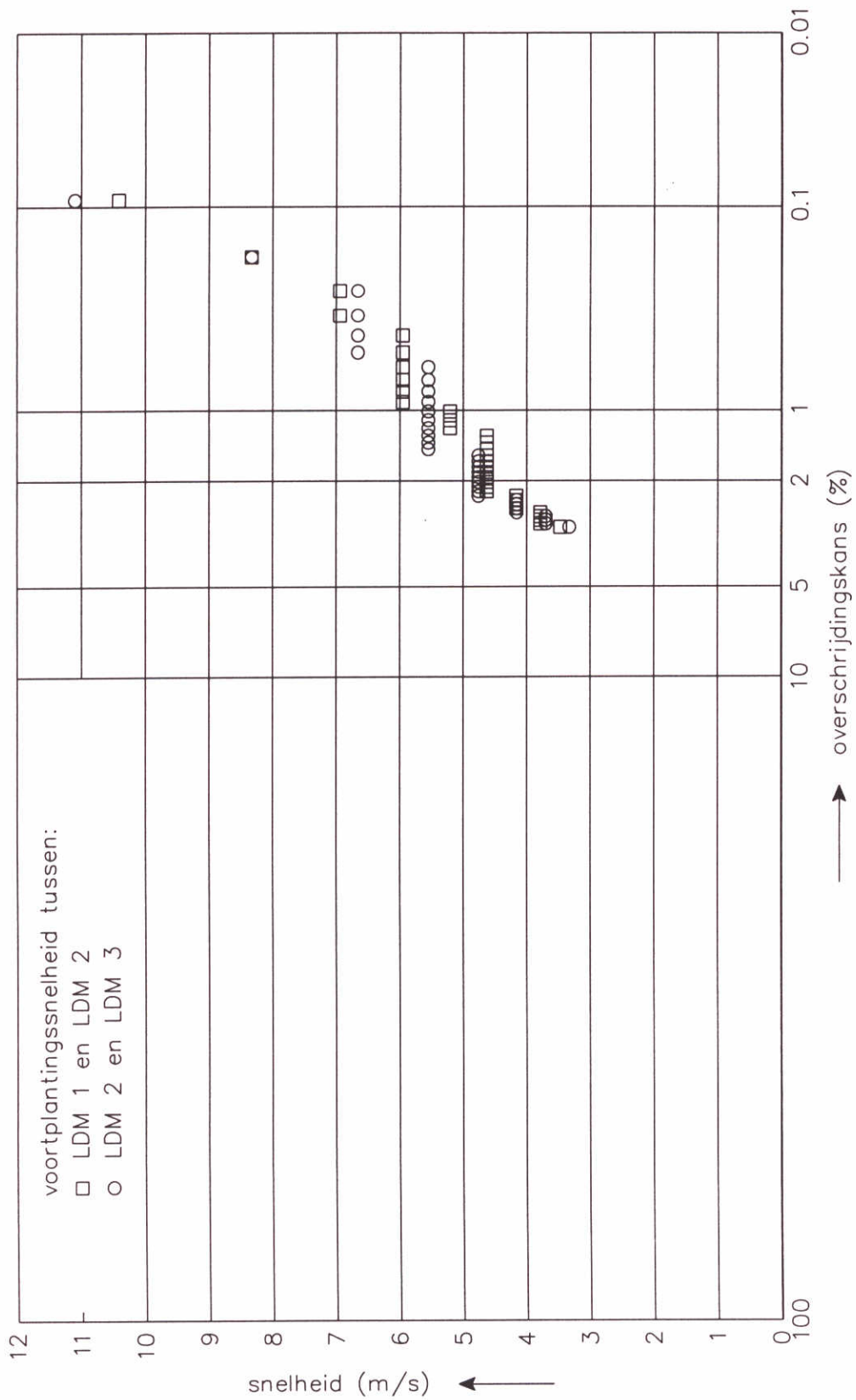
H 1991

FIG. 15



SNELHEIDS-OVERSCHRIJDINGSKROMME

P114



SNELHEIDS-OVERSCHRIJDINGSKROMME GEBASEERD OP FASEVERSCHILLEN VAN LDM 1, LDM 2 EN LDM 3

P126



locatie Delft
Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon 015 2569353
telefax 015 2619674
telex 38176 hydnl
e-mail info@wldelft.nl

locatie 'De Voorst'
Voorsterweg 28, Marknesse
postbus 152
8300 AD Emmeloord
telefoon 0527 242922
telefax 0527 243573
telex 42290 hylvo-nl
e-mail info@wldelft.nl

