



waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

stormvloedkering Oosterschelde
golfklappen op de eindkokers

AFGEHANDELD

verslag modelonderzoek

M1835

februari 1982

stormvloedkering Oosterschelde
golfklappen op de eindkokers

verslag modelonderzoek

M1835

februari 1982

INHOUD

Lijst van tabellen
Lijst van figuren
Lijst van fotobladen
Lijst van bijlagen
Lijst van symbolen

		blz.
<u>1</u>	<u>Inleiding</u>	1
1.1	Opdracht.....	1
1.2	Achtergrond.....	1
<u>2</u>	<u>Samenvatting</u>	3
<u>3</u>	<u>Doelstelling en opzet van het onderzoek</u>	5
<u>4</u>	<u>Randvoorwaarden en meetprogramma</u>	7
<u>5</u>	<u>Beschrijving van de klappen</u>	9
5.1	Theoretische modellen.....	9
5.2	Schaaleffekten.....	12
5.3	Waargenomen klaptypen.....	14
5.3.1	Benedenligger.....	14
5.3.2	Middenligger.....	15
5.4	Toegepaste schaalregels.....	16
<u>6</u>	<u>Beschrijving van de modellen en de modelopstellingen</u>	17
6.1	Model en modelopstelling in Ruimte V.....	17
6.2	Model en modelopstelling in Goot 3.....	18
<u>7</u>	<u>Wijze van meten en proefprocedure</u>	21
7.1	Metingen in Ruimte V.....	21
7.2	Metingen in Goot 3.....	22

INHOUD (vervolg)

	blz.
<u>8</u> <u>Resultaten</u>	25
8.1 Metingen in Ruimte V.....	25
8.1.1 Benedenligger.....	25
8.1.2 Middenligger.....	26
8.2 Metingen in Goot 3.....	27
8.2.1 Benedenligger (proef 199).....	27
8.2.2 Middenligger (proef 499).....	29
8.3 Opmerkingen.....	31
<u>9</u> <u>Vergelijking tussen gemeten en berekende klappen</u>	33

LITERATUUR

TABELLEN

FIGUREN

FOTO'S

BIJLAGEN

Lijst van tabellen

1. Proevenprogramma (Ruimte V)
2. Ingestelde waterstanden, schuifstanden en golfbeelden (Goot 3)
3. Golfklapdrukken en -krachten op de benedenligger (Ruimte V)
4. Golfklapdrukken en -krachten op de middenligger (Ruimte V)
5. Golfhoogten en watersnelheden, middenligger (Ruimte V)
6. Kenmerken van geanalyseerde klappen op de benedenligger, proef 199

Lijst van figuren

1. Overzicht van de Oosterscheldemond met het tracé van de stormvloedkering.
2. Perspektieftekening van de Stormvloedkering Oosterschelde.
3. Bovenaanzicht eindkoker en gedeelte van vakwerk en schaalbeplating.
(Tekening nr. A81482 van RWS Dir. Bruggen).
4. Vertikale doorsneden over de eindkoker.
(Tekening nr. A81482 van RWS Dir. Bruggen).
5. Gewenst inkomend golfspektrum op stilstaand water.
6. 95% betrouwbaarheids intervallen bij 1000, 5000 en 10000 golven.
7. Energiedichtheidsspektra van gemeten golven op stromend water.
P 199 (1/5 deel)
8. Energiedichtheidsspektra van gemeten golven op stromend water.
P499 (1/3 deel)
9. Energiedichtheidsspektra van inkomende golven op stromend water.
proeven 199 en 499
10. Energiedichtheidsspektra van inkomende golven op stilstaand water.
proeven 199 en 499, H6.
11. Statistische verdelingen van gemeten golfhoogten op stromend water.
proef 199, H1
12. Statistische verdelingen van inkomende golfhoogten op stilstaand water.
proef 199, H6
13. Niet-lineair compressiemodel volgens Ramkema [2]
14. Bovenaanzicht van de opstelling in de glazen goot van "Ruimte V"
15. Schematische doorsnede A-A, Ruimte V, situatie: meting aan benedenligger.
16. Doorsnede B-B, Ruimte V, situatie: meting aan benedenligger.
17. Schematische doorsnede A-A, Ruimte V, situatie: meting aan middenligger.
18. Doorsnede B-B, Ruimte V, situatie: meting aan benedenligger.
19. Bovenaanzicht meetkokers met plaatsing drukopnemers, Ruimte V.
20. Bovenaanzicht meetkokers met plaatsing drukopnemers, Goot 3.
21. Detaillering eindhar (benedenligger), Goot 3.
22. Overzicht van de opstelling in Goot 3.
23. Langsdoorsnede over de meetsektie, Goot 3.
24. $\bar{F}_{v \text{ o-top}}$ uitgezet tegen \bar{H}_i en $\pi \bar{H}_i / \bar{T}$, benedenligger.
25. $\frac{1}{2}(D7 + D8)$ uitgezet tegen \bar{H}_i en $\pi \bar{H}_i / \bar{T}$, benedenligger.
26. $\bar{F}_{v \text{ o-t}}(D1)$ = klapkracht op de uitkraging, uitgezet tegen \bar{H}_i , $\pi \bar{H}_i / \bar{T}$ en \bar{T} , middenligger.

Lijst van figuren (vervolg)

27. $\bar{F}_{v\ 0-t}(D1)$ = klapkracht op de uitkraging, uitgezet tegen $(\overline{dH_2/dt})_{0-t}(D_1)$ = opwaartse snelheid van het wateroppervlak, middenligger.
28. $\bar{F}_{vo-t}(D2, D3)$ = klapkracht op inwendige deel van de ligger, uitgezet tegen \bar{H}_1 , $\pi \bar{H}_1/\bar{T}$, en \bar{T} , middenligger.
29. Statistische verdeling van klapkrachten F_v , P199, benedenligger.
30. Statistische verdeling van klapdrukken, D1, P199, benedenligger.
31. Statistische verdeling van klapdrukken, D2, P199, benedenligger.
32. Statistische verdeling van klapdrukken, D3, P199, benedenligger.
33. Statistische verdeling van klapdrukken, D4, P199, benedenligger.
34. Statistische verdeling van klapdrukken, D5, P199, benedenligger.
35. Statistische verdelingen van klapdrukken op de benedenligger, P199.
36. Statistische verdeling van klapdrukken D1, P499, middenligger.
37. Statistische verdeling van klapdrukken D2, P499, middenligger.
38. Statistische verdeling van klapdrukken D3, P499, middenligger.
39. Statistische verdeling van klapdrukken D4, P499, middenligger.
40. Statistische verdeling van klapdrukken D5, P499, middenligger.
41. Statistische verdeling van klapdrukken D6, D7, P499, middenligger.
42. Statistische verdelingen van klapdrukken op middenligger, P499.
43. Enkele grote klappen D3, P199, benedenligger.
44. Voorbeeld van gelijktijdige registratie van druk- en krachtsignalen, Proef 199 klap $F_v.1$.
45. Voorbeeld van gelijktijdige registratie van druk- en krachtsignalen, Proef 199 klap D2.12.
46. Voorbeeld van gelijktijdige registratie van druk- en krachtsignalen, Proef 499 klap D1.7.
47. Voorbeeld van gelijktijdige registratie van druk- en krachtsignalen, Proef 499 klap D3.14.
48. Voorbeeld van gelijktijdige registratie van druk- en krachtsignalen, Proef 499 klap D5.7.
49. Relatie tussen klapdruk ($D2_{0-t}$, $D3_{0-t}$) en klaptijd ($t_{\frac{1}{2}}$), P199, modelwaarden.
50. Relatie tussen klapdruk ($D2_{0-t}$, $D3_{0-t}$) en klapoppervlak (A), P199, modelwaarden.
51. Relatie tussen klap-oppervlak (A) en klap-tijd ($t_{\frac{1}{2}}$), P199, modelwaarden.

Lijst van fotobladen

1. Model in Goot 3, zeezijde.
2. Detail meet-eindkoker, benedenligger.

Lijst van bijlagen

1. Berekeningen van golfklapdrukken op de eindkoker
2. Waterspiegelbewegingen in de schuifspinning.
3. Kumulatieve frekwentieverdelingen van klap-amplituden.

Lijst van symbolen

		dimensie
a	oscillatie-amplitude in de druk	kN/m^2
A	aangrijpingsoppervlak van een klap	m^2
B	dikte van de waterstraal vóór de klap	m
c	voortplantingssnelheid van een schokgolf in water	m/s
E	kompressibiliteit van lucht (index a) of water (index w)	N/m
f	frequentie	Hz
F_v	vertikale opwaartse kracht op een ligger(-onderdeel)	kN
g	versnelling van de zwaartekracht	m/s^2
H	golfhoogte	m
indices	i: inkomend s: significant	
l	lengte	m
L	afgestopte/meewerkende waterlengte	m
m	massa	kg
n	schaalgetal	-
indices	F, l, p, t, v: kracht, lengte, druk, tijd, snelheid.	
p	druk	kN/m^2
index	max: piekwaarde van de druk tijdens de klap	
t	tijd	s
indices	1/4, 1/2, 3/4: tijdsduur gedurende welke de druk groter is dan 1/4, 1/2, 3/4 * p_{max}	
T	golfperiode	s
index	z: bepaald tussen twee opgaande nuldoorgangen	
v	snelheid	m/s
index	o: op tijdstip o.	
x	coördinaat	m
y	coördinaat	m
z	coördinaat	m
α	1. hoek tussen wateroppervlak en konstruktie 2. reflektiekoefficiënt	graden -
δ	luchtlaagdikte	m
τ	stijgtijd van de klapdruk van $p=0$ tot $p=p_{\text{max}}$	s

indices: o-t: nul-top waarde

t-d: top-dalwaarde

1 Inleiding

1.1 Opdracht

In zijn brief nr. WT.11-145 van 9 oktober 1981 heeft Rijkswaterstaat, Deltadienst, Hoofdafdeling W.T. opdracht verleend tot het uitvoeren van modelonderzoek naar golfklappen op horizontale plaatdelen van de eindkokers van de hefschuyen van de Stormvloedkering Oosterschelde. Het onderzoek heeft plaatsgevonden onder begeleiding van de Werkgroep H.O.S. (Hydraulisch Onderzoek Sleufmiddelen) waarin vertegenwoordigers zitting hebben van de Deltadienst, Directie Bruggen, Directie Sluizen en Stuwen en het Waterloopkundig Laboratorium.

Het onderzoek omvat twee meetseries, een oriënterende serie die is uitgevoerd in "Ruimte V" van het Windgolfgotengebouw en een kwantificerende serie die is uitgevoerd in Goot 3 van het Gotenlaboratorium, beide in Delft. Beide meetseries hebben plaatsgevonden op schaal $n_1 = 40$.

Het onderzoek is verricht onder de dagelijkse leiding van ir. R.M. Korthof die ook dit verslag heeft geschreven.

1.2 Achtergrond

De stalen hefschuyen van de Stormvloedkering bestaan uit een kerende schaalbeplating, gesteund door vakwerkliggers die zijn opgebouwd uit ronde buisprofielen. De liggers dragen de belastingen van de schaalbeplating over op de pijlers via overgangskonstrukties, die naar plaats en vormgeving worden aangeduid als eindkokers (zie fig. 2). Dit zijn rechthoekige, vertikaal opgestelde stalen dozen met een horizontale doorsnede van ongeveer $4 \times 4,5 \text{ m}^2$.

Aan één van de vier vertikale wanden zijn de hoofdstaven van de vakwerkliggers bevestigd. De overige drie wanden zijn voorzien van aanslagen, die de belastingen overdragen op de pijlersponning. Ter hoogte van elke vakwerkligger is de eindkoker inwendig voorzien van een horizontale ligger met een "mangat" van ongeveer 2 m^2 . Uitwendig wordt deze ligger voortgezet als uitkraging naar de buitenste vakwerkstaaf. Zie fig. 1 t/m 4.

Aangezien de steunkonstruktie van de schuif aan de zeezijde is aangebracht, worden zowel het vakwerk als de eindkokers direkt belast door golven en stroom. Bij gesloten schuif blijven deze onderdelen geheel ondergedompeld, zodat uitsluitend kwasistatische belastingen optreden. Bij geheel of gedeeltelijk geopende schuif kunnen echter ook dynamische belastingen optreden tengevolge van golfklappen. Golfklapbelastingen op het vakwerk worden beschreven in [1]. Golfklapbelastingen op de eindkoker zijn het onderwerp van het onderhavige verslag.

Op de onderste ligger van de eindkoker, die eigenlijk de bodem van de koker vormt, en op de onderste uitkraging, zullen de zwaarste klapbelastingen optreden als de schuif geheel geopend is en de zeewaterstand zich bevindt ter hoogte van het hart van de ligger, dat dan gelegen is op NAP +2,90 m. In het beheer van de kering is een dergelijke situatie heel wel mogelijk. Tijdens het sluiten passeert elke ligger op één of ander niveau de stilwaterstand aan de zeezijde. Ook dan bestaat gedurende enige tijd gevaar voor golfklappen op de liggers. Dit geldt niet alleen voor de uitkragingen, maar ook voor de inwendige liggers, omdat in de kokers waterspiegelbewegingen mogelijk zijn door de aanwezigheid van de "mangaten".

Aanvankelijk zijn de klapbelastingen geschat met benaderende berekeningen (Bijlage 1). De rekenresultaten zijn evenwel sterk afhankelijk van de aannamen met betrekking tot luchtinsluitingen. Bij de in de berekeningen gehanteerde hydraulische randvoorwaarden, die overigens nog tamelijk frekwent voorkomen, geven de hoogste schattingen zeer aanzienlijke belastingen. Helaas moet worden gekonstateerd dat de aannamen die aan de hoogste schattingen ten grondslag liggen, niet minder realistisch zijn dan die welke tot de lagere schattingen leiden.

Het gebruik van de hoge schattingen voor het ontwerpen van de kokers leidt tot grote plaatdikten. Aangezien betere schattingen met behulp van berekeningen niet kunnen worden verkregen, heeft de Werkgroep H.O.S. een hydraulisch schaalonderzoek noodzakelijk geacht.

2 Samenvatting

De horizontale liggers van de eindkokers van de vakwerkschuif kunnen bij geheel of gedeeltelijk geopende schuif dynamisch belast worden door golfklappen. Berekeningen (bijlage 1) gaven aan, dat de klapbelastingen hoog kunnen oplopen. Betrouwbare berekeningen zijn voor deze problematiek niet mogelijk. De uit de berekening volgende klapbelastingen zouden evenwel maatgevend zijn voor de dimensionering. Hoewel hydraulisch schaalonderzoek naar golfklappen in het algemeen tengevolge van schaal effecten resulteert in enigszins conservatieve prototype-waarden, werd toch verwacht dat met behulp van modelonderzoek de belastingen scherper gesteld konden worden. Hoofdstuk 9 geeft aan dat deze verwachting is uitgekomen.

Het onderzoek is uitgevoerd voor waterstanden en golfomstandigheden die een aanzienlijke (naar verwachting de grootste) bijdrage leveren aan de overschrijdingskans van de ontwerpbelastingen:

zeewaterstand NAP +2,9 m

belaste ligger van de eindkoker op NAP +2,9 m

$H_S = 3,0$ m, $\bar{T}_Z = 5,4$ s (gevraagd was $\bar{T}_Z = 5,1$ s) .

De metingen hebben betrekking op de beneden- en de middenligger van een schuif met kerende hoogte van 11,9 m.

Vóór de aanvang van het onderzoek was niet te voorzien welke verschijnselen bij de klappen op de liggers het belangrijkste zijn. Teneinde dit te kunnen beoordelen is naast informatie over optredende drukken en krachten ook visuele informatie nodig. Eisen ten aanzien van filmen en nauwkeurig meten blijken echter strijdig te zijn, en daarom is het onderzoek opgedeeld in een oriënterende fase, waarin visuele waarnemingen zijn verricht, ondersteund met druk- en krachtmetingen, en een definitieve fase waarin zo nauwkeurig mogelijk is gemeten. Voor deel I zijn de metingen uitgevoerd in Ruimte V van het Windgolfgebouw, voor deel II in Goot 3 van het Golenlaboratorium, beide in Delft. De modelschaal was: $n_1 = 40$.

Bij de optredende klappen is stromingsdruk ($n * \frac{1}{2} \rho v^2$, geventileerde klappen) in het algemeen het belangrijkste verschijnsel. Als gevolg van trillingen van ingesloten luchtpakketten komen in het verloop van de druk oscillaties meestal wel voor, maar zij spelen niet de belangrijkste rol.

Voor deze twee verschijnselen zijn twee verschillende schaalregels toegepast:

Froude voor stromingsdruk, en het niet-lineaire compressiemodel voor luchtos-
cillaties.

Deze werkwijze vereist een gedetailleerde beschouwing van de klapregistraties;
daarom is deze gedifferentieerde schaling slechts voor een beperkt aantal
klappen uitgevoerd.

De methode van meten - een combinatie van drukopnemers en totaalkrachttopnemers
met hoge eigen frekwentie - maakt het mogelijk om zeer lokale klappen, die
ondanks hoge druk niet van belang zijn voor een plaatveld, te onderscheiden
van klappen met groot aangrijpingsoppervlak. De lokale klappen, voorzover ze
de statistische verdelingen van klapdrukken sterk zouden beïnvloeden, zijn
weggelaten.

De meetresultaten zijn gepresenteerd in de vorm van statistische verdelingen
van klapdrukken (fig. 30 - 42).

Enkele resultaten worden hieronder weergegeven:

Gemeten en berekende klappen kN/m ²	Berekende 1,5%-waarde	Gemeten 1,5%-waarde	Berekende 0,1%-waarde	Gemeten 0,1%-waarde
middenligger inwendig	170	45 - 70	-	60 - 130
Middenligger uitkraging	400	240	-	350
Benedenligger 1.gemidd.over het opp.	-	60*	280	100*
2.lokaal	-	150 - 200		250 -

* berekend als $F_v/\text{oppervlak}$

3 Doelstelling en opzet van het onderzoek

Het doel van dit onderzoek is het verkrijgen van ontwerpgegevens met betrekking tot golfklapbelastingen op het plaatwerk van de eindkokers. Het gaat daarbij in de eerste plaats om de horizontale liggers en uitkragingen.

Uit de berekeningen van golfklapbelastingen (Bijlage 1) blijkt dat de verwachte drukken sterk afhankelijk zijn van de aanwezigheid en de eventuele dikte van luchtinsluitingen tussen het wateroppervlak en de belaste onderdelen. Ook bij de interpretatie van in het model gemeten golfklapdrukken nemen de luchtinsluitingen een centrale plaats in [2], omdat voor het dynamische gedrag ervan niet dezelfde schaalregels gelden als voor andere stromings- en golfverschijnselen in water. Het is derhalve van groot belang om gegevens te verkrijgen over mogelijke luchtinsluitingen.

Omdat de eventuele vorming van luchtinsluitingen, evenals overigens het gehele golfklapproces zich in zeer korte tijd voltrekt, zijn high-speed filmopnamen onontbeerlijk voor een goede waarneming. Dit impliceert dat de door golfklappen belaste onderdelen in het model goed zichtbaar moeten zijn, en dat de opstelling optimaal toegankelijk dient te zijn voor licht en filmcamera. Slechts tegen relatief hoge kosten kunnen deze vereisten worden gerealiseerd in een modelfaciliteit met voldoende afmetingen en uitrusting voor hoogwaardige metingen, nodig voor het verkrijgen van ontwerpgegevens.

Aanvankelijk was in het onderzoeksprogramma een aantal proeven opgenomen waarin het effect van maatregelen ter reductie van golfklapbelastingen zou worden nagegaan. Voor deze proeven moet het model enkele malen worden aangepast. Het efficiënt uitvoeren van deze oriënterende proeven en de noodzakelijke modelaanpassingen vereist een gemakkelijk hanteerbaar en goed toegankelijk model.

Op grond van deze overwegingen is het onderzoek opgedeeld in een oriënterende fase, waarin de meetopstelling is afgestemd op het maken van high-speed filmopnamen en het gemakkelijk wijzigen van het model, en een kwantificerende fase, waarin voldaan werd aan hoge eisen met betrekking tot meetnauwkeurigheid en verwezenlijking van waterstanden en golfomstandigheden.

De doelen die met de oriënterende fase, in het vervolg aangeduid als deel 1, worden beoogd, zijn:

- Fenomenologisch inzicht. De metingen dienen inzicht te geven in de waterbewegingen die voorafgaan aan de golfklappen, en in de mogelijke vorming van luchtinsluitingen.
- Vergelijking tussen het oorspronkelijke ontwerp en enkele varianten die zijn uitgerust met golfklap-beperkende maatregelen. Dit doel is na afloop van de serie metingen aan het oorspronkelijke ontwerp komen te vervallen, omdat op basis van de toen verkregen resultaten is besloten om golfklap-beperkende maatregelen niet te testen.

Met de kwantificerende fase, verder aangeduid als deel 2, worden de volgende doelen beoogd:

- het bepalen van golfklapbelastingen op de horizontale liggers bij een combinatie van waterstanden en golfomstandigheden, die naar verwachting de grootste bijdrage levert aan de overschrijdingskans van de uiteindelijke ontwerpbelasting.
- Toetsing van de verwachting (zie Bijlage 1) dat de statistische verdelingen van de golfklapdrukken logaritmisch zullen zijn.

In beginsel geldt het bovenstaande voor alle liggers van alle eindkokers van de S.V.K.O.. Om redenen van tijd en kosten zijn slechts twee liggers met bijbehorende uitkraging beproefd.

In overleg met de Deltadienst zijn hiervoor gekozen:

de benedenligger (tevens onderzijde) en de middenligger van een drieregelige schuif met een kerende beplatingshoogte van 11,9 m.

4 Randvoorwaarden en meetprogramma

Op basis van voorlopige berekeningen, uitgevoerd door de Deltadienst, is de verwachting geuit dat de grootste bijdrage aan de overschrijdingskans van de uiteindelijke ontwerpbelasting van de benedenligger zal worden geleverd door situaties met een zeewaterstand van NAP +2,90 m en geopende schuif. Het hart van de benedenligger is dan eveneens gelegen op NAP +2,90 m. Voor de middenligger wordt de grootste bijdrage geleverd door een iets hogere zeewaterstand, maar om redenen van efficiëntie van de metingen is voor deze ligger dezelfde waterstand gekozen.

De vervallen zijn ten dele gekozen op basis van de kansberekeningen, en ten dele vanuit de overweging dat klapbelastingen tengevolge van stroomrefractie nabij de kering naar verwachting zullen afnemen met toenemend verval en overigens gelijke omstandigheden op enige afstand voor de kering.

Voor de metingen aan de benedenligger is een verval gekozen van 0,5 m; voor de middenligger: 1,0 m. Deze vervallen zijn uitsluitend in goot 3 toegepast, (deel 2) omdat Ruimte V (deel 1) onvoldoende rondpompcapaciteit biedt.

N.B. Bij de metingen van deel 2 is de waterstand aan de zeezijde op NAP +2,90 m gebracht ter plaatse van de uitkraging van de beschouwde ligger. Tengevolge van de door het verval ontstane stroming bedraagt de zeewaterstand ver voor de kering bij de meting aan de benedenligger (geheel geopende schuif) NAP +3,02 m, en bij de meting aan de middenligger (gedeeltelijk geopende schuif) NAP +2,95 m.

De Randvoorwaardennota [3] geeft voor de gekozen zeewaterstand H_s -waarden variërend tussen 2,3 en 3,0 m. De grootste energiedichtheden liggen tussen 0,06 en 0,3 Hz.

De metingen van deel 1 zijn uitgevoerd met regelmatige golven. Teneinde de gevoeligheid van de waterbewegingen, luchtbelinsluitingen en klapbelastingen voor variatie in golfomstandigheden af te tasten, is een tamelijk groot aantal korte proeven verricht, waarbij met steeds maximale golfhoogte de periode is gevarieerd. Bij korte perioden wordt de golfhoogte begrensd door de maximaal haalbare golfsteilheid (in model ongeveer 1/10). Bij langere golfperioden wordt de golfhoogte door het "vrijboord" van de goot beperkt tot ongeveer 5 m.

Het proevenprogramma van deel 1 is weergegeven in tabel 1. Hierin is tevens aangegeven van welke metingen high-speed filmopnamen zijn gemaakt.

Het programma van deel 2 bestaat uit 2 lange metingen. Voor beide metingen is een golfspektrum aangehouden, dat bij zeewaterstand NAP +3,0 m en windsnelheid = 35 m/s (extreem spektrum) is gegeven in de Randvoorwaardennota [3]. Dit spektrum dat is weergegeven in fig. 5, is opgevat als het gewenste inkomende golfspektrum op stilstaand water.

De metingen hebben een registratieduur van $10^4 * \bar{T}_z$; dit komt overeen met ruim 16 uur in het prototype. Deze ongebruikelijk grote lengte is gekozen op grond van overwegingen met betrekking tot statistische betrouwbaarheid van de gemeten verdeling van golfklapbelastingen.

Om twee redenen worden aan de statistische betrouwbaarheid hoge eisen gesteld:

- Eén van de doelen van de metingen is het toetsen van de verwachte (logaritmische) verdelingen van klapdrukken van de gemeten verdelingen.
- De omstandigheden die naar verwachting de grootste bijdrage leveren aan de overschrijdingskans van de ontwerpbelastingen, die gesteld wordt op $2,5 * 10^{-4}$ per jaar (deze omstandigheden zijn ingesteld bij de metingen), komen nog tamelijk frekvent voor, zodat het noodzakelijk is om de verdelingen tot zeer geringe overschrijdingspercentages (orde 10^{-6}) te extrapoleren.

Voor een proefduur van 1000, 5000 en 10.000 golven zijn de 95%-betrouwbaarheidsintervallen berekend volgens de methode, gepresenteerd in het WL-speurwerkverslag: Risisco-analyse [4]. De intervallen zijn weergegeven in fig. 6. Uit de figuur blijkt, dat bij de frekventies waarvoor vergelijking tussen een meting met 1000 en één met 10.000 golven mogelijk is, de statistische betrouwbaarheid van de langere meting ongeveer een faktor 3 beter is.

De tijdens de metingen van deel 2 ingestelde waterstanden, schuifstanden en golfbeelden zijn gepresenteerd in tabel 2 en fig. 7 t/m 12.

5 Beschrijving van de klappen

5.1 Theoretische modellen

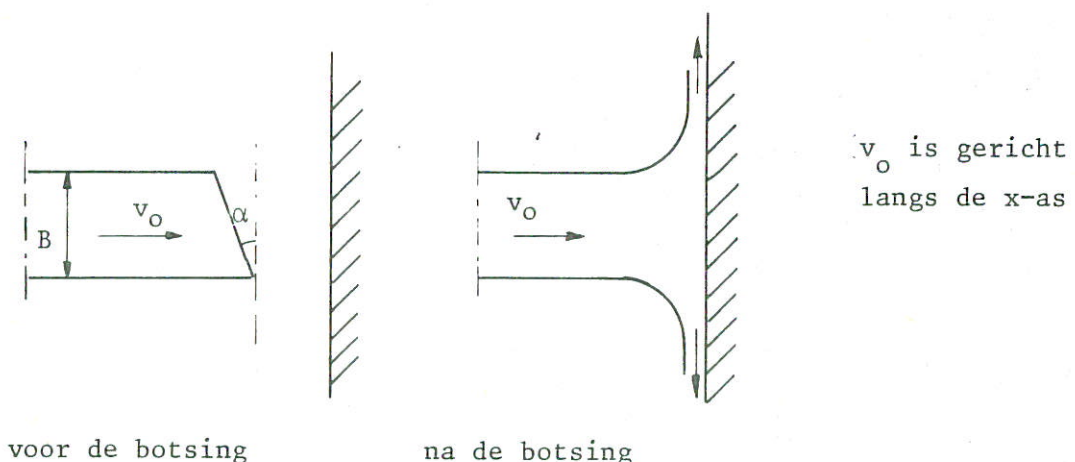
Als een massa water met een snelheid v een vaste wand treft, ontstaat een snel oplopende druk, omdat het water in korte tijd moet worden afgeremd. Bij gelijke impuls van het water loopt de druk uiteraard hoger op naarmate de "rem-tijd" korter is.

Naar de verschijnselen die hierbij een rol spelen, onderscheidt Lundgren [5] een drietal klaptypen.

1. Geventileerde golfklappen (slamming). Bij dit type golfklap wordt de lucht, die oorspronkelijk aanwezig was tussen het water en de konstruktie, verdrongen, zonder dat belangrijke hoeveelheden lucht door het water worden ingesloten.

In het onderstaande wordt dit type klap nader beschouwd. Deze beschouwing is overgenomen van Kolkman [8].

De situatie wordt geschematiseerd volgens deze figuur:



De waterdrukken worden volgens de Navier-Stokes-vergelijkingen veroorzaakt door twee termen (vloeistof niet samendrukbaar, en zwaartekracht buiten beschouwing gelaten):

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \frac{\partial v}{\partial t}, \text{ en} \quad 1)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho v_x \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v_y \frac{\partial v}{\partial y} + \rho v_z \frac{\partial v}{\partial z} \quad 2)$$

Na de botsing geldt op grond van 2): $p = \frac{1}{2} \rho v_0^2$, als we permanente stroming veronderstellen en invoeren: $v_y = v_z = 0$.

Tijdens de botsing kan 1) ook worden geformuleerd als:

$$\text{kracht} = \int^B p \, dy = -\rho L B \frac{\partial v}{\partial t} \quad 3)$$

waarbij L ontstaat door integratie in x-richting. Dit wordt volledig gepresenteerd in [9]. Hieruit blijkt ook dat $L \approx 0,27 B$.

Als nu $\frac{\partial v}{\partial t}$ wordt vervangen door $\frac{\Delta v}{\Delta t}$, met $\Delta v = v_0$ en Δt is gelijk aan de tijd om v_0 af te stoppen tot 0 dan wordt gevonden:

$$\bar{p} = -0,27 \rho B \frac{v_0}{\Delta t} \quad (\bar{p} \text{ konstant over de botstijd}) \quad 4)$$

In de figuur van pag. 14 mag ervan worden uitgegaan dat $\Delta t \approx B(\tan \alpha)/v_0$, zodat volgt:

$$\bar{p} = -0,27 \rho \frac{v_0^2}{B \tan \alpha} = -0,27 \rho \frac{v_0^2}{\tan \alpha} = n^* \frac{1}{2} \rho v_0^2 \quad 5)$$

Om reden van deze uitkomst wordt deze benadering aangeduid als het stromingsdrukmodel.

Chuang [6] heeft dit geverifieerd met metingen en kwam tot de konklusie dat deze benadering goed opgaat als $\alpha > 6^\circ$. Bij kleinere hoeken kan niet alle lucht meer ontsnappen, zodat dan niet meer sprake is van geventileerde golfklappen. In de beschrijving van de maximale druk volgens $p_{\max} :: \rho v^{\text{exp}}$ leidt dit tot een exponent die in grootte varieert tussen 1 en 2.

Op grond van het bovenstaande kan worden gekonkludeerd dat voor geventileerde golfklappen de schaalregels volgens Froude moeten worden toegepast: $n_p = n_1$.

2. De waterschok. Als in de beschouwing over de geventileerde golfklappen $\alpha = 0$, zou de stijgtijd nul worden en de maximumdruk oneindig. Indien dan de veronderstelling dat geen lucht wordt ingesloten, wordt gehandhaafd, wordt de drukopbouw bepaald door kompressibiliteit van water (De wand wordt volledig star verondersteld). In 1929 heeft Von Kármán al afgeleid dat hierbij geldt:

$$p_{\max} = \rho v_0 c, \text{ met } c = \text{geluidssnelheid in water} \quad 6)$$

Zie ook [8].

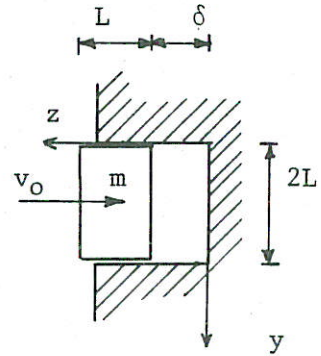
Deze waarde moet gezien worden als een bovengrens van de mogelijke klapdrukken, omdat reducerende verschijnselen, zoals zijdelingse afstroming en aanwezigheid van een relatief zachte luchtlaag tussen water en konstruktie, zijn weggelaten. Het moet onmogelijk worden geacht dat de waterschok zich over grote oppervlakken tegelijkertijd zou voordoen, omdat dan altijd lucht wordt ingesloten, die door de zeer veel kleinere kompressibiliteit of elasticiteit ($\frac{E_{\text{water}}}{E_{\text{atm.-lucht}}} = 15000$) de druk aanzienlijk zal reduceren. Dit is in overeenstemming met waarnemingen van o.a. Chuang [6] en Führböter [7].

Als voor prototype en model dezelfde waarden van ρ en c worden aangehouden, geldt voor waterschokken: $n_p = n_v = \sqrt{n_1}$. De hoeveelheid lucht die op het moment van de klap in het water nabij de konstruktie aanwezig is, heeft grote invloed op de waarde van c en daarmee op de waarde van p_{\max} . In het algemeen bevat het water in het prototype meer lucht dan in het model, zodat $c_{\text{proto}} < c_{\text{model}}$ [5].

3. Compressieklappen. Indien tengevolge van de geometrie van de watermassa en de konstruktie de lucht niet kan worden verdrongen, blijft een luchtinsluiting aanwezig tussen de konstruktie en het water. Deze kan worden opgevat als een veer die wordt ingedrukt tijdens het afremmen van de watermassa.

Een model voor de benadering van de maximum druk is in 1939 opgesteld door Bagnold. Hij schematiseerde de situatie tot een zuiger, die de meewerkende watermassa m voorstelt, en die met aanvangssnelheid v_0 een met lucht gevulde, afgesloten cylinder, die een weergave is van de luchtinsluiting, indrukt.

Dit zuigermodel is uitgangspunt geweest voor vele onderzoekers, onder andere voor Ramkema [2] en Lundgren [5].



Hieronder wordt een eenvoudig geval beschouwd.

Indien de indrukkingen klein zijn ten opzichte van δ kan de luchtveer als lineair worden beschouwd. Er wordt nu verondersteld dat de toestandsveranderingen isotherm zijn en dat de vloeistof zich incompressibel gedraagt. De benadering is ééndimensionaal. De bewegingsvergelijking van m luidt nu:

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = p \cdot 2L - p_0 \cdot 2L \quad 7)$$

De oplossing is een sinusvormige beweging, met een sinusvormig drukverloop. Als de meewerkende massa m wordt gesteld op $2\rho L^2$, kan worden afgeleid:

$$p_{\max} = p_0 \left(1 + \sqrt{\frac{\rho v_0^2 L}{\delta p_0}} \right) \quad 8)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{p_0}{\delta L \rho}} \quad 9)$$

Indien de luchtinsluitingen in model en prototype geometrisch gelijkvormig zijn volgens n_1 , leidt dit tot de konklusie:

$$n_p = \sqrt{n_1}, \quad n_f = n_1$$

Ramkema [2] heeft een versie gepresenteerd van een compressiemodel, waarmee rekening wordt gehouden met compressibiliteit van water en met het niet-lineaire gedrag van de luchtveer. De resulterende schaalregels zijn weergegeven in figuur 13.

5.2 Schaalearkten

De schaalmodellen waarvan in dit onderzoek gebruik is gemaakt zijn geometrisch gelijkvormig met het prototype, met een lengteschaal $n_1 = 40$. De oppervlakte-

golven en vervalstromingen worden beheerst door de zwaartekracht. Deze verschijnselen worden in het geometrisch gelijkvormig schaalmodel dynamisch gelijkvormig weergegeven als de verhouding tussen zwaartekracht en stationaire traagheidskracht in model en prototype gelijk is. Deze verhouding wordt weergegeven door het getal van Froude: $Fr = \frac{v^2}{gL}$. Voor oppervlaktegolven en vervalstromingen moet dus gelden: $Fr_{pr} = Fr_m$.

In een "Froude-model" treden schaaleffekten in de golfklappen op, omdat niet alle verschijnselen die een rol spelen bij de golfklappen, dynamisch gelijkvormig worden weergegeven. Een schaaleffekt ontstaat per definitie als voor een bepaald verschijnsel een variabele schaal in het model geldt [10].

Bij golfklappen is er een groot aantal oorzaken van schaaleffekten, die uitvoerig worden behandeld in [11]. Enkele voorbeelden van verschijnselen die niet dynamisch gelijkvormig worden weergegeven zijn schokgolfvoortplanting, compressie van ingesloten luchtpakketten en stroming van lucht.

Stromingsdruk wordt in een "Froude-model" dynamisch gelijkvormig weergegeven, omdat uit $Fr_{pr} = Fr_m$ volgt: $Eu_{pr} = Eu_m$. $Eu = \frac{\text{stationaire traagheidskracht}}{\text{drukkracht}}$. Het verdringen van lucht dat voorafgaat aan een kompressieklap wordt echter niet op schaal weergegeven, omdat vooral visceuze krachten in de lucht in model en in prototype niet gelijkvormig zijn. Het belang hiervan lijkt evenwel niet groot [11].

Waterschokken zijn in een Froudemodel behept met schaaleffekten, omdat de verhouding tussen kompressiekrachten (in water) en stationaire traagheidskrachten, voorgesteld door $Ma = \frac{v}{c}$, in model en prototype niet gelijk is. Met schaaleffekten tengevolge hiervan kan in de interpretatie van gemeten drukken rekening worden gehouden door voor schokgolfdrukken een aangepaste schaalregel te hanteren die afwijkt van de elders in het model en voor andere verschijnselen geldende (Froude) schaalregels (zie par. 5.1).

In compressieklappen komen eveneens schaaleffekten voor, in de eerste plaats omdat de verhouding tussen krachten tengevolge van kompressie van ingesloten luchtpakketten en stationaire traagheidskrachten in model en prototype niet gelijk is.

Dit schaaleffekt kan verrekend worden door een aangepaste schaalregel te gebruiken (par. 5.1). Hierbij wordt opgemerkt, dat bij de opstelling van deze

schaalregel verondersteld wordt dat de luchtpakketten geometrisch gelijkvormig in het model worden weergegeven. Het is mogelijk dat door de verschillen tussen model en prototype in de verhouding van stromingskrachten en krachten tengevolge van kompressie van luchtpakketten, de vorming van luchtinsluitingen onderhevig is aan niet-kwantificeerbare schaaleffekten.

5.3 Waargenomen klaptypen

5.3.1 Benedenligger

Omdat de onderzijde van de benedenligger voorzien is van een groot aantal flenzen van enige decimeters hoogte, mag worden verwacht dat tamelijk grote hoeveelheden lucht worden ingesloten als een vlakke horizontale waterspiegel de onderzijde treft. De filmopnamen die tijdens de metingen van deel I zijn gemaakt, laten evenwel een iets ander beeld zien.

Onmiddellijk vóór een klap is het wateroppervlak in het algemeen niet horizontaal en evenmin vlak, als gevolg waarvan aanzienlijk minder lucht wordt ingesloten dan op het eerste gezicht verwacht wordt. Dit verschijnsel doet zich sterker voor bij hogere golven, hetgeen ten dele verklaard kan worden uit de grotere helling van de waterspiegel in de nuldoorgang. Bij de proef met de langste golfperiode (7,6 s) wordt de minste lucht ingesloten. Hiervoor is geen verklaring gevonden.

De registraties van de drukopnemers, gemaakt in de gefilmde situaties, zijn in overeenstemming met de visuele waarnemingen. De drukregistraties hebben in het algemeen een pulsvormig verloop, waarop soms een oscillatie is gesuperponeerd. De voorkomende frekwenties liggen in de orde van 150 - 400 Hz, en kunnen derhalve worden gerelateerd aan waargenomen luchtbellens met afmetingen in het model in de orde van $\delta * 2L = 225 \text{ mm}^2$ (bijv. $5 * 45 \text{ mm}^2$ doorsnede) tot $\delta * 2L = 30 \text{ mm}^2$ (bijv. $3 * 10 \text{ mm}^2$). De oscillatie-amplituden zijn klein ten opzichte van de maximale drukken (p_{max}) van de klappen, maximaal ongeveer 25%.

De gemeten p_{max} -waarden overschrijden slechts zelden de waarde 5 kN/m^2 (model), hetgeen klein is ten opzichte van de waterschokdruk, die voor dit geval ongeveer 100 x zo groot zou zijn.

Het bovenstaande leidt tot de konklusie dat de klappen grotendeels van het geventileerde type zijn, met oscillaties als gevolg van kompressieverschijnselen.

5.3.2 Middenligger

Tussen de waterspiegelbewegingen in de koker en daarbuiten bestaan belangrijke verschillen in fase en amplitude, zoals blijkt uit Bijlage 2. Als gevolg daarvan worden de uitkraging, die zich aan de buitenzijde van de eindkoker bevindt, en de inwendige ligger, op verschillende wijze door golfklappen belast.

Uit de high-speed filmopnamen, die gemaakt zijn bij de metingen van deel 1, blijkt dat tegen de onderzijde van de inwendige ligger in het algemeen over grote oppervlakken lucht wordt ingesloten. In de bijbehorende registraties komen oscillaties voor met frekwenties vanaf ongeveer 75 Hz; deze lage frekwenties kunnen middels het compressiemodel worden gerelateerd aan luchtsluitingen over de gehele lengte en/of breedte van de koker met een dikte (δ) van 9 à 10 mm (model).

Evenals bij de benedenligger houdt het drukverloop voor een niet onbelangrijk deelverband met stromingsdrukverschijnselen (geventileerde golfklappen). Schokgolven in het water spelen geen rol van betekenis.

In uitzondering op het hierboven geschetste beeld wordt bij lange hoge golven (proeven 690 en 692) bij de schaalbeplating nagenoeg geen lucht ingesloten. Vergelijking met drukregistraties is evenwel niet mogelijk omdat daar bij de metingen in Ruimte V geen drukopnemer was ingebouwd. Mede om deze reden zijn voor de metingen in goot 3 drukopnemers toegevoegd (Vergelijk figuren 19 en 20). Bij detail-analyse van een aantal grote klappen, geregistreerd met de drukopnemer nabij de schaalbeplating tijdens proef 499, bleek dat toch ook daar luchtbellens van grote invloed zijn geweest op het drukverloop.

De klappen op de uitkraging zijn, evenals die op de benedenligger en de inwendige middenligger, een samenstelling van stromingsdruk en luchtbeloscillatie. Het aandeel van de luchtbeloscillaties varieert van klap tot klap zeer sterk.

5.4 Toegepaste schaalregels

Aangezien stromingsdruk in het algemeen de grootste bijdrage van de klapdrukken (p_{\max}) levert, zijn voor de klappen in beginsel de schaalregels van Froude toegepast, volgens welke $n_p = n_1$. De lengteschaal van het model bedraagt 40, dus $n_p \text{ Froude} = 40$.

Voorzover echter drukoscillaties aan trillingen van luchtbellens kunnen worden toegeschreven, is het niet-lineaire compressiemodel toegepast. De wijze waarop onderscheid is gemaakt tussen stromingsdruk en compressiedruk is weergegeven in Paragraaf 8.2.1.

Konsekvente toepassing van het niet-lineaire compressiemodel, dat is weergegeven in figuur 13, leidt tot een per klap variërende waarde van n_p . Omdat echter de schatting van het oscillatiedeel reeds leidt tot onnauwkeurigheden in de orde van 20% van de prototypedruk, en de gedifferentieerde Froude/compressieschaling uitsluitend op de grootste gemeten klapdrukken is toegepast, is per proef en per drukopnemer meestal één schaalwaarde volgens het niet-lineaire compressiemodel vastgesteld. De volgende waarden van $n_{p\text{compressie}}$ zijn toegepast voor de grootste gemeten klappen per signaal (deel 2, proeven 199 en 499):

- Benedenligger, alle signalen: $n_{p\text{compressie}} = 10$
- Middenligger, uitkraging : $n_{p\text{compressie}} = 10-15$ (grote variatie in p_{\max})
- Middenligger, inwendig : $n_{p\text{compressie}} = 8$

De gedifferentieerde schaling is niet toegepast in deel 1 van dit onderzoek.

6 Beschrijving van de modellen en de modelopstellingen

6.1 Model en modelopstelling in Ruimte V

In verband met de eisen die in hoofdstuk 3 zijn gesteld aan de meetopstelling voor deel 1 van dit onderzoek, zijn de metingen uitgevoerd in de kleine, goed toegankelijke goot met glazen wanden, die is opgesteld in Ruimte V van het Windgolfgotengebouw te Delft.

De afmetingen van deze goot bedragen: lengte 30 m, hoogte 0,6 m, breedte 0,5 m. De goot is uitgerust met een wieggolfschot waarmee regelmatige golven kunnen worden opgewekt. Er is rondpompcapaciteit aanwezig tot ongeveer 30 l/s.

Om de prototype-eindkoker nog nauwkeurig te kunnen weergeven in een model is een lengteschaal van minimaal ongeveer 1/40 vereist. Toepassing van een dergelijk kleine schaal heeft wel schaalearkten in de golfklappen tengevolge, maar eenwezenlijke verbetering wordt dienaangaande pas bereikt in een opstelling van Deltagoot-grootte, terwijl een voorzichtige kwantificering van de belangrijkste schaalearkten in deze klappen mogelijk is met het niet-lineaire compressiemodel. Ondanks de sterke beperkingen die door de afmetingen van de goot in Ruimte V aan een model op schaal $n_1 = 40$ worden opgelegd is op grond van het bovenstaande toch voor deze modelschaal gekozen. De toegepaste schaal-factoren bedragen nu:

Lengte : $n_l = 40$

Tijd : $n_t = \sqrt{40} = 6,32$

Snelheid: $n_v = \sqrt{40} = 6,32$

Druk : $n_p = 40$ (behalve voor sommige onderdelen van de klap)

Kracht : $n_F = 40^3 = 64000$.

Het model en de opstelling zijn weergegeven in figuren 14 t/m 19. Opvallend is de asymmetrische opstelling in de goot; deze is gekozen op grond van symmetrie-overwegingen. De gootwand waartegen geen halve pijler is gebouwd, is opgevat als symmetrievlak in een situatie waarin één sectie van de kering loodrecht door golven wordt belast. De breedte van de goot bedraagt 0,5 m, zodat de opstelling een halve sectie met hart-op-hart pijlerafstand van 40 m voorstelt (Werkelijke maat: 45 m).

Het bodemniveau is gelegen op NAP -14,8 m, de bovenzijde van de dorpel op NAP -5,5 m. De onderzijde van de bovenbalk ligt op NAP +1,0 m. De metingen van golfklappen op de benedenligger hebben plaatsgevonden bij geheel geopende schuif, hetgeen betekent: hart benedenligger op NAP + 2,90 m (= zeewaterstand) en onderzijde kerende beplating op NAP +1,20 m. De metingen aan de middenligger hebben eveneens plaatsgevonden met zeewaterstand op NAP +2,90 m, terwijl ook het hart van de middenligger op dit niveau is gebracht. De hart-op-hart afstand van de beneden- en middenligger is in overleg met de Deltadienst gesteld op 4,5 m, zodat de onderzijde van de kerende beplating op NAP -3,3 m komt te liggen. Zie figuren 15-18.

Voor de metingen aan beneden- en middenligger zijn om modeltechnische redenen aparte meetkokers gebouwd, zoals blijkt uit figuren 15-18. De profilering van beide kokers is bepaald in overleg met Direktie Bruggen van de Rijkswaterstaat. In het prototype wordt de profilering van de flenzen van de liggers afgestemd op de kerende beplatingshoogte en de hydraulische belastingen van de betreffende schuif. Omdat hoge flenzen het insluiten van luchtpakketten bevorderen, en de aanwezigheid van luchtinsluitingen een reducerend effect zal hebben op de klapdrukken, is gekozen voor de geringste flenshoogte die in het prototype voorkomen. Zie fig. 19.

In verband met de noodzaak om filmopnamen te maken is een zo groot mogelijk gedeelte van de meetkokers in perspex uitgevoerd. Teneinde de modellen voldoende stijfheid te geven zijn de horizontale vlakke plaatdelen van 10 mm dik aluminium vervaardigd. Aan de onderzijde is een profilering in perspex aangebracht. Alle "overdikte" is aan de bovenzijde gekonstrueerd.

De afstand tussen het model en het golfschot bedroeg bij deze metingen ruim 21 m. Ruim 4 m voor het golfschot is een golfhoogtemeter geplaatst (H1). Een tweede (aangepaste) golfhoogtemeter (H2) heeft in, naast en voor de eindkokers dienst gedaan. Zie paragraaf 7.1 en Bijlage 2.

6.2 Model en meetopstelling in Goot 3

Aan de metingen van deel 2 van dit onderzoek worden hoge nauwkeurigheidseisen gesteld, zoals is uiteengezet in hoofdstuk 3. De keuze van de faciliteit, de modelopstelling en de mate van schematisatie ten opzichte van het prototype zijn dan ook hierop afgestemd.

De metingen zijn uitgevoerd in Goot 3 van het Golenlaboratorium te Delft. In deze goot kunnen met een hydraulisch aangedreven wieggolfschot zowel regelmatige als onregelmatige golven worden opgewekt. Instellen van wind is niet mogelijk, maar dit is geen overwegend bezwaar, omdat door de geringe afstand tussen golfschot en model (ongeveer 40 m) het door het golfschot opgewekte spektrum nagenoeg onvervormd bij het model arriveert. Hierdoor wordt ter plaatse van het model voldoende hoogfrequentie energie in de spektra aangetroffen. De goot is uitgerust met een nauwkeurige debietregeling, die een goede beheersing van het verval aan de kering mogelijk maakt.

Om redenen van tijd en kosten is in Goot 3 zoveel mogelijk gebruik gemaakt van dezelfde modelonderdelen als in Ruimte V. Derhalve is de modelschaal in Goot 3: $n_1 = 40$. De opstelling is weergegeven in figuur 22 en fotoblad 1.

In de 2,5 m brede goot zijn over een afstand van ongeveer 21 m stalen scheidingswanden aangebracht. Het model, dat een weergave is van één sectie (het deel van de kering tussen twee hartlijnen van de pijlers), is in het centrale deel van de goot opgesteld. De breedte hiervan is 1,125 m, hetgeen overeenkomt met de hart-op-hart afstand van de pijlers in het prototype (45 m). In de zijgoten zijn golfdempende taluds aangebracht (helling 1:10).

Een doorsnede over de meetsectie is gegeven in figuur 23. De bodem is gelegd op NAP -29,5 m; dit niveau is in overeenstemming met de hoogteligging en afmetingen van de overige onderdelen. Het geheel is afgestemd op een kerende schuifhoogte van 11,9 m. De dorpel is gedeeltelijk ingebed in een stortstenen drempel die in het model ondoorlatend is gemaakt, omdat de stroming door de dorpel bij de toegepaste schuifstanden geen rol van betekenis speelt voor de golfklappen. In de doorsnede van figuur 23 is tevens aangegeven op welke gegevens de vormgeving van de modelonderdelen is gebaseerd.

Voor de metingen in goot 3 is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van dezelfde onderdelen als voor de metingen in Ruimte V. Onder andere zijn dezelfde meet-eindkokers toegepast, nadat hieraan enkele wijzigingen waren aangebracht.

1. De verticale wanden zijn verhoogd om golfoverslag te voorkomen.
2. Tegen de eindhar (het gedeelte aan de zijde van de pijler) is een kram (versterking) aangebracht. Zie fig. 20 en 21.
3. In iedere eindkoker zijn twee extra drukopnemers aangebracht, zie figuur 20 (vergelijk met figuur 19).

Fotoblad 2 laat het model van de benedenligger zien.

In de goot zijn op verschillende plaatsen golfhoogtemeters opgesteld, zoals blijkt uit figuur 22.

7 Wijze van meten en proefprocedure

7.1 Metingen in Ruimte V

Meting van golfklappen

De meet-eindkoker voor de benedenligger is voorzien van drie drukopnemers in de horizontale plaat. Dit geldt eveneens voor de meeteindkoker voor de middenligger; deze is bovendien uitgerust met twee drukopnemers in de achterwand. Zie fig. 19.

De instrumentatie voor het meten van golfklapbelastingen wordt gecompleteerd door een meetsysteem voor verticale krachten op de gehele eindkoker. De kern van het systeem wordt gevormd door vier piëzo-elektrische krachtopnemers; deze opnemers hebben een bijzonder hoge stijfheid, waardoor het mogelijk is om de eigenfrequentie van de meet-eindkokers in de opnemers en de hulpkonstrukties voldoende ver op te voeren voor golfklapmetingen. De "natte" eigenfrequentie bedraagt ongeveer 1250 Hz.

Fotoblad 2 geeft een overzicht van het model van de benedenligger, hangende aan de krachtopnemers. De vier opnemers zijn ingebouwd in de verticale staven die de verbinding vormen tussen de dikke stalen schijf boven de eindkoker, en de ligger. Deze schijf is een onderdeel van het ophangframe, en heeft een zodanig grote massa, dat de bewegingen ervan tengevolge van klappen tegen de eindkoker verwaarloosbaar klein zijn.

Golfmetingen

Inkomende golven worden gemeten met behulp van een golfhoogtemeter (H1) op ruim 4 m voor het golfschot.

Voor het meten van waterspiegelbewegingen in de eindkoker is een aangepaste golfhoogtemeter (H2) door de centrale gaten in de liggers gestoken en aan het frame bevestigd. Deze opstelling beïnvloedt weliswaar de nauwkeurigheid van de golfhoogtemeter nadelig (maximale meetfouten ~ 10%), maar een betere methode is tegen aanvaardbare kosten momenteel niet voorhanden. Deze golfhoogtemeter is tevens gebruikt voor het meten van waterspiegelbewegingen in de sponning en naast de uitkraging (zie tabel 1 en bijlage 2).

Proefprocedure

Voorafgaande aan de uitvoering van de metingen worden de instrumenten geijkt (golfhoogtemeters 1x per week), waarna de golfschotinstelling wordt ingeregeld. De metingen verlopen dan als volgt:

1. Waterstand zeezijde = waterstand Oosterscheldezijde = NAP +2,90 m.
2. Instrumenten worden op nul afgeregeld (stil water)
3. Start golfschot
4. Registratie van gemeten signalen gedurende de looptijd van de golftrein vanaf het golfschot via het model tot aan H1 of filmopname gedurende ongeveer 20 s.
5. Stop golfschot en registratieapparatuur
6. Controle nulpositie als het water weer tot rust is gekomen.

7.2 Metingen in Goot 3

Golfmetingen

Op verschillende plaatsen in de centrale meetgoot zijn golfhoogten gemeten, zoals blijkt uit figuur 22. Ongeveer halverwege de meetgoot zijn de drie golfhoogtemeters H1, H4 en H5 opgesteld op onderlinge afstanden 0,17 en 0,43 m (model). Tengevolge van reflecties tegen het model en het golfschot bestaat het golfbeeld ter plaatse uit een gedeelte dat zich naar het model toe beweegt, het inkomende deel, en een gedeelte dat zich in tegengestelde richting beweegt, het gereflekteerde deel.

Uit het golfbeeld, dat gemeten wordt met H1, H4 en H5, wordt het inkomende deel berekend met behulp van het kruiscorrelatieprogramma INKSPE. Hiermee kunnen tevens de reflectie-eigenschappen van de konstruktie worden bepaald.

N.B. Het gaat hierbij om het inkomende golfbeeld in de meetgoot, dus op stromend water. Tengevolge van stroomrefraktie is dit niet gelijk aan het "echte" inkomende golfbeeld, dat is gedefinieerd op stilstaand water.

Het inkomende golfbeeld op stilstaand water is rechtstreeks gemeten met behulp van een golfhoogtemeter in één van de zijgoten (H6). De golfreflecties in de zijgoten zijn te verwaarlozen omdat daar een zeer effectieve golfdemping is

toegepast. Vergelijk fig. 9 en 10.

Aan de Oosterscheldezijde is H7 gestationeerd met het doel de Oosterschelde-waterstand te meten. In de meetkokers en direkt ervoor, zijn de golfhoogtemeters H2 en H3 opgesteld, om verbanden te kunnen leggen tussen gemeten klappen en waterspiegelbewegingen ten behoeve van de interpretatie van de klappen. De nauwkeurigheid van de metingen met H2 en H3 is niet groot, omdat deze golfhoogtemeters dichter bij geleidende modelonderdelen moesten worden opgesteld, dan nog toelaatbaar is voor een nauwkeurige meting (maximale meetfouten $\sim 10\%$).

Meting van golfklappen

Voor de beschrijving van het systeem voor het meten van golfkrachten wordt verwezen naar paragraaf 7.1. Zoals reeds gesteld in paragraaf 6.2 zijn voor deze metingen 5 drukopnemers in de liggers aangebracht, alsmede 2 drukopnemers in de achterwand van het model van de middenligger, zie figuur 20.

Proefprocedure

Voorafgaande aan de uitvoering van de metingen worden alle instrumenten geijkt, waarna het golfspektrum wordt ingeregeld. De metingen verlopen dan als volgt:

1. Waterstand zeezijde = waterstand Oosterscheldezijde = waterstand, overeenkomend met de hoeveelheid water die in de goot aanwezig is als de gewenste waterstanden zijn ingesteld
2. Golfhoogtemeters worden op nul afgeregeld
3. De gewenste waterstanden worden ingesteld
4. Alle instrumenten worden op nul geregeld
5. Start golfschot
6. 15 min. ingolven; controle en zo nodig bijstelling van het verval (controle m.b.v. laagdoorlaat gefilterde H7)
7. Registratie van de signalen gedurende $2\frac{1}{2}$ uur (≈ 10000 golven)
8. Stop golfschot
9. 15 min. uitdeinen; controle en zonodig bijstelling van het verval
10. Controle nulposities instrumenten
11. Stop proef.

Tijdens de registratie wordt het verval regelmatig gecontroleerd en zonodig bijgesteld.

Het golfbeeld tijdens de meting wordt op de volgende wijze gecontroleerd:

- H6: golfhoogteanalyse en berekening golfspektrum
- H1: berekening golfspektrum.

8 Resultaten

8.1 Metingen in Ruimte V

8.1.1 Benedenligger

Uit de waarnemingen die zijn verricht met behulp van high-speed films, is na vergelijking met de bijbehorende registraties geconcludeerd, dat de belangrijkste bijdrage aan de gemeten drukken wordt geleverd door stromingsdruk. Luchtinsluitingen zijn soms wel aanwezig, en drukfluctuaties in de insluitingen komen in de geregistreerde druksignalen tot uitdrukking als oscillaties die gesuperponeerd zijn op het (pulsvormige) drukverloop tengevolge van stromingsdruk (geventileerde klap). Zie ook paragraaf 5.3.1.

De toegepaste schaalfactor voor klapdrukken is ontleend aan het stromingsdrukmodel, dus er geldt: $n_p = n_l = 40$. In verband met het oriënterende karakter van dit deel van het onderzoek is afgezien van het toepassen van een schaalfactor volgens het compressiemodel voor de luchtbeloscillaties.

Tabel 3 geeft informatie over gemiddelde waarden en standaardafwijkingen van de volgende grootheden, berekend uit 20 à 25 golven en klappen:

- Inkomende golfhoogte: H_i
- Golfperiode: T
- Snelheid van het wateroppervlak op het moment dat de maximale klapkracht wordt gemeten: $\left(\frac{dH_2}{dt}\right)_{F_{vo-t}}$
- Klapdruk op de uitkraging: $D6_{0-t}$
- Klapkracht op de gehele benedenligger: F_{vo-t}
- Klapdruk op twee plaatsen op de benedenligger: $D7_{0-t}$, $D8_{0-t}$
- Gemiddelde klapdruk op de benedenligger zonder de uitkraging: $\frac{1}{2} \Sigma (D7, D8)$.

In figuren 24 en 25 zijn \bar{F}_{vo-t} en $\frac{1}{2} \Sigma (D7, D8)_{0-t}$ uitgezet tegen \bar{H}_i en $\pi \bar{H}_i / \bar{T}$ (een maat voor de verticale snelheid waarmee het wateroppervlak de konstruktie treft). Duidelijke verbanden ontbreken; met name komt het verwachte toenemende verloop van \bar{F}_{vo-t} met $\pi \bar{H}_i / \bar{T}$ niet op. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de vorm van het wateroppervlak tijdens de klap bij korte perioden (grote waarden van $\pi \bar{H}_i / \bar{T}$) onregelmatiger is, en de helling van de waterspiegel groter, waardoor de drukken lager zijn en het gelijktijdig belaste opper-

vlak kleiner.

Bij een groot aantal klappen is tijdens de piekwaarde van F_v de optredende waarde van $F_v / \frac{1}{2} \Sigma(D7, D8)$ groter dan het oppervlak van de ligger. Hierbij is F_v gecorrigeerd voor de op de uitkraging uitgeoefende druk, alsmede voor de oprijvende kracht van de achterwand (gering t.o.v. de klap). De konklusie hieruit is, dat de drukopnemers niet gemonteerd zijn op de plaatsen waar de grootste drukken optreden. Onder andere om deze reden zijn voor deel 2 van het onderzoek in elke meet-eindkoker twee extra drukopnemers aangebracht, één in het voorste plaatveld en één in het plaatveld bij de schaalwand.

8.1.2 Middenligger

Bij de klappen tegen de middenligger is een grotere invloed van luchtinsluitingen op het drukverloop waargenomen dan bij de benedenligger, zie paragraaf 5.3.2. Evenals bij de metingen van deel 1 op de benedenligger, is afgezien van het gebruik van schaalfactoren volgens het compressiemodel voor de drukfluctuaties, afkomstig van oscillerende luchtinsluitingen. Voor alle gemeten drukwaarden is de schaalfactor ontleend aan het stromingsdrukmodel (Froude) : $n_p = n_l = 40$.

In tabel 4 zijn gemiddelde waarden en standaardafwijkingen van de volgende grootheden:

- Inkomende golfhoogte: H_i
- Golfperiode: T
- Klapkracht op de inwendige ligger: $F_{vo-t}(D2, D3)$
- Klapdrukken op de inwendige ligger: $D2_{o-t}$, $D3_{o-t}$
- Gemiddelde klapdruk op de inwendige ligger: $\frac{1}{2} \Sigma(D2, D3)_{o-t}$
- Klapdrukken op de achterwand aan de binnenzijde: $D4_{o-t}$, $D5_{o-t}$
- Klapkracht op de uitkraging: $F_{vo-t}(D1)$
- Klapdruk op de uitkraging: $D1_{o-t}$

In figuur 26 en 27 zijn $\bar{F}_{vo-t}(D2, D3)$ en $\bar{F}_{vo-t}(D1)$ uitgezet tegen \bar{H}_i , $\frac{\pi \bar{H}_i}{T}$ en \bar{T} , en in figuur 28 $\bar{F}_{vo-t}(D1)$ tegen de opwaartse snelheid van het wateroppervlak ($\frac{dH_2}{dt}$) $D1$. Ook hier ontbreken duidelijke relaties, vooral wat betreft $\bar{F}_{vo-t}(D1)$. $\bar{F}_{vo-t}(D2, D3)$ hangt nog het sterkst samen met \bar{T} : $\bar{F}_{vo-t}(D2, D3)$ neemt ruwweg lineair toe met \bar{T} . Dit hangt samen met het feit dat bij langere golfperioden de waterbewegingen in de eindkoker sterker zijn, zoals blijkt uit

tabel 5.

8.2 Metingen in Goot 3

8.2.1 Benedenligger (proef 199)

Een indruk van de grootte van de golfklapdrukken en -krachten wordt gegeven door figuren 29 t/m 34, waarin statistische verdelingen zijn weergegeven van:

- Golfklapkrachten op de gehele benedenligger: F_{v0-t}
- Golfklapdrukken op de uitkraging: $D1_{0-t}$
- Golfklapdrukken op het plaatveld nabij het vakwerk: $D2_{0-t}$
- Golfklapdrukken op het plaatveld nabij de schaalwand: $D3_{0-t}$
- Golfklapdrukken op het plaatveld nabij de eindkoker: $D4_{0-t}$
- Golfklapdrukken op het plaatveld aan de voorzijde: $D5_{0-t}$

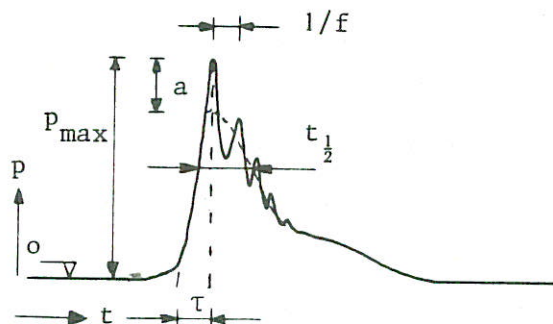
De overschrijdingspercentages zijn berekend ten opzichte van het aantal watergolven, dat ongeveer 10000 bedraagt. De getrokken lijnen in de figuren geven de frekwentieverdelingen weer, die ontstaan als alle klapdrukken worden geschaald volgens $n_p = n_1$ (Froude). De onderbroken lijnen geven de verdelingen weer, die verkregen zijn na gedetailleerde bestudering van een aantal klappen met een hoge druk (volgens onderstaande methode).

In paragraaf 5.3.1 is aangegeven, dat ten opzichte van de met Froude-schaling verkregen waarden reducties mogelijk zijn door drukoscillaties tengevolge van trillende luchtinsluitingen op te schalen volgens het niet-lineaire compressiemodel (fig. 13), dat bij $n_1 = 40$ en de gemeten modeldrukken oplevert:

$$n_p \approx 10.$$

De toepassing van dit model maakt het noodzakelijk om de registraties in detail te bestuderen, omdat oscillaties met frekwenties tot ongeveer 1000 Hz (model) onderkend moeten worden. Van oscillaties met hogere frekwenties mag worden aangenomen dat ze niet afkomstig zijn van luchtbeltrillingen. Hiertoe is het nodig de klappen sterk vertraagd op lichtgevoelig papier uit te schrijven. Aangezien zowel het vertraagde uitschrijven als de erop volgende detailanalyse zeer tijdrovend is, kan slechts een beperkt aantal klappen in detail worden geanalyseerd. Per druksignaal zijn de 6 à 15 klappen met de hoogste drukken nader geanalyseerd.

Het verloop van de druksignalen in de tijd is als volgt in parameters uitgedrukt:



- p_{\max} = 0-top waarde van de druk
- a = oscillatie-amplitude
- τ = stijgtijd
- $t_{\frac{1}{2}}$ = tijdsduur waarover de druk $> \frac{1}{2}p_{\max}$

Bovendien zijn door vergelijking van simultane druk- en krachtregistraties schattingen gemaakt van de oppervlakken, waarover de klappen aan grijpen. Dit is niet altijd een eenduidige zaak, omdat de resultaten van de vijf gemeten drukken die elk representatief zijn voor een onbekend oppervlak, gelijk wordt gesteld aan de gemeten verticale krachten. In de meeste gevallen doet zich dit probleem niet voor, bijvoorbeeld als 4 opnemers nog "droog" staan op het moment dat de konstruktie geraakt wordt ter plaatse van de vijfde, of als in de signalen van één drukopnemer en van F_v duidelijke gemeenschappelijke kenmerken aanwezig zijn, zie bijvoorbeeld fig. 44 en 45. Fig. 45 laat zien dat de op D2 gemeten hoge druk over een zeer gering oppervlak aangrijpt (minder dan $0,5 \text{ m}^2$).

In tabel 6 zijn enkele bevindingen uit deze analyse verzameld. Uit de tabel blijkt, dat alle parameters een ruime spreiding vertonen. Voorts kan worden opgemerkt, dat de ondergrens van de waargenomen frekwenties in het algemeen lager ligt, naarmate de flens van het plaatveld hoger is ten opzichte van het plaatveldoppervlak. Dit wordt in verband gebracht met het feit dat bij hogere flenzen grotere luchtinsluitingen mogelijk zijn, die dus ook in een lagere frekwentie oscilleren. Fig. 43 laat enkele gedifferentieerd geschaalde klappen zien.

In fig. 35 zijn de uiteindelijke statistische verdelingen van klapdrukken op de benedenligger verzameld. Tevens zijn voor enkele grote klappen de aangrijpingsoppervlakken vermeld.

Met betrekking tot de vorm van de verdelingen dient nog het volgende te worden opgemerkt: Uitsluitend de klappen met de hoogste 0-top drukken in het model zijn gedifferentieerd geschaald: de overige met Froude. Dit heeft tot gevolg dat de toppen van de verdelingen verlaagd zijn, ten opzichte van de rest,

zodat ze "boller" zullen zijn dan indien alle klappen gedifferentieerd geschaald zouden zijn. Dit laatste in aanmerking genomen, mag worden gekonkludeerd dat de klapdrukken ongeveer logaritmisch verdeeld zijn.

Tot slot nog enkele kenmerkende grootheden:

Drukopnemer:	bijbehorende waarde van			Po-t 0,1% [kN/m ²]	Po-t 1,5% [kN/m ²]
	Po-t 0,01% [kN/m ²]	τ [s]	A [m ²]		
1	335	0,01	1,3	250	170
2	400	0,005	1,0	290	150
3	525	0,02	1,9	330	200
4	320	0,02	2,3	250	185
5	435	0,003	0,2	295	180

8.2.2 Middenligger (Proef 499)

In figuur 36 t/m 41 worden statistische verdelingen gegeven van golfklapdrukken op de middenligger en de achterwand onder de middenligger. De plaatsing van de drukopnemers 1 t/m 5 is dezelfde als op de benedenligger. Drukopnemers 6 en 7 zijn in de achterwand aangebracht (zie fig. 20).

Evenals bij de benedenligger zijn de percentages berekend ten opzichte van het aantal watergolven. De getrokken lijnen hebben betrekking op de klapdrukken die ontstaan na Froude-schaling, en de onderbroken lijnen geven de verdelingen die ontstaan na gedifferentieerde schaling van de grootste in model gemeten klappen.

In de figuren 37 en 39 ontbreken de onderbroken lijnen, omdat in overleg met de Directie Bruggen detailstudie van klappen op D2 en D4 achterwege is gelaten. In figuur 38 is behalve de getrokken en de onderbroken lijn een derde lijn aanwezig. Deze geeft de verdeling, die ontstaat als gedifferentieerde schaling wordt toegepast, en als bovendien een aantal klappen met grote druk (proto) en gering aangrijpingsoppervlak wordt weggelaten.

Figuur 41 laat een vergelijking zien tussen de statistische verdelingen van klapdrukken, gemeten met drukopnemers 6 en 7 gedurende 1/3 deel van proef 499. Omdat hieruit blijkt dat de samenhang tussen deze twee signalen zeer groot is, is alleen het signaal D6 over de gehele proefduur geanalyseerd. Het resultaat daarvan is eveneens in figuur 41 gegeven. Het blijkt dat de kortere analyse-duur een verdeling oplevert, die bij lage overschrijdingspercentages vrij sterk afwijkt van de verdeling op basis van de gehele proef.

In figuur 42 worden de verdelingen van klapdrukken op de inwendige middenligger en de achterwand onderling vergeleken. Ten aanzien van de klappen op de plaats van D4, waarvan de verdeling die van andere posities ruim overtreft, wordt opgemerkt, dat deze zijn opgeschaald volgens Froude, zulks in tegenstelling tot de klappen op D3 en D5. Op grond van de positie van D4 in de kram van de eindhar, en op basis van de beschikbare registraties, is de verwachting gerechtvaardigd, dat door detailstudie en gedifferentiëerde schaling de top van de verdeling nog enkele tientallen procenten omlaag gebracht kan worden. In overleg met de Directie Bruggen is dit niet gedaan, omdat de nu gepresenteerde klapbelastingen niet maatgevend zijn voor de lokale plaatdikte.

Blijkens figuur 36 liggen de klapdrukken op de uitkraging aanzienlijk hoger dan op de inwendige ligger, hetgeen ook te verwachten is op grond van de mate waarin deze onderdelen zijn blootgesteld aan golfaanval. Vergelijking met figuur 30 laat zien, dat de uitkraging van de middenligger ongeveer 1,5 x zo zwaar belast wordt als de uitkraging van de benedenligger. deze tendens wordt in verband gebracht met een grotere golfreflektie ter plaatse van de eindkoker naarmate de schuif verder gesloten is. Hieruit volgt dat de uitkraging van de bovenligger nog iets zwaarder zal worden belast dan die van de middenligger.

Figuren 46 t/m 48 laten enkele grote klappen op de inwendige middenligger en op de uitkraging zien. figuur 47 geeft een klap met gering aangrijpingsoppervlak (ongeveer $0,6 \text{ m}^2$); figuur 48 toont de oscillatie van een luchtbel die zich onder de gehele inwendige ligger uitstrekt. Ook figuur 46 laat een oscillerende luchtbel zien, ditmaal onder de uitkraging.

Onderstaande tabel geeft enkele kenmerkende waarden met betrekking tot de klappen op de middenligger.

Drukopnemer	bijbehorende waarden			Po-t 0,1% [kN/m ²]	Po-t 1,5% [kN/m ²]
	Po-t 0,01% [kN/m ²]	van τ [s]	A[m ²]		
1	525	0,01	1,4	350	240
2	85*	-	-	65	45
3	110	0,003	1,1	95	55
4	170*	-	-	130	70
5	60**	0,016-0,032	0,3 à 3,4	60**	45
6	50	-	-	40	25

* geëxtrapoleerd

** 0,17%-waarde

8.3 Opmerkingen

1. Zoals reeds in paragraaf 5.2 naar voren is gebracht treden in de golfklappen in dit model aanzienlijke schaafeffecten op. Het belangrijkste effect ontstaat door dynamisch niet gelijkvormige weergave van luchtbeloscillaties. Met behulp van het niet-lineaire compressiemodel kan dit effect gekwantificeerd worden, onder de aanname, dat de betreffende luchtinsluitingen geometrisch gelijkvormig zijn met het prototype. Hierbij zijn de volgende problemen van belang:

- De grootte van het deel van de klapdruk dat een gevolg is van luchtbeloscillaties moet uit het drukverloop worden geschat, en deze schatting is niet zeer nauwkeurig. In het algemeen ontstaat hierdoor een licht konserwatisme in de prototypedruk. De interpretatiemarge die hiermee samenhangt wordt geraamd op $\pm 20\%$ van de prototypedruk.
- Door de sterk uiteenlopende verhouding tussen de aandelen van de stromingsdruk en compressiedruk in de klap in model en prototype is het voorstelbaar dat de luchtinsluitingen geometrisch niet gelijkvormig worden weergegeven in het model. Ook de oppervlaktetspanning, die in het model relatief te groot is, zal hieraan bijdragen. Deze effecten zijn echter niet kwantificeerbaar.

2. Ook bij geventileerde golfklappen kan de oppervlaktespanning een rol spelen doordat het wateroppervlak in model relatief gladder is dan in het prototype. Kwantificeren van de invloed hiervan op de klapdrukken is niet mogelijk.

3. Bij scheve golfaanval wordt de eindkoker in de opstuwingshoek door hogere golven belast dan onder loodrechte golfaanval. De mate waarin dit het geval is, kan worden geschat met behulp van een drukmeting uitgevoerd tijdens het onderzoek M1543. De meting heeft plaatsgevonden aan een sectie van de kering die met gesloten schuif werd belast door golven met een invalshoek van 30° (hoek tussen golfkam en langs-as van de kering). De extreme golfhoogte in de opstuwingshoek bedraagt naar schatting 7,5% meer dan bij loodrechte golfaanval. (Zie verslag modelonderzoek M1614 [12] waarin deze meting is uitgewerkt). Naar verwachting zullen de golfklapdrukken bij scheve golfaanval maximaal 15% hoger liggen dan bij loodrechte golfaanval ($p \propto \rho v^2$; $v \propto H$, bij gelijke T).

9 Vergelijking tussen gemeten en berekende klappen

Onderstaande tabel geeft een overzicht van gemeten en berekende klapdrukken. Duidelijk blijkt hoezeer de berekeningen een overschatting geven van de drukken ten opzichte van de meetresultaten.

Gemeten en berekende klapdruk dimensie: kN/m^2	Berekende 1,5%-waarde	Gemeten 1,5%-waarde	Berekende 0,1%-waarde	Gemeten 0,1%-waarde
Middenligger inwendig	170	45-70	-	60-130
Middenligger uitkraging	400	240	-	350
Benedenligger 1.gemiddeld over opp.	-	60*	280	100*
2.lokaal	-	150-200		250-330

* berekend uit F_{v0-t}

De gegeven gemeten belastingen zijn waarschijnlijk enigszins konservatief ten gevolge van de genoemde schaalproblemen (zie 8.2.3), maar de betrouwbaarheid ervan is een orde beter dan die van de berekende belastingen, waarvan de grootte zeer afhankelijk is van de aannamen met betrekking tot luchtinsluitingen (zie bijlage 1).

LITERATUUR

- 1 Waterloopkundig Laboratorium, Stormvloedkering Oosterschelde, Vertikale belastingen vakwerkschuiven, Concept verslag M1723/M1687, december 1981
- 2 RAMKEMA, C. A model law for wave impacts on coastal structures. Delft Hydraulics Laboratory, Publication no. 207, October 1978
- 3 Rijkswaterstaat, Deltadienst, Nota DDWT 80.001: Golveros, een programma gemaakt voor het voorspellen van golfspektra ter plaatse van de Stormvloedkering in de Oosterschelde, jan. 1980, data set voor de eindfase.
- 4 Waterloopkundig Laboratorium en GRIJSEN, J.G. Risico Analyse, Speurwerkverslag S164, oktober 1974
- 5 LUNDGREN, H. Wave shock forces, an analysis of defomations and forces in the wave and in the foundation, Procs. Research on Wave Action, Vol.II, Delft, 1969
- 6 CHUANG, S.L. Experiments on slamming of wedge-shaped bodies, Journal of Ship Research, September 1967
- 7 FUHRBOTER, A. Laboratory investigations of impact forces, Procs. Research of Wave Action, Vol. II, Delft 1969
- 8 KOLKMAN, P.A., Maximale golfklapdrukken volgens het sromingsmodel, het schokgolfmodel en het waterpistonmodel, Waterloopkundig Labortorium, Juli 1981

LITERATUUR (vervolg)

- 10 Prof.dr.ir. M. DE VRIES, Waterloopkundig onderzoek, Collegehandleiding b80.
Technische Hogeschool Delft, Afdeling der Civiele Techniek,
augustus 1980
- 11 Waterloopkundig Laboratorium, Schaalearbeiden bij golfklappen op een talud,
Verslag modelonderzoek M1057,
augustus 1979
- 12 Waterloopkundig Laboratorium. Stormvloedkering Oosterschelde, Golfbelastingen op de hefciylinder,
Verslag modelonderzoek M1614.
(in voorbereiding)

Tabel 1. Proevenprogramma (Ruimte V)

Bij alle proeven zijn zowel de zeewaterstand als de Oosterscheldewaterstand ingesteld op NAP + 2,90 m.

Schuifstanden: bij meting aan de middenligger: hart middenligger op NAP + 2,90 m, d.w.z. onderzijde schuif op NAP -3,3 m.

bij meting aan de benedenligger: hart benedenligger op NAP + 2,90 m, d.w.z. onderzijde schuif op NAP + 1,20 m.

Proef	\bar{H}_i [m]	\bar{T} [s]	Ligger: Beneden Midden	D1 D2 D3 D4 D5	D6 D7 D8	F_V	Plaats H ₂ : In koker Voor koker Sponning	Film	F _V , D, H Uitge- werkt
152	3,4	4,4	B		x	x	I	x	
162	4,9	5,7	B		x	x	I	x	
172	4,8	6,6	B		x	x	I	x	
142	4,9	7,6	B		x	x	I	x	x
181	1,2	3,8	B		x	x	I		
185	2,3	3,8	B		x	x	I		x
151	1,7	4,5	B		x	x	I		
150	3,5	4,6	B		x	x	I		x
161	2,5	5,7	B		x	x	I		
160	4,9	5,7	B		x	x	I		x
171	2,6	6,5	B		x	x	I		
170	4,8	6,6	B		x	x	I		x
141	3,2	7,6	B		x	x	I		
140	5,0	7,6	B		x	x	I		x
482	2,3	3,8	M	x		x	I	x	
452	3,4	4,4	M	x		x	I	x	
462	4,9	5,7	M	x		x	I	x	
472	4,8	6,6	M	x		x	I	x	
442	4,8	7,6	M	x		x	I	x	
481	1,2	3,8	M	x		x	I		
480	2,3	3,8	M	x		x	I		x
451	1,7	4,4	M	x		x	I		
450	3,4	4,4	M	x		x	I		x
461	2,5	5,7	M	x		x	I		
460	4,9	5,7	M	x		x	I		x

} D, F, H:
alleen
papier-
registratie.

Vervolg TABEL 1 Proevenprogramma (Ruimte V)

Proef	\bar{H}_i [m]	\bar{T} [s]	Ligger Beneden Midden	D1 D2 D3 D4 D5	D6 D7 D8	F_v	Plaats H_2 In koker Voor koker Spanning	Film	$F_v, D, H.$ uitge- werkt
471	2,6	6,6	M	x		x	I		
470	4,8	6,6	M	x		x	I		x
441	3,2	7,6	M	x		x	I		
440	4,8	7,6	M	x		x	I		x
680	2,3	3,8	M				S	x	Meting H_1 en H_2 ; spon- ning afgedicht langs schuif-opleggingen. Uitgewerkt: H_1 en H_2 (tijdens film $H_1=3,0m$) Meting H_1 en H_2 ; sponning niet afge- dicht uitgewerkt: H_1 en H_2 Meting H_2 voor de schuif; uitgewerkt: H_1, H_2
650	3,4	4,5	M				S	x	
660	4,9	5,7	M				S	x	
670	4,8	6,7	M				S	x	
640	4,9	7,5	M				S	x	
690	5,4	10,8	M				S	x	
680*	2,3	3,8	M				S		
650*	3,4	4,5	M				S		
660*	4,9	5,7	M				S		
670*	4,8	6,7	M				S		
640*	4,9	7,5	M				S		
690*	5,4	10,8	M				S		
682	2,3	3,8	M	x		x	V		
652	3,4	4,4	M	x		x	V		
662	4,9	5,7	M	x		x	V		
672	4,8	6,6	M	x		x	V		
642	4,8	7,6	M	x		x	V		
692	5,4	10,8	M	x		x	V	x	

N.B. De niet-uitgewerkte metingen met geringe golfhoogte zijn als extra op de band gezet (dat kost ongeveer 20 min. per proef) om indien nodig nog een verband tussen klapbelastingen en golfhoogtete kunnen leggen.

Tabel 2 Ingestelde waterstanden, schuifstanden en golfbeelden, Goot 3	Gemeten op			Inkomend	
	stromend water			Stromend water (uit H1, H4, H5)	Stilstaand water (uit H6)
	H1	H4	H5		
<u>P199</u> Zeewaterst. NAP +2,90m. H_s [m]	3,17	3,24	3,21	ca.2,7	3,01
Oost.waterst.NAP +2,40m. m_o [m ²]	0,72	0,74	0,73	ca.0,5	0,60
Onderz.schuif.NAP +1,20m. \bar{T}_z [s]	5,83	5,86	5,82	5,84	6,42
T_{p1} [s]	10,8	11,4	11,8	11,3	10,8
T_{p2} [s]	5,40	5,40	5,35	5,38	5,79
<u>P499</u> Zeewaterst. NAP +2,90m. H_s [m]	3,45	3,47	3,57	ca.2,8	-
Oost.waterst.NAP +1,95m. m_o [m ²]	0,85	0,86	0,90	ca.0,57	0,59
Onderz.schuif NAP -3,30m. \bar{T}_2 [s]	5,85	5,81	5,83	5,83	-
T_{p1} [s]	10,8	11,4	11,8	11,3	10,8
T_{p2} [s]	5,40	5,40	5,40	5,40	5,75

Tabel 3

Golfklapdrukken en -krachten op de benedenligger (Ruimte V).

Gemiddelde waarden μ en standaardafwijkingen σ/μ (Froudeschaling)

waarden van μ

Proef	H_i [m]	T_{Hi} [s]	$\left(\frac{dH_2}{dt}\right)$ [m/s]	D_{6o-t} [kN/m ²]	F_{vo-t} [kN]	D_{7o-t} [kN/m ²]	D_{8o-t} [kN/m ²]	$\frac{1}{2}\Sigma(D7, D8)_{o-t}$ [kN/m ²]
185	2,3	3,8		49	610	85	72	56
150	3,5	4,6	3,6	110	760	110	87	71
160	4,9	5,7	4,1	170	810	76	89	70
170	4,8	6,6	3,1	120	830	83	72	57
140	5,0	7,6	3,1	120	870	81	64	60

waarden van σ/μ [%]

185				55	31	56	43	46
150			13	46	26	57	30	34
160			12	35	14	38	31	19
170			20	50	22	30	29	23
140			11	34	30	38	20	27

Tabel 4

Golfklapdrukken en -krachten op de middenligger (Ruimte V).

Gemiddelde waarden μ en standaardafwijkingen σ/μ (Froudeschaling).

waarden van μ

Proef	H _i [m]	T _{Hi} [s]	F _{v o-t} (D2,D3) [kN]	D _{2o-t} [kN/m ²]	D _{3o-t} [kN/m ²]	$\frac{1}{2}\Sigma(D2D3)_{o-t}$ [kN/m ²]	D _{4o-t} [kN/m ²]	D _{5o-t} [kN/m ²]	F _{v o-t} (D1) [kN]	D _{1 o-t} [kN/m ²]
480	2,3	3,8	140	5	7	5	5	5	290	130
450	3,4	4,4	160	11	14	10	-	-	290	130
460	4,9	5,7	360	37	35	35	-	-	320	140
470	4,8	6,6	360	44	41	38	20	19	440	210
440	4,8	7,6	450	45	42	42	-	-	280	140
692	5,4	10,8	730	62	60	62	53	47	150	140

waarden van σ/μ [%]

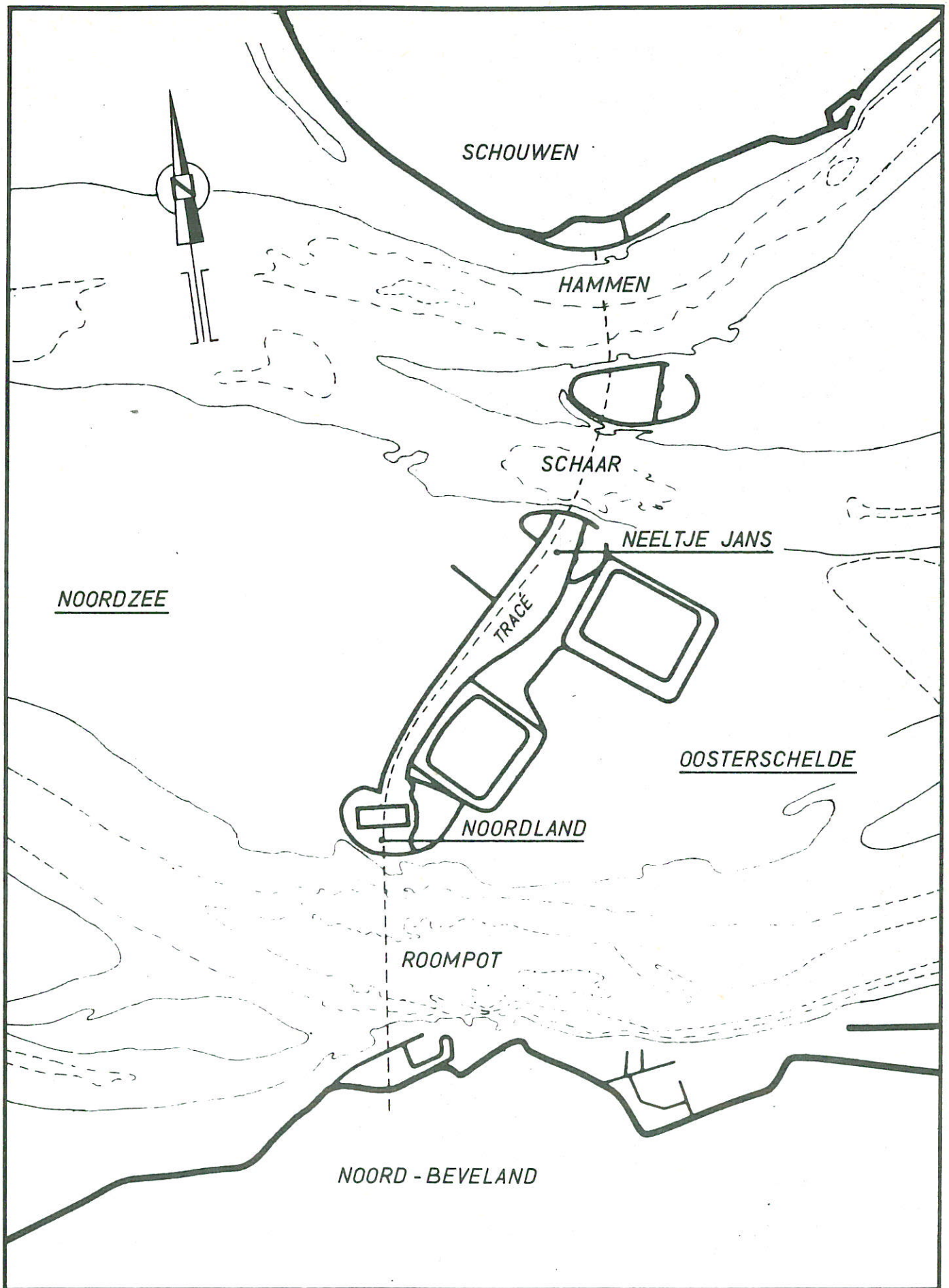
480		65	79	89	79	58	60	48	46
450		48	50	55	56	-	-	68	40
460		29	20	16	20	-	-	35	37
470		30	31	19	26	45	38	27	27
440		40	31	35	30	-	-	34	36
692		31	29	22	26	31	32	40	32

Tabel 5 Golfhoogten en watersnelheden, middenligger (Ruimte V)
 Gemiddelde waarden.

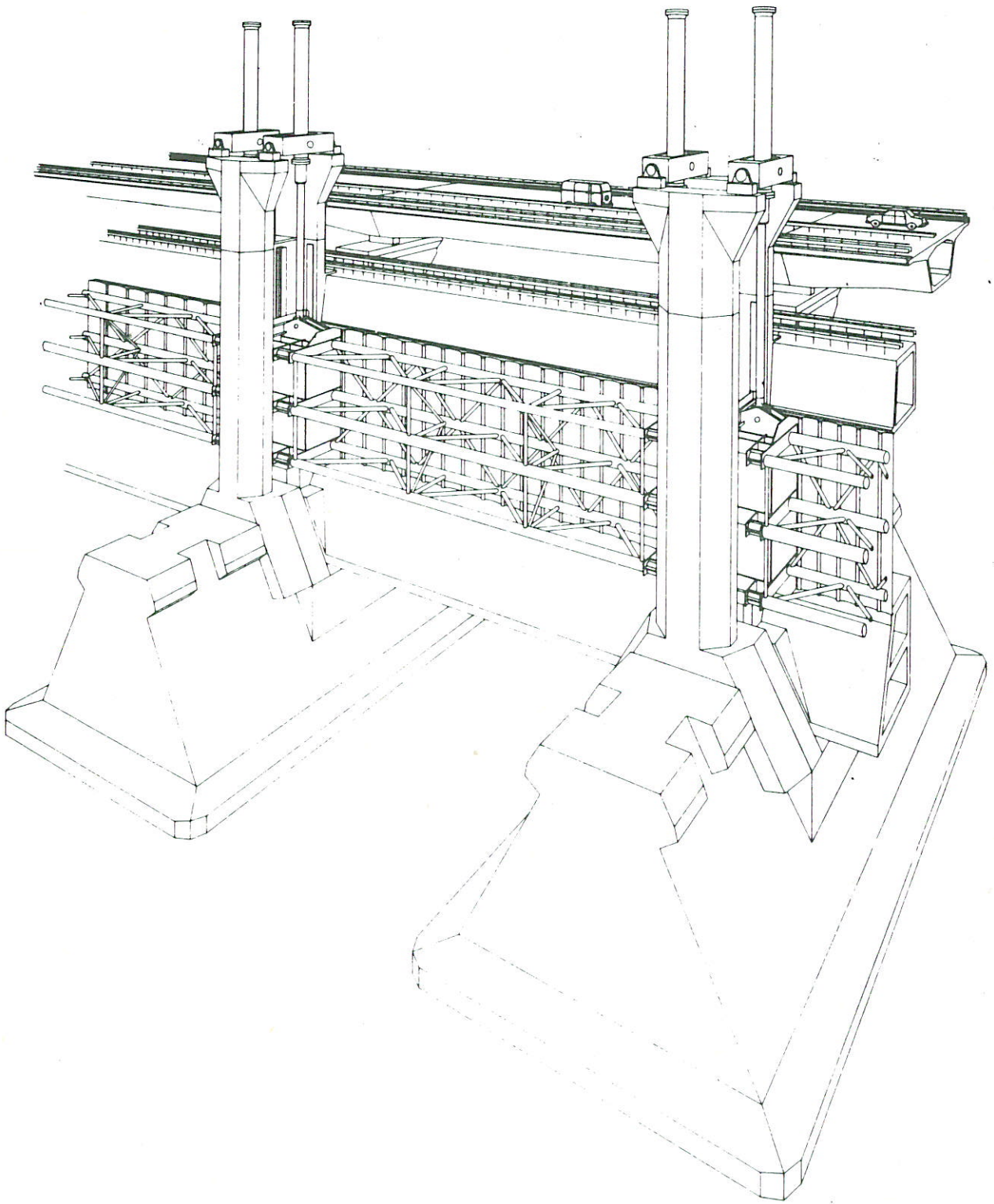
Proef	H _i [m]	T [s]	Golfhoogte in de eindkoker [m]	Opwaartse snelheid in de eindkoker [m/s]	Golfhoogte voor de eindkoker [m]	Opwaartse snelheid voor de eindkoker [m/s]
480/682	2,3	3,8	1,2	-	3,2	2,9
450/652	3,4	4,4	1,7	1,1	5,4	3,5
460/662	4,9	5,7	2,4	1,9	5,7	2,8
470/672	4,8	6,6	3,0	2,5	7,4	3,1
440/642	4,8	7,6	3,6	2,8	7,5	2,7
692	5,4	10,8	-	-	8,3	2,4

Tabel 6: Kenmerken van geanalyseerde klappen op de benedenligger.

Proef 199	D1	D2	D3	D4	D5
Aantal geanalyseerde klappen	10	15	15	6	9
τ range [ms model]	1-8	<0,5-6	<0,5-0,6	2-3	<0,5-10,5
μ [ms model]	3,1	1,5	2,2	2,5	2,1
σ [ms model]	2,1	1,8	1,9	0,4	3,3
f range [Hz model]	400-700	375-1850	735-2500	220-1000	425-1000
μ [Hz model]	510	875	1070	435	720
σ [Hz model]	125	500	500	325	215
$t_{1/2}$ range [ms model]	0,8-1,2	0,1-5	0,2-1,4	0,7-2,6	0,5-1,0
μ [ms model]	1,0	0,8	0,5	1,7	0,7
σ [ms model]	0,1	1,2	0,3	0,6	0,2
P_{max} , grootste waarde gedurende P199 [kN/m ²]					
proto	335	400	525	320	525
A [m ² proto]	0-5,0	0,2-2,8	0,8-2,2	0,5-2,3	0,1-2,5
Flenshoogte h [m proto]	0,40	0,40	<0,24 (verjongd)	>0,30 (kram)	0,38
relatieve flenshoogte h/plaatsveldoppervl. [1/m proto]	3,6	5,9	>7,1	≈ 1	4,5



OVERZICHT VAN DE OOSTERSCHELDEMOND MET
HET TRACÉ VAN DE STORMVLOEDKERING



PERSPEKTIEFTEKENING VAN DE STORMVLOEDKERING
OOSTERSCHELDE

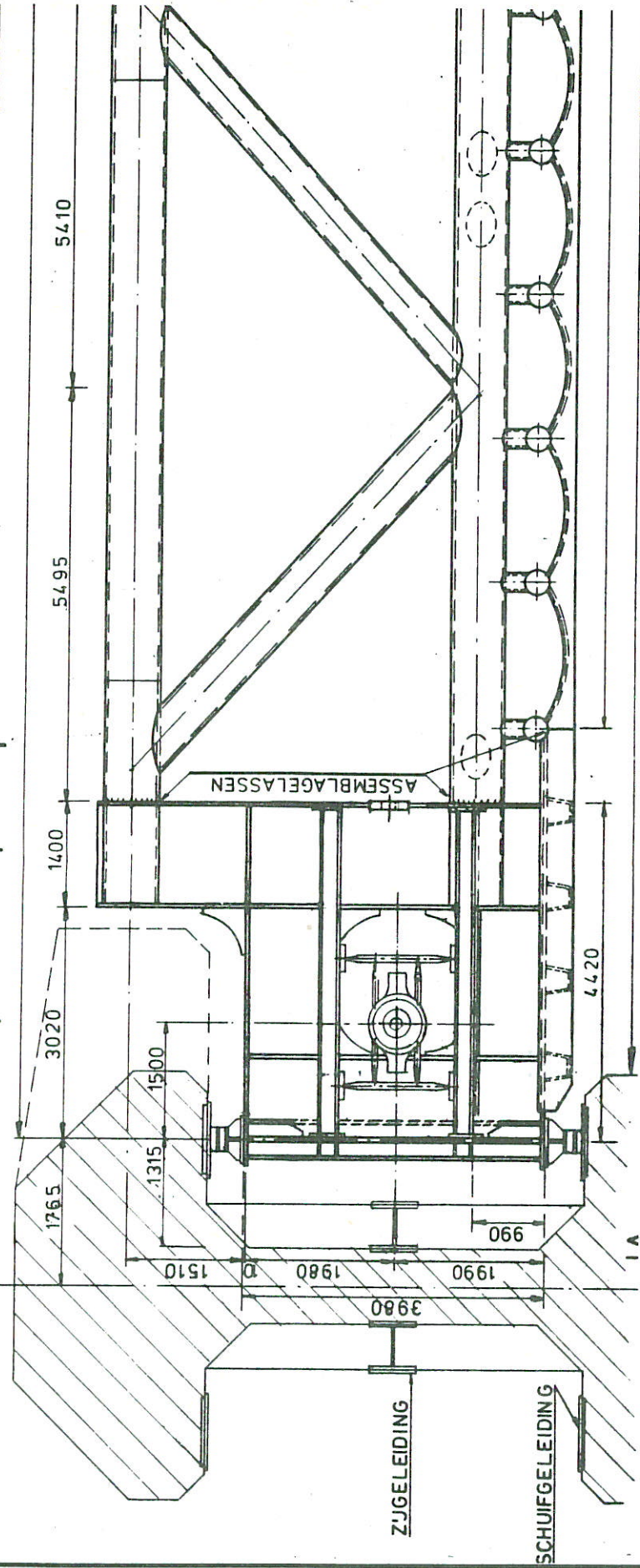
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1835-1002

FIG. 2

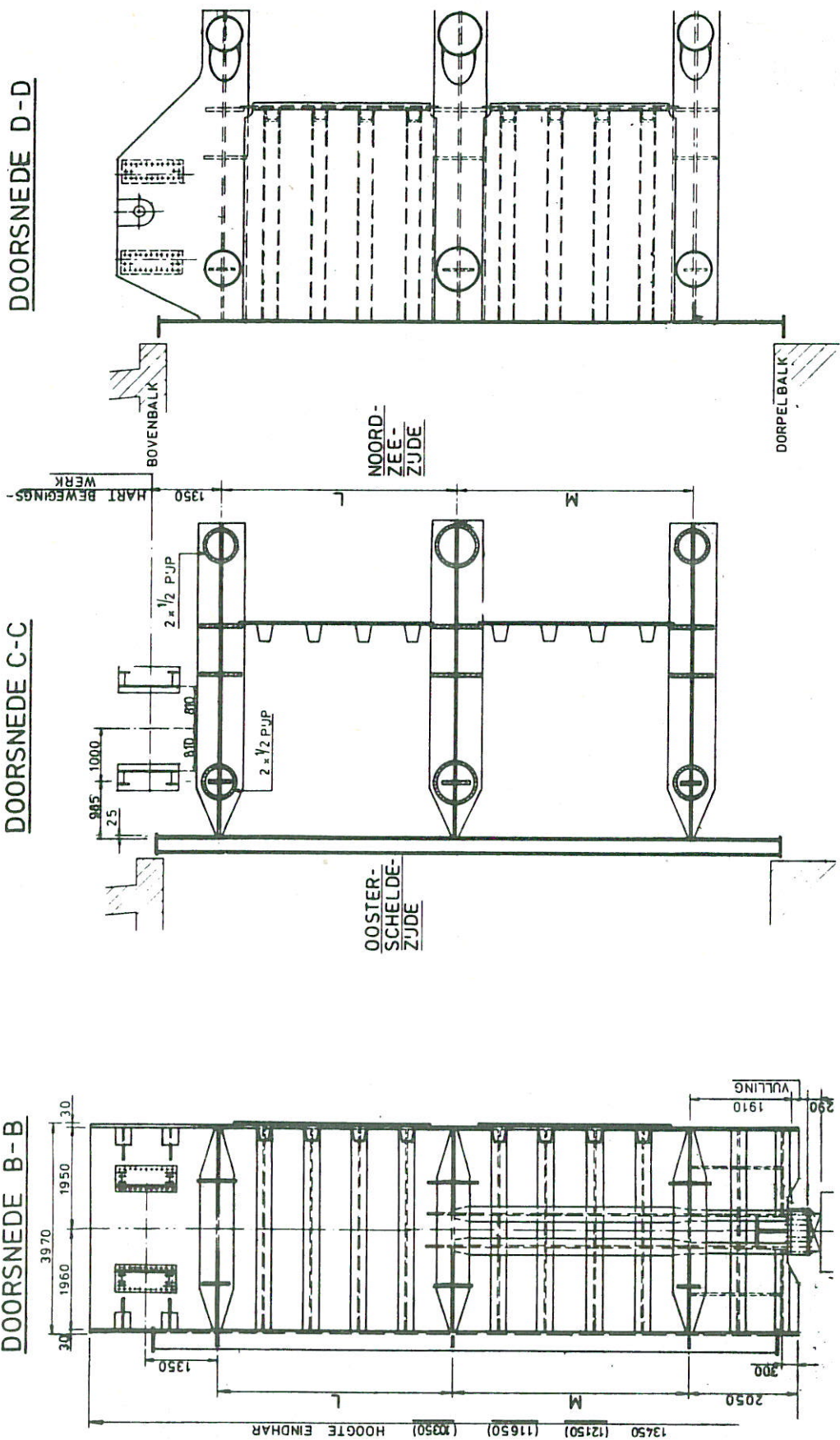
A4

DOORSNEDE PULVER
BOVEN N.A.P.



BOVENAANZICHT EINDKOKER, EN GEDEELTE VAN VAKWERKEN
SCHAALBEPLATING TEK. NR. A81482, RWS DIR. BRUGGEN

A 4



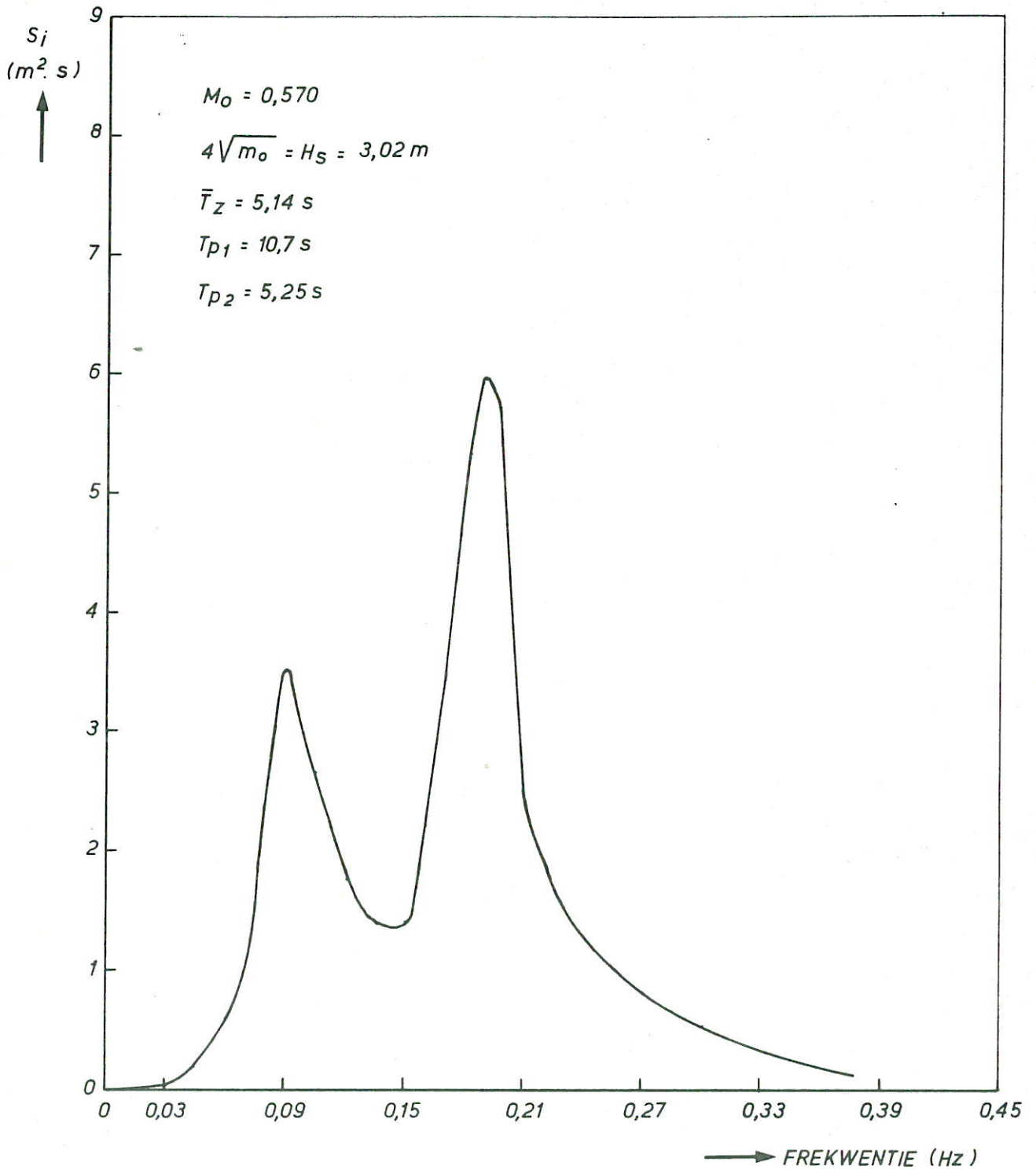
VERTIKALE DOORSNEDEN OVER DE EINDKOKER
 TEKENING NR. A81482, RWS DIR. BRUGGEN

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1835-1004

FIG. 4



GEWENST INKOMEND GOLFSPEKTRUM OP
 STILSTAAND WATER

$N_L = 40$

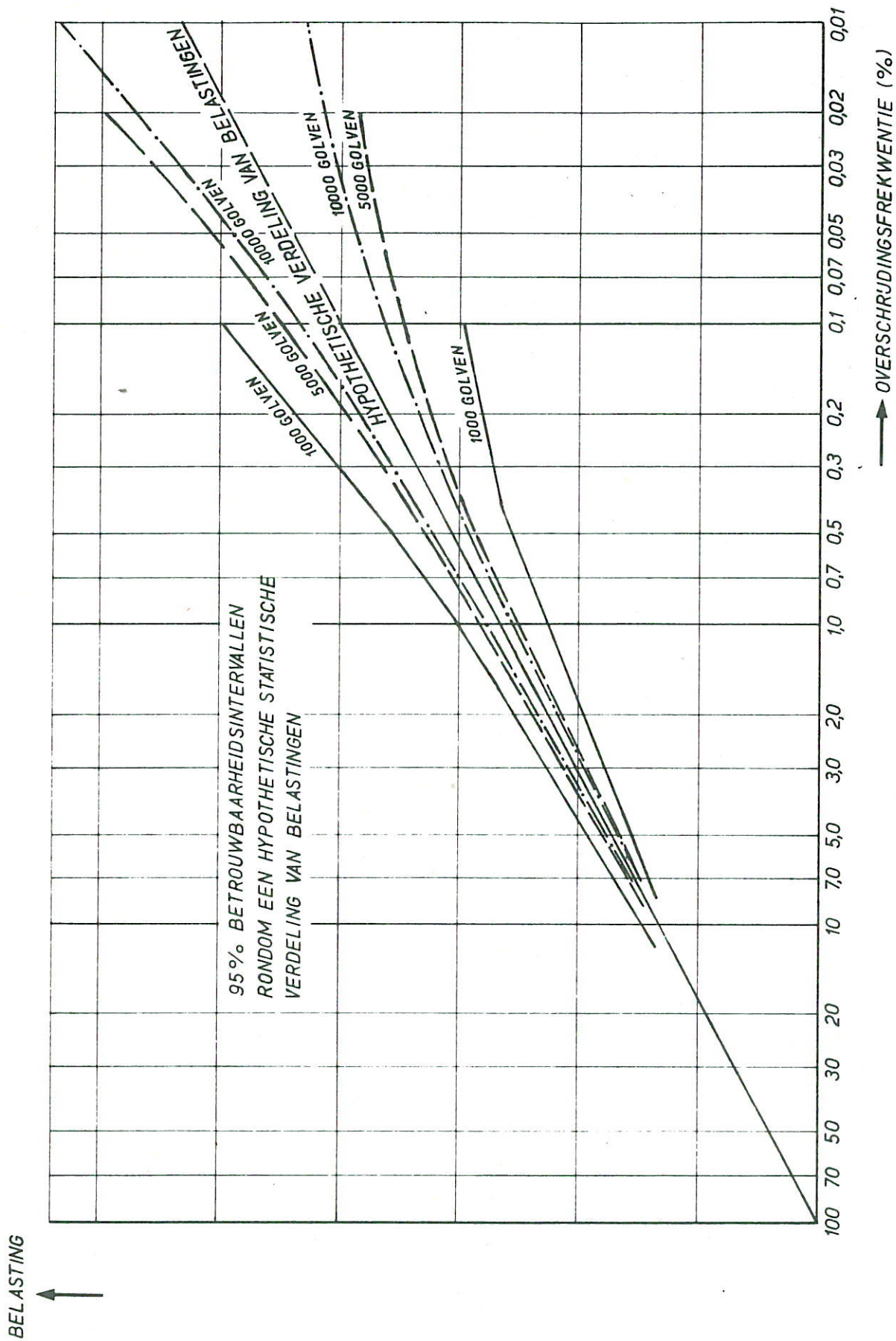
ZEEWATERSTAND.
 N.A.P. +3m

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

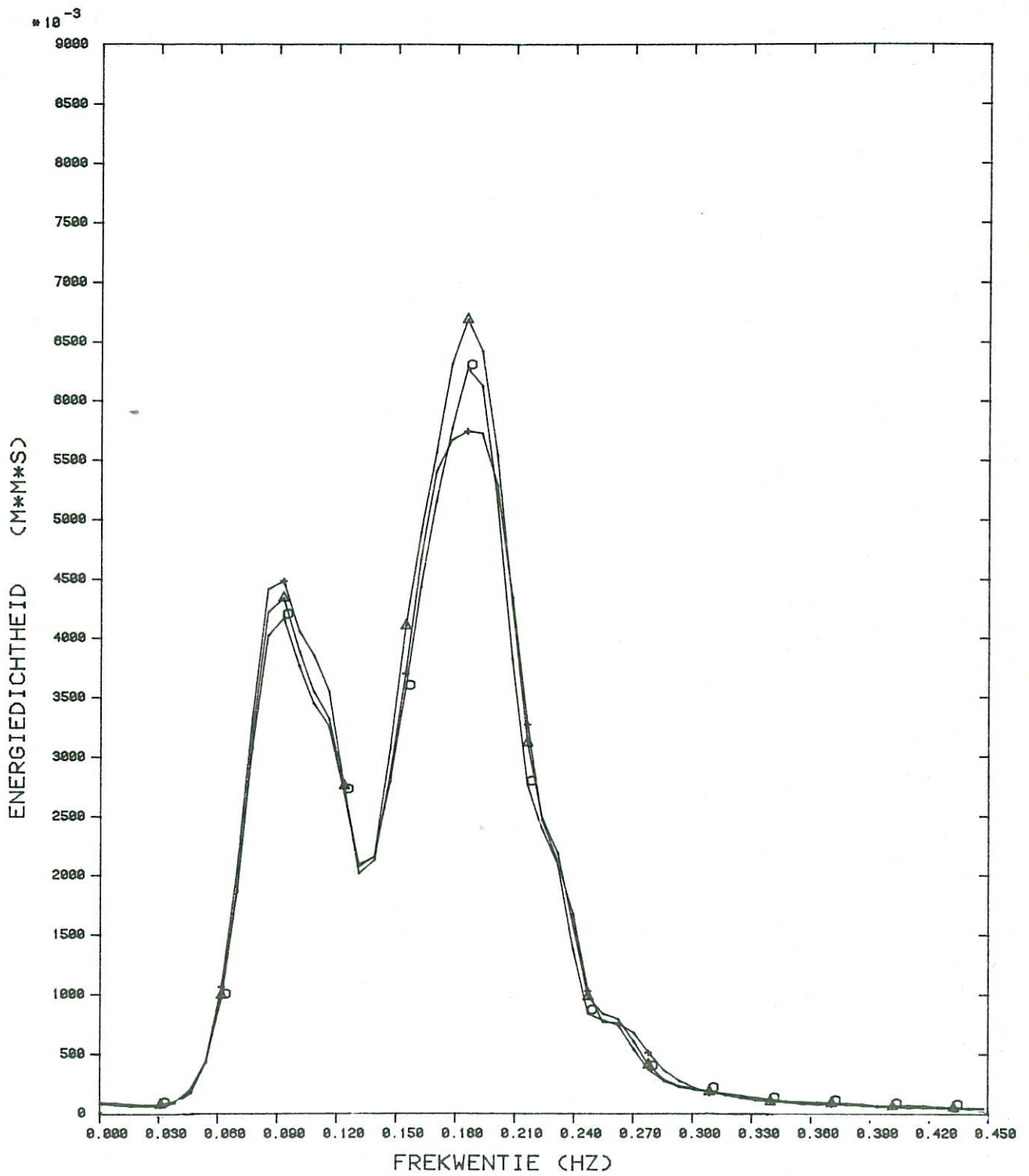
M1835-1005

FIG. 5



95 % - BETROUWHEIDSINTERVALLEN BIJ 1000 ,
5000 EN 10000 GOLVEN

A4



	M0(M ²)	SP(M ² S)	TP(S)
□ M1835P168.K01	0.69	6.27	5.39
△ M1835P168.K04	0.74	6.69	5.39
+ M1835P168.K05	0.72	5.74	5.39

ENERGIEDICHTHEIDSSPEKTRA VAN GEMETEN
GOLVEN OP STROMEND WATER

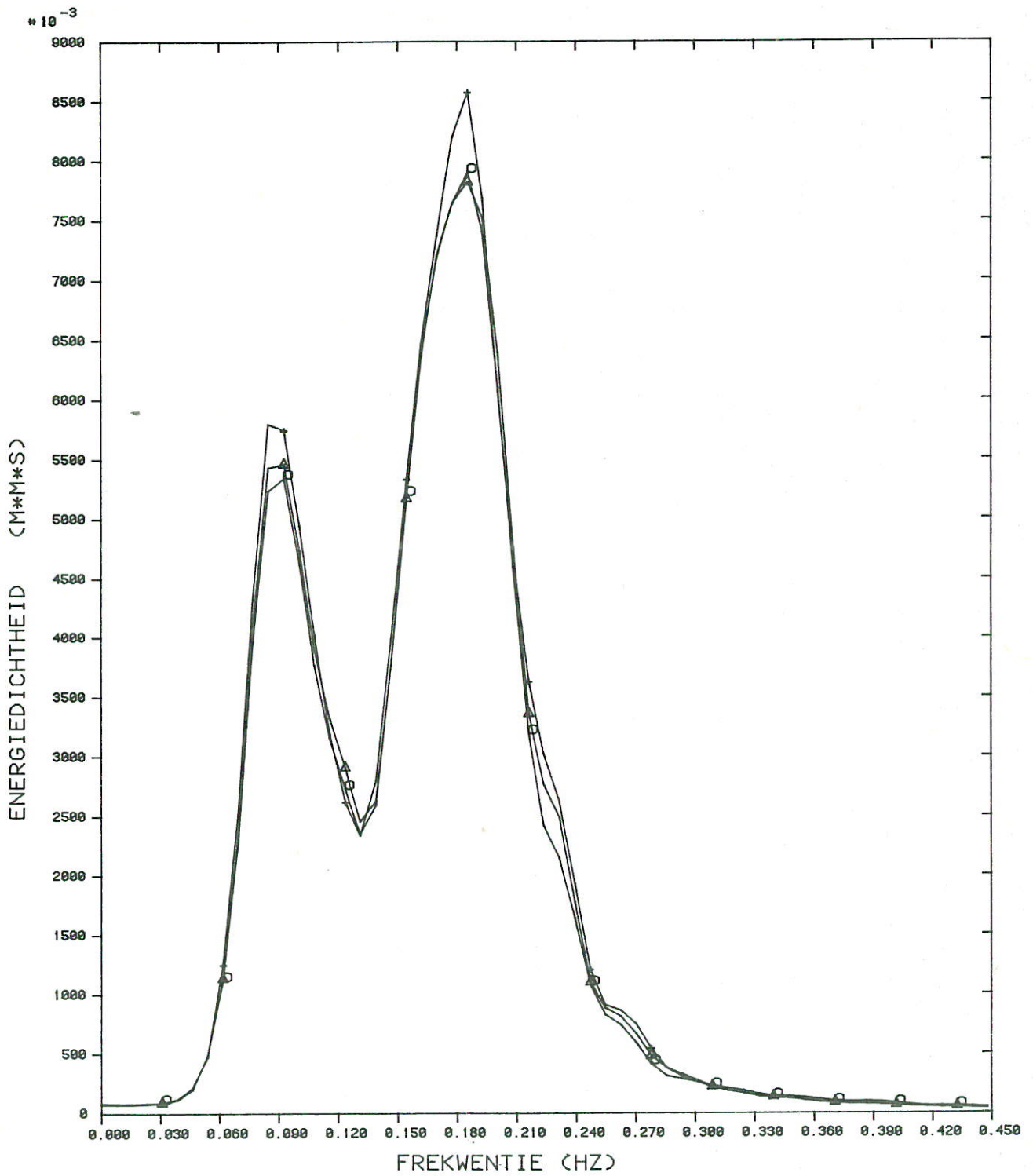
WATERGOLVEN
P 199 (1/5 DEEL)
DATUM: 24-11-1981

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1007

FIG. 7



□	M1835P459.K01	M0(M ²)	SP(M ² S)	TP(S)
△	M1835P459.K04	0.85	7.90	5.39
+	M1835P459.K05	0.87	7.82	5.39
		0.90	8.57	5.39

ENERGIEDICHTHEIDSSPEKTRA VAN GEMETEN
GOLVEN OP STROMEND WATER

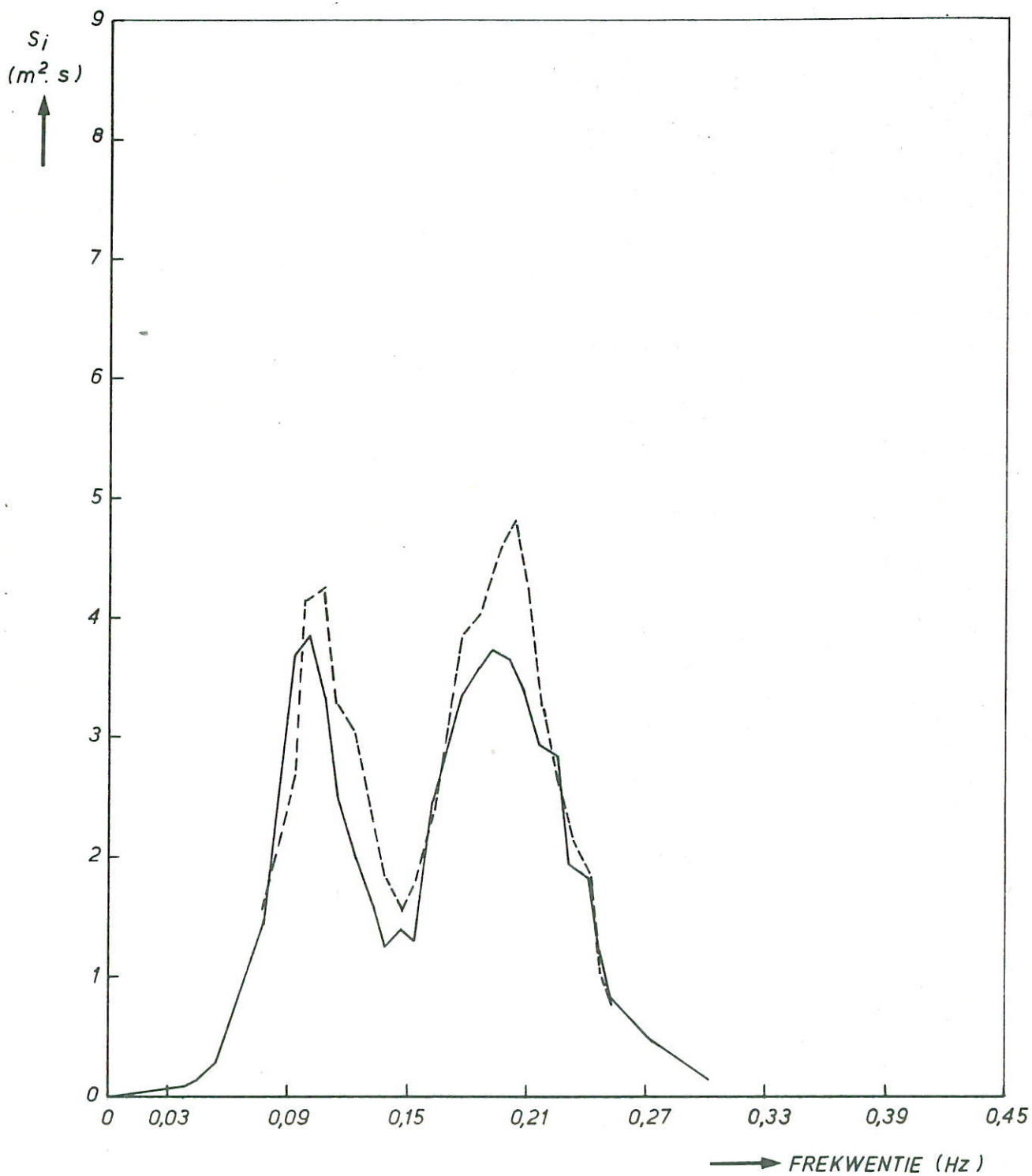
WATERGOLVEN
P 499 (1/3 DEEL)
DATUM: 1-2-1982

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1835-1008

FIG. 8



ENERGIEDICHTHEIDSSPEKTRA VAN INKOMENDE GOLVEN
OP STROMEND WATER

PROEVEN 199 EN 499

— P 199

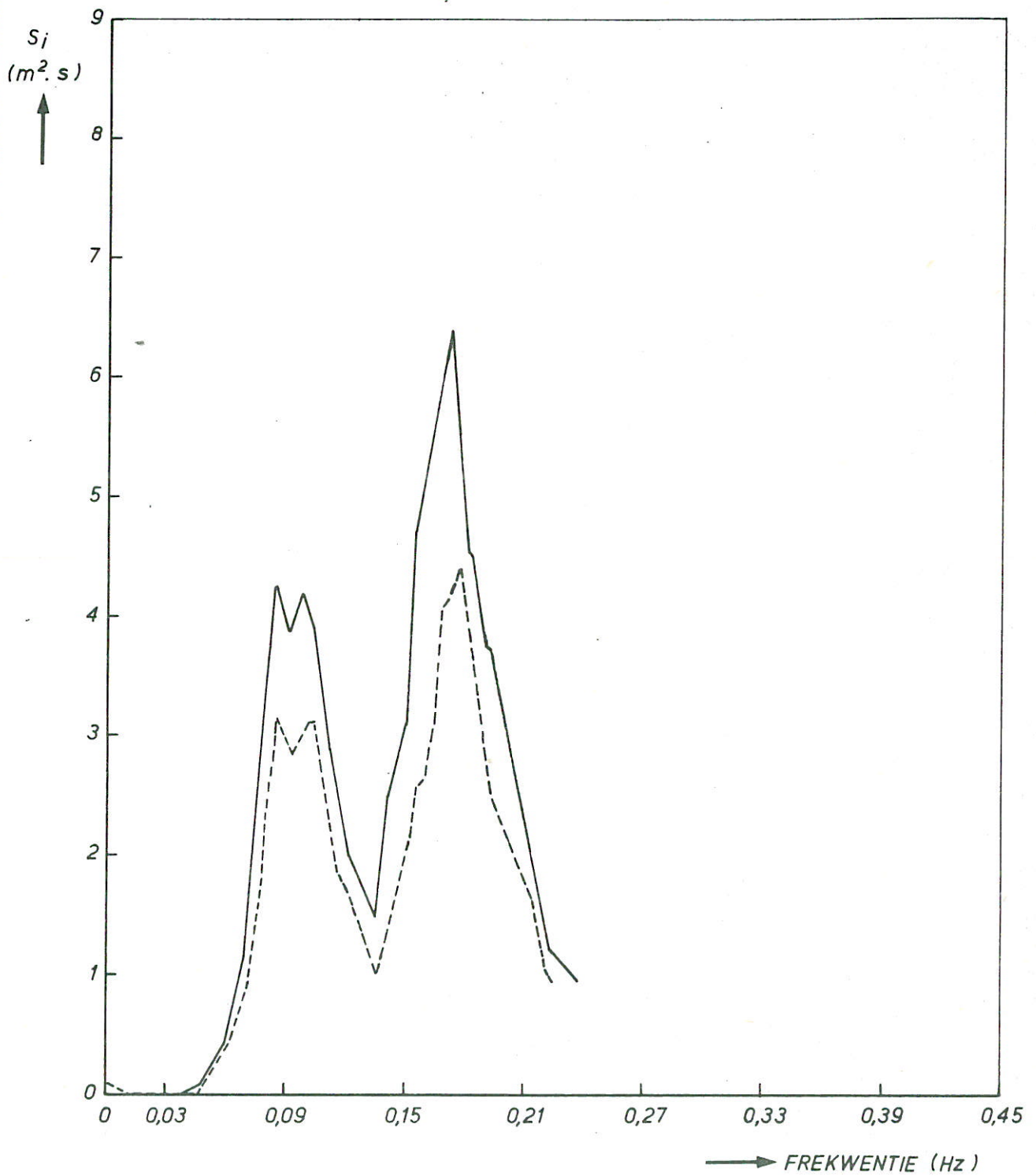
- - - - P 499

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1009

FIG. 9



ENERGIEDICHTHEIDSSPEKTRA VAN INKOMENDE GOLVEN
OP STILSTAAND WATER PROEVEN 199 EN 499, H6

— P 199

- - - P 499

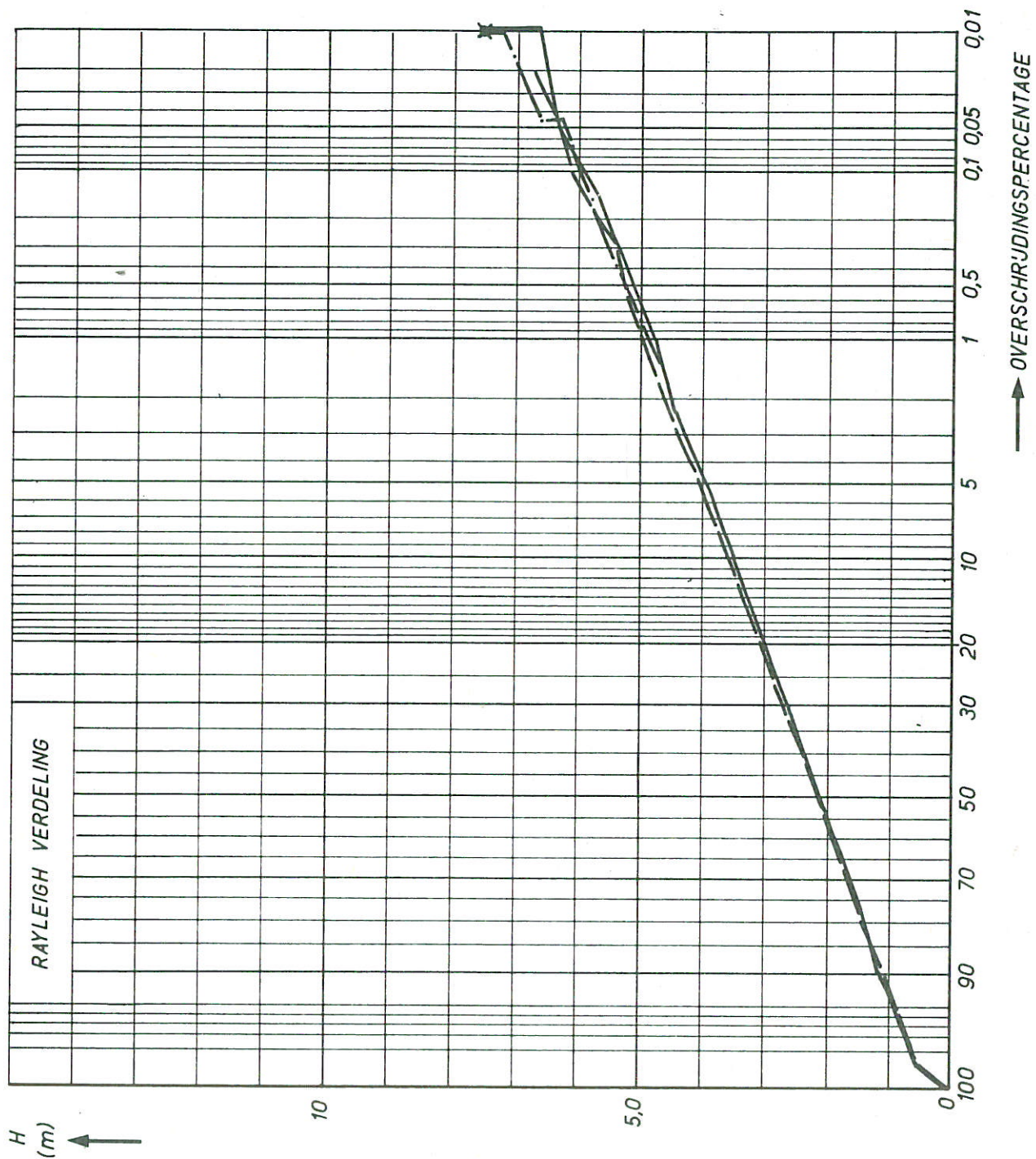
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1010

FIG.10

H1
 H4
 H5



STATISTISCHE VERDELINGEN VAN GEMETEN GOLF-HOOGTEN OP STROMEND WATER

PROEF 199

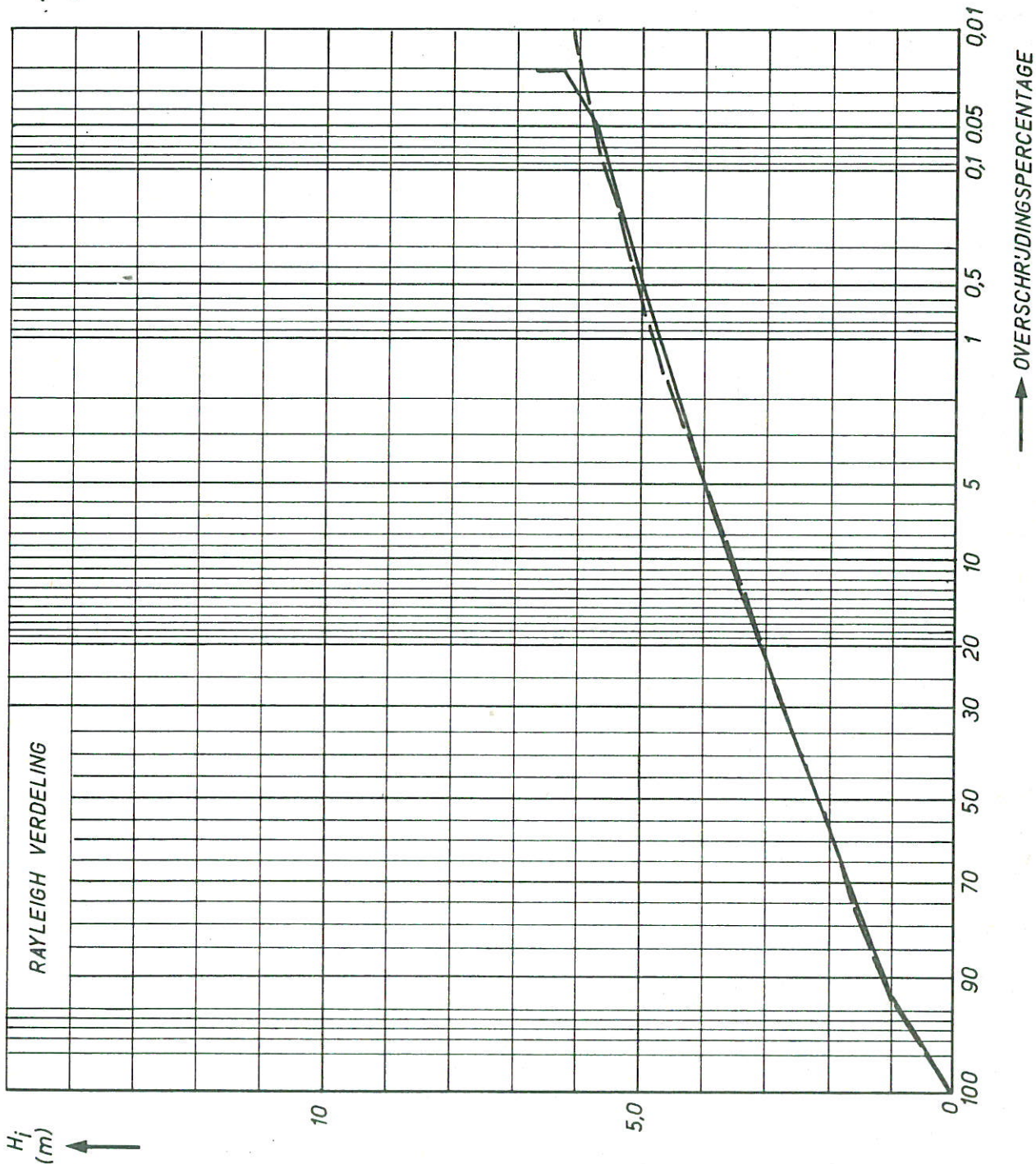
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1011

FIG. 11

— P199
 - - - P499



STATISTISCHE VERDELINGEN VAN INKOMENDE GOLF-
 HOOGTEN OP STILSTAAND WATER, H_6

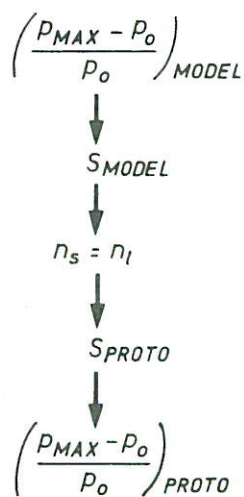
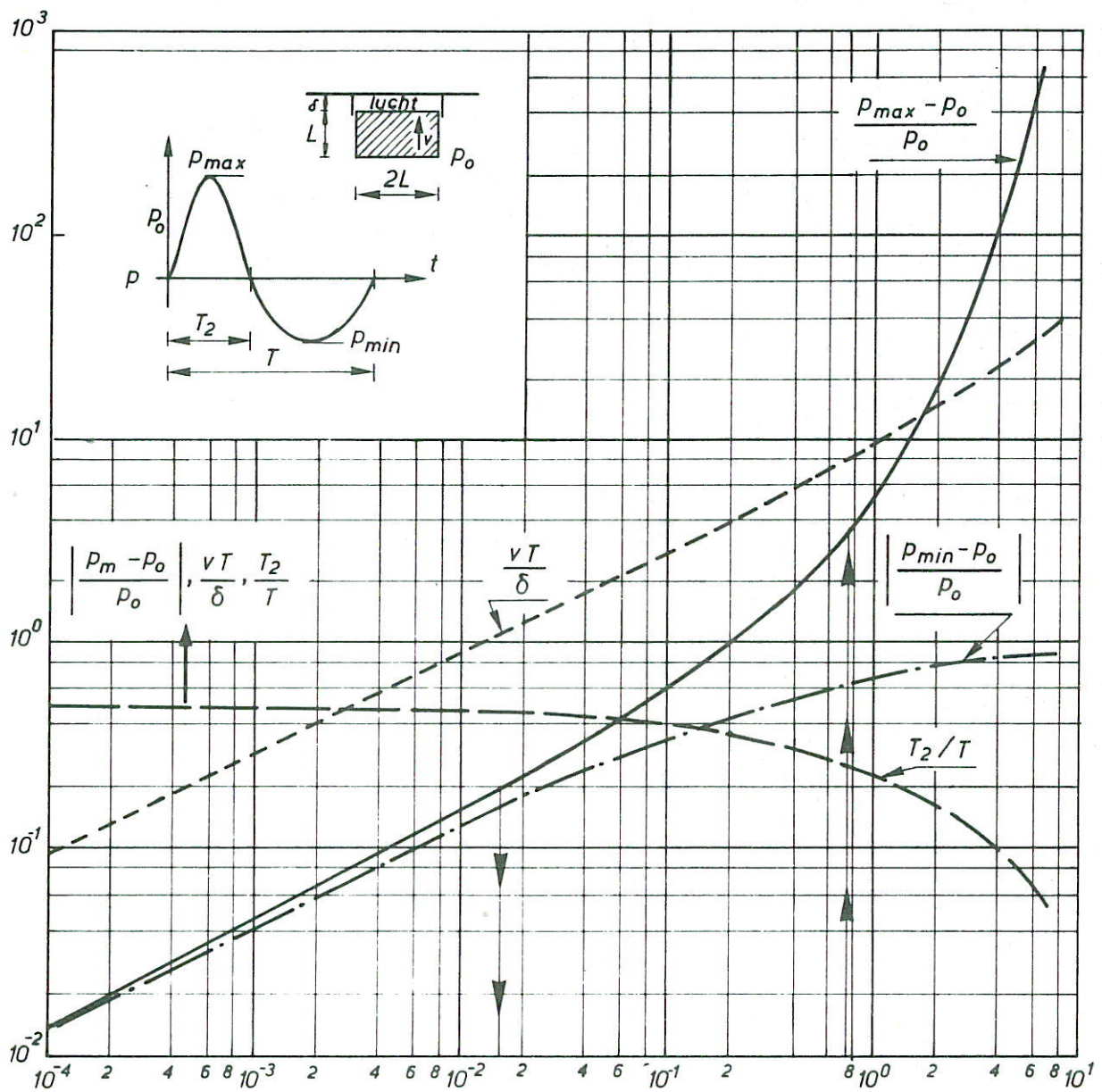
PROEVEN 199 EN 499

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1012

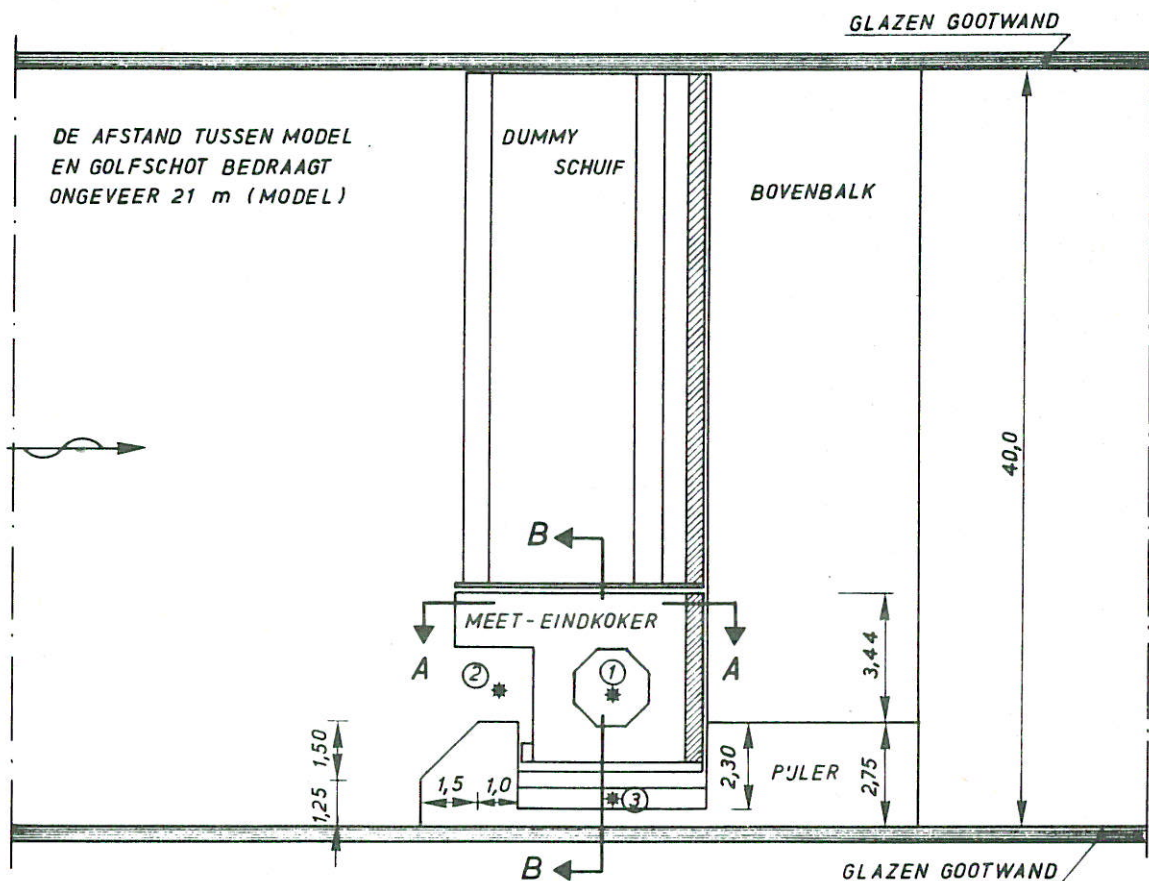
FIG. 12



$$S = \frac{1/2 \rho v^2}{P_0} \frac{L}{\delta}$$

NIET-LINEAIR COMPRESSIEMODEL VOLGENS RAMKEMA [2]

A4



SCHAAL 1:5 t.o.v. MODEL ; 1:200 t.o.v. PROTOTYPE

- ① LOKATIE VAN H_2 BIJ METING VAN WATERSPIEGELBEWEGINGEN IN DE KOKERS
- ② LOKATIE VAN H_2 BIJ METING VAN WATERSPIEGELBEWEGINGEN VOOR DE KOKER (SITUATIE METINGEN AAN MIDDENLIGGER)
- ③ LOKATIE VAN H_2 BIJ METING VAN WATERSPIEGELBEWEGINGEN IN DE SPONNING (SITUATIE METINGEN AAN MIDDENLIGGER)

BOVENAANZICHT VAN DE OPSTELLING IN DE
GLAZEN GOOT VAN RUIMTE V

MATEN IN m
PROTOTYPE

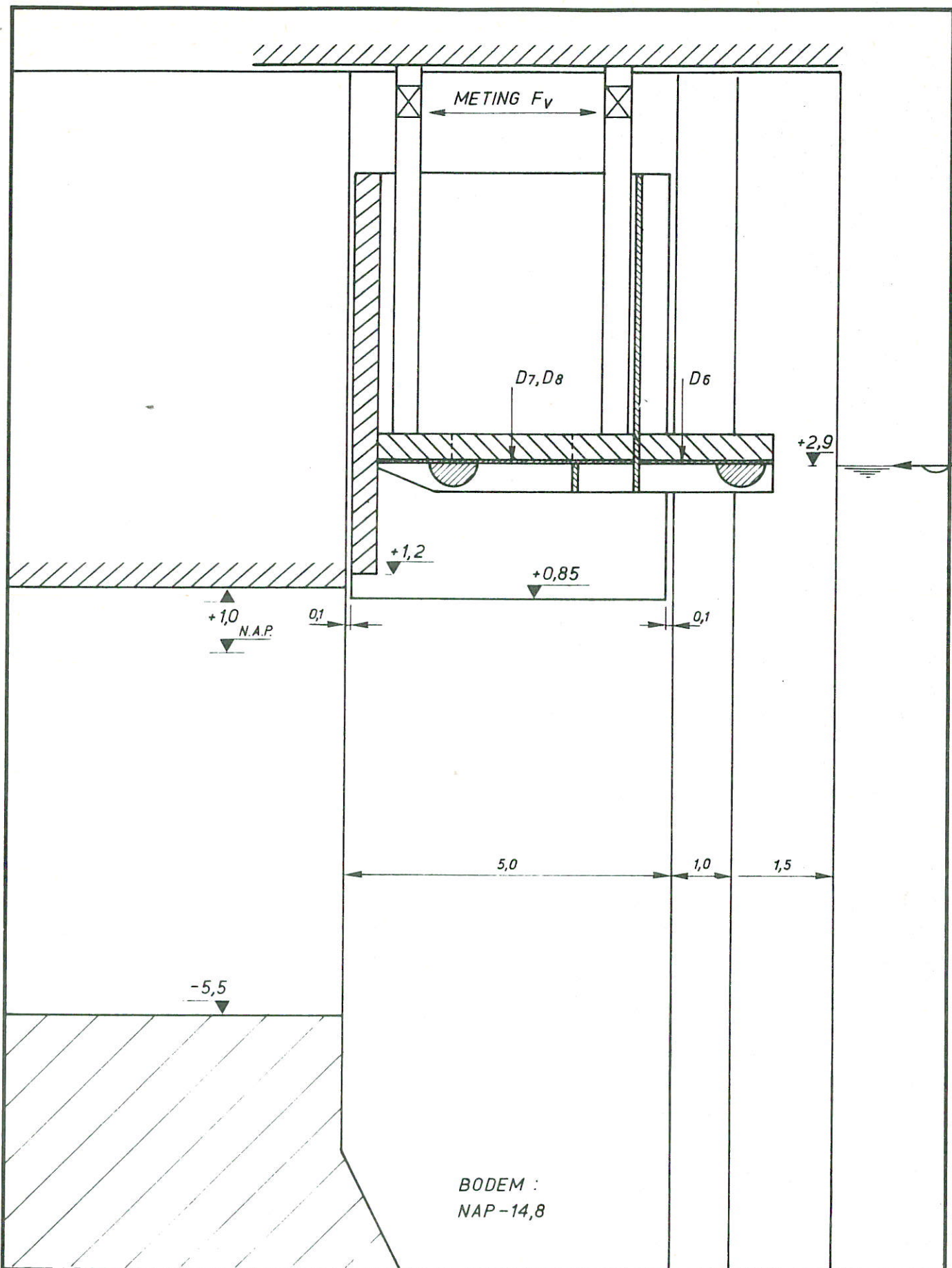
JB

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1014

FIG.14



SCHEMATISCHE DOORSNEDE A - A , RUIMTE V

MATEN IN m
PROTOTYPE

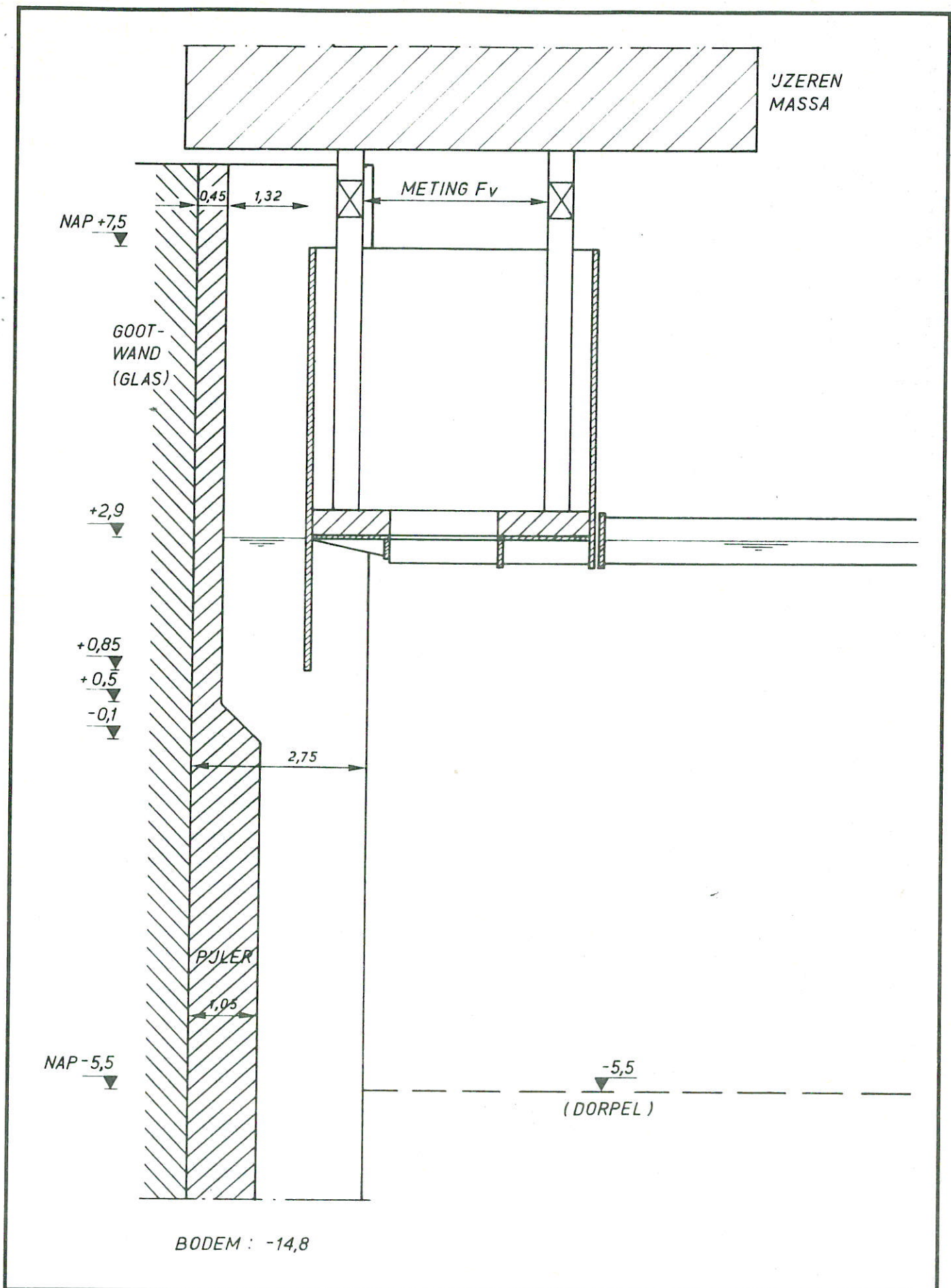
JB

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1835 - 1015

FIG. 15



DOORSNEDE B-B, RUIMTE V
 SITUATIE : METING AAN BENEDENLIGGER

MATEN IN m
 PROTOTYPE

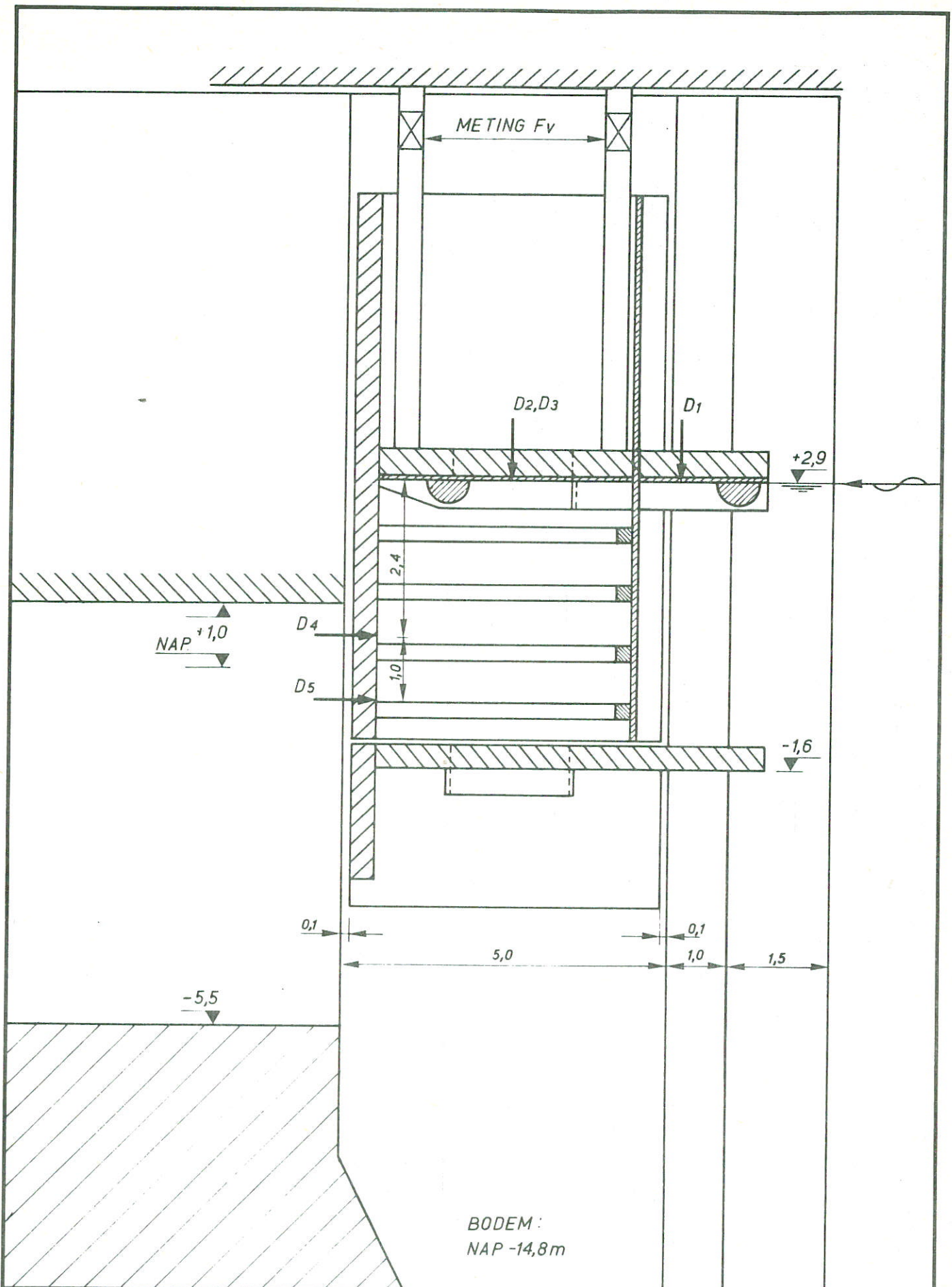
JB

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1016

FIG. 16

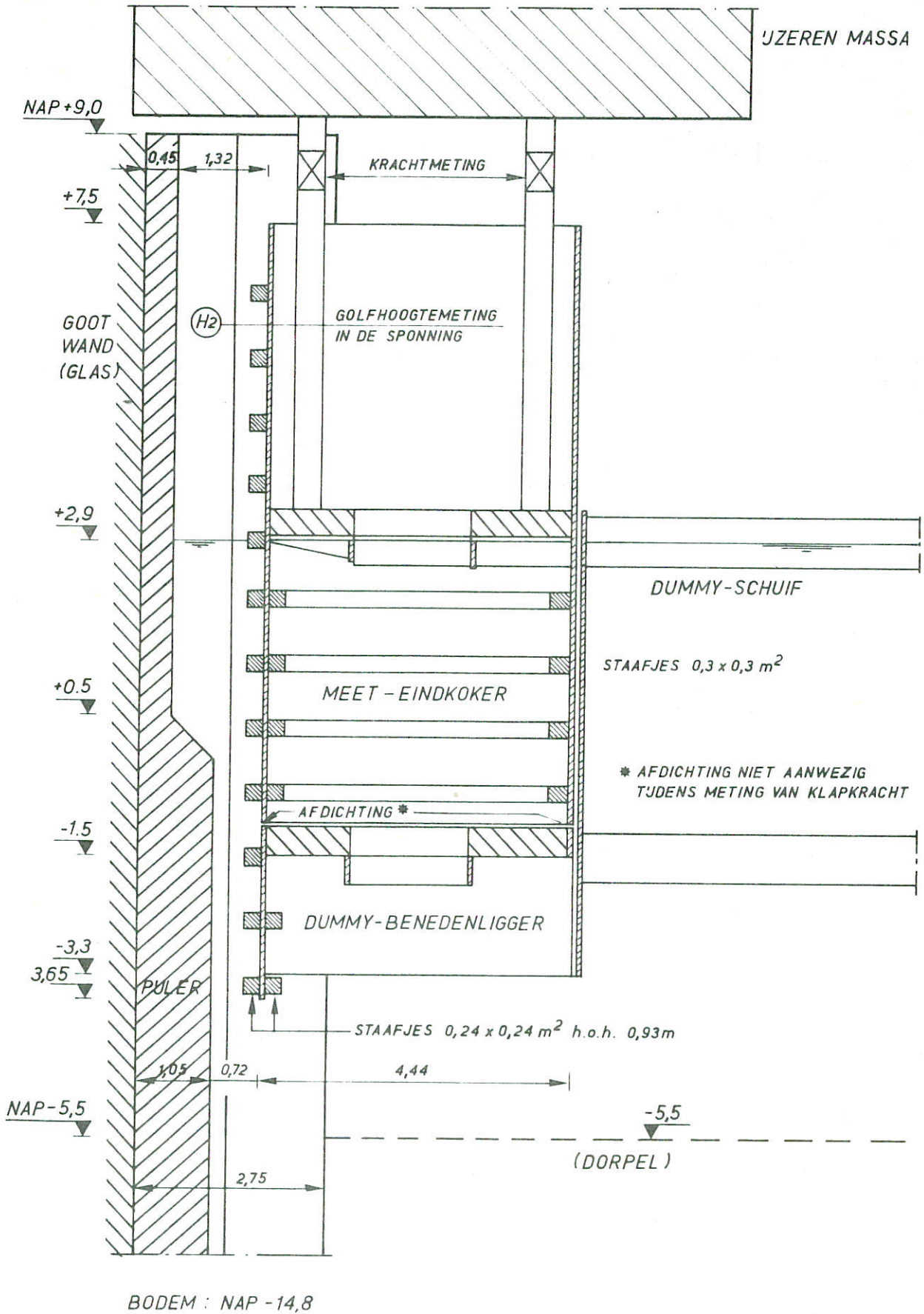


SCHEMATISCHE DOORSNEDE A-A, RUIMTE V
SITUATIE: METING AAN MIDDENLIGGER

MATEN IN m
PROTOTYPE

JB

A4



DOORSNEDE B-B, RUIMTE V
SITUATIE : METING AAN BENEDENLIGGER

MATEN IN m
PROTOTYPE

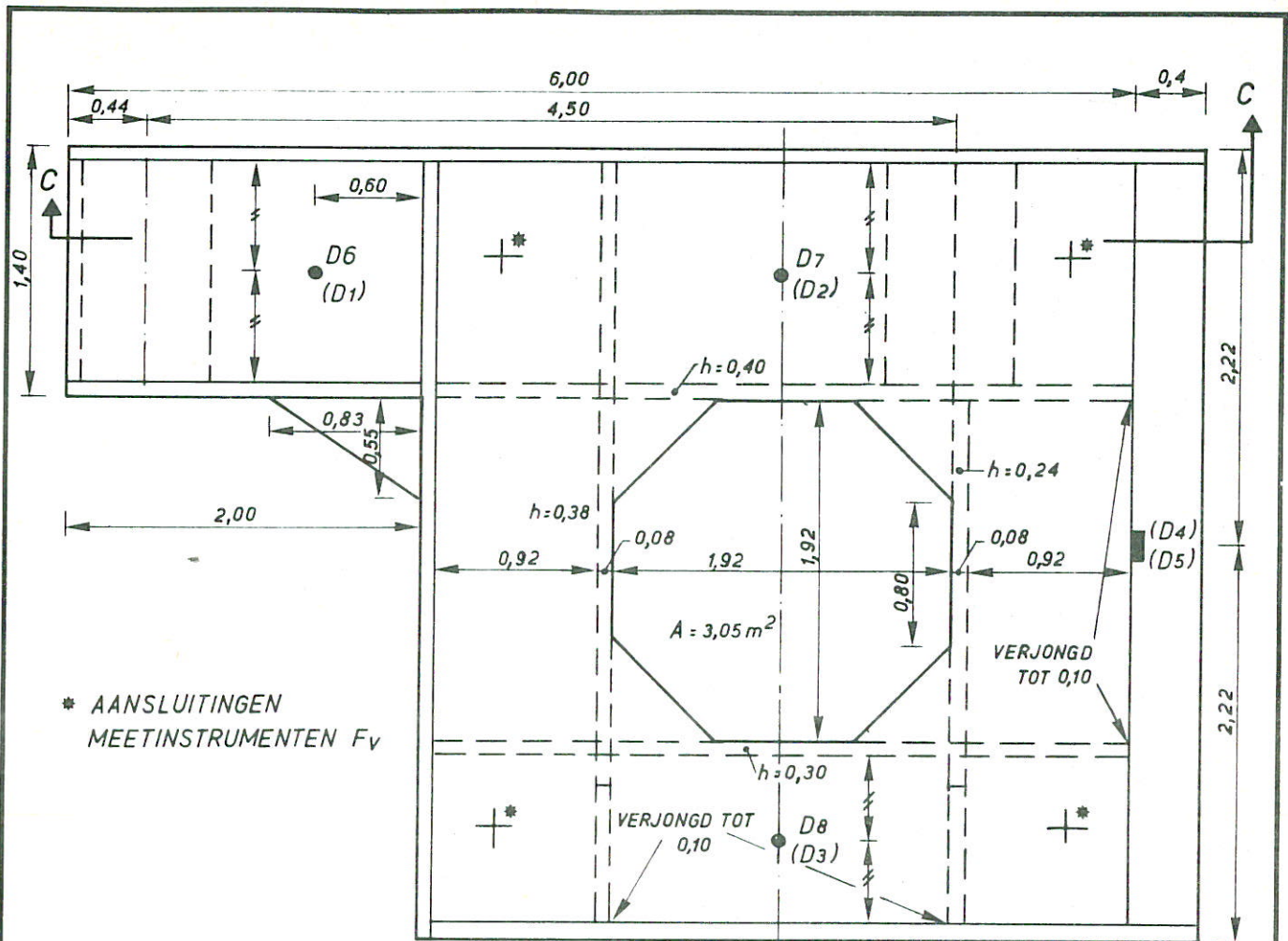
JB

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

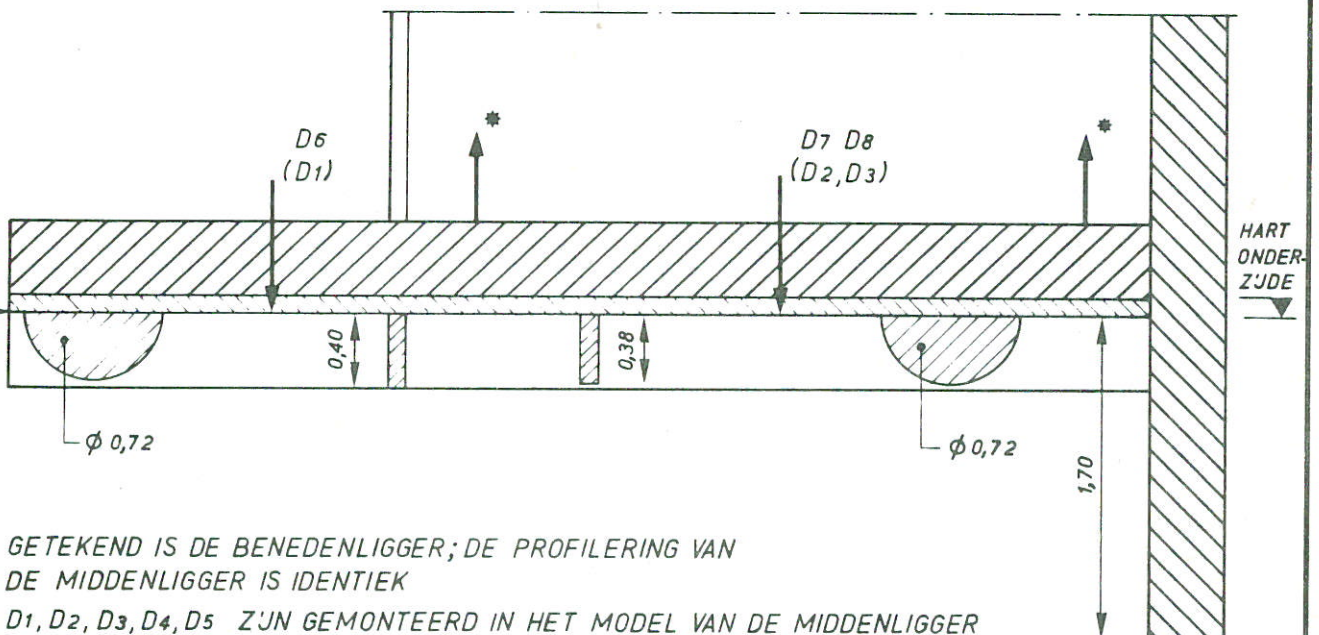
M 1835 - 1018

FIG.18



* AANSLUITINGEN
MEETINSTRUMENTEN F_v

DSN C-C



GETEKEND IS DE BENEDENLIGGER; DE PROFILERING VAN DE MIDDENLIGGER IS IDENTIEK

D1, D2, D3, D4, D5 ZIJN GEMONTEERD IN HET MODEL VAN DE MIDDENLIGGER
D6 D7 D8 ZIJN GEMONTEERD IN HET MODEL VAN DE BENEDENLIGGER

BOVENAANZICHT MEETKOKERS MET PLAATSIING DRUK-
OPNEMERS, RUIMTE V

MATEN IN m
PROTOTYPE

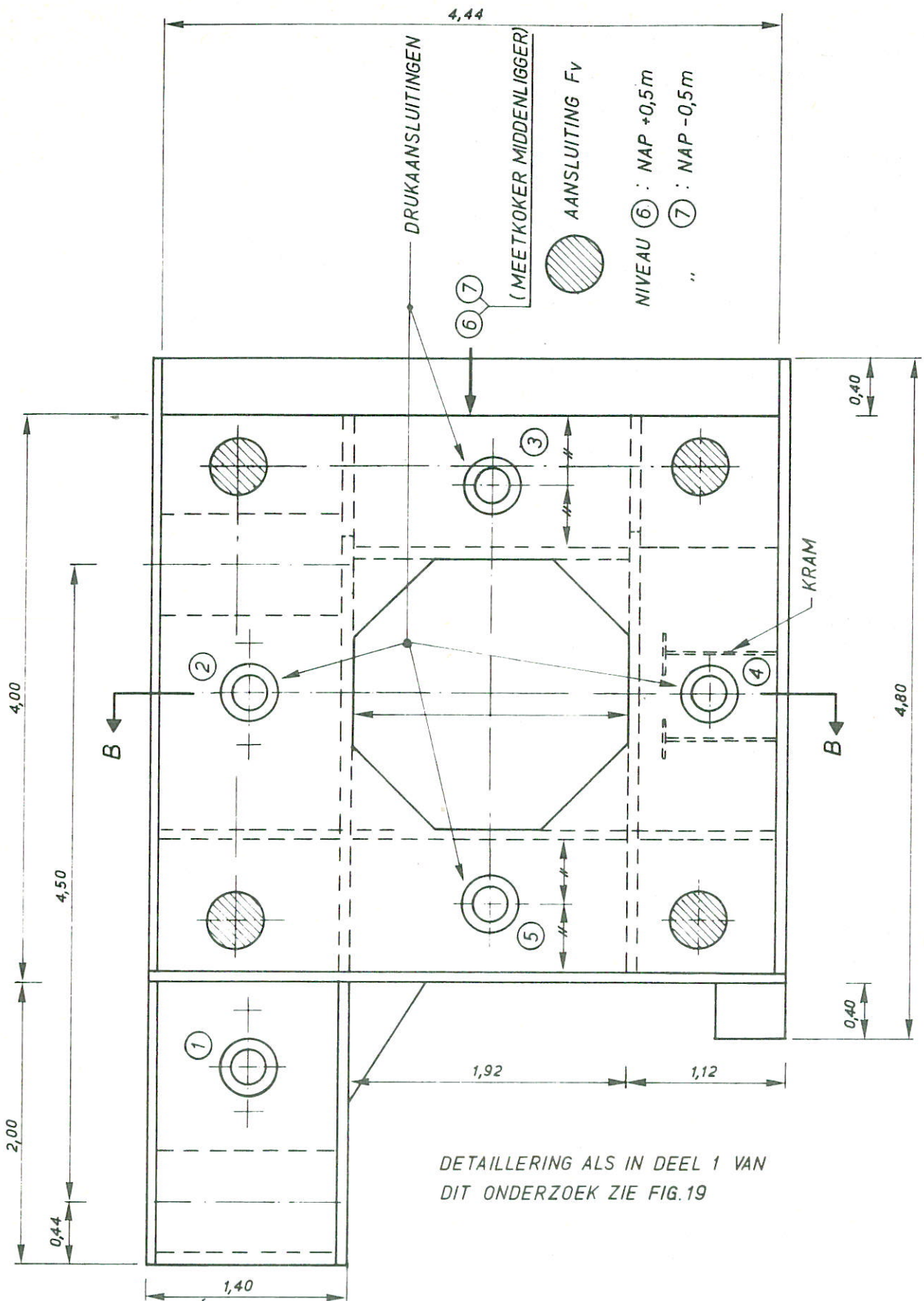
JB

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1019

FIG. 19



BOVENAANZICHT MEETKOKERS MET PLAATSING
DRUKOPNEMERS, GOOT 3

MATEN IN m
PROTOTYPE

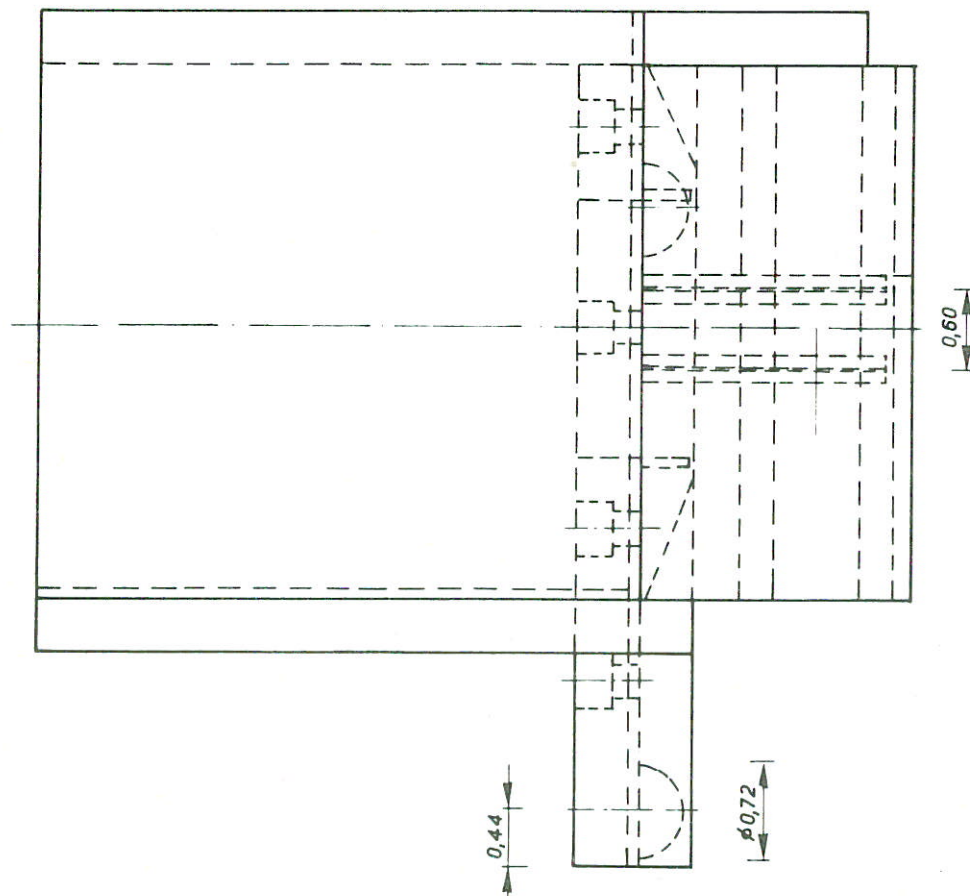
JB

A4

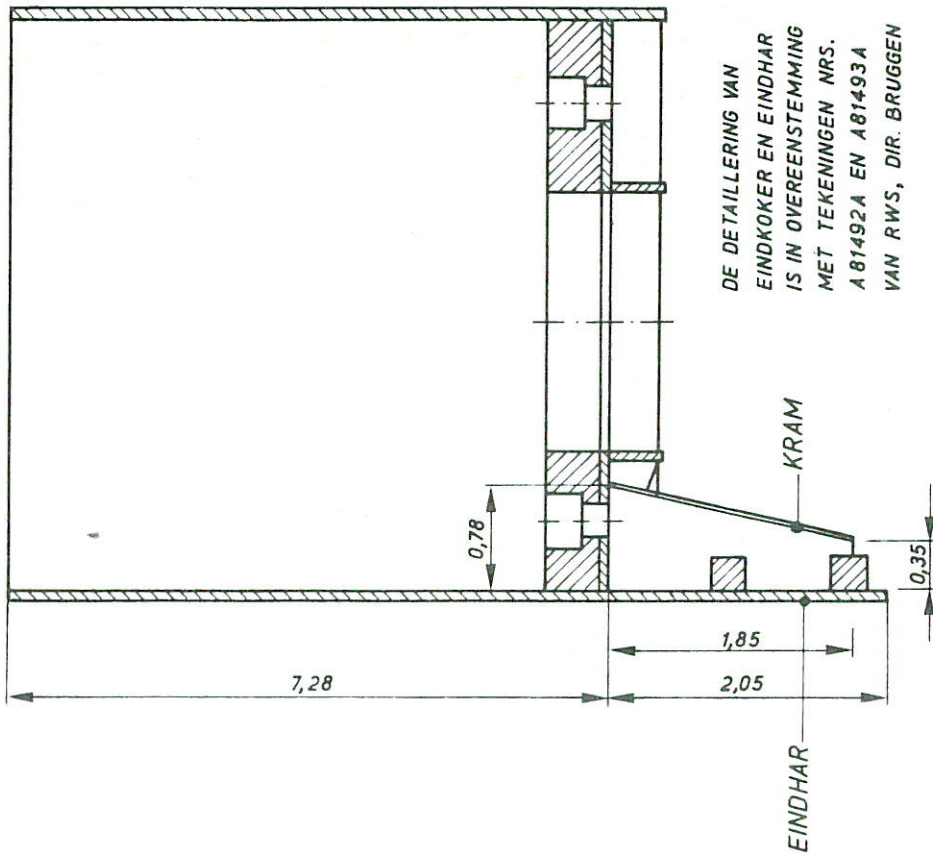
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1020

FIG.20



EINDKOKER:
ZJAANZICHT
P'JLERZIJDE



DE DETAILLERING VAN
EINDKOKER EN EINDHAR
IS IN OVEREENSTEMMING
MET TEKENINGEN NRS.
A81492A EN A81493A
VAN RWS, DIR. BRUGGEN

DOORSNEDE B - B (ZIE FIG. 14)

GETOOND IS DE MEET-
EINDKOKER VOOR DE BENEDENLIGGER ;
DE UITVOERING VAN DE MIDDENLIGGER
IS OVEREENKOMSTIG.

DETAILLERING EINDHAR (BENEDENLIGGER) GOOT 3

MATEN IN m PROTOTYPE

JB

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

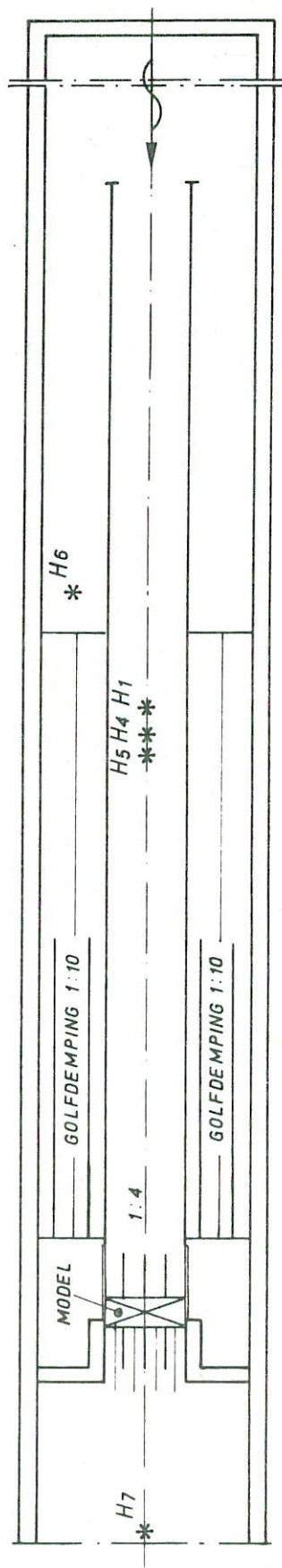
M1835-1021

FIG. 21

PLAATS IN DE GOOT :

GOLFSCHOT	$x = -3,5 \text{ m}$
BEGIN MEETGOOT	$x = 14,47 \text{ m}$
H1	$x = 26,12 \text{ m}$
H2	$x = 35,45 \text{ m}$
H3	$x = 35,38 \text{ m}$
H4	$x = 26,29 \text{ m}$
H5	$x = 26,72 \text{ m}$
H6	$x = 21,16 \text{ m}$
H7	$x = 41,95 \text{ m}$
VOORZUDE MEETKOKER	$x = 35,40 \text{ m}$

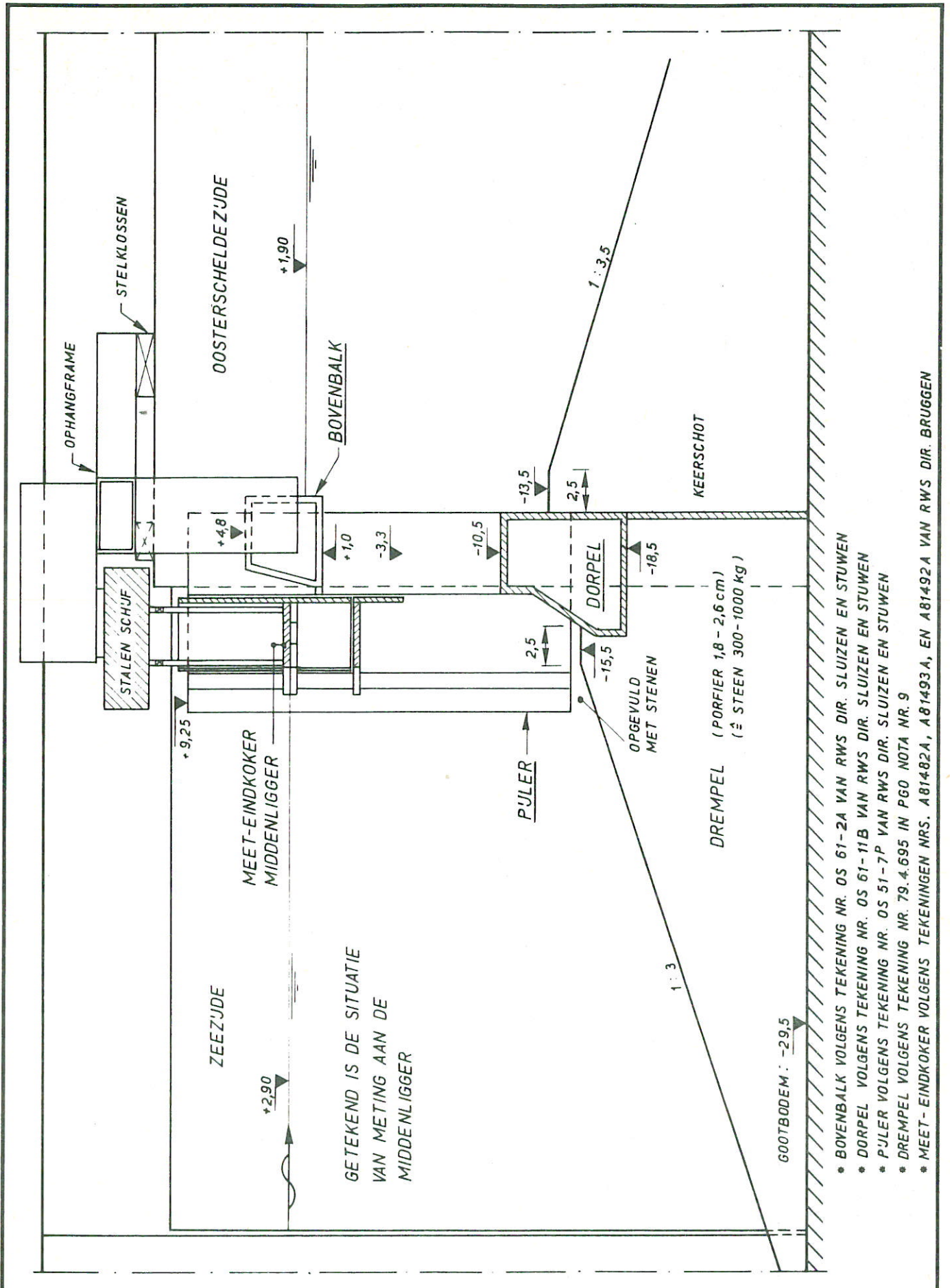
BOVENAANZICHT



OVERZICHT VAN DE OPSTELLING IN GOOT 3

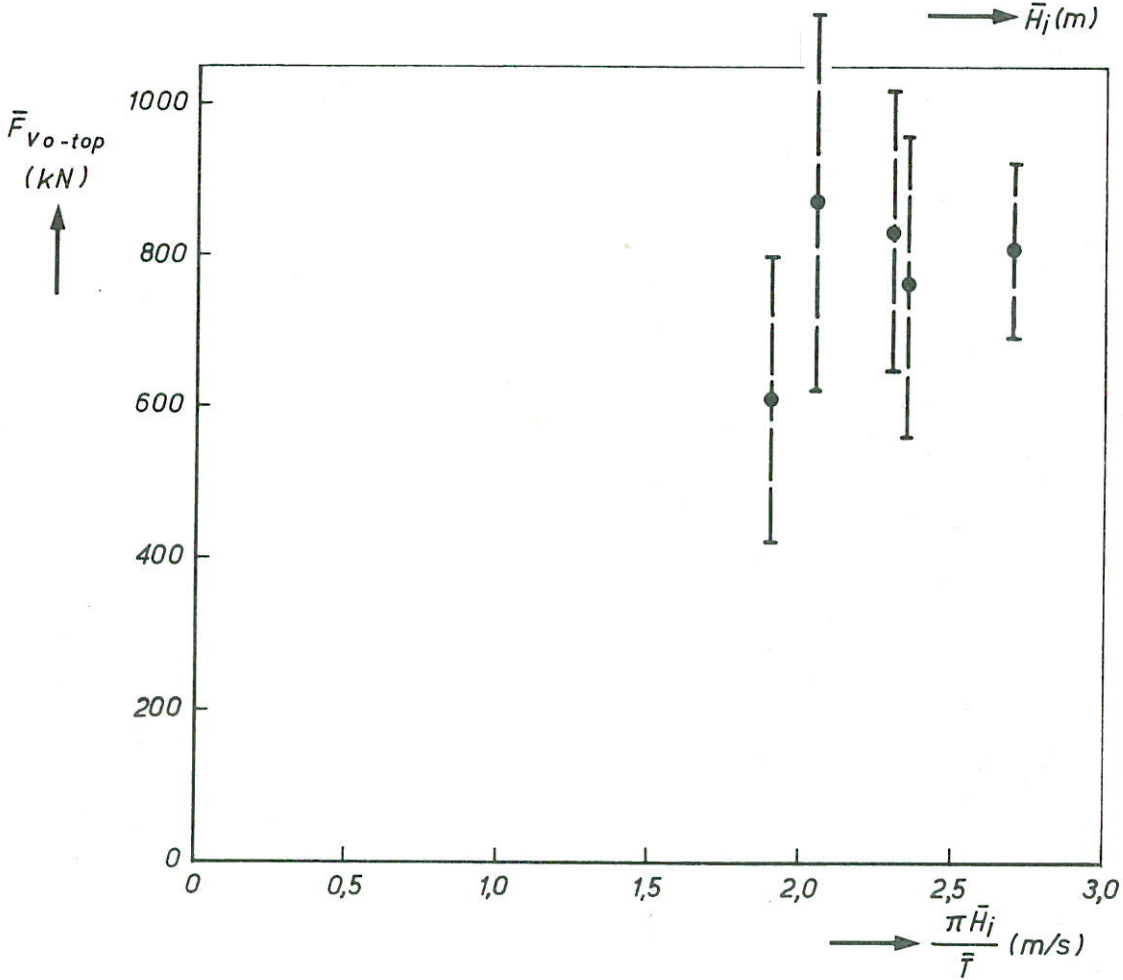
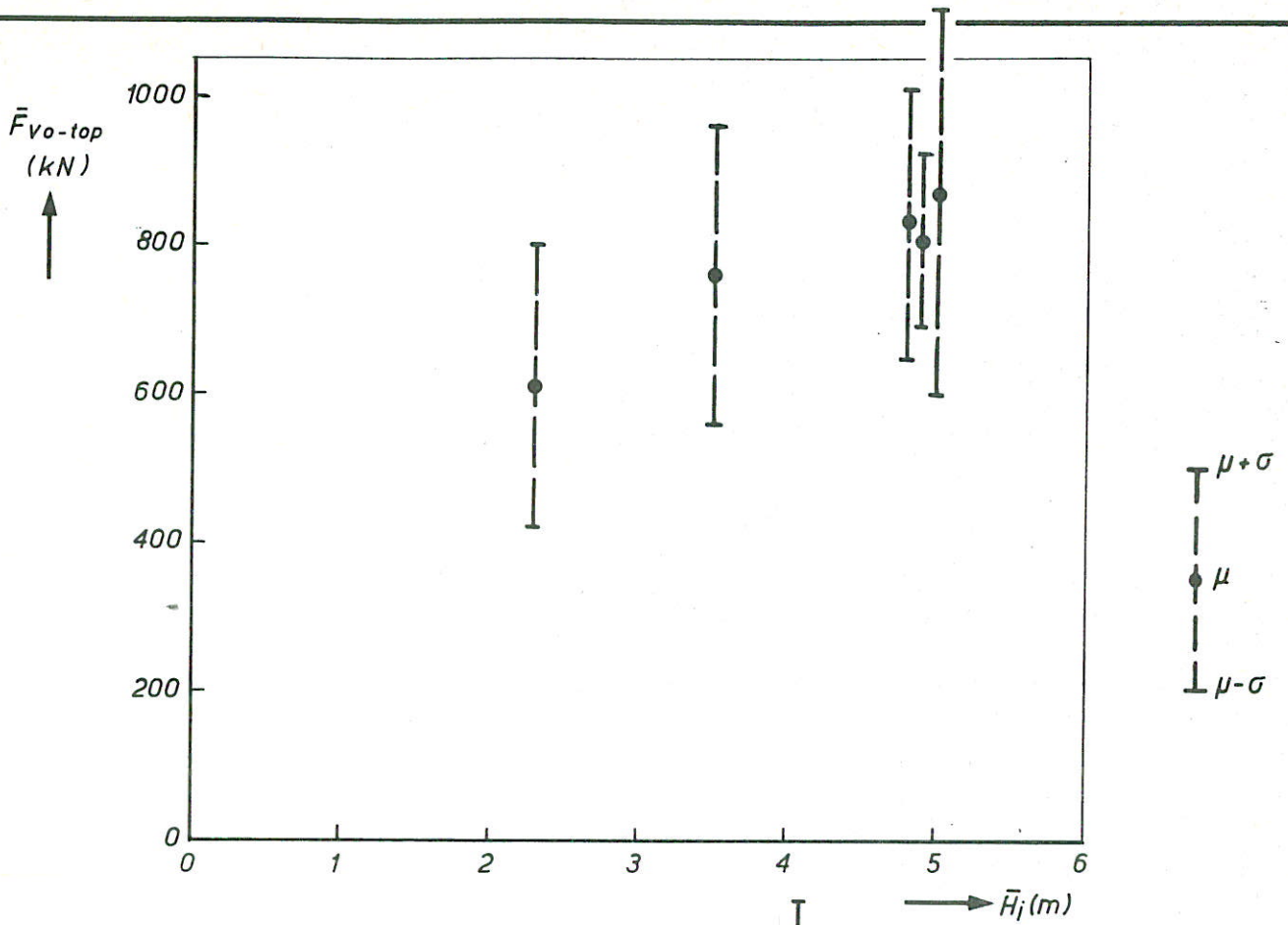
MATEN IN m MODEL

A4



- * BOVENBALK VOLGENS TEKENING NR. OS 61-2A VAN RWS DIR. SLUIZEN EN STUWEN
- * DORPEL VOLGENS TEKENING NR. OS 61-11B VAN RWS DIR. SLUIZEN EN STUWEN
- * PULJER VOLGENS TEKENING NR. OS 51-7-P VAN RWS DIR. SLUIZEN EN STUWEN
- * DREMPEL VOLGENS TEKENING NR. 79.4.695 IN PGO NOTA NR. 9
- * MEET-EINDKOKER VOLGENS TEKENINGEN NRS. A81482A, A81493A, EN A81492A VAN RWS DIR. BRUGGEN

LANGSDOORSNEDE OVER DE MEETSEKTIE, GOOT 3		MATEN IN m PROTO	
		NIVEAU IN m t.o.v. NAP	A4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM		M1835-1023	FIG. 23



$\bar{F}_{V_{o-top}}$ UITGEZET TEGEN
 \bar{H}_j EN $\frac{\pi \bar{H}_j}{\bar{T}}$, BENEDENLIGGER

FROUDESCHALING

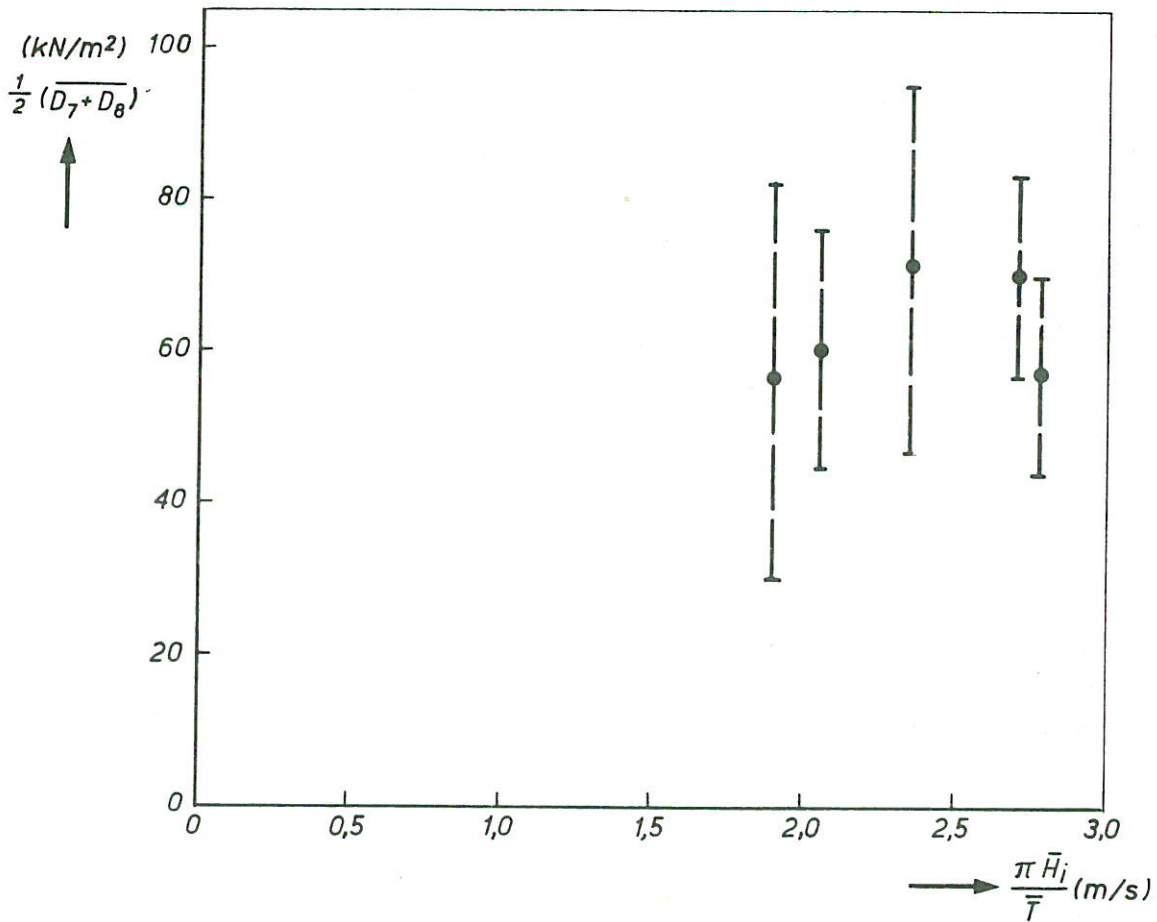
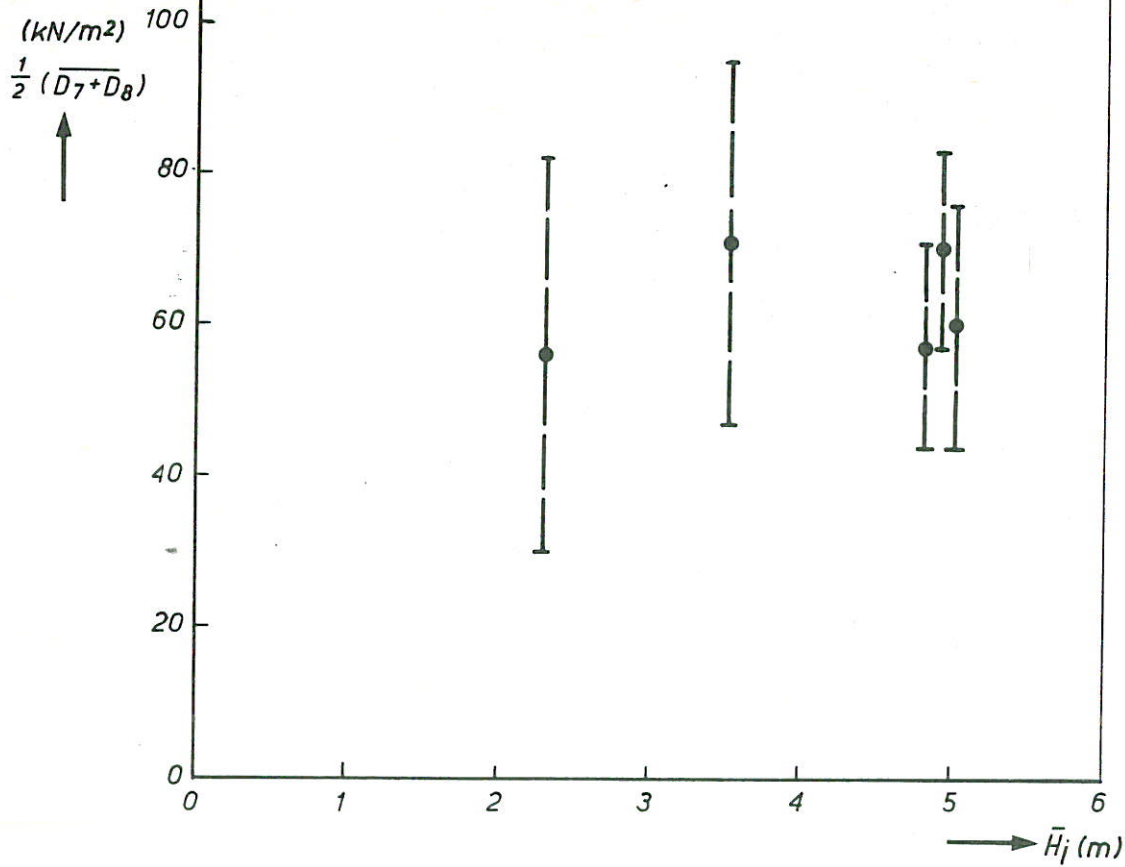
PROEVEN 140-185

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1024

FIG.24



$\frac{1}{2}(\bar{D}_7 + \bar{D}_8)$ UITGEZET TEGEN \bar{H}_j EN $\frac{\pi \bar{H}_j}{\bar{T}}$
BENEDENLIGGER

FROUDESCHALING

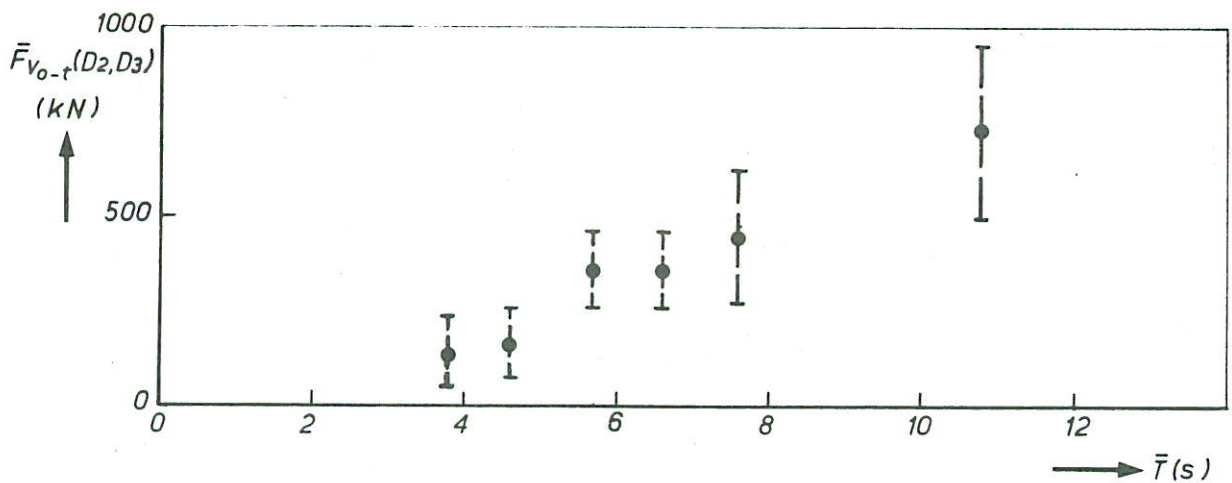
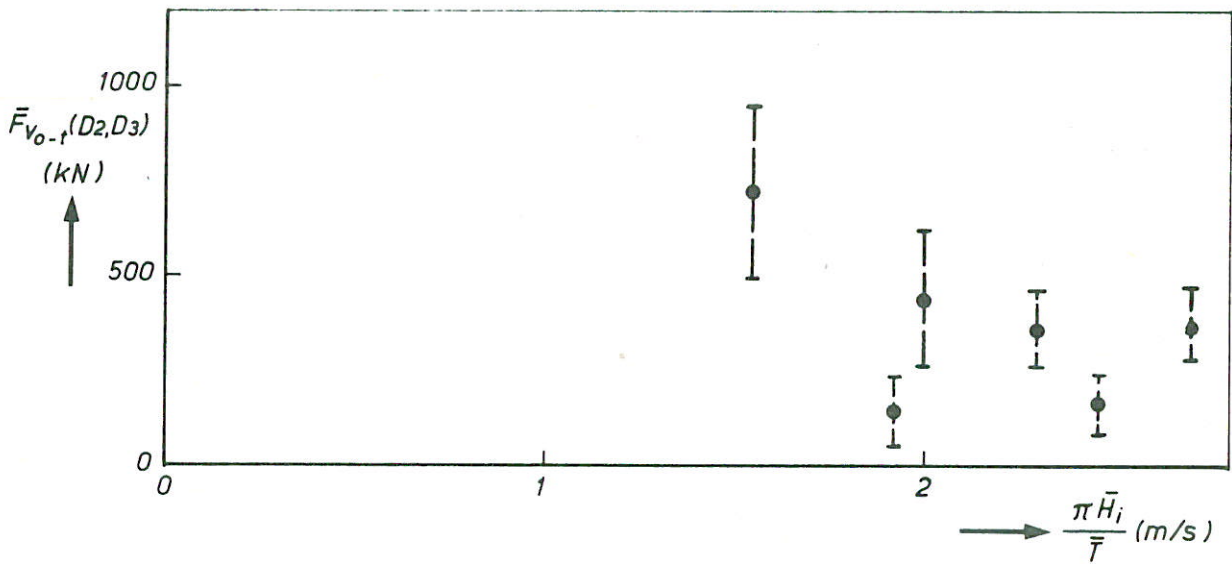
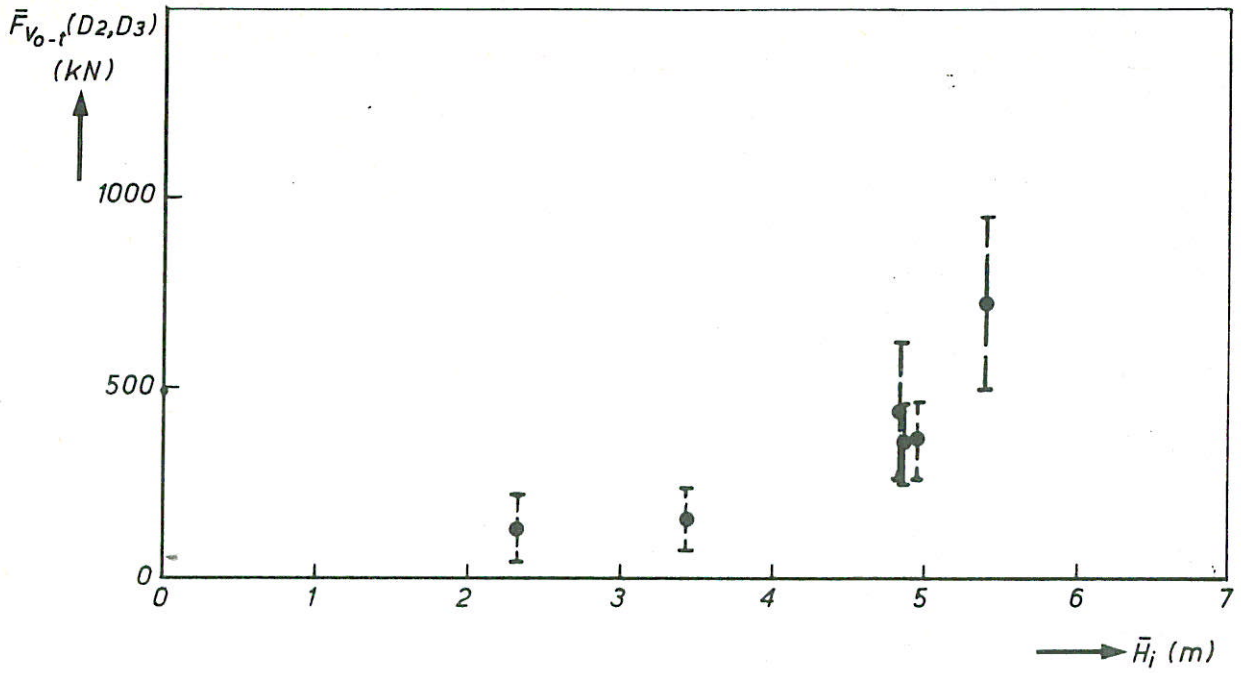
PROEVEN 140-185

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1025

FIG.25



$\mu + \sigma$
 μ
 $\mu - \sigma$

$\bar{F}_{V_0-t}(D_2, D_3)$, KLAPKRACHT OP INWENDIGE DEEL VAN DE LIGGER, UITGEZET TEGEN H_i , $\frac{\pi H_i}{\bar{T}}$ EN \bar{T} , MIDDENLIGGER

PROEVEN 440-480

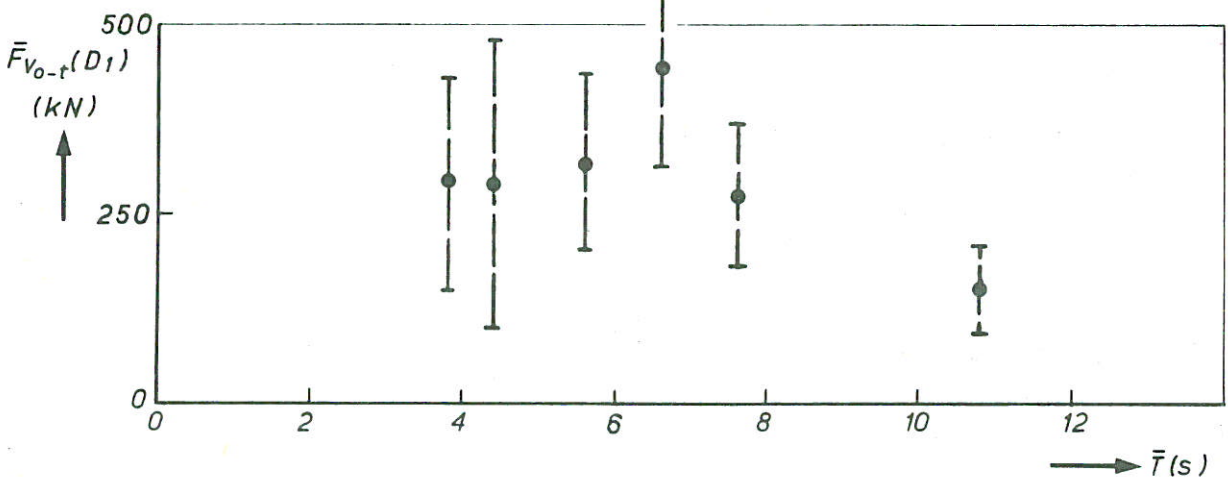
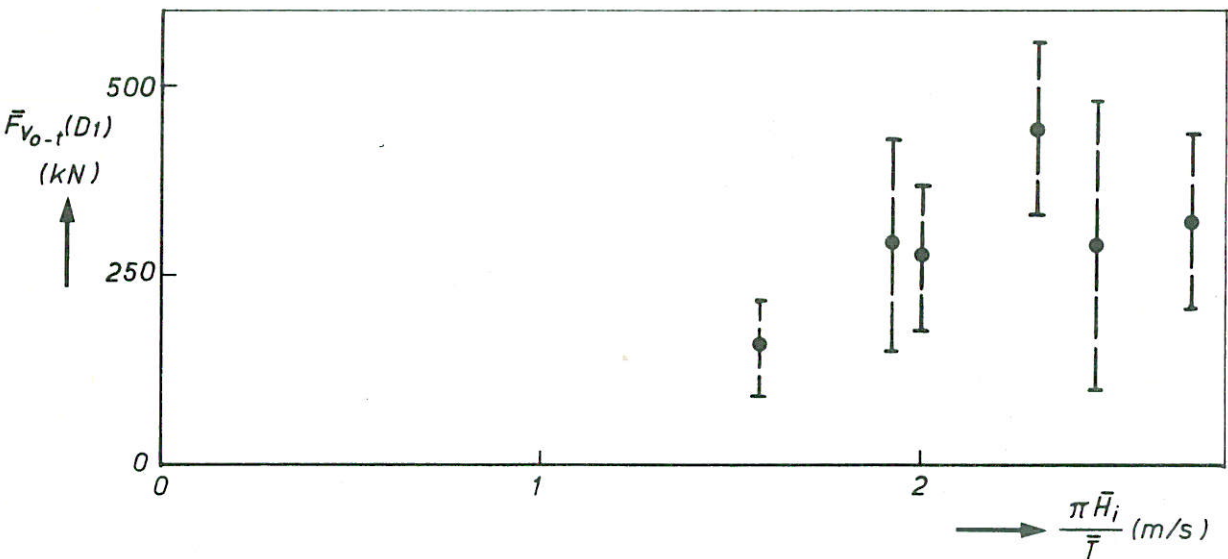
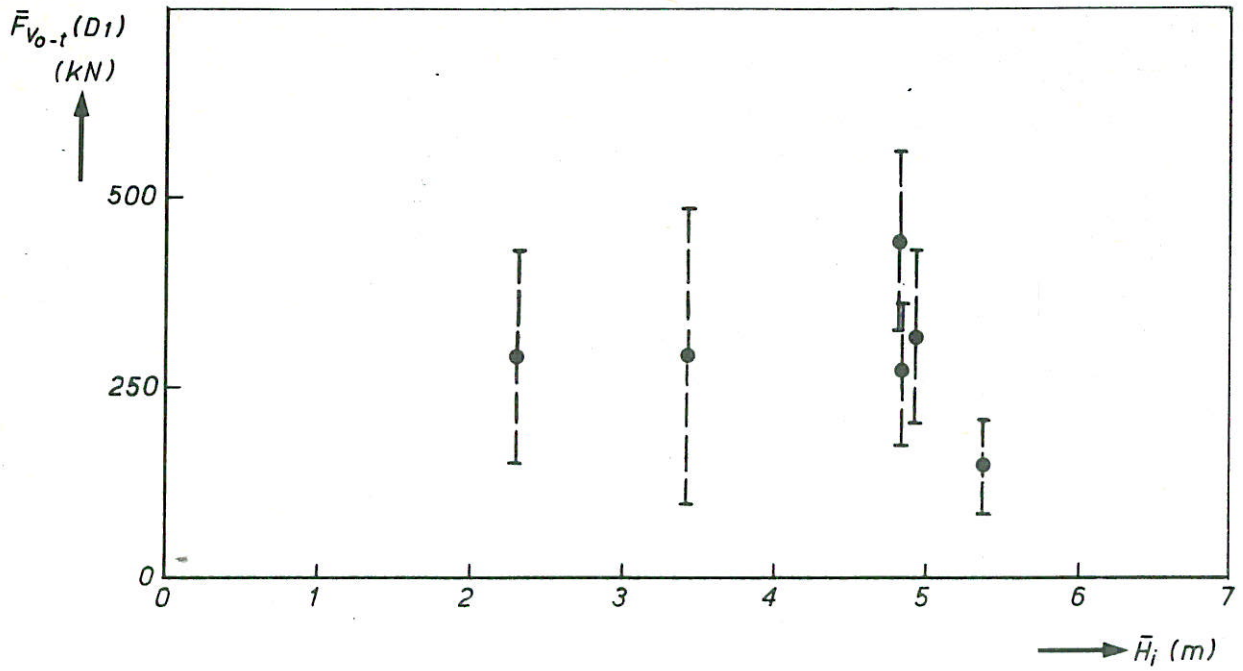
FROUDESCHALING

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1026

FIG. 26



$\mu + \sigma$
 μ
 $\mu - \sigma$

$\bar{F}_{v_o-t}(D_1)$, KLAPKRACHT OP DE UITKRAGING, UIT-
 GEZET TEGEN \bar{H}_i , $\frac{\pi \bar{H}_i}{T}$ EN \bar{T} , MIDDENLIGGER

PROEVEN 440-480

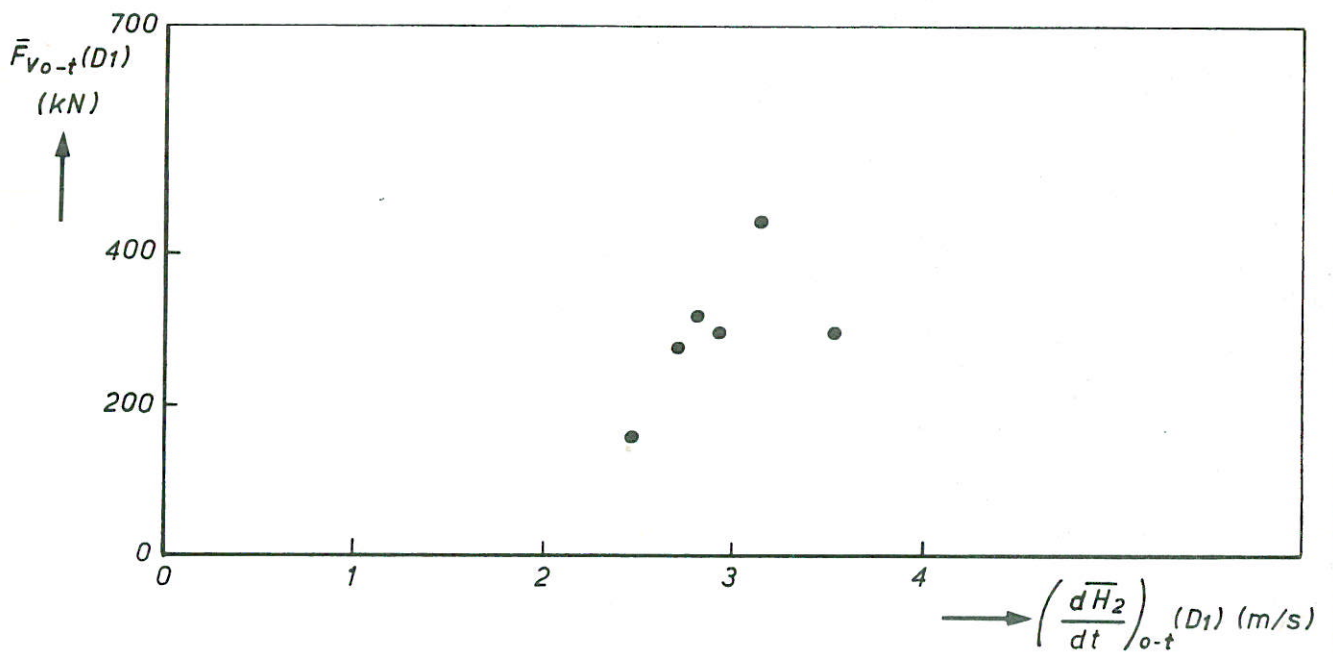
FROUDESCHALING

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1027

FIG. 27



$\bar{F}_{vo-t}(D_1)$, KLAPKRACHT OP DE UITKRAGING, UIT-
 GEZET $\left(\frac{d\bar{H}_i}{dt}\right)_{o-t}(D_1) =$ OPWAARTSE SNELHEID VAN HET
 WATEROPPERVLAK, MIDDENLIGGER

PROEVEN 440-480

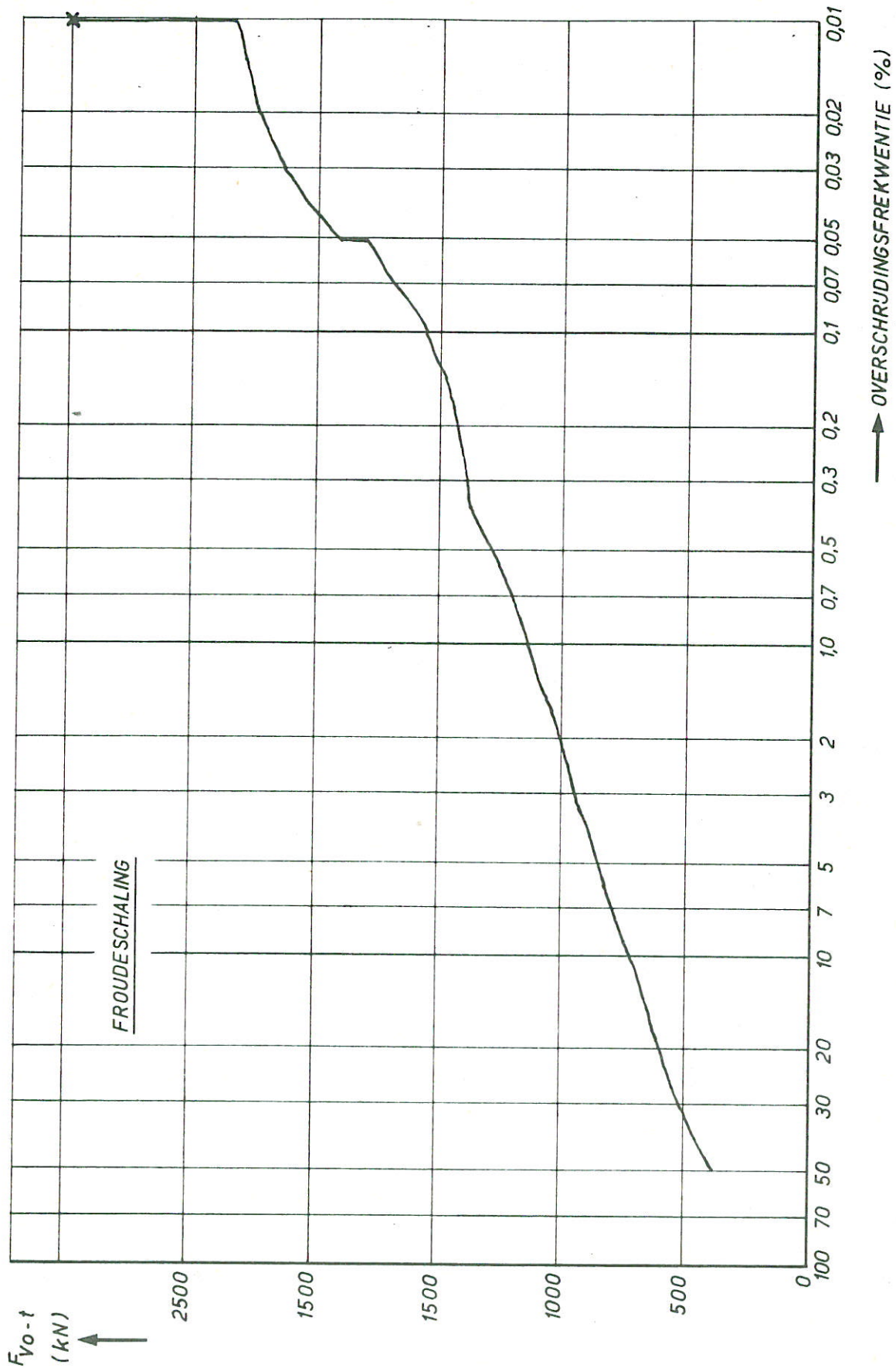
FROUDESCHALING

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1028

FIG. 28



STATISTISCHE VERDELING VAN KLAPKRACHTEN F_{Vo-t}

PROEF 199

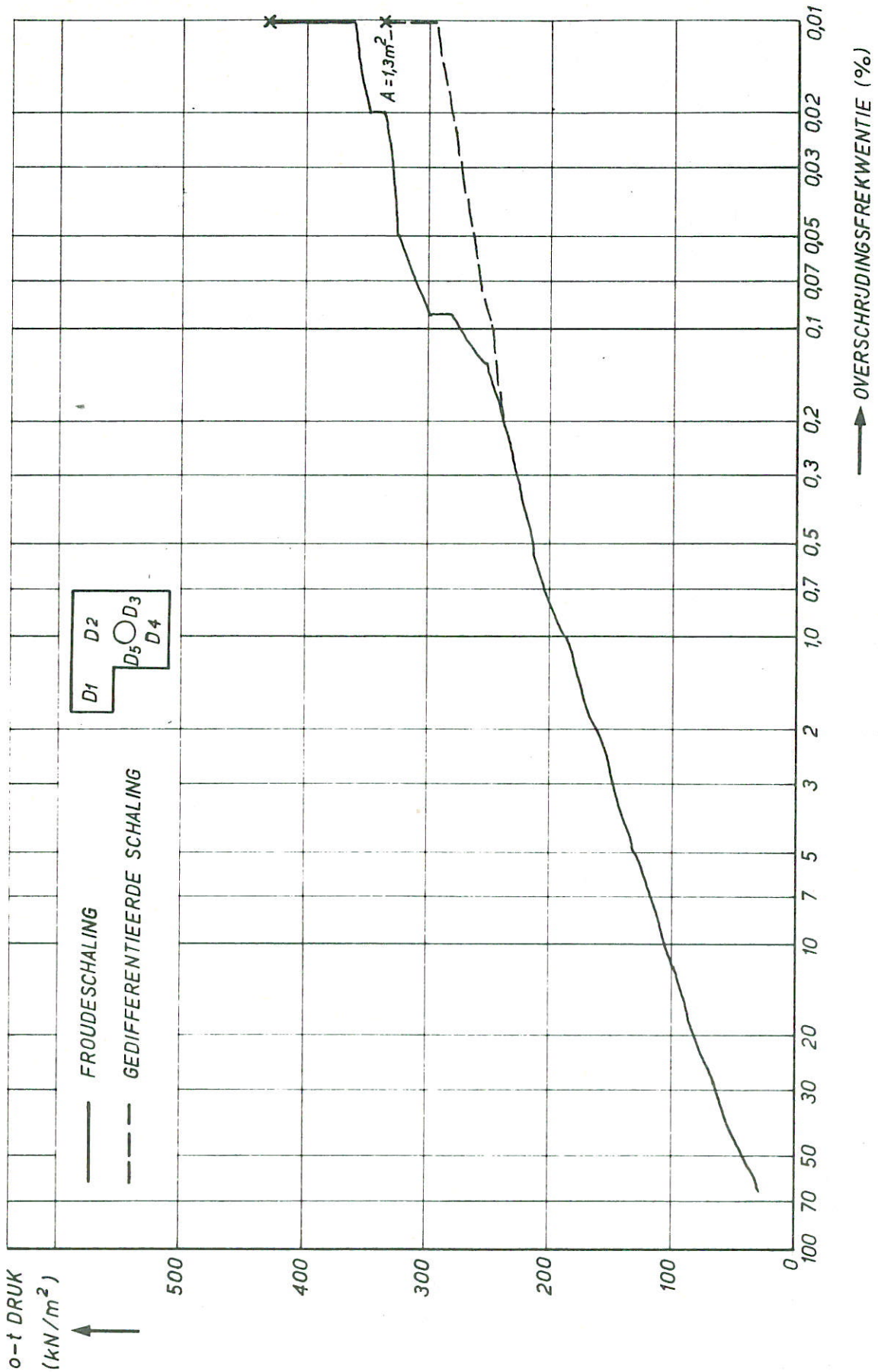
BENEDENLIGGER

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1029

FIG. 29



STATISTISCHE VERDELING VAN KLAPDRUKKEN D1

PROEF 199

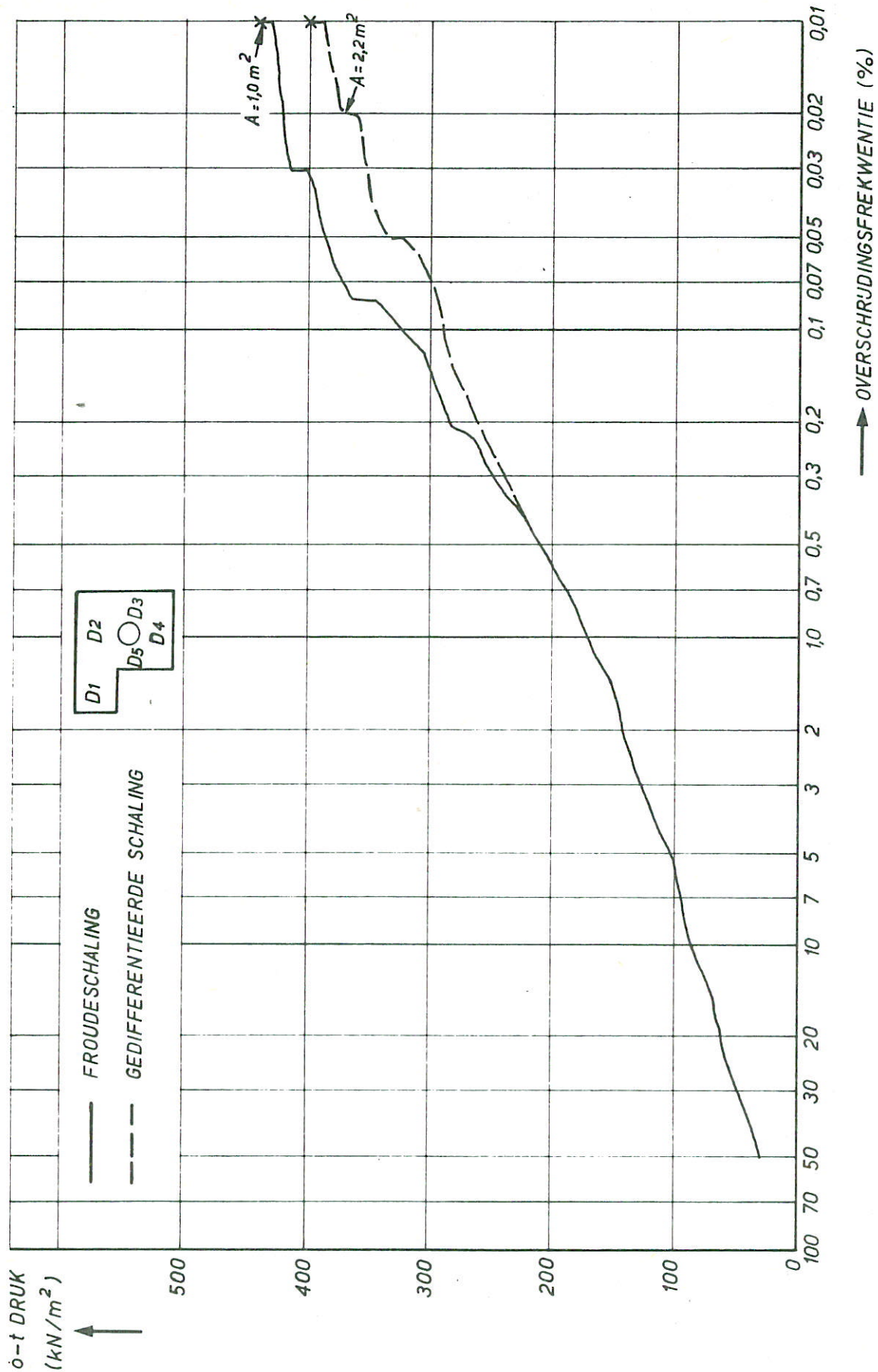
BENEDENLIGGER

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1030

FIG.30



STATISTISCHE VERDELING VAN KLAPDRUKKEN D2

PROEF 199

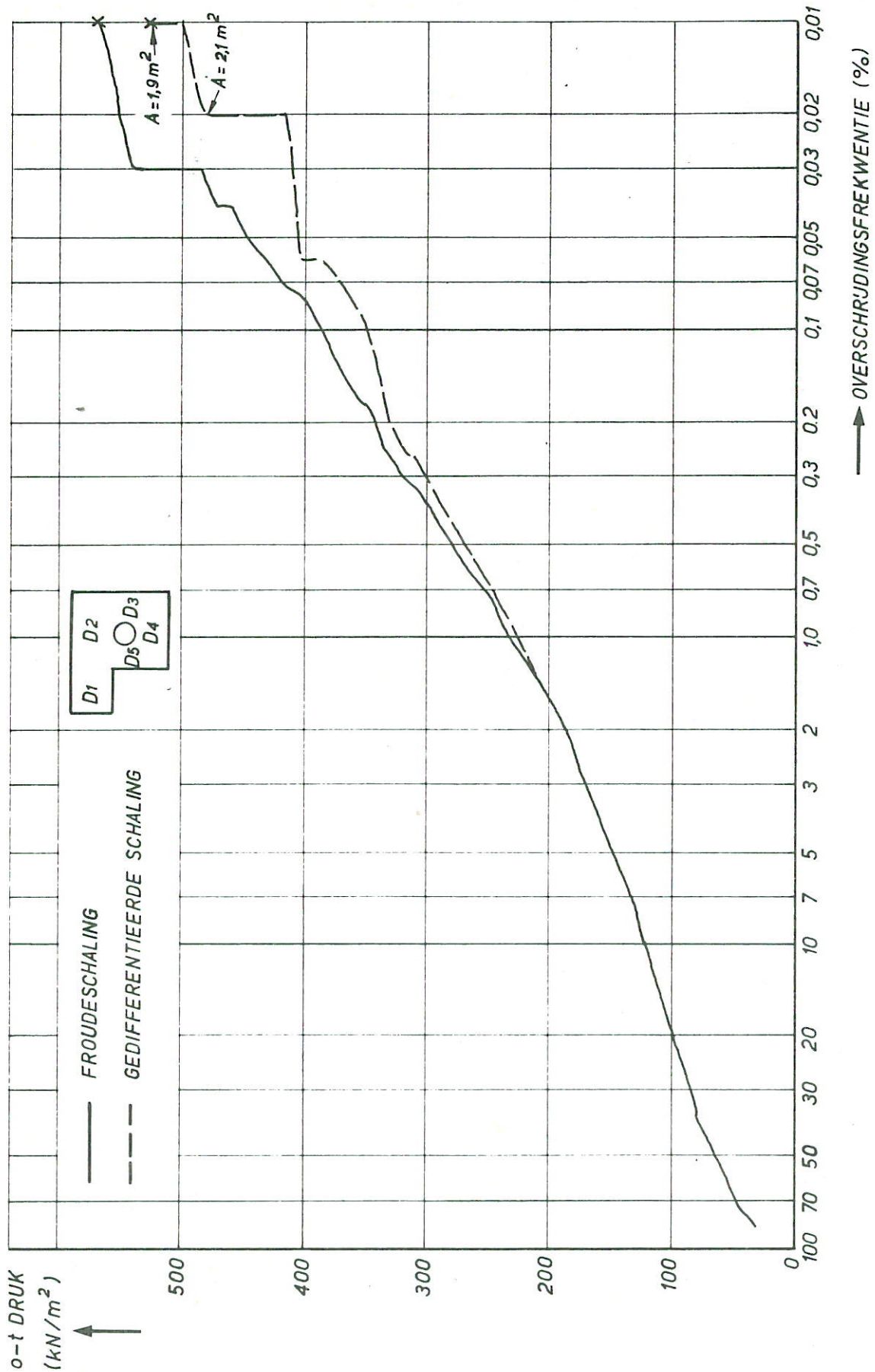
BENEDENLIGGER

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1031

FIG.31



STATISTISCHE VERDELING VAN KLAPDRUKKEN D3

PROEF 199

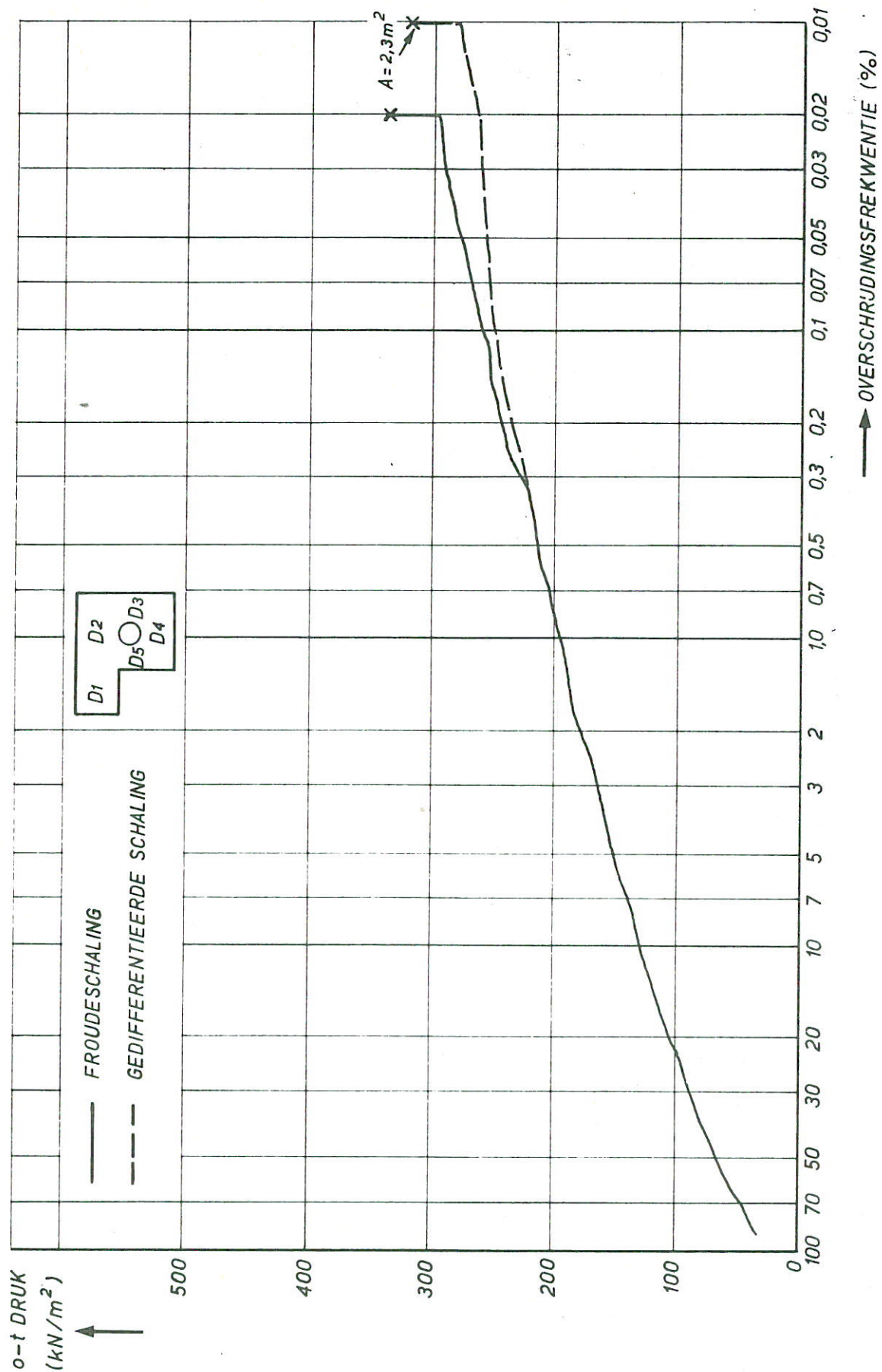
BENEDENLIGGER

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1835 - 1032

FIG.32



STATISTISCHE VERDELING VAN KLAPDRUKKEN D4

PROEF 199

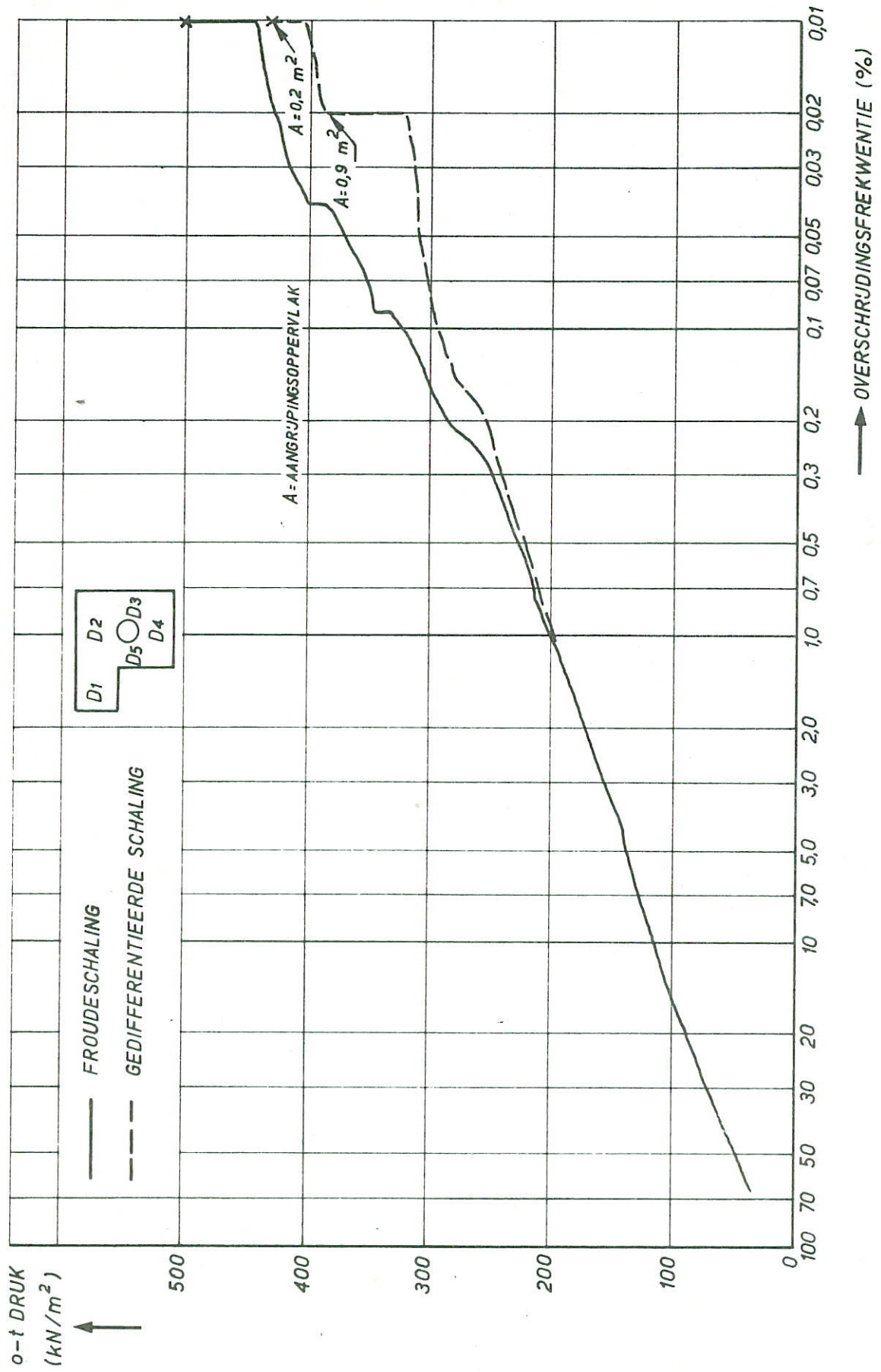
BENEDENLIGGER

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1033

FIG.33



STATISTISCHE VERDELING VAN KLAPDRUKKEN D5

PROEF 199

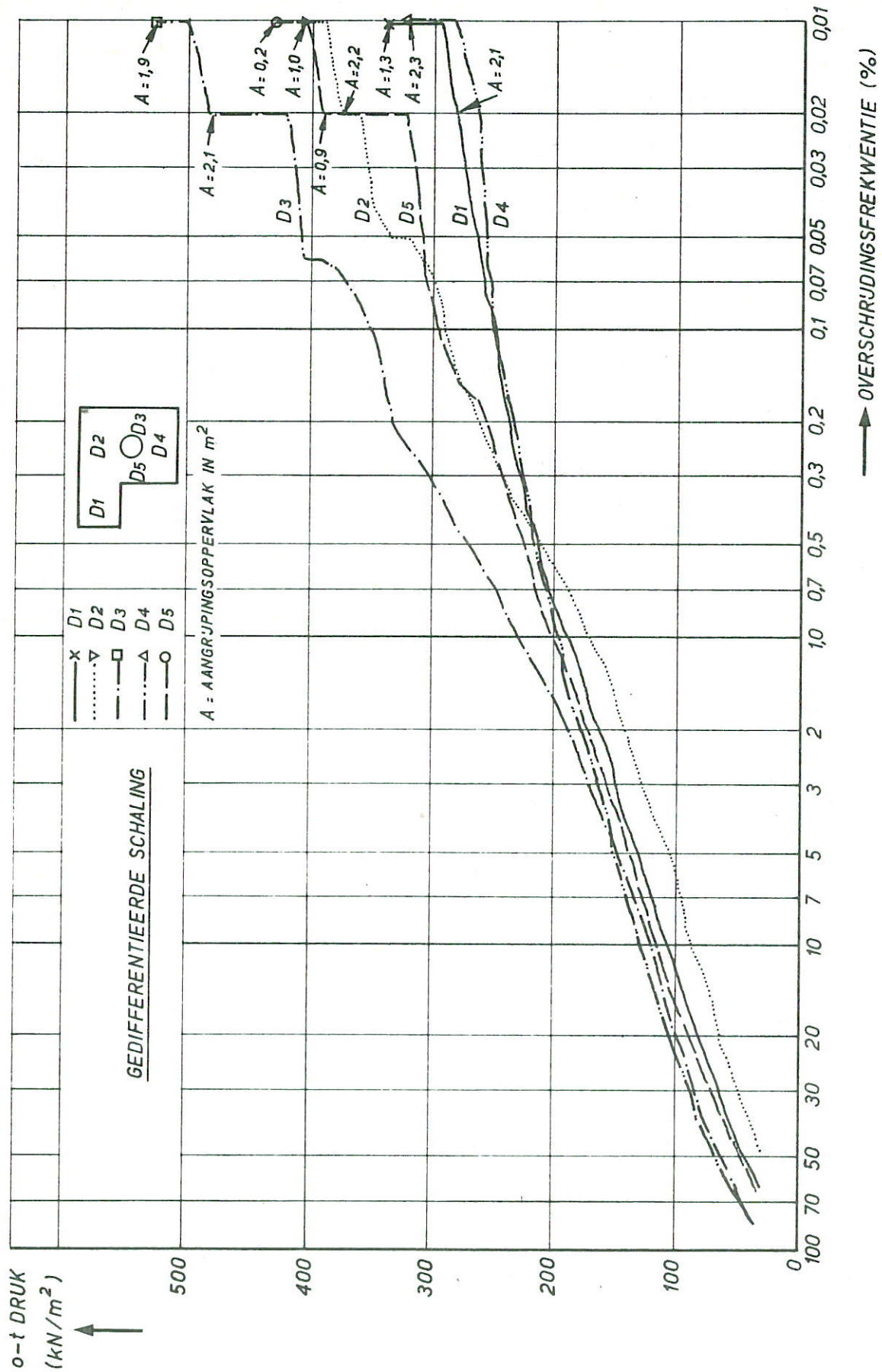
BENEDENLIGGER

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1034

FIG. 34



STATISTISCHE VERDELING VAN KLAPDRUKKEN

PROEF 199

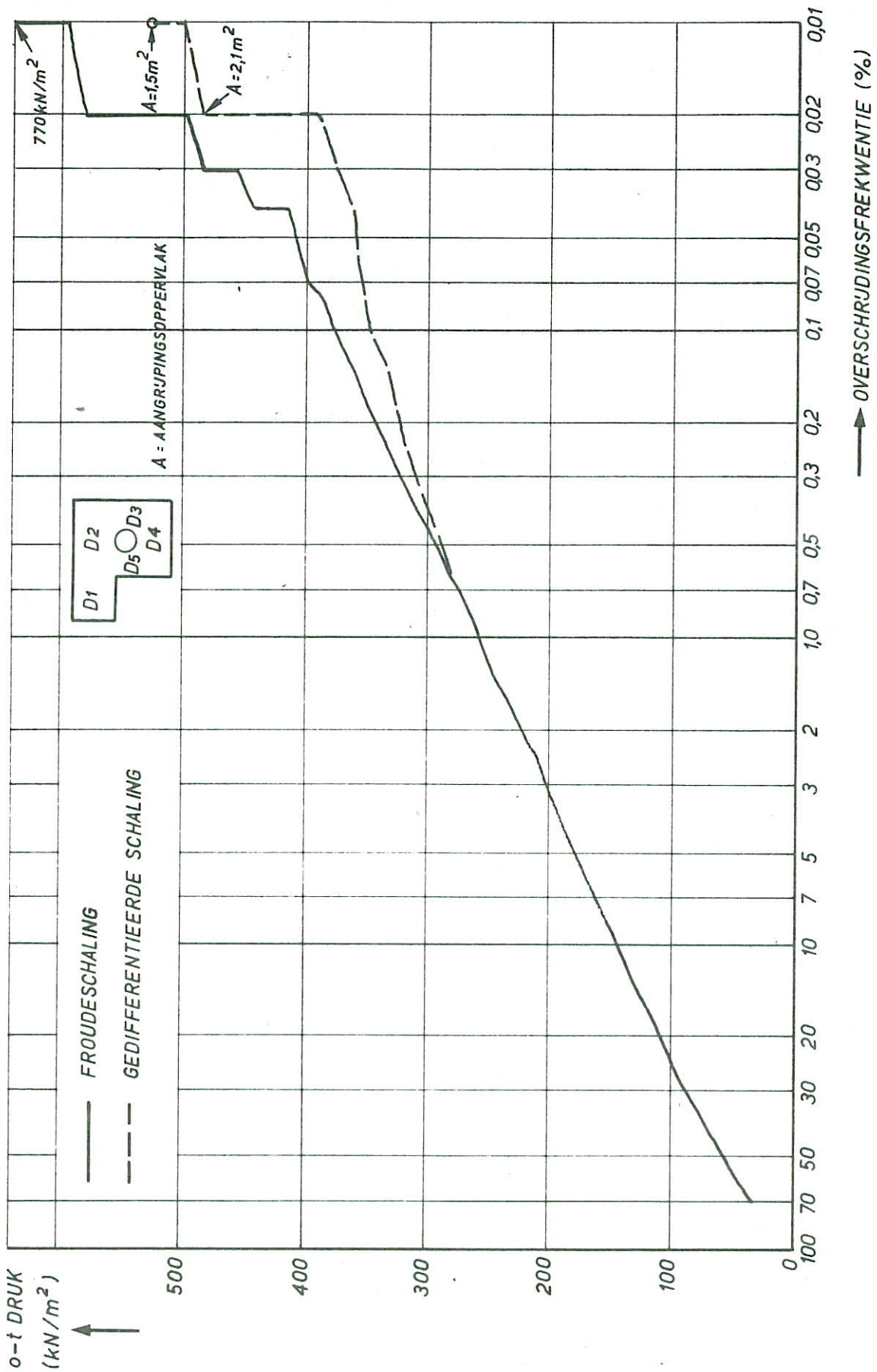
BENEDENLIGGER

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1035

FIG. 35



STATISTISCHE VERDELING VAN KLAPDRUKKEN D1

PROEF 499

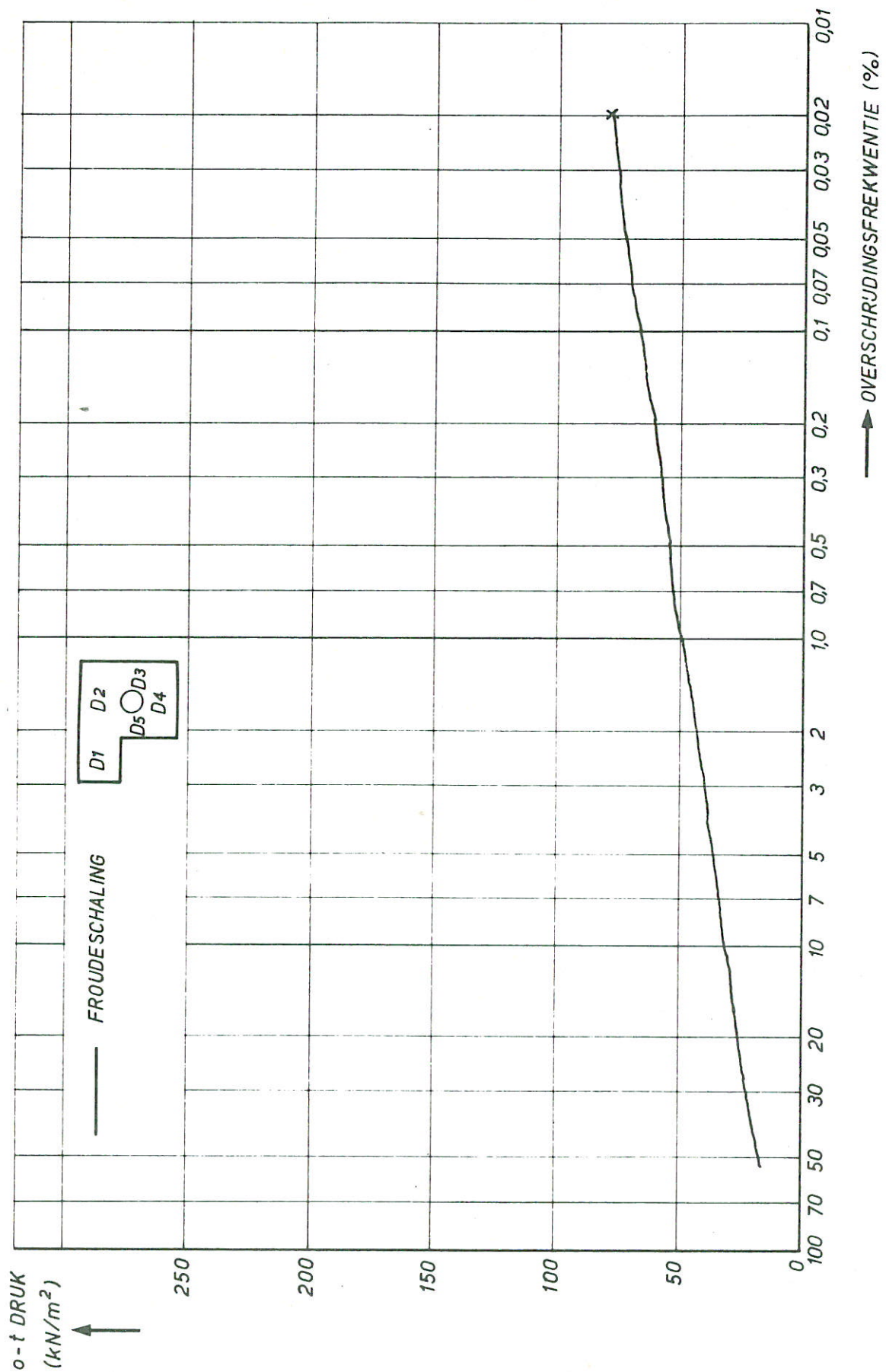
MIDDENLIGGER

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1036

FIG.36



STATISTISCHE VERDELINGEN VAN KLAPDRUKKEN D2

PROEF 499

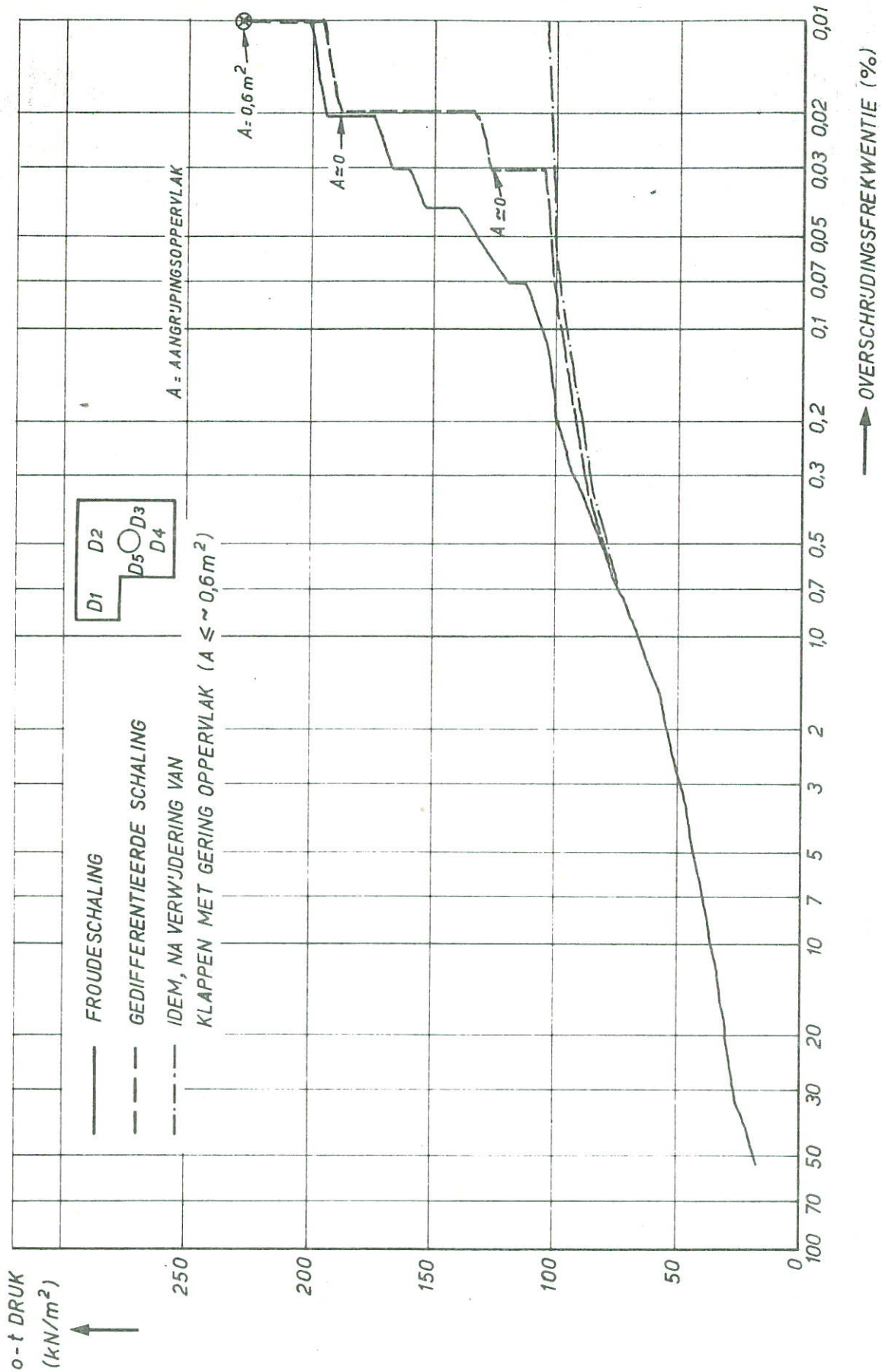
MIDDENLIGGER

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1037

FIG.37



STATISTISCHE VERDELINGEN VAN KLAPDRUKKEN D₃

PROEF 499

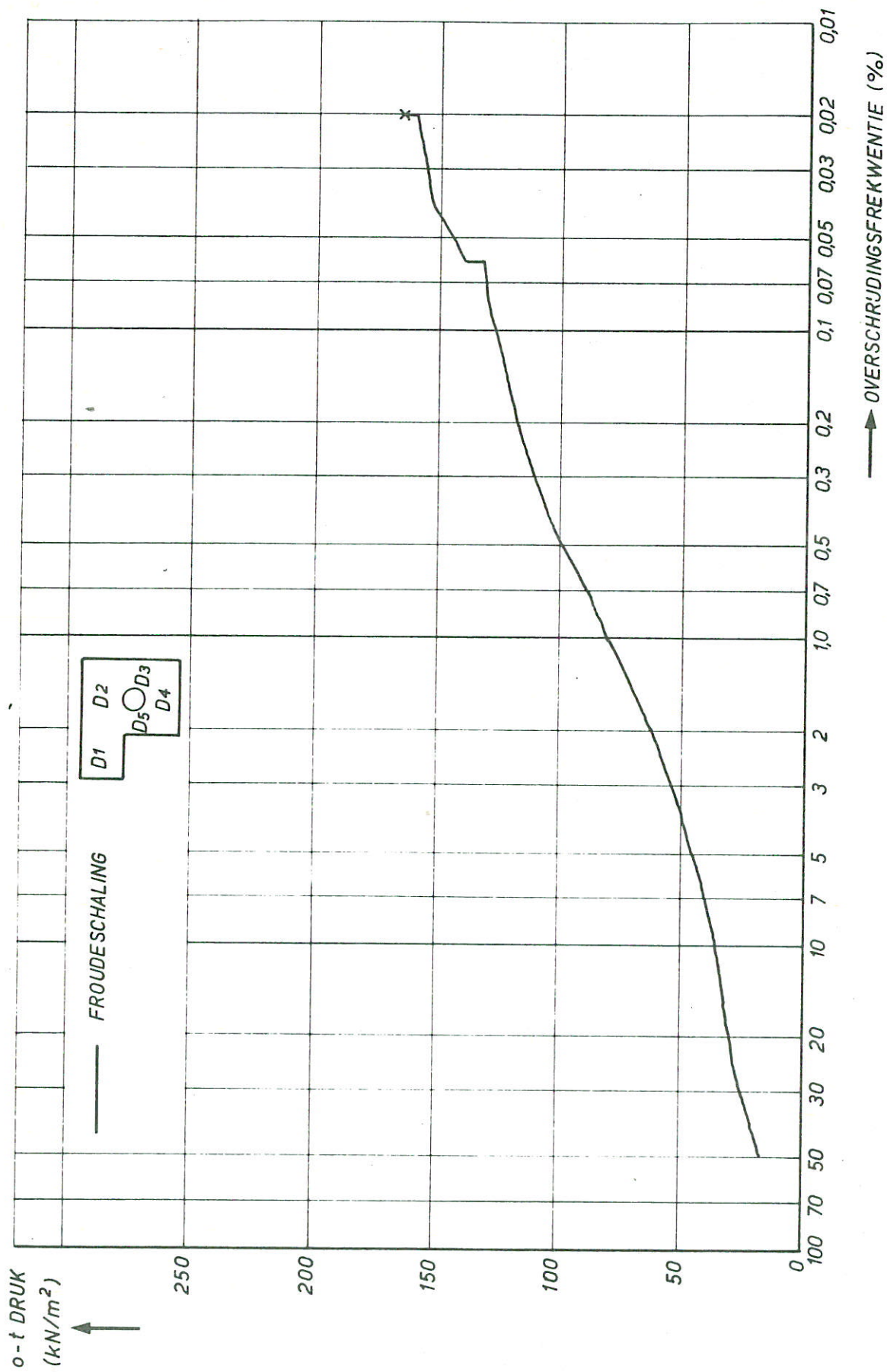
MIDDENLIGGER

A₄

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1835 - 1038

FIG. 38



STATISTISCHE VERDELINGEN VAN KLAPDRUKKEN D4

PROEF 499

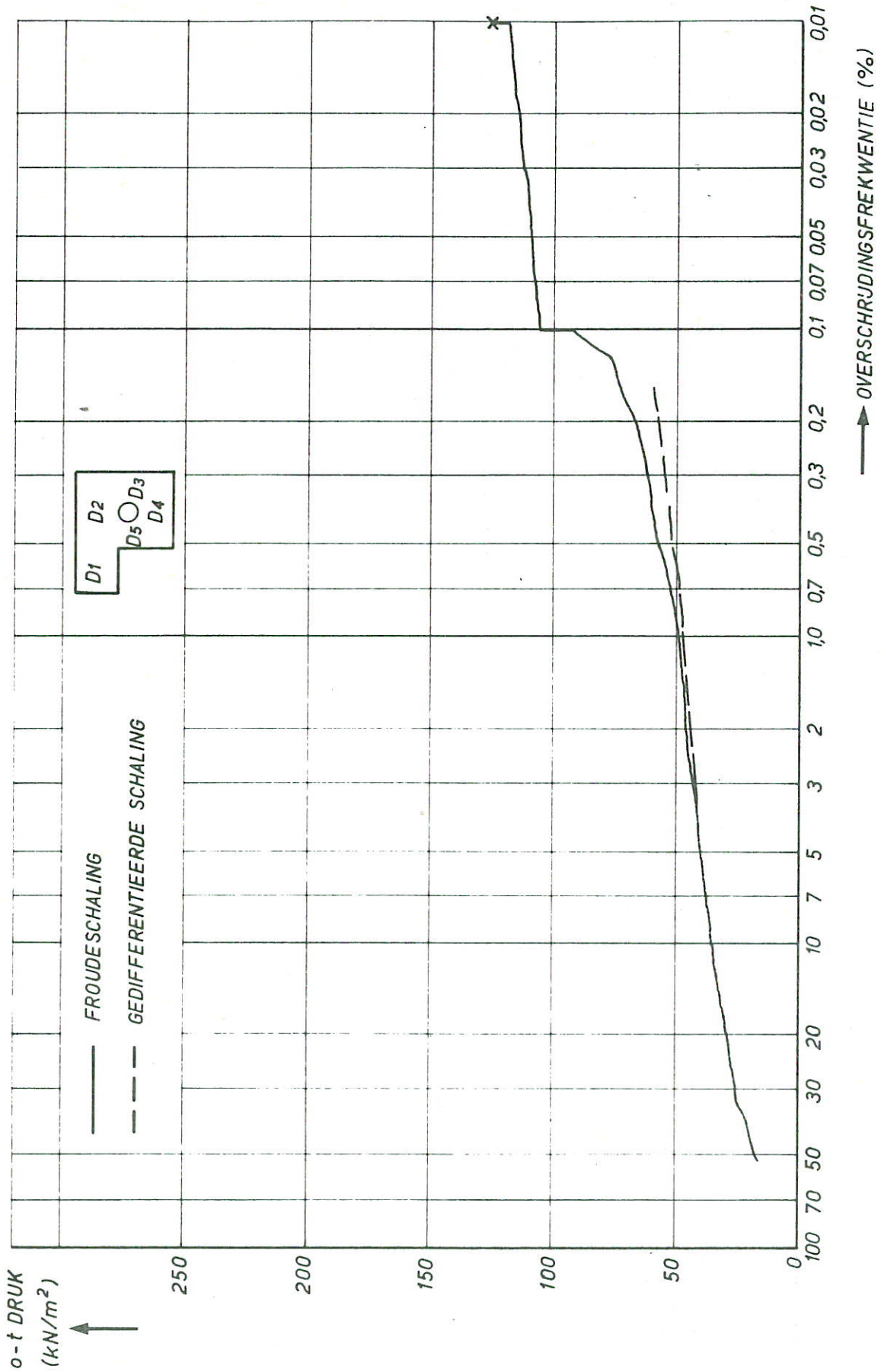
MIDDENLIGGER

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1039

FIG.39



STATISTISCHE VERDELINGEN VAN KLAPDRUKKEN D5

PROEF 499

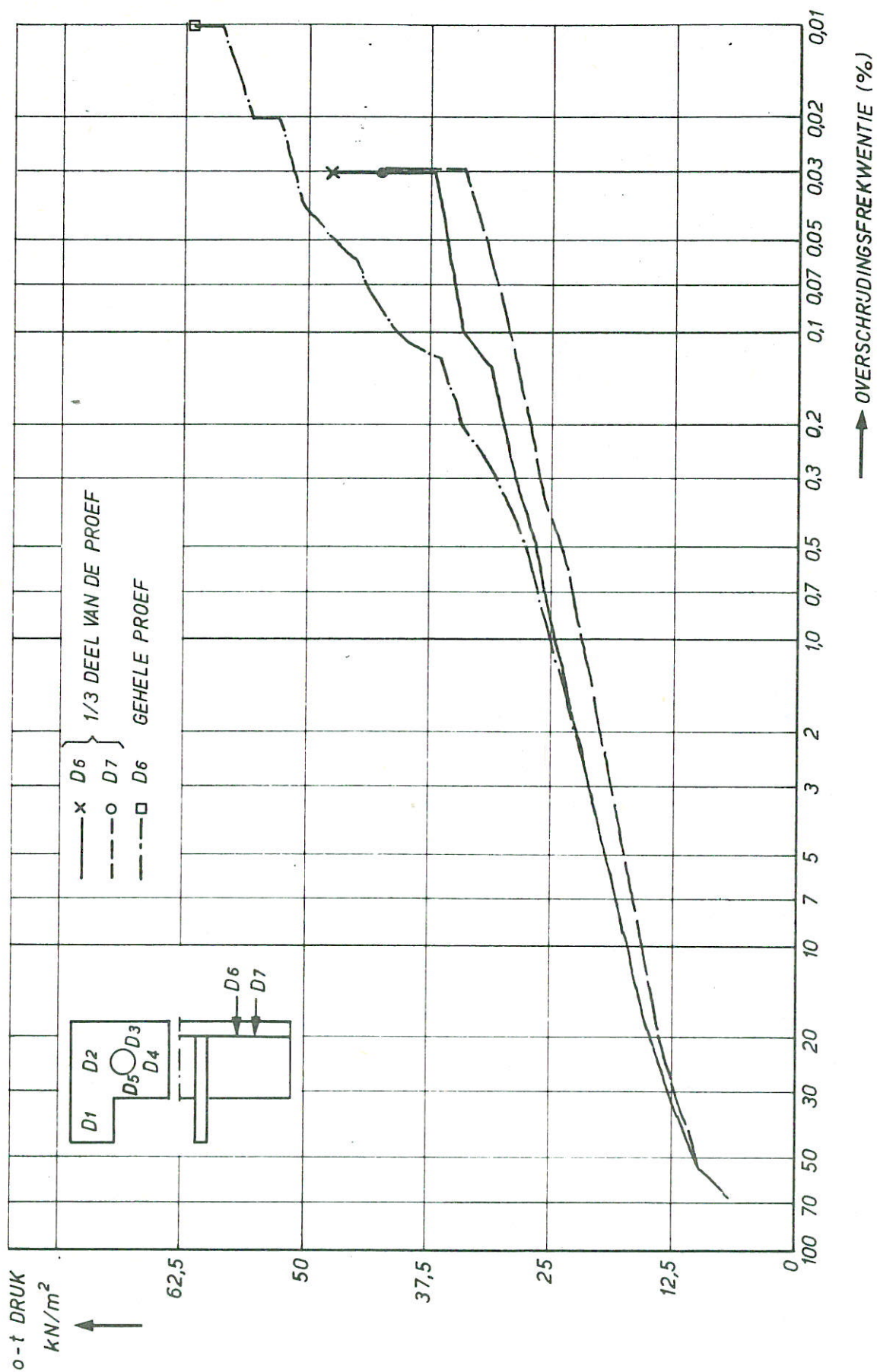
MIDDENLIGGER

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1835 - 1040

FIG.40



STATISTISCHE VERDELINGEN VAN KLAPDRUKKEN D6, D7

PROEF 499 (1/3 DEEL)

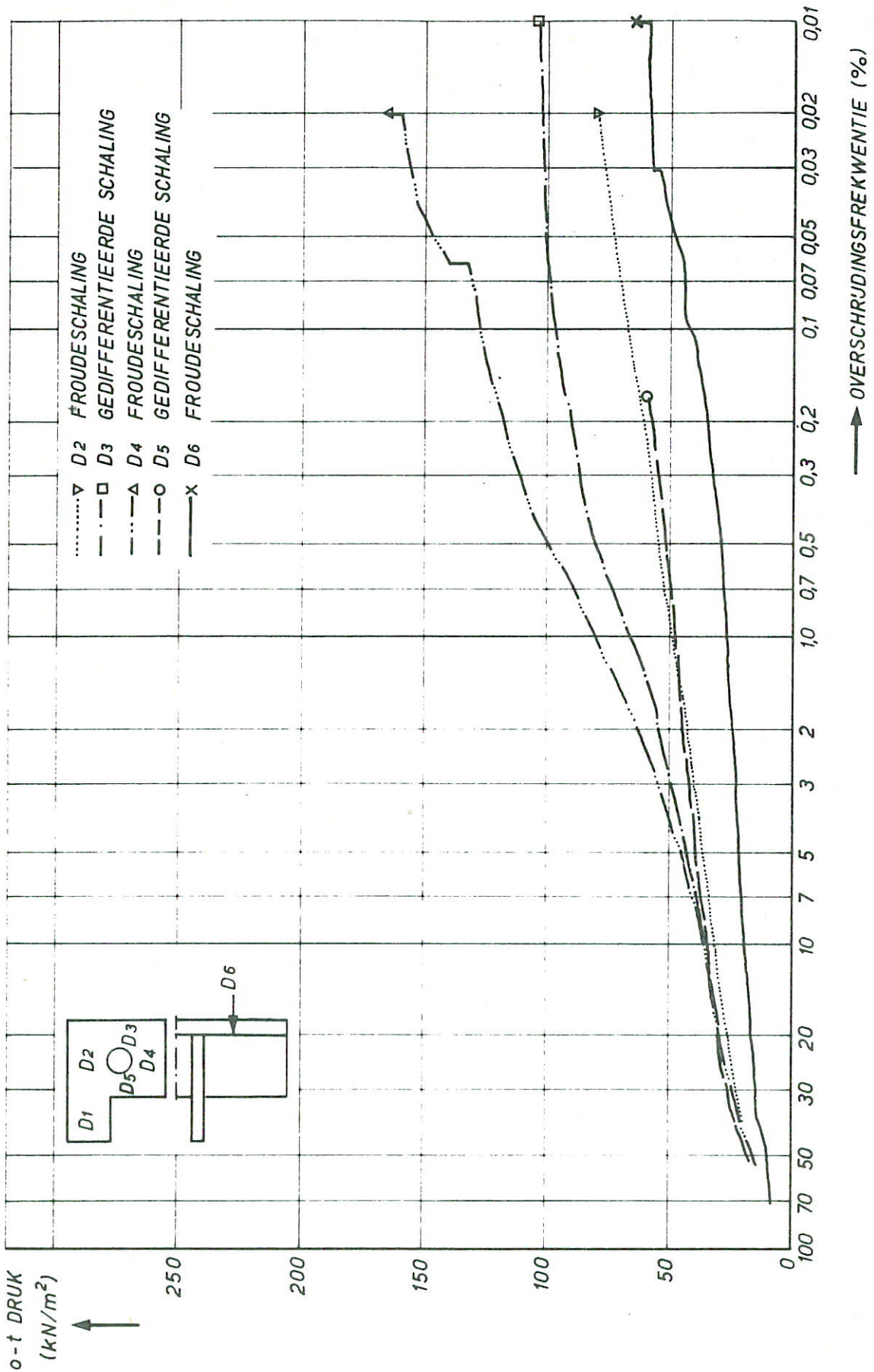
MIDDENLIGGER

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1041

FIG. 41



STATISTISCHE VERDELINGEN VAN KLAPDRUKKEN OP DE
INWENDIGE MIDDENLIGGER EN DE ACHTERWAND

PROEF 499

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1042

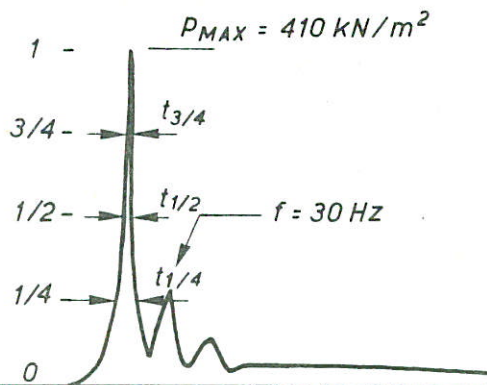
FIG. 42

D3,4

p (80 kN/m²/cm)



TJD (7ms/mm)



$t_{1/4} = 19 \text{ ms}$

$t_{1/2} = 7 \text{ ms}$

$t_{3/4} = 3 \text{ ms}$

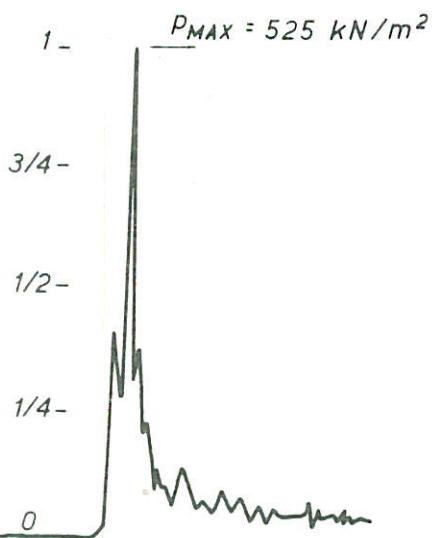
$A = 2,2 \text{ m}^2$

D3,8

p (80 kN/m²/cm)



TJD (7ms/mm)



$t_{1/4} = 25 \text{ ms}$

$t_{1/2} = 5 \text{ ms}$

$t_{3/4} = 2,5 \text{ ms}$

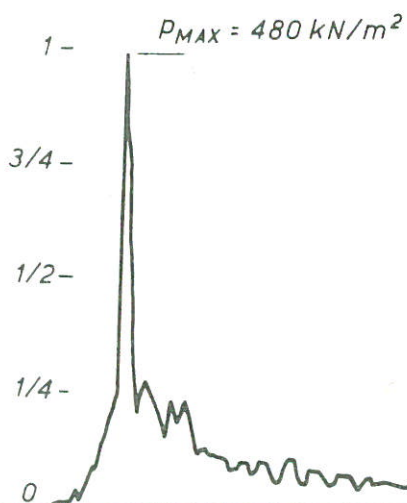
$A = 1,9 \text{ m}^2$

D3,9

p (80 kN/m²/cm)



TJD (7ms/mm)



$t_{1/4} = 17 \text{ ms}$

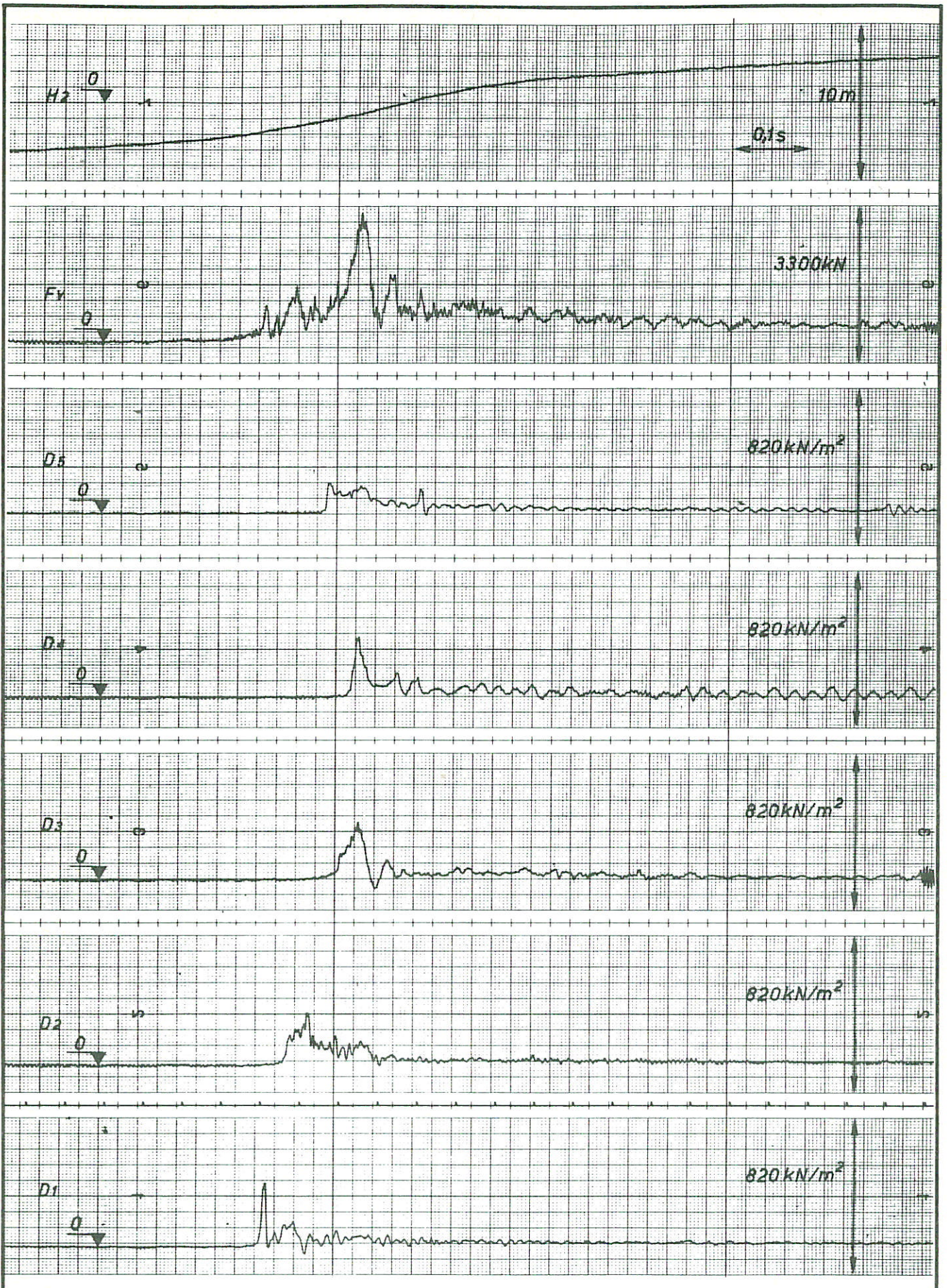
$t_{1/2} = 8,9 \text{ ms}$

$t_{3/4} = 5,7 \text{ ms}$

$A \approx 2,1 \text{ m}^2$

ENKELE GROTE KLAPPEN D₃, P199, BENEDENLIGGER
(GEDIFFERENTIEERDE SCHAAL)

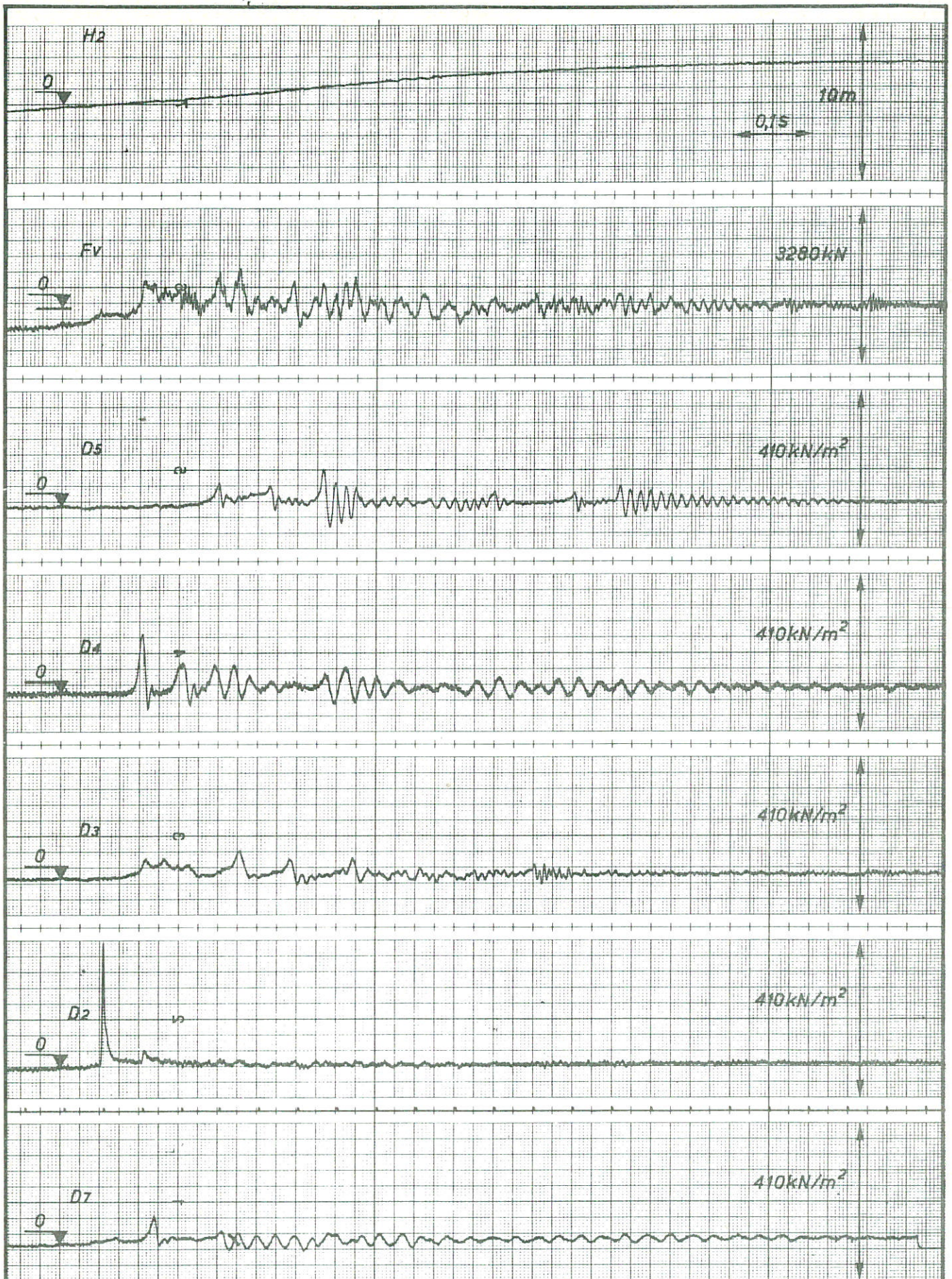
A4



VOORBEELD VAN GELJKTJDIGE REGISTRATIES
VAN DRUK- EN KRACHTSIGNALEN

PROEF 199 KLAP F_v 1

A 4



VOORBEELD VAN GELIJKTJDIGE REGISTRATIES VAN
DRUK - EN KRACHTSIGNALEN

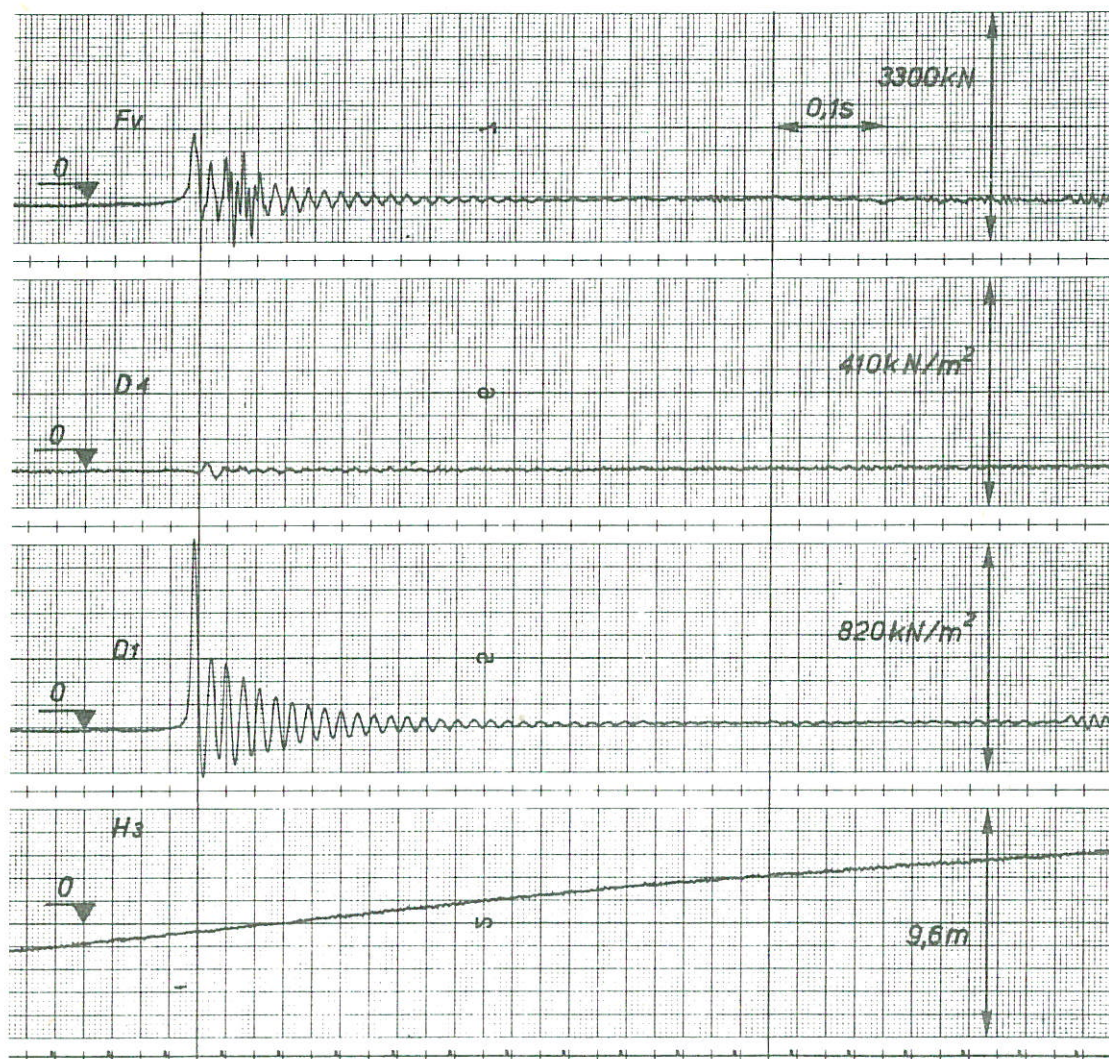
PROEF 199 KLAP D2-12

A 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1045

FIG. 45



VOORBEELD VAN GELIJTJDIGE REGISTRATIES VAN
DRUK- EN KRACHTSIGNALEN

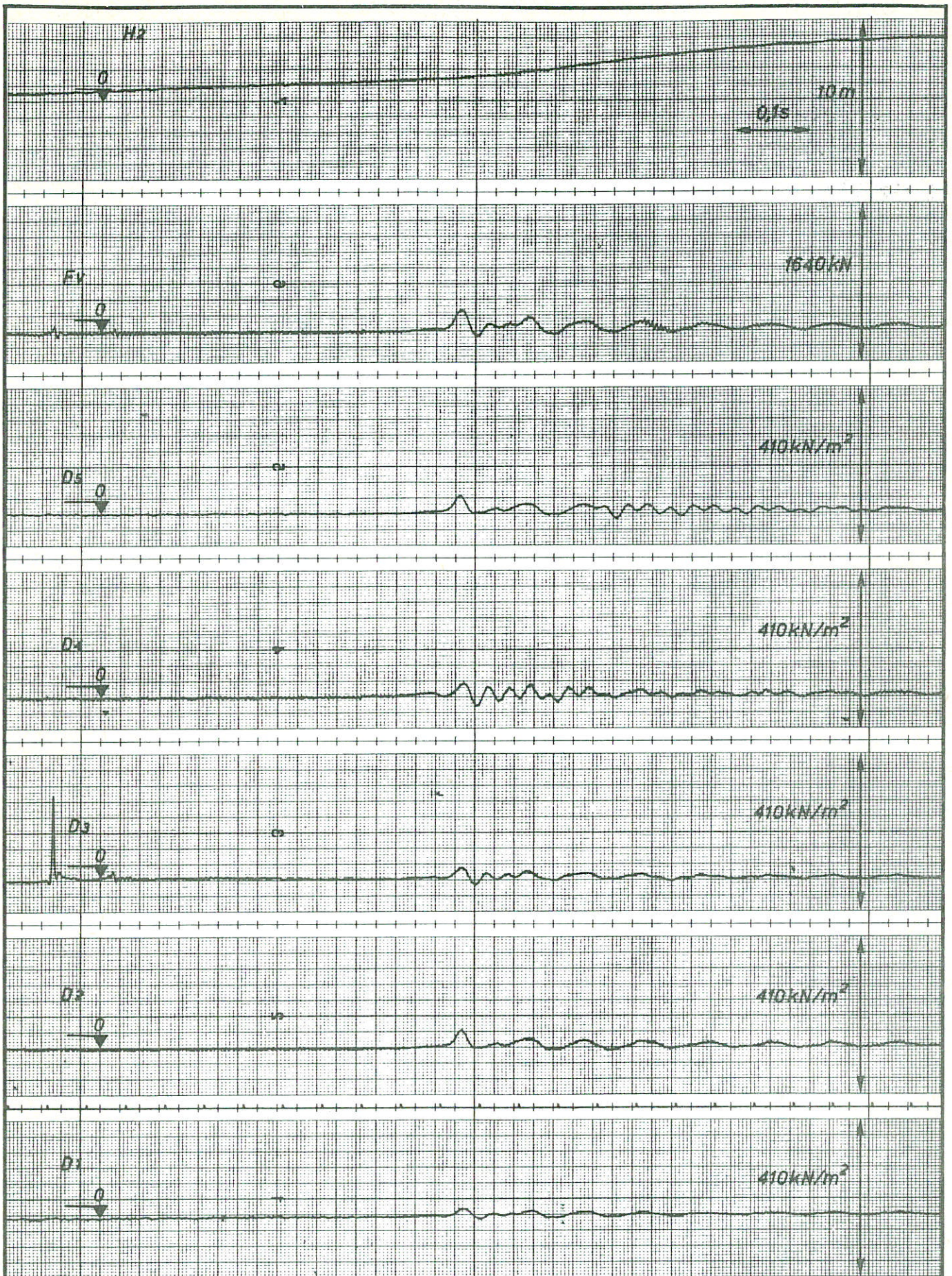
PROEF 499 KLAP D1-7

A 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1046

FIG.46



VOORBEELD VAN GELIJKTJDIGE REGISTRATIES
VAN DRUK- EN KRACHTSIGNALLEN

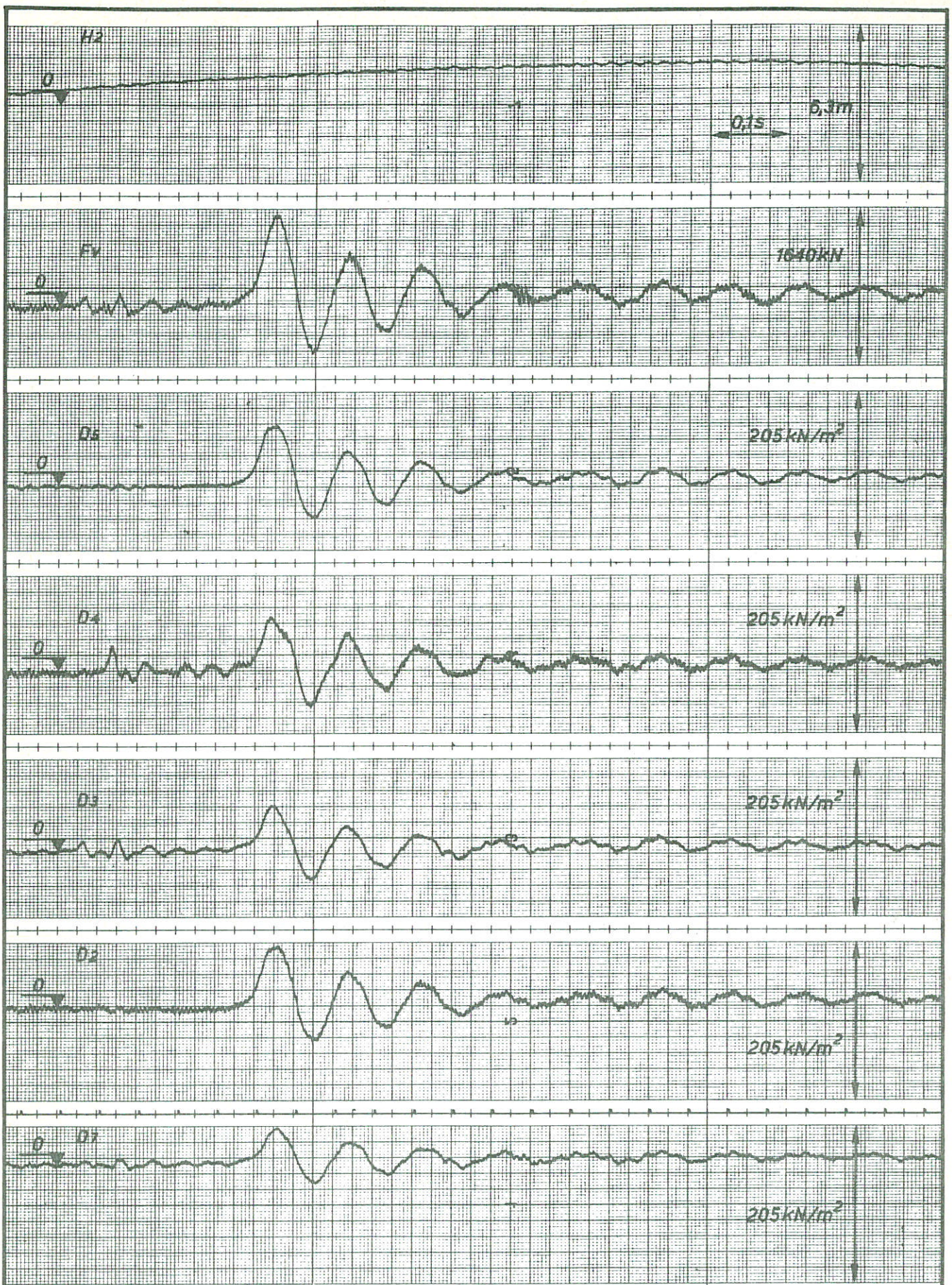
PROEF 499 KLAP D3-14

A 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1047

FIG. 47



VOORBEELD VAN GELUKTJDIGE REGISTRATIES VAN
DRUK- EN KRACHTSIGNALEN

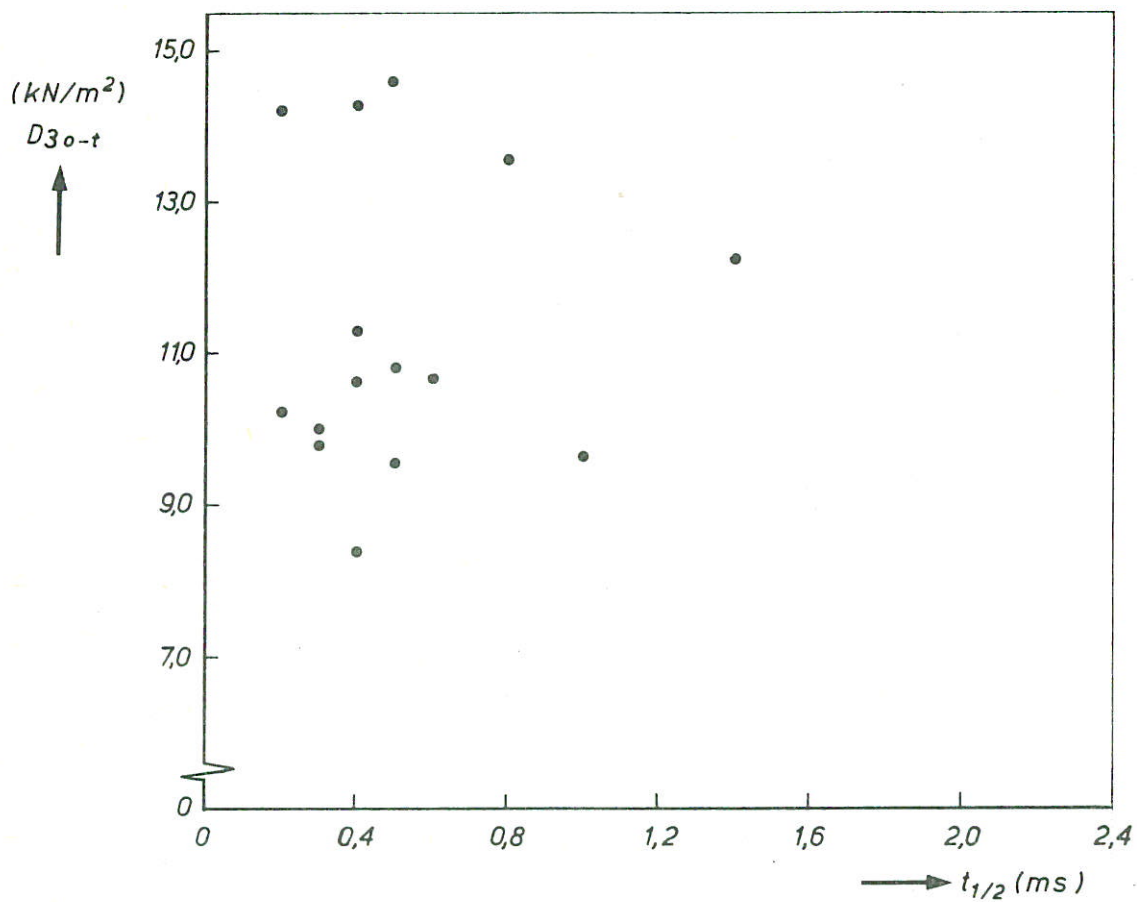
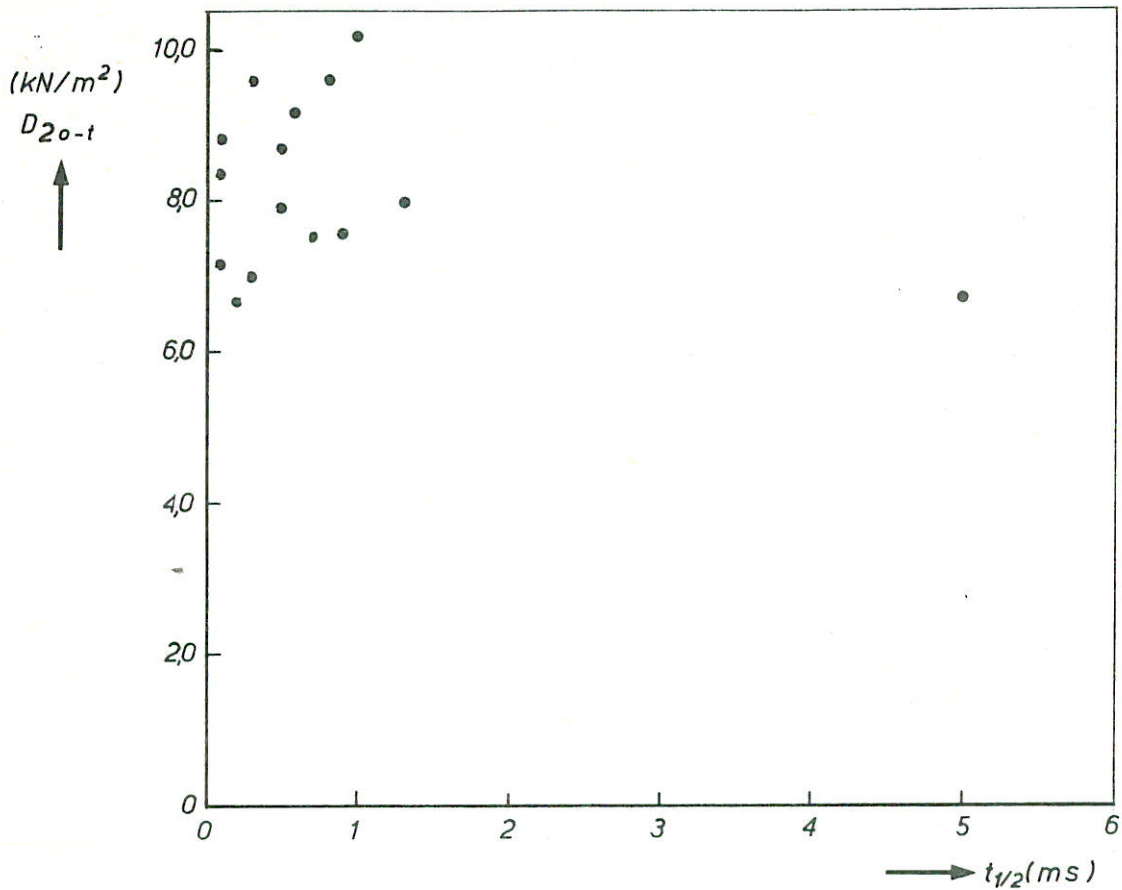
PROEF 499 KLAP D5-7

A 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1048

FIG.48



RELATIE TUSSEN : KLAPDRUK (D_{20-t} , D_{30-t}) EN KLAPTJD ($t_{1/2}$), MODELWAARDEN

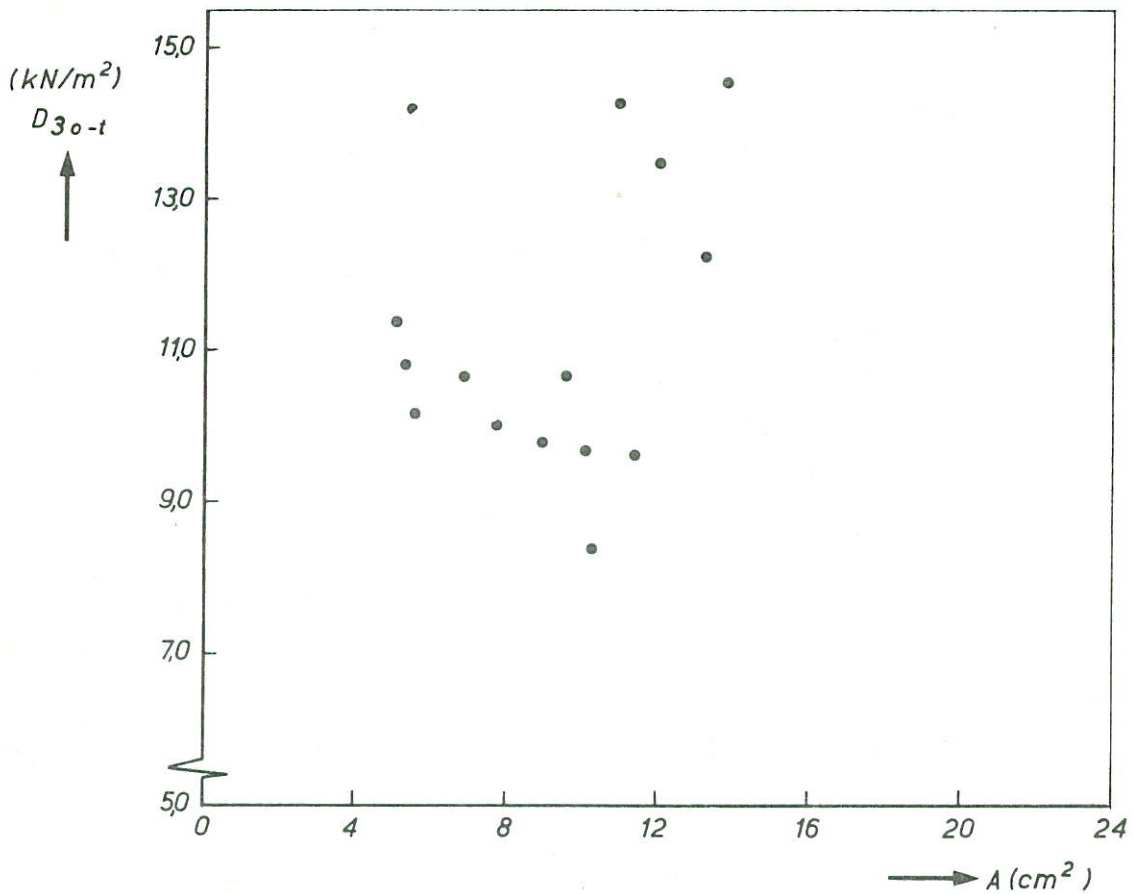
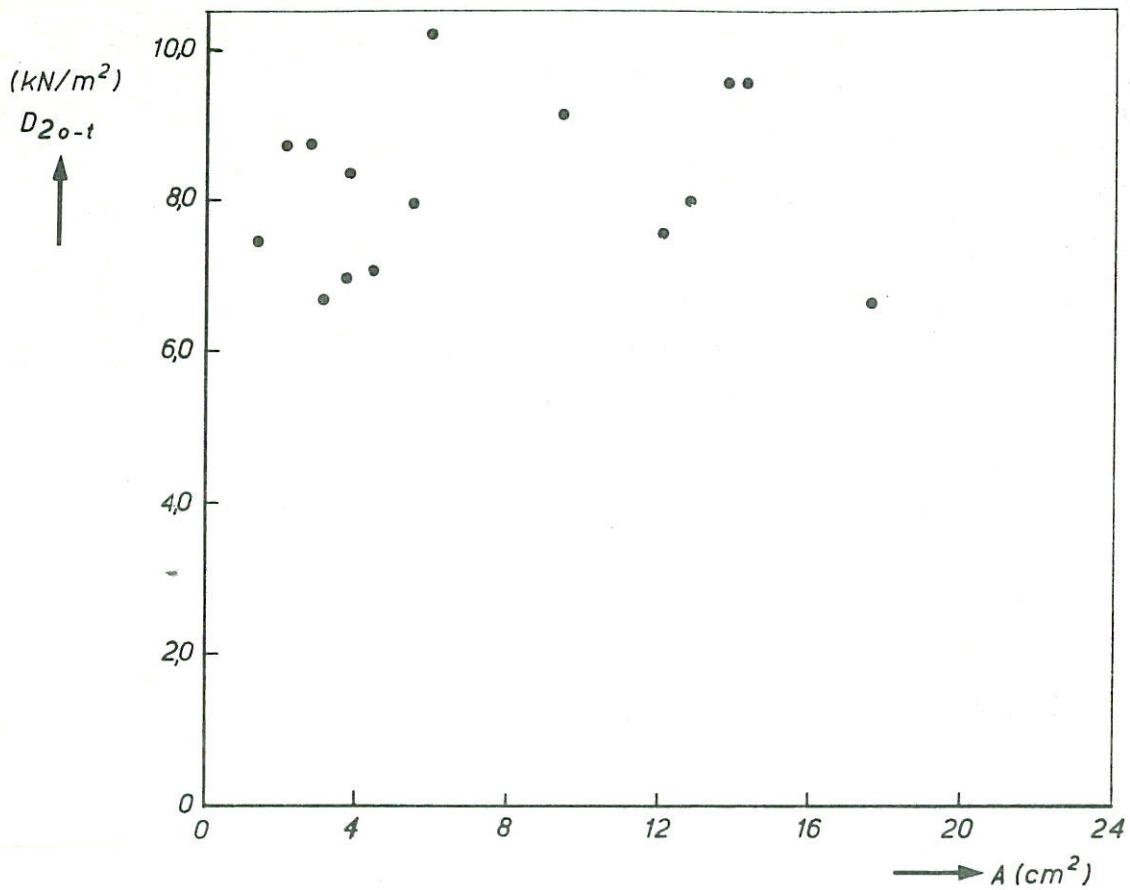
PROEF 199

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1049

FIG.49



RELATIE TUSSEN : KLAPDRUK (D_{20-t} , D_{30-t}) EN
 KLAPOPPERVLAK (A) , MODELWAARDEN

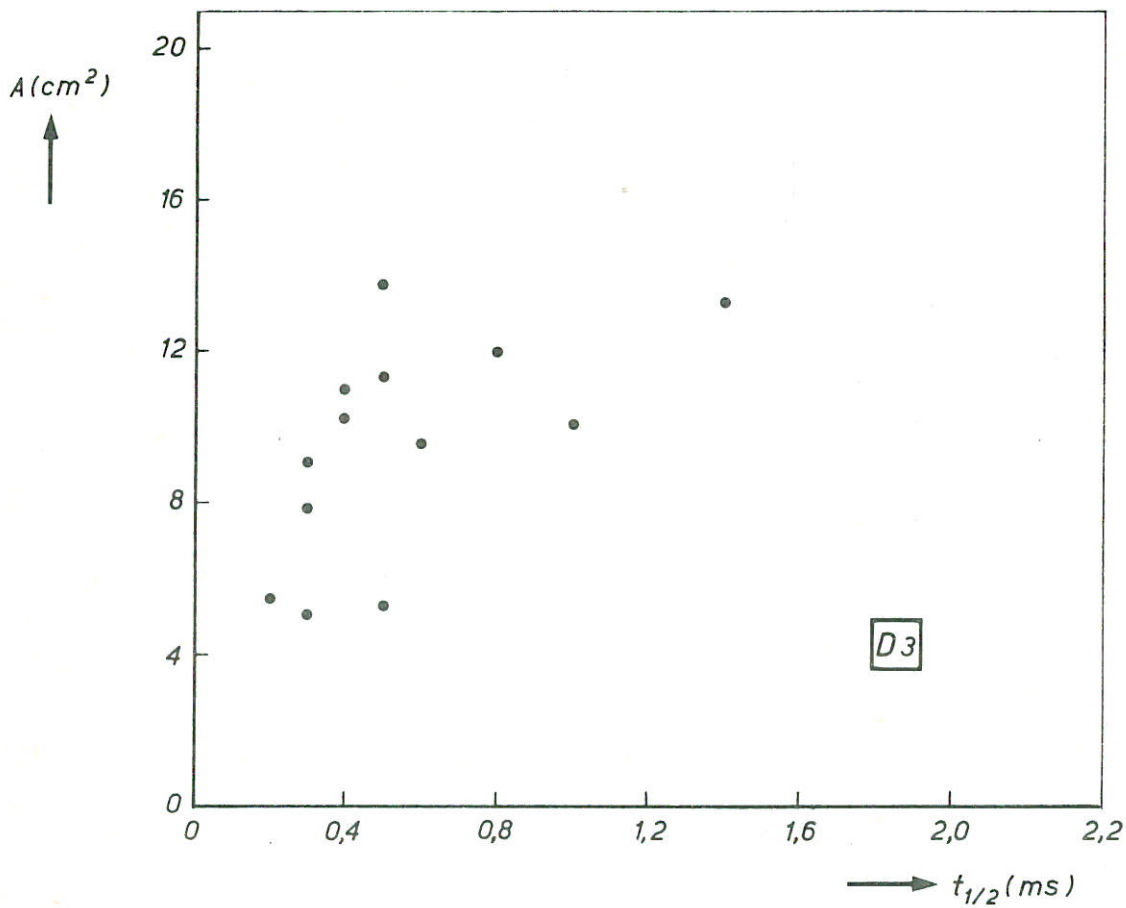
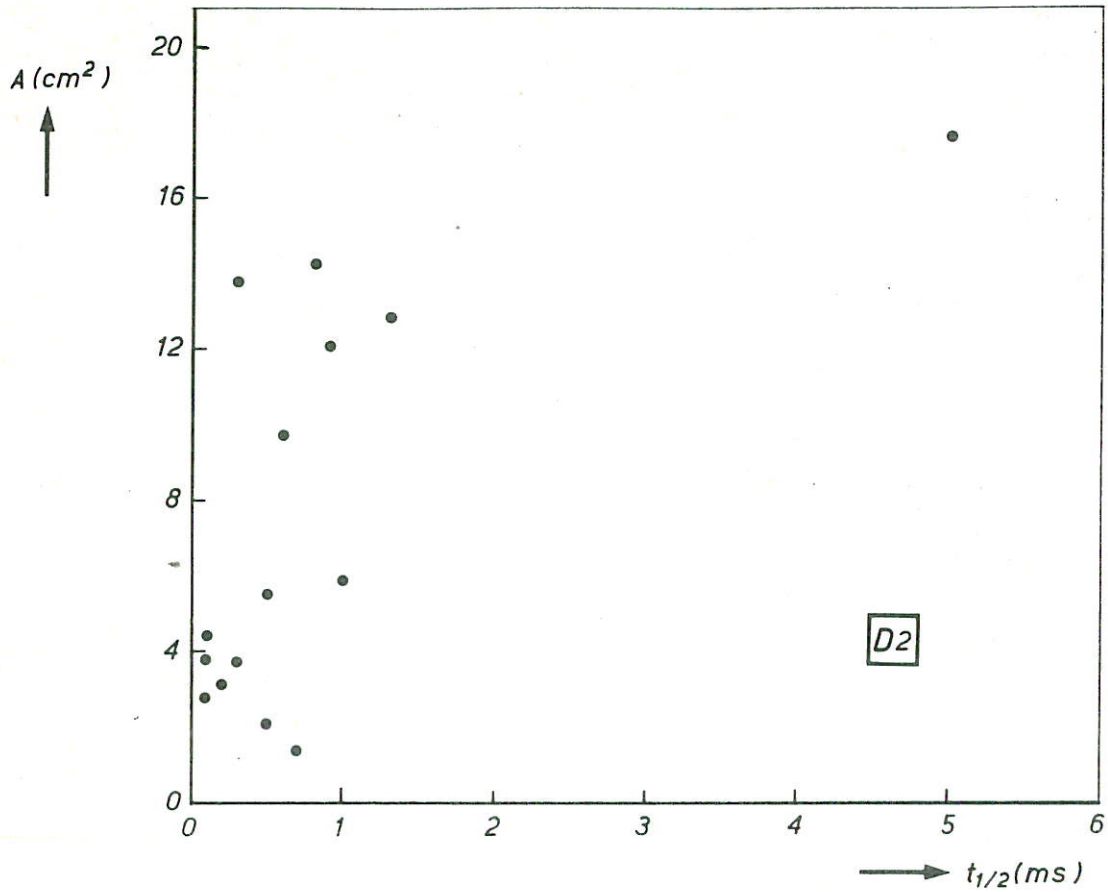
PROEF 199

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1050

FIG. 50



RELATIE TUSSEN KLAP-OPPERVLAK (A) EN
KLAP-TJD ($t_{1/2}$), MODELWAARDEN

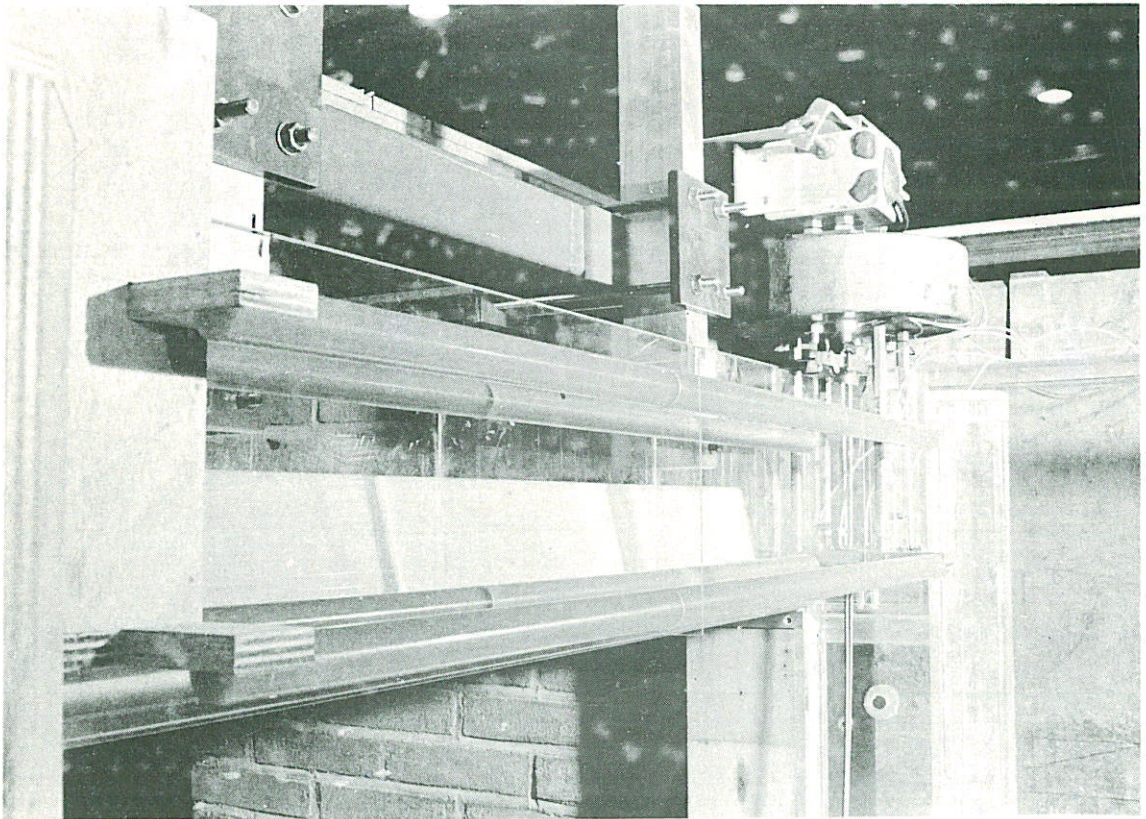
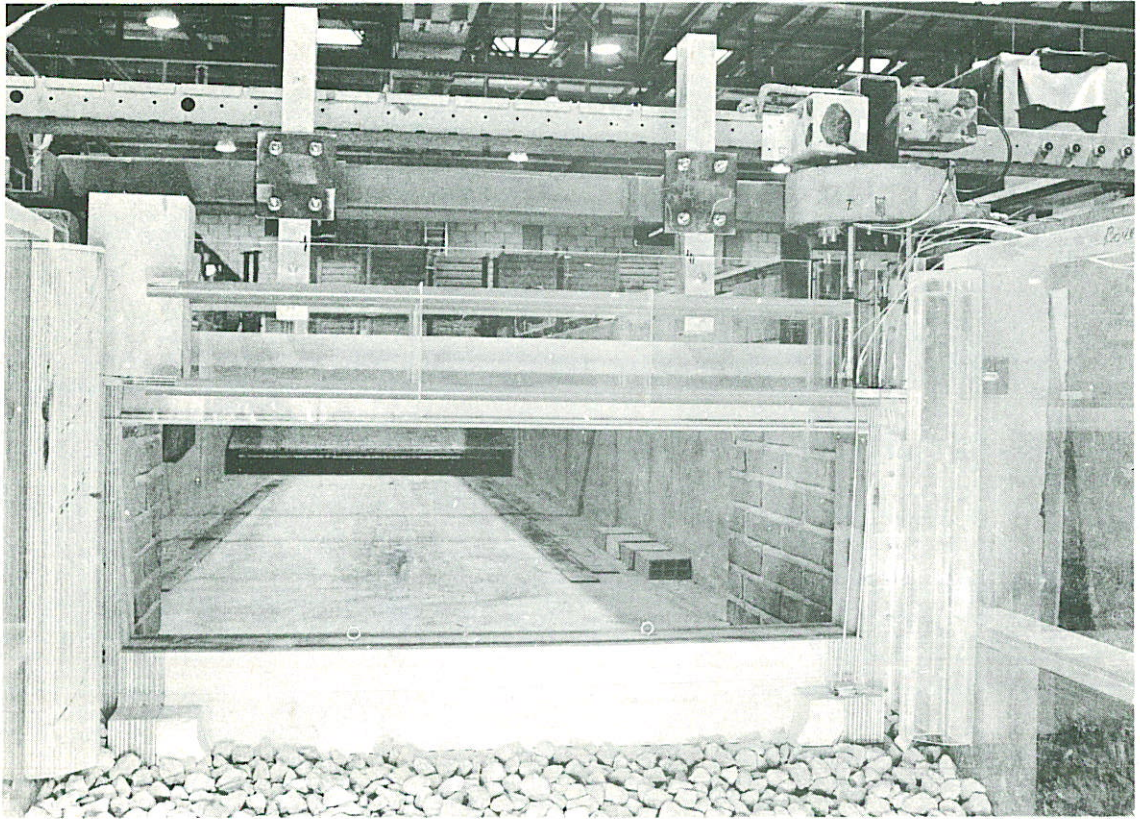
PROEF 199

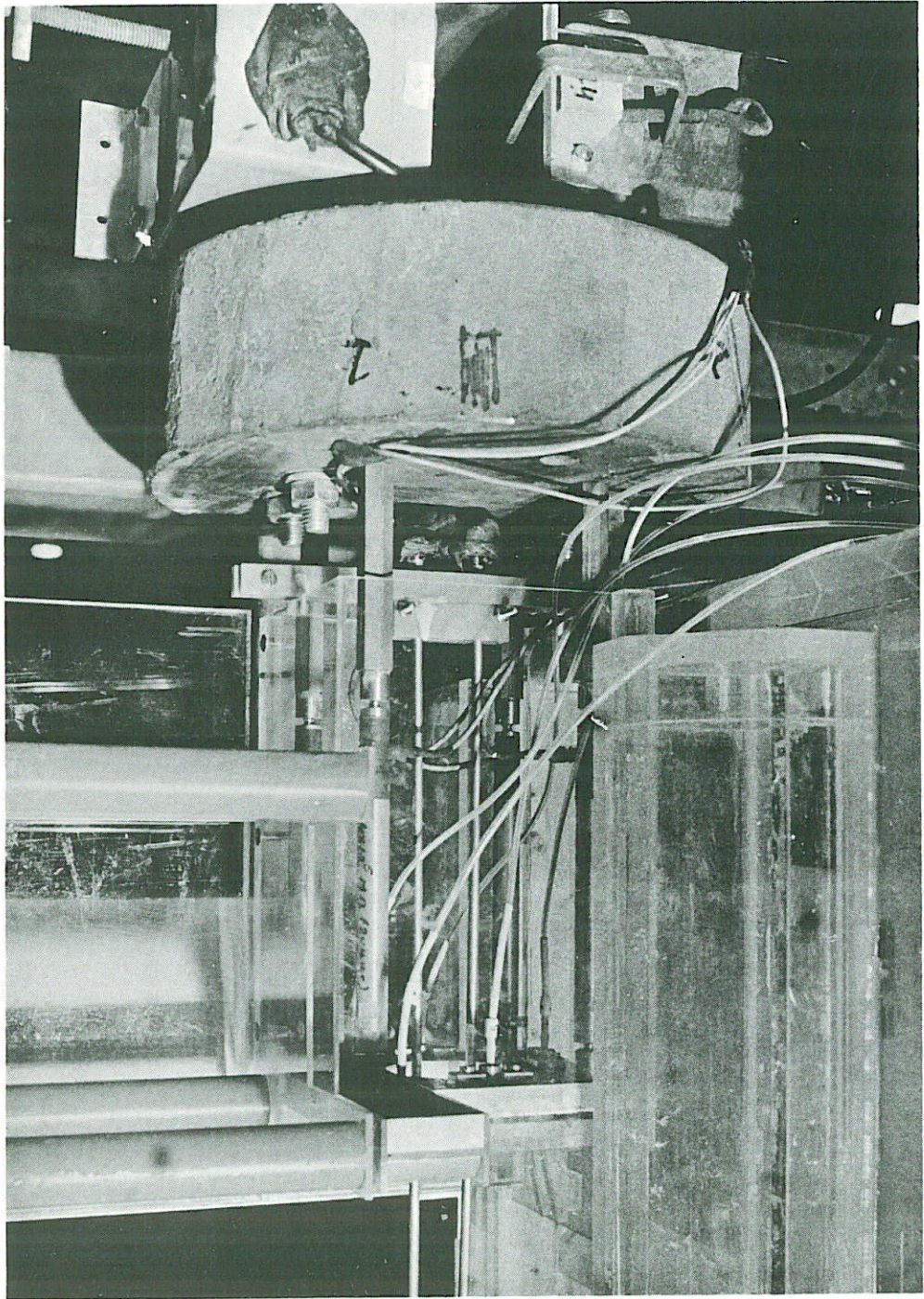
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1835-1051

FIG. 51





Fotopagina 2

BIJLAGE 1 - Uitgangspunten bij de berekening van golfklapbelastingen op onderdelen van de eindkokers.

1 Algemeen

Randvoorwaarden: Waterstand Zeezijde: 3,00 m + NAP

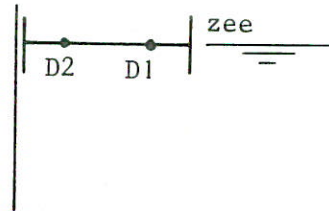
Inkomende golven: $H_S = 2,5$ m, $\bar{T}_Z = 5,2$ s.

Positie belaste onderdeel: hart op NAP + 3 m.

Berekeningwijzen:

a. koppeling met modelmetingen M1664 [1], drukmetingen in de bovenligger van de plaatliggerschuif.

Gebuurde registraties: D2 en $\frac{1}{2} \sum (D_1, D_2)$.



b. lineair compressiemodel:

$$\bar{p}_{\max} = \sqrt{\frac{p_0 \rho L v^2}{\delta}}$$

(p_0 = omgevingsdruk, ρ = soortelijke massa van water,

$2L$ = lengte van de af te stoppen kolom water, v = beginsnelheid van het water, δ = luchtbeldekte).

c. Koppeling aan meetresultaten van Chuang [2]

• Uit [2] volgt bij een gegeven snelheid van de af te stoppen waterkolom een waarde van p_{\max} , afhankelijk van de aangenomen hoek tussen konstruktie en wateroppervlak (α).

• Uit α en v volgt een ondergrens voor de klaptijd:

$$\Delta t = \frac{l}{v} \tan \alpha \quad l = \text{lengtemaat van de konstruktie.}$$

• Met impulsbehoud: $m\Delta v = F\Delta t$ volgt voor iedere waarde van α een waarde van $F = \frac{m\Delta v}{\Delta t}$.

• Vergelijking tussen $A \int p_{\max, \text{Chuang}} \cdot dA$ en $\frac{m\Delta v}{\Delta t}$ voor verschillende waarden van α . $p_{\max, \text{Chuang}}$ heeft een maximum bij 3° . $\frac{m\Delta v}{\Delta t}$ neemt toe met afnemen van α .

• Het snijpunt tussen de twee krommen levert F_{\max} voor willekeurige waarden van α .

$$\bar{p} = \frac{F_{\max}}{A}$$

2 Uitkraging

Berekend is de klapbelasting die in de beschouwde situatie door 1,5% van het

aantal watergolven wordt overschreden.

Halve pijp

1,5%-belasting is rechtstreeks afgeleid uit metingen M1687[3] (golfklapmetingen vakwerkschuif). Er is gebruik gemaakt van omrekenfactoren voor:

omrekening naar de juiste H_s : 1,1* gemeten belasting.

extra golfreflektie i.v.m. M1687: 1,44* gemeten belasting ($\alpha=0,8$)

(factoren gebaseerd op "Slamming"; $F = C_s * \frac{1}{2} \rho v^2 DL$; lengte halve pijp $\approx 1,40$ m)

Resultaat: $F = 30 \text{ à } 75$ kN per uitkraging.

Horizontale deel

a. Koppeling met M1664, meting zonder gaten in de ligger (P310, P410), drukopnemer D2. Geen correctie naar de juiste H_s en reflectiekaracteristieken ($H_s = 2,5$ m; $\alpha = 0,8$).

Resultaat: $\bar{p} = 420$ kN/m² over het gehele oppervlak.

b. Lineair compressiemodel

$L = 1,5$ m; $\delta = 0,1$ m; $v = 2,3$ m/s (1,5%-waarde).

Resultaat: $\bar{p} = 90$ kN/m² gelijkmatig verdeeld.

c. Koppeling met metingen Chuang.

$v = 2,3$ m/s. $m = 1,5^3 * 1000$ kg.

Resultaat: $F_{\max} = 750$ kN ($\Rightarrow \bar{p} = 400$ kN/m²) bij $\alpha \approx 1^\circ$.

Gemiddeld over a,b,c: $F = 610$ kN, foutenschatting: + 215 kN

- 390 kN

3 Inwendige liggers

De belastingen worden bepaald door verticale waterbewegingen in de eindkokers (v).

Berekeningen v: Op basis hiervan zijn schattingen voor de 1,5%-waarde van v gemaakt:

$v_{\min} = 0,55$ m/s; $v_{\max} = 1,43$ m/s (afh. van schattingen voor vertragingverliezen).

- a. Koppeling met M1664, proef 710; signaal $\frac{1}{2}\Sigma(D1, D2)$ (gemiddelde klapdruk op de bovenligger).

Korrekties voor omrekening:

naar de juiste waarde van $H_g = 2,5$ m.

naar de juiste reflektiekarakteristieken ($\alpha = 0,8$).

Koppeling met M1664 via $v = \frac{dH}{dt}$ vóór de schuif en v in de eindkoker; aangenomen is: $\bar{p} :: H$ en dus $\bar{p} :: \frac{dH}{dt}$.

Resultaat: $\bar{p} = 78 \text{ à } 205 \text{ kN/m}^2$ gelijkmatig verdeeld.

- b. Lineair compressiemodel:

$L = 4$ m; $v = 0,55 \text{ à } 1,43$ m/s; $\delta = 0,1$ m.

Resultaat: $\bar{p} = 35 \text{ à } 95 \text{ kN/m}^2$ gelijkmatig verdeeld.

- c. Koppeling met metingen Chuang.

$v = 0,55$ a $1,43$ m/s $m = 4,5 * 4 * 4\text{m}^3 * 1000 \text{ kg/m}^3 = 80000 \text{ kg}$
($4,5 * 4 =$ oppervlak eindkoker)

Resultaat: $F_{\min} = 440 \text{ kN}$ bij $\alpha < 1^\circ$ ($\bar{p} = 31 \text{ kN/m}^2$)
 $F_{\max} = 2300 \text{ kN}$ bij $\alpha < 1^\circ$ ($\bar{p} = 161 \text{ kN/m}^2$)

Gemiddelde over a,b,c: $F = 1450 \text{ kN}$; $\sigma_F = 990 \text{ kN}$
($\bar{p} = 100 \text{ kN/m}^2$ $\sigma_p = 70 \text{ kN/m}^2$)

4. Onderzijde eindkokers

- a. Koppeling met M1664 niet mogelijk.

- b. Lineair compressiemodel

$L = 4,4$ m; $\delta = 0,1$ m; $v = 2,25$ m/s (0,1%-waarde).

Resultaat: $\bar{p} = 120 \text{ kN/m}^2$ gelijkmatig verdeeld.

- c. Koppeling met metingen Chuang.

$m = 4,4 * 4,0 * 2,8 \text{ m}^3 * 1000 \text{ kg/m}^3 = 50000 \text{ kg}$; $v = 2,25$ m/s.

($4,4 * 4,0 =$ oppervlakte onderzijde).

Resultaat: $F \approx 4000 \text{ kN}$ bij $\alpha \approx 0,6^\circ$

$\bar{p} \approx 280 \text{ kN/m}^2$ gelijkmatig verdeeld.

Gemiddelde over b en c: $F = 2860 \text{ kN}$; $\sigma_F = 1140 \text{ kN}$
 $\bar{p} = 200 \text{ kN/m}^2$; $\sigma_{\bar{p}} = 80 \text{ kN/m}^2$
(0,1%-waarde)

LITERATUUR bij bijlage 1.

1. Waterloopkundig Laboratorium, Stormvloedkering Oosterschelde, Golfklappen op de hefschuiven, Optimalisering plaatliggerschuif.
Verslag modelonderzoek, M1664, september 1980.
2. Chuang, S.L. Experiments on slamming of wedge-shaped bodies,
Journal of Ship Research, September 1967.
3. Waterloopkundig Laboratorium, Stormvloedkering Oosterschelde, Vertikale golfbelastingen vakwerkschuiven,
Concept verslag modelonderzoek, M1723/M1687, december 1981.

BIJLAGE 2 Waterspiegelbewegingen in de schuifspinning

1. Inleiding

Als onderdeel van een proevenprogramma voor metingen van klapbelastingen op horizontale vlakke plaatdelen van de eindkoker zijn enkele metingen uitgewerkt van waterspiegelbewegingen in de schuifspinning. Uitwijkingen van de waterspiegel in de spinning zijn hierbij bepaald met behulp van een speciale golfhoogtemeter, geplaatst in de eindkoker. Bovendien zijn de waterspiegelbewegingen in en buiten de koker vastgelegd op high-speed film (≈ 200 beelden/s).

De metingen hebben plaatsgevonden in de glazen goot van $30 \times 0,5 \times 0,6 \text{ m}^3$ in "Ruimte V" in het Windgolfgoten gebouw.

2. Meetopstelling

Een horizontale doorsnede over de opstelling is gegeven in figuur B2.2. De opstelling is overigens nagenoeg gelijk aan die voor meting van klappen op de middenligger (figuur 17,18). N.B. de verticale spleten tussen meet- eindkoker en pijler, die noodzakelijk zijn voor meting van klapbelastingen op de koker, zijn bij de metingen van waterspiegelbewegingen in de spinning afgedicht, evenals de spleet tussen (dummy)- benedenligger en de rest van de koker. Deze afdichting is noodzakelijk omdat bij afwezigheid ervan, de lek te groot zou worden (lek-oppervlak: enkele tientallen procenten van het oppervlak van de dwarsdoorsnede over de spinning beneden NAP).

De gebruikte opstelling heeft betrekking op een schuif met kerende beplatingshoogte van 11,9 m, maar het niveau van dorpel, drempel en bodem is hiermee niet in overeenstemming: deze niveau's zijn omhooggebracht op grond van overwegingen ten aanzien van de klappenmetingen. Dit heeft evenwel tot gevolg, dat de golfreflektie in dit model hoger is dan in het prototype, hetgeen een correctie noodzakelijk maakt.

3. Proefkondities

Zeewaterstand: NAP + 2,9 m.

Oosterscheldewaterstand: NAP + 2,9 m.

Golfhoogten en -perioden: zie tabel 1.

Schuifstand: hart middenligger op NAP + 2,9 m, d.w.z. onderzijde kerende beplating: NAP - 3,3 m.

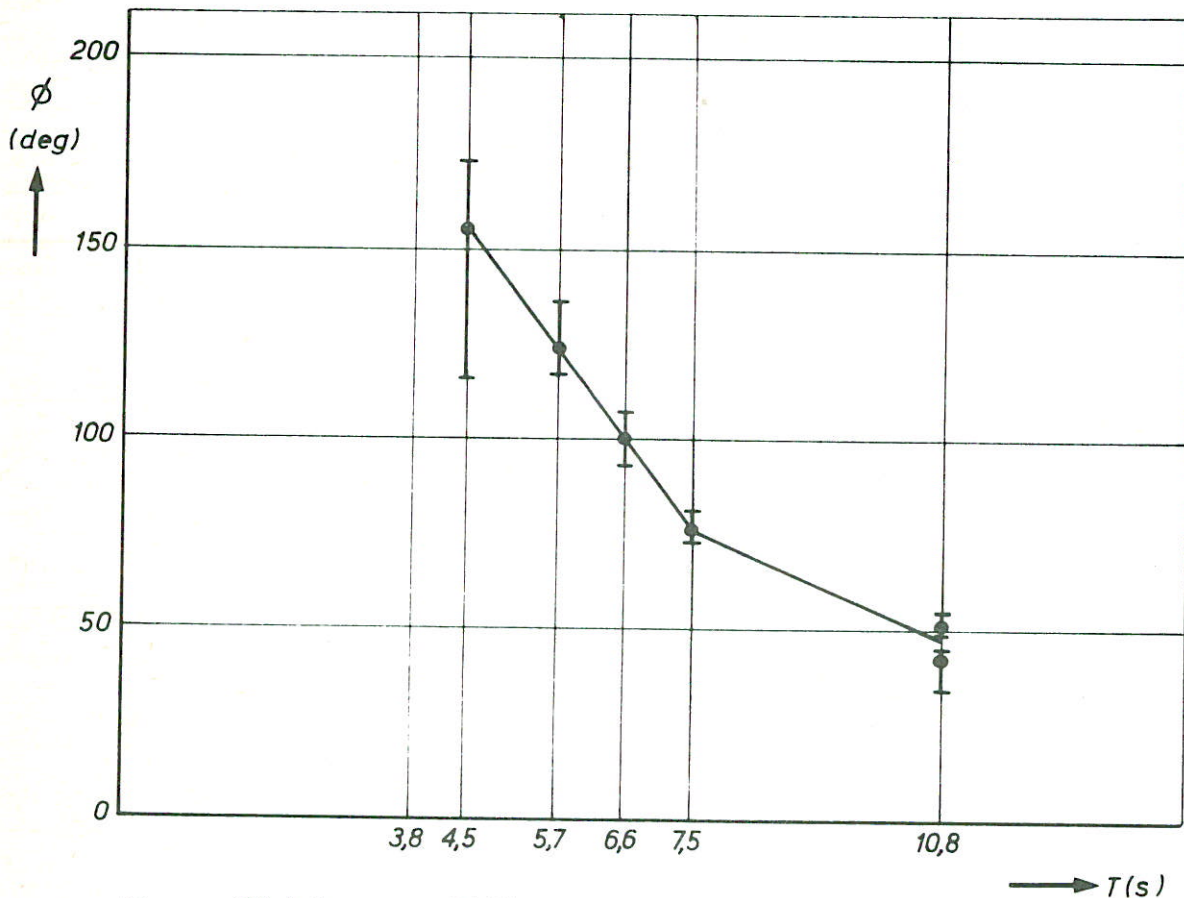
4. Resultaten

Per proef zijn over 10 golven de gemiddelde waarden bepaald van inkomende golfhoogte en golfhoogte in de sponning. Faseverschillen tussen golfbewegingen voor de koker en in de sponning zijn bepaald met behulp van de film door meting van de tijdverschillen tussen opgaande nuldoorgangen van beide bewegingen (5 golven), en gecontroleerd m.b.v. de registraties van D1 en H2 (10 golven).

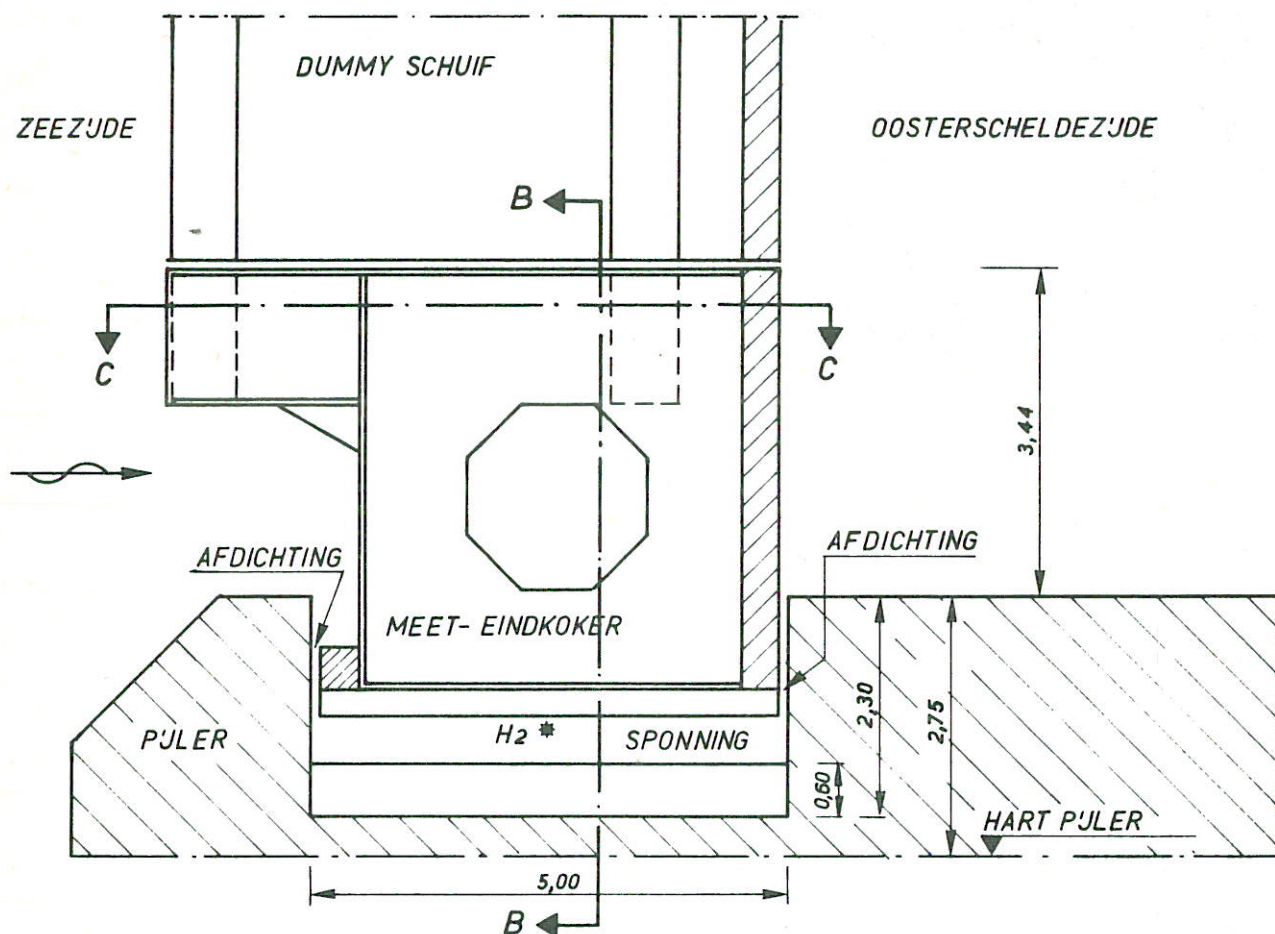
De gemeten golfhoogten zijn teruggerekend naar een situatie met $\alpha = 0,7$. Gemeten in het model: $\alpha \approx 1,0 \Rightarrow$ correctiefactor $c = \frac{1,7}{2} = 0,85$ is nodig op H_{sponning} .

Tabel B2.1 Resultaten van metingen van waterspiegelbewegingen in de spanning (regelmatige golven).

Proef	\bar{T} [s]	\bar{H}_i [m]	ϕ [deg]	H_{spanning} gemeten [m]	H_{spanning} $\alpha = 0,7$ [m]	$\frac{\bar{a}_{\text{ztspanning}}}{\bar{H}_{\text{spanning}}}$ [-]
680	3,8	2,3	?	0,35	0,30	0,45
650	4,5	3,4	120-170	0,85	0,70	0,51
660	5,7	4,9	120-140	1,85	1,55	0,54
670	6,6	4,8	90-110	3,25	2,75	0,54
640	7,5	4,9	80	4,10	3,50	0,55
690	10,8	5,4	50	6,70	5,60	0,56
690*	10,8	3,0	40	3,80	3,20	0,54



Figuur B2.1 Faseverschillen tussen waterspiegelbewegingen in de spanning en voor de koker. $\phi > 0$ betekent dat de beweging in de spanning achter loopt t.o.v. buiten.

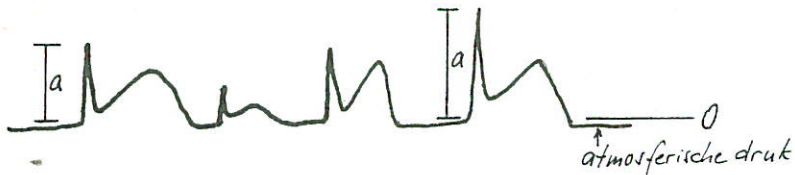


Horizontale doorsnede over pijler, sponning en meet-eindkoker, boven NAP.

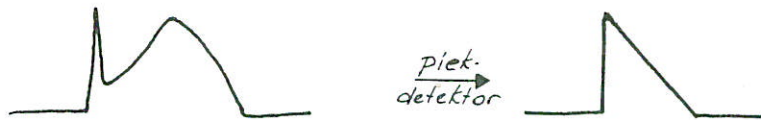
Fig. B2.2

BIJLAGE 3 Kumulatieve frekwentieverdeling van klap-amplituden

De registraties van de drukopnemers zien er in het algemeen uit als in onderstaand voorbeeld:



Teneinde een indruk te verkrijgen van de grootte van de golfklapdruk-amplituden a is een kumulatieve frekwentieverdeling van a -waarden samengesteld. Aangezien de normale verwerkingsapparatuur niet geschikt zijn voor deze snelle signalen, is een zogenaamde piekdetektor in de schakeling opgenomen. Dit apparaat volgt de opwaartse flank van het signaal tot aan de top van de klap waarna de achterflank wordt vervangen door een lineaire terugval in de tijd, zoals onderstaande figuur aangeeft:



Het uitgangssignaal van de piekdetektor is geschikt voor normale verwerking met behulp van een golfhoogte-analysator. Dit apparaat deelt de o-top-waarden in klassen in, waarna de kumulatieve frekwentieverdeling kan worden opgesteld.

p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands