

waterloopkundig laboratorium  
delft hydraulics laboratory

doorlaatsluis Brouwersdam

trillingsmetingen schuiven

verslag buitenmetingen

---

R 1347

maart 1980

---

doorlaatsluis Brouwersdam

trillingsmetingen schuiven

verslag buitenmetingen

---

R 1347

maart 1980

## Inhoud

Lijst van figuren  
Lijst van tabellen  
Lijst van symbolen

	Blz.
<u>1. Inleiding</u> .....	1
1.1 Opdracht .....	1
1.2 Doelstelling onderzoek .....	1
1.3 Samenvatting en konklusies .....	1
<u>2. Sluis Brouwersdam</u> .....	4
2.1 Overzicht sluis .....	4
2.2 Schuiven sluis Brouwersdam .....	4
2.2.1 Schuifontwerp .....	4
2.2.2 Eigenfrequenties schuiven .....	5
2.3 Afvoer karakteristiek sluis .....	7
<u>3. Opzet en uitvoering metingen</u> .....	8
3.1 Inleiding .....	8
3.2 Meetprogramma .....	8
3.3 Meetopstelling .....	9
3.4 Versnellingsopnemers .....	11
3.5 Kodering meetsignalen .....	13
<u>4. Resultaten metingen</u> .....	14
4.1 Inleiding .....	14
4.2 Verwerking metingen .....	14
4.3 Resultaten .....	15
4.3.1 Gemeten versnellingen .....	15
4.3.2 Spektrum analyse .....	16
4.3.3 Verhouding dynamische en statische krachten op de schuif .....	17
<u>5. Vergelijking met modelresultaten</u> .....	20
5.1 Inleiding .....	20
5.2 Korte beschrijving modelonderzoek .....	20
5.3 Beschouwing over afwijkingen model-prototype .....	21
5.4 Vergelijking .....	22
5.4.1 Vertikaal .....	22

Inhoud (vervolg)

Blz.

5.4.2 Horizontaal ..... 23

Tabellen

Figuren

## Lijst van figuren

1. Overzichtssituatie sluis Brouwersdam
2. Sluisontwerp A-1
3. Schuifontwerp van sluis Brouwersdam
4. Aanzicht schuiven en bewegingswerk met positie versnellingsopnemers
5. Doorsnede schuivenhuis met de symmetrische schuif (aanvankelijk ontwerp)
6. Stijfheid ophangkonstruktie schuif als funktie van de relatieve schuifopening
7. Afvoercoëfficiënt voor lozen, bepaald bij modelonderzoek M 1257
8. Afvoercoëfficiënt voor inlaten, bepaald bij modelonderzoek M 1257
9. Verloop zeewaterstand (t.o.v. NAP) tijdens meetdagen
10. R.M.S.-waarden versnellingssignalen onderste 'horizontale' opnemer als funktie van het verval over de sluis bij korrekte aanstroming
11. R.M.S.-waarden versnellingssignalen van de 'vertikale' opnemer B1 als funktie van het verval over de sluis bij korrekte aanstroming
12. Spektra verplaatssignalen tijdens maximaal verval; 1e meetdag
13. Vertikale en horizontale statische kracht op schuiven sluis Brouwersdam, zoals gemeten tijdens modelonderzoek M 1272
14. Vertikale dynamische kracht op de schuif bij prototypemetingen en modelmetingen
15. Vertikale dynamische verplaatsing van de schuif bij prototypemetingen en modelmetingen
16. Horizontale verplaatsing van de onderkant van de schuif bij prototypemetingen en modelmetingen.

## Lijst van tabellen

1. Resultaten meting nr. 1  $d/D = 0,555$
2. Resultaten meting nr. 2  $d/D = 0,277$
3. Resultaten meting nr. 3  $d/D = 0,155$
4. Resultaten meting nr. 4  $d/D = 0,111$
5. Resultaten meting nr. 5  $d/D = 0,083$
6. Resultaten meting nr. 6  $d/D = 0,069$
7. Resultaten meting nr. 7  $d/D = 0,056$
8. Resultaten meting nr. 8  $d/D = 0,028$

## Lijst van symbolen

A	keeldoorsnede van de kokers	$[m^2]$
$C_Q$	afvoercoëfficiënt sluis	$[-]$
d	hefhoogte schuif	$[m]$
D	kokerhoogte in keel	$[m]$
f	frekwentie	$[s^{-1}]$
$f_n$	eigenfrekwentie versnellingsopnemer	$[s^{-1}]$
$f_v$	vertikale eigenfrekwentie schuif	$[s^{-1}]$
$F_{dyn}$	dynamische kracht op de schuif	$[kg\ ms^{-2}]$
$F_{stat}$	statische kracht op de schuif	$[kg\ ms^{-2}]$
g	zwaartekrachtsversnelling	$[ms^{-2}]$
$g_{max}$	maximale gemeten versnelling	$[ms^{-2}]$
$\Delta h$	verval over de sluis	$[m]$
H(f)	overdrachtsfunctie	$[-]$
k	stijfheid ophangkonstruktie	$[kg\ s^{-2}]$
m	schuifmassa	$[kg]$
$m_w$	meebewegende watermassa	$[kg]$
Q	debiet	$[m^3\ s^{-1}]$
x	verplaatsing schuif	$[m]$
$\ddot{x}$	versnelling schuif	$[ms^{-2}]$
y	verplaatsing versnellingsopnemer	$[m]$
$\ddot{y}$	versnelling opnemer	$[ms^{-2}]$
z	relatieve verplaatsing opnemer	$[m]$
$\zeta$	demping versnellingsopnemer	$[-]$
$\sigma$	standaardafwijking versnellingssignaal	$[ms^{-2}]$
$\psi$	fasehoek	$[-]$

## 1. Inleiding

### 1.1 Opdracht

Met brief WT 15.359 d.d. 20 januari 1978 heeft de Hoofdafdeling Waterloopkunde van de Deltadienst Rijkswaterstaat het Waterloopkundig Laboratorium opdracht gegeven een prototype trillingsonderzoek uit te voeren aan de schuiven van de spuisluis in de Brouwersdam. Dit prototypeonderzoek is uiteindelijk verricht in april 1979 onder leiding van ir. C. Deelen, die tevens dit verslag samenstelde.

### 1.2 Doelstelling onderzoek

De doelstelling van het prototype trillingsonderzoek aan de schuiven van de spuisluis in de Brouwersdam is tweeledig.

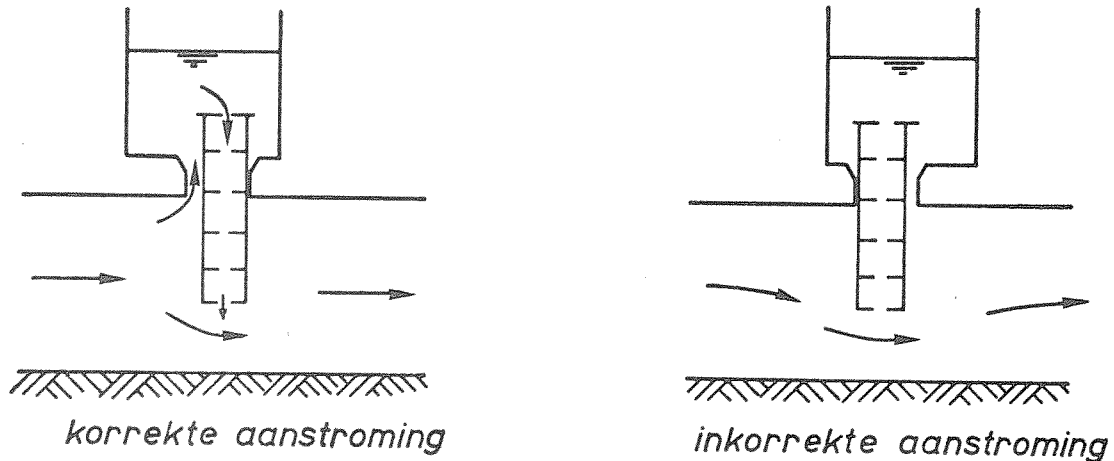
In de eerste plaats kan door dit onderzoek meer zekerheid worden verkregen omtrent het gedrag van de prototypeschuif. Hoewel reeds een uitvoerig modelonderzoek heeft plaatsgevonden (model M 1272) is een verifikatie op zijn plaats omdat bij trillingsonderzoek de konstruktie enigszins geschematiseerd in model is gebracht. Bij het modelonderzoek zijn bijvoorbeeld de horizontale en verticale trillingen in afzonderlijke schuifmodellen onderzocht, zodat interactieverschijnselen hierin niet tot uiting kwamen. Indien uit het prototypeonderzoek een ongunstig gedrag wordt gevonden kunnen alsnog beperkingen worden opgelegd aan de bedrijfsvoering. Een tweede doelstelling is de vergelijking van modelresultaten met prototypesresultaten en een analyse van overeenkomsten en verschillen. Deze analyse is van theoretisch en praktisch belang, waarbij te denken valt aan modeltechniek en interpretatie van modelresultaten.

### 1.3 Samenvatting en konklusies

De sluis Brouwersdam bestaat uit twee venturivormige kokers met een verlaagd schuivenhuis in de keel. In dit schuivenhuis bevinden zich per koker twee hoofdschuiven. Dit zijn gladde, dubbelbeplate glijdschuiven met een dikte van ongeveer  $\frac{2}{3}$  van de sponningbreedte, die asymmetrisch in de sponningen staan. In verband met deze asymmetrie is het van belang van welke kant de schuif wordt aangestroomd. Bij een zogenaamde korrekte aanstroming stroomt er naast een debiet onder de schuif door ook een debiet via de bovenstroomse spleet en door de schuif terug (omstromingsdebiet) wanneer deze enkele decimeters is geheven.



De schuifschacht blijft vol met water staan zodat luchtaanzuiging kan worden beperkt. Bij een inkorrekte aanstroming stroomt vrijwel al het water onder de schuif door.



Per koker wordt één schuif korrekt aangestroomd en één inkorrekt. Bij het prototypetrillingsonderzoek zijn tegelijkertijd twee schuiven in het onderzoek betrokken, in iedere koker één en wel zodanig dat de ene schuif korrekt en de andere inkorrekt wordt aangestroomd. De metingen zijn gedaan bij gemiddeld springtij van laag water tot hoog water, terwijl de te onderzoeken schuiven een bepaalde hefhoogte kregen ingesteld. Er zijn in totaal 8 meetdagen geweest zodat bij 8 schuifopeningen het dynamisch gedrag van de schuif is bekeken.

Het trillingsgedrag van een schuif is vastgelegd met behulp van 4 versnellingsopnemers, 2 voor verticale en 2 voor horizontale versnellingen. Tijdens de meting zijn de signalen van de opnemers na versterking en uitschrijven op de band opgenomen om verder verwerken mogelijk te maken.

Aan de hand van de registratie tijdens de meting zijn geen regelmatige trillingen geconstateerd. De gemeten versnellingssignalen zijn onregelmatig van karakter. Voorts is niet waargenomen dat tijdens de meting luchtaanzuiging is opgetreden.

Bij het verwerken van de metingen is enerzijds van de registratie globaal de maximale versnelling om het uur afgelezen en daarnaast met een RMS-meter de standaardafwijking  $\sigma$  op dezelfde tijdstippen bepaald. Uit de resultaten

blijkt dat de gemeten versnellingen erg klein zijn: zij bedragen hooguit enkele procenten van de zwaartekrachtsversnelling.

Deze versnellingen geven bij trilling in de eigenfrequentie van de schuif verplaatsingen van de orde van grootte van  $10^{-4}$  m. Zoals verwacht nemen de RMS-waarden van de gemeten versnellingen van de schuif toe met het verval. De gemeten versnellingen zijn, zowel horizontaal als vertikaal, het grootst bij de grotere schuifopeningen. Een beperkte spektrale analyse van enkele signalen tijdens maximaal verval levert geen duidelijke scherpe pieken op als gevolg van een meer of minder regelmatige trilling. Tenslotte is gekeken naar de grootte van de dynamische krachten op de schuif ten opzichte van de statische kracht. Hiertoe is aan de hand van de gemeten versnellingen een schatting gemaakt van de dynamische kracht en is deze vergeleken met de tijdens het modelonderzoek gemeten statische kracht op de schuif. Hieruit volgt dat vertikaal de dynamische kracht te verwaarlozen is en deze horizontaal klein is ten opzichte van de statische kracht.

Hoewel slechts enkele hefhoogten zijn onderzocht, kan op grond van de resultaten worden gekonkludeerd dat er geen aanleiding is om de schuifkonstructie te wijzigen of beperkingen aan de bedrijfsvoering op te leggen.

Tot slot is voor zover mogelijk, een vergelijking gemaakt tussen de resultaten van het prototype onderzoek en de modelresultaten. Het modelonderzoek is in twee gedeelten gesplitst: een horizontaal en een vertikaal krachten- en trillingsonderzoek.

Voor het horizontale onderzoek is een elastisch gelijkvormig model gekozen met scharnierende lijnopleggingen. Vertikaal is het model als een enkelvoudig massaveersysteem uitgevoerd met een stijve schuif en een wrijvingsloze oplegging in de vorm van een hydrostatisch lager.

De verschillen tussen model en prototype betreffen voornamelijk de opleggingen. De prototypeschuif is een glijdschuif terwijl in het model juist een wrijvingsloze oplegging is toegepast. In het prototype is derhalve in verticale richting de damping veel groter dan in het model. Horizontaal is de overeenkomst redelijk goed.

Een vergelijking van de verticale dynamische kracht in model en prototype levert inderdaad op dat de dynamische belasting in prototype kleiner is. De dynamische verplaatsingen van de schuif in prototype, te vertalen in een dynamische kracht op het hefsysteem, zijn veel kleiner dan die tijdens het modelonderzoek gemeten als gevolg van het verschil in oplegging.

De overeenkomst tussen de horizontale dynamische verplaatsingen van de onderkant van de schuif in model en prototype is redelijk goed.

## 2. Sluis Brouwersdam

### 2.1 Overzicht sluis

Ten behoeve van de beheersing van de waterkwaliteit van de afgesloten Grevelingen was het wenselijk in de Brouwersdam een doorlaatmiddel aan te brengen (figuur 1). De doorlaatsluis in de Brouwersdam is zo ontworpen dat de sluis niet alleen als lozingsmiddel maar ook als inlaatwerk dienst kan doen. Het is immers nog steeds onzeker binnen wat voor waterhuishoudkundig systeem de sluis zal moeten functioneren.

Voor een overzicht van de ontwerpgeschiedenis van de spuisluis kan worden verwezen naar lit. [2, 3].

Een overzicht van de sluis Brouwersdam is te vinden op figuur 2.

De sluis bestaat uit twee venturivormige kokers met een verlaagd schuivenhuis in de keel. Zowel aan zee- als aan meerzijde is er een plotselinge overgang in de kokerdoorsnede. De plafonddiepte in de keel van de sluis is NAP -6,5 m. Naast het schuivenhuis lift het plafond op NAP -4 m en verloopt naar zeezijde en Grevelingenzijde tot NAP -3 m, voornamelijk om het binnenlopen van golfdalen in de kokers zoveel mogelijk tegen te gaan. Elke koker is in de keel 6 m breed en heeft een bodemligging van NAP -11 m. De lengte van de kokers is 195 m.

In het schuivenhuis bevinden zich per koker twee hoofdschuiven, een onderhouds- en een reserveschuif.

### 2.2 Schuiven sluis Brouwersdam

#### 2.2.1 Schuifontwerp

Het schuifontwerp is het resultaat van een uitvoerig stromingsonderzoek aan de schuiven van de sluis Noordland (lit. [2]). In eerste instantie is daarbij uitgegaan van een dubbelbeplate schuif ter breedte van de sponning. Omdat het resultaat was dat bijna al het water onder de schuif door stroomde en derhalve de schuif bij sommige openingen droog stond, is daarna een oplossing gezocht in het toepassen van een enkele beplating. Verkeerde aanstroming zou echter bij dit ontwerp ongewenst zijn, terwijl bovendien bij een enkele beplating de bovenligger dicht zou moeten zijn hetgeen de hefkrachten zou verhogen.

Uiteindelijk is gekozen voor een gladde, dubbelbeplate glijdschuif met een

dikte van ongeveer  $\frac{2}{3}$  van de sponningbreedte, die asymmetrisch in de sponning staat (figuur 3). De richting van aanstromen is van belang: de schuif kan korrekt of inkorrekt worden aangestroomd.

De korrekt aangestroomde schuif heeft, zodra hij enkele decimeters is geheven, aan de bovenstroomse zijde van de bovenaanslag een grote spleet, terwijl de spleet aan de benedenstroomse zijde zo klein mogelijk is gehouden.

Als gevolg van het grote omstromingsdebiet door de bovenstroomse spleet en via de schuif zelf terug in de koker blijft de schuifschacht bij alle hefhoogten vol staan met water. Dit voorkomt dat bij het optreden van onderdrukken in de keel lucht meegezogen wordt. Tengevolge van deze verticale stroming in de schuif worden zuigkrachten verminderd en neemt de demping van de schuif toe. Omdat het grote omstromingsdebiet bij geheel gladde schachtwanden veel lucht mee de koker in trek, werden de wanden voorzien van een nok over de volle breedte van de koker (zie figuur 5).

Wanneer de schuif inkorrekt wordt aangestroomd bevindt de grote spleet zich benedenstrooms, zodat het omstromingsdebiet dan zeer gering is.

In iedere koker bevinden zich twee hoofdschuiven, een zeeschuif en een meerschuij. Bij stroming in een bepaalde richting wordt de benedenstroomse schuij korrekt en de bovenstroomse schuij inkorrekt aangestroomd. Bij stroming van Grevelingen naar Zee wordt dus de zeeschuif korrekt aangestroomd en bij stroming van zee naar Grevelingen de meerschuij.

Het bewegingswerk van de schuiven is, tezamen met de schuiven, weergegeven op de figuren 4 (aanzicht) en 5 (dwarsdoorsnede). De ophangkonstruktie bestaat uit een zuigerstang, een met olie gevulde cilinder en een zogenaamde A-konstruktie. Het gewicht van de schuij bedraagt ongeveer 180 kN, dat van A-konstruktie en cilinder 25 kN.

### 2.2.2 Eigenfrekwenties schuiven

Tijdens het modelonderzoek M 1272 zijn de eigenfrekwenties van de schuij bepaald. Vanwege het belang van de kennis van de eigenfrekwenties voor de analyse van de trillingsmetingen, wordt hier kort op de resultaten van het modelonderzoek ten aanzien van de eigenfrekwenties ingegaan.

#### - Horizontaal

De horizontale eigenfrekwentie is bepaald voor schuifopeningen van 0,125 m tot 3 m. De schuij rustte tegen zijn aanslagen en bevond zich geheel onder

water. Er was geen stroming.

De gemeten 'natte' horizontale eigenfrequentie is 10 à 11 Hz, afhankelijk van de manier van aanstoten en de waterstand in de schacht. De bijbehorende gemeten 'droge' frequentie is 37 Hz.

- Vertikaal

Bepalend voor de verticale eigenfrequentie zijn de stijfheid van de ophangkonstruktie en de massa van de schuif, inclusief meebewegende watermassa. De verticale stijfheid wordt bepaald door de lengte van de oliekolom en de stijfheden van zuigerstang en A-konstruktie. Aangezien de lengte van de oliekolom afhangt van de schuifopening zal de totale verticale stijfheid een functie zijn van de schuifopening. In figuur 6 is de stijfheid van de ophangkonstruktie uitgezet als functie van de relatieve schuifopening  $d/D$ .

In model zijn enkele schuifopeningen en bijbehorende stijfheden ingesteld en is onderzoek gedaan naar de meebewegende watermassa. Deze hangt volgens de resultaten bij ongeveer 1 m water boven de schuif voornamelijk af van de afstand van de schuif tot de bodem. Er zijn proeven gedaan waarbij geen stroming optrad en proeven waarbij de gemiddelde snelheid onder de schuif ongeveer 5 m/s was. De invloed van stroming op de meebewegende watermassa is zeer gering.

Berekening van de 'natte' verticale eigenfrequentie levert het volgende op voor de schuifstanden waarbij prototypetrillingsonderzoek is gedaan:

$$f_v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m+m_w}}$$

d [m]	d/D	k [10 <sup>6</sup> N/m]	m+m <sub>w</sub> [10 <sup>3</sup> kg]	f <sub>v</sub> [Hz]
2,50	0,555	22,8	48,4	3,5
1,25	0,277	36,4	50,0	4,3
0,70	0,155	49,3	50,0	5,0
0,50	0,111	56,7	50,8	5,3
0,375	0,083	62,5	51,6	5,5
0,31	0,069	66,0	52,3	5,7
0,25	0,056	69,6	53,1	5,8
0,125	0,028	78,6	56,3	6,0

### 2.3 Afvoer karakteristiek sluis

Tijdens het modelonderzoek M 1257 (lit. [3]) is de afvoer karakteristiek van de sluis Brouwersdam bepaald. Dit is gebeurd voor lozen (stroming van Grevelingen naar Zee) en inlaten (stroming van Zee naar Grevelingen). Hierbij is zowel gestroomd met de meest benedenstroomse schuif in gebruik (korrekte aanstroming) als met de bovenstroomse schuif (inkorrekte aanstroming). De resultaten zijn te vinden op de figuren 7 en 8.

De afvoercoëfficiënt  $C_Q$  is hierbij als volgt gedefinieerd:

$$Q = C_Q A \sqrt{2g\Delta h}$$

waarbij:  $Q$  = debiet door de sluis  $[\text{m}^3/\text{s}]$

$C_Q$  = afvoercoëfficiënt

$A$  = keeldoorsnede van de kokers  $[\text{m}^2]$

$$A = 2 \times 4,5 \times 6 = 54 \text{ m}^2$$

$g$  = zwaartekrachtsversnelling  $[\text{m}/\text{s}^2]$

$\Delta h$  = verval over de sluis: verschil in waterstanden zee Grevelingen  $[\text{m}]$

De in de figuren gepresenteerde waarden voor  $C_Q$  zijn niet gecorrigeerd voor de invloed van het getal van Reynolds dat in model te klein is. Het wrijvingsverlies is in het model derhalve te groot en  $C_Q$  dus te klein.

Uit de figuren 7 en 8 blijkt dat zowel voor lozen als inlaten geldt dat bij een inkorrekte aanstroming de afvoercoëfficiënt groter is dan bij een korrekte aanstroming van de schuif. Dit hangt nauw samen met de omstroming van de schuif. Bij een korrekte aanstroming zal er een groot omstromingsdebiet zijn dat via de schuif weer in de koker stroomt en zo het onder de schuif heen stromende water verstoort. Dit heeft grotere energieverliezen en derhalve een kleinere afvoercoëfficiënt dan bij inkorrekte aanstroming ten gevolg.

Een andere oorzaak voor het verschil in afvoercoëfficiënt met name bij grotere schuifopeningen is gelegen in de positie van de schuif in de koker. Bij inkorrekte aanstroming is de bovenstroomse schuif in gebruik zodat bij de grotere openingen aanliggen van de stroming in de keeldoorsnede kan plaatsvinden, hetgeen het energieverlies achter de schuif verkleint en derhalve de afvoercoëfficiënt vergroot. Tevens blijkt dat voor  $d/D < 0,5$  de afvoercoëfficiënt  $C_Q$  evenredig is met de relatieve schuifopening  $d/D$ , hetgeen betekent dat voor deze schuifopeningen de gemiddelde snelheid onder de schuif niet bepaald wordt door de schuifopening maar alleen door het verval.

### 3. Opzet en uitvoering metingen

#### 3.1 Inleiding

De opzet en uitvoering van de trillingsmetingen houden nauw verband met de doelstelling van het onderzoek: enerzijds het verkrijgen van meer zekerheid over het gedrag van de prototypeschuif en anderzijds een vergelijking van modelresultaten met prototypesresultaten en een analyse van overeenkomsten en verschillen. Met het oog hierop wordt in de hiernavolgende paragrafen ingegaan op het meetprogramma, meetopstelling en meetapparatuur.

#### 3.2 Meetprogramma

Om een vergelijking tussen model- en prototypesresultaten mogelijk te maken dient het meetprogramma van het prototype trillingsonderzoek zo goed mogelijk aan te sluiten op het modelmeetprogramma. Een korte beschrijving van de opzet van het modelonderzoek is te vinden in paragraaf 5.2.

Uitgaande van de tijdens het modelonderzoek gevarieerde parameters wordt achtereenvolgens nagegaan of deze parameters in het prototype te variëren zijn en binnen welke grenzen dit mogelijk is. Tijdens het modelonderzoek zijn gevarieerd: stroomrichting, schuifopening, de waterstand, het verval over de sluis en de stijfheid van de ophangkonstruktie.

##### - stroomrichting

Per koker zijn er twee schuiven, die elk voor een preferente stroomrichting ontworpen zijn (korrekte schuifpositie) maar die eventueel ook voor de andere stroomrichting (inkorrekte schuifpositie) gebruikt kunnen worden. In model heeft zowel korrekte als inkorrekte aanstroming plaatsgevonden.

Om een groot aantal metingen te voorkomen is besloten simultaan 2 schuiven in het onderzoek te betrekken, een zeeschuif in de noordelijke koker en een meerschuif in de zuidelijke koker. Bij stroming van Grevelingen naar zee wordt de zeeschuif korrekst aangestroomd en de meerschuif in de andere koker inkorrekt. Bij stroming van zee naar Grevelingen is dit net andersom.

Door gelijktijdig te meten aan twee schuiven neemt het aantal randvoorwaarden, vervallen en waterstanden sterk toe.

##### - schuifopening

In het model zijn de hefhoogten van de schuif gevarieerd van gesloten tot

volledig geopende schuif. In verband met de duur van de metingen zal het aantal in te stellen schuifstanden in prototype aanzienlijk kleiner moeten zijn. Op grond van modelresultaten is gekozen voor de volgende 8 hefhoogten: 2,50 m, 1,25 m, 0,70 m, 0,50 m, 0,375 m, 0,31 m, 0,25 m en 0,125 m. Bij een meting krijgen de twee te onderzoeken schuiven allebei dezelfde hefhoogte ingesteld, terwijl de andere twee schuiven volledig getrokken zijn.

- waterstand en verval

Het zal duidelijk zijn dat ten aanzien van waterstanden en verval de mogelijkheden in het prototype vrij beperkt zijn. De proeven zijn gedaan bij een gemiddeld springtij. Gemeten werd daarbij van laag water tot hoog water zodat de duur van de meting ongeveer 6 uur bedroeg.

Figuur 9 geeft het verloop van de zeewaterstand aan tijdens de acht meetdagen. Hieruit blijkt dat bij stroming van Grevelingen naar zee het verval maximaal ongeveer 1 m bedroeg en bij stroming van zee naar Grevelingen ongeveer 2 m.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van het uitgevoerde proevenprogramma:

meting nr.	datum	schuif-opening [m]	peil Grevelingen t.o.v. NAP	max. verval Grevelingen-zee [m]	max. verval zee-Grevelingen [m]
1	10-4-1979	2,50	0,25 <sup>-</sup>	0,98	1,60
2	11-4-1979	1,25	0,26 <sup>-</sup>	1,00	1,80
3	12-4-1979	0,70	0,27 <sup>-</sup>	0,86	1,87
4	23-4-1979	0,50	0,29 <sup>-</sup>	0,60	2,00
5	24-4-1979	0,375	0,19 <sup>-</sup>	0,76	2,14
6	25-4-1979	0,31	0,18 <sup>-</sup>	1,14	2,04
7	26-4-1979	0,25	0,18 <sup>-</sup>	1,18	2,02
8	27-4-1979	0,125	0,18 <sup>-</sup>	0,94	1,96

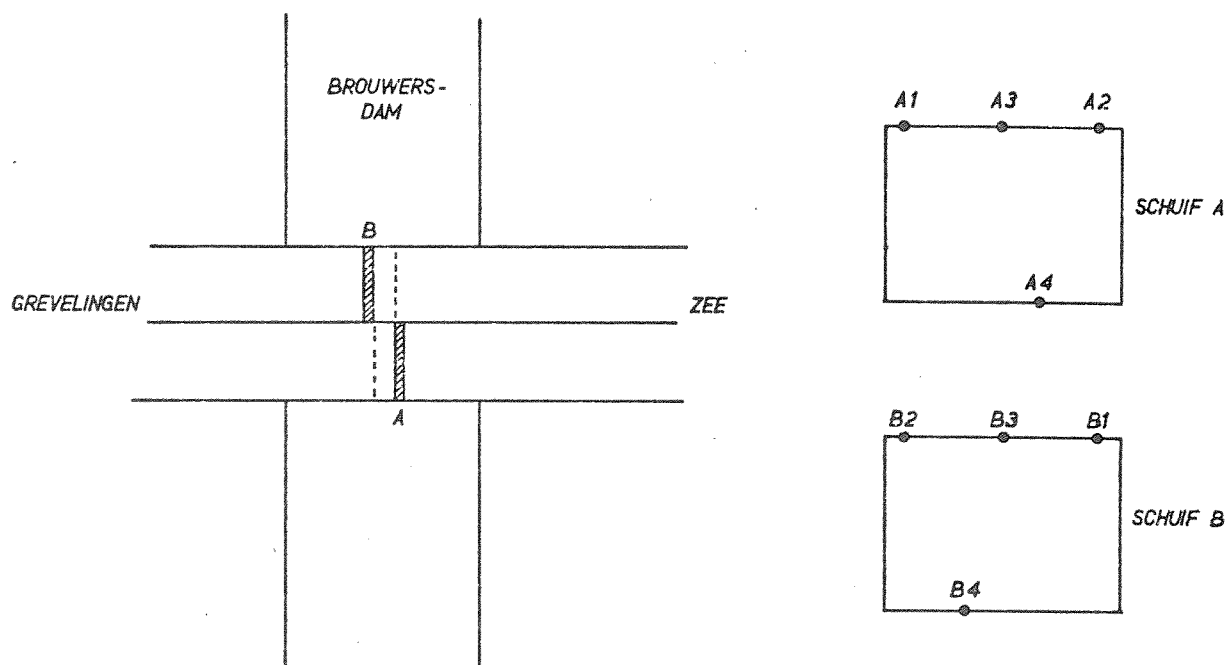
### 3.3 Meetopstelling

Om het trillingsgedrag van de schuiven te registreren, is gebruik gemaakt van versnellingsopnemers (zie paragraaf 3.4). Per schuif wordt het verplaatsingsbeeld vastgelegd met behulp van 4 opnemers: twee voor verticale (nrs. 1 en 2) en twee voor horizontale (nrs. 3 en 4) versnellingen.



De twee 'vertikale' opnemers zijn geplaatst boven op de schuif op de hoeken. De 'horizontale' opnemers stonden op de boven- en benedenligger van de schuif. De bovenste was geplaatst in het midden van de bovenligger, bij de onderste opnemer was dit niet mogelijk.

Schuif A is de zeeschuif in de noordelijke koker met de 'vertikale' opnemers A1 en A2 en de 'horizontale' opnemers A3 (boven) en A4 (onder). Hetzelfde geldt voor de meerschuiif B in de zuidelijke koker.



plaatsing opnemers op schuiven:  
schuiven gezien in richting Grevelingen

De preciese positie van de opnemers op de schuif is aangegeven op de figuren 3 en 4.

Om de opnemers geschikt te maken voor gebruik onder water, zijn ze omgebouwd en waterdicht gemaakt. De overige apparatuur was opgesteld in de bedieningsruimte van de sluis Brouwersdam.

De signalen van de 8 versnellingsopnemers zijn gestuurd door een versterker en gedurende de gehele meting uitgeschreven met een UV-recorder. Om een latere analyse mogelijk te maken zijn de signalen tegelijkertijd opgenomen op 2 bandrecorders Analog-7.

Om een koppeling te kunnen maken met de voorkomende waterstanden en vervallen

zijn ieder half uur de zeewaterstand en het Grevelingenpeil afgelezen op het bedieningspaneel van de sluis, tezamen met de bijbehorende tellerstanden van de bandrecorders.

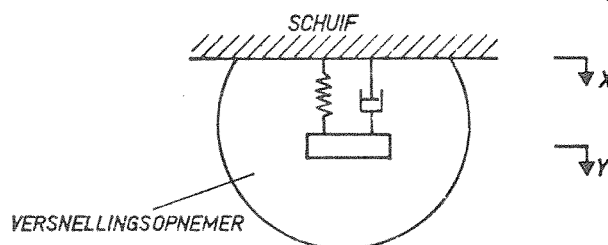
Tenslotte moet nog worden vermeld dat er boven op de zuigerstang rekstroken waren aangebracht om het verloop van de krachten in de zuigerstang te bepalen.

### 3.4 Versnellingsopnemers

De versnellingsopnemers waren geleend van TNO-IWECO. Het meetbereik is ongeveer 0,7 g met een meetnauwkeurigheid van ca. 3% van de ingestelde waarde. De eigenfrequenties van de opnemers liggen tussen 26,5 Hz en 28 Hz, de demping  $\zeta$  varieert van 0,45 tot 0,8.

Bovengenoemde gegevens en andere technische informatie over de gebruikte opnemers is te vinden in rapport no. 3165 van het Instituut TNO voor Werktuigkundige Konstrukties (lit. [1]).

De eigenfrequentie  $f_n$  en de demping  $\zeta$  van de versnellingsopnemers zijn van belang voor de interpretatie van de met de desbetreffende opnemer gemeten versnellingen. Schematisch is de opnemer op de schuif voor te stellen als een éénmassaveersysteem, vast verbonden aan een grote massa.



De door de opnemer gemeten versnellingen zijn gerelateerd aan de relatieve verplaatsing van de opnemer  $z = x - y$ .

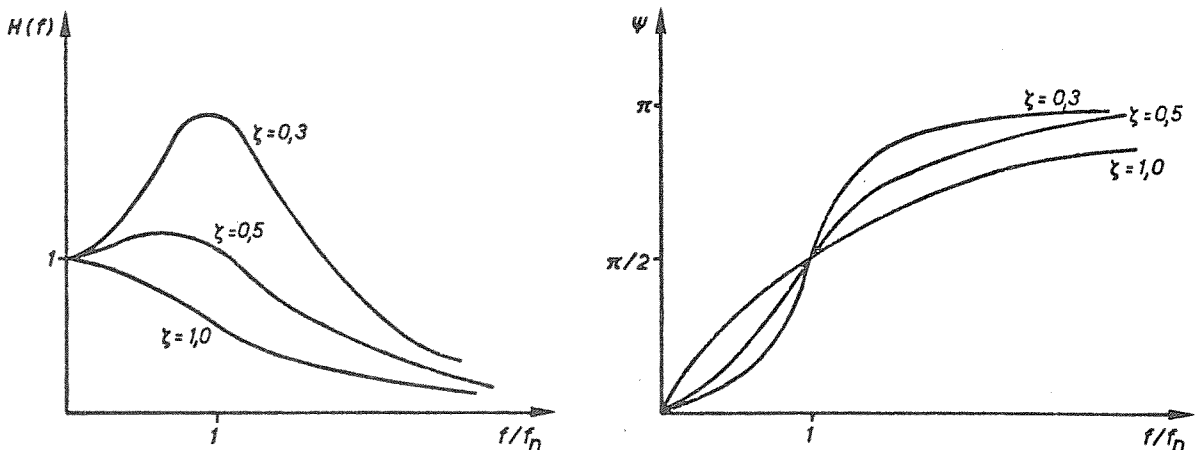
Indien geldt dat  $x = x_0 \sin 2\pi ft$  volgt voor  $z$ :

$$z = H(f) x_0 \sin (2\pi ft - \psi)$$

$$\text{met } H(f) = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_n}\right)^2\right]^2 + \left(2 \zeta \frac{f}{f_n}\right)^2}}$$

$$\psi = \text{arctg} \frac{2\zeta f/f_n}{1 - (f/f_n)^2}$$

Onderstaande figuren tonen  $H(f)$  en  $\psi$  als functie van  $f/f_n$  voor enkele waarden van  $\zeta$ :



De versnellingsopnemer werkt als een soort filter. Frekwenties die vele malen kleiner zijn dan de eigenfrequentie van de opnemer ( $f/f_n \ll 1$ ) worden onvervormd doorgelaten, frekwenties in de buurt van de eigenfrequentie worden, afhankelijk van  $\zeta$ , in meerdere of mindere mate versterkt en krijgen een faseverschuiving van  $\sim 90^\circ$ , terwijl hoge frekwenties ( $f/f_n \gg 1$ ) verzwakt doorkomen en een faseverschuiving van meer dan  $90^\circ$  hebben.

Het verdient derhalve aanbeveling te meten met versnellingsopnemers die een eigenfrequentie hebben die vele malen groter is dan de frekwenties van het frekwentiegebied waarin men geïnteresseerd is.

Aangezien dit bij de onderhavige metingen niet mogelijk was, moeten bovengenoemde opmerkingen in acht worden genomen bij het interpreteren van de resultaten.

### 3.5 Kodering meetsignalen

Er zijn 8 meetdagen waarop is gemeten aan 2 schuiven met 4 opnemers per schuif: twee 'vertikale' (nrs. 1 en 2) en twee 'horizontale' (nrs. 3 en 4).

De kodering van de meetsignalen is als volgt opgebouwd:

nr. meetdag - schuif - nr. opnemer

nr. meetdag: 1, 2, 3, .... 8

schuif : A of B

nr. opnemer: 1, 2, 3 of 4

## 4. Resultaten metingen

### 4.1 Inleiding

Gedurende de metingen is aan de hand van de registratie van de trillingen op de UV-recorder het verloop van de versnellingen en de grootte ervan gevolgd. De waargenomen trillingsversnellingen zijn niet groot. Een globale schatting levert op dat bij de meeste metingen de versnellingen niet groter zijn dan  $0,1 \text{ m/s}^2$ , dus 1% van de zwaartekrachtsversnelling. De maximale waargenomen versnelling is ongeveer 30 mg, 3% van g.

Een belangrijke konklusie die voorts getrokken kan worden, is dat er geen regelmatige harmonische trillingen zijn waargenomen. De gemeten versnellingsignalen zijn zeer onregelmatig en ruisachtig van karakter. Dit is bevestigd aan de hand van een beperkte harmonische analyse van enkele signalen.

Tijdens de metingen is nagegaan of er luchtaanzuiging is opgetreden. Dit is niet waargenomen.

Ten aanzien van de werking van de apparatuur tijdens de metingen moet worden opgemerkt dat de 'vertikale' opnemer A1 na de derde meting waarschijnlijk als gevolg van een elektrische storing kapot is gegaan.

Verwacht mag worden dat het verschil tussen de signalen van de twee 'vertikale' opnemers gering is. Derhalve zijn de gevolgen voor de analyse van de metingen klein. Bij verwerking van de metingen op het laboratorium na afloop van de buitenmeting bleek tevens dat de signalen gemeten met de 'horizontale' opnemer B3 (bovenste opnemer) niet goed op de bandrecorder zijn opgenomen, zodat verder verwerken onmogelijk is. De signalen gemeten met deze opnemer zijn wel goed uitgeschreven tijdens de meting, zodat een globale handverwerking wel mogelijk is. Verder zijn er met de versnellingsopnemers en het opnemen op de band geen problemen opgetreden. Die problemen zijn er wel regelmatig geweest met de rekstroken die op de zuigerstangen van de onderzochte schuiven zijn geplakt. Deze rekstrookmetingen zijn derhalve niet verder uitgewerkt.

### 4.2 Verwerking metingen

De verwerking van de metingen op het laboratorium is gestart met het bepalen van de opgetreden versnellingen. Dit heeft op twee manieren plaatsgevonden. Enerzijds is van de trillingsregistraties om het uur globaal de maximale versnelling afgelezen. Daarnaast is met behulp van een RMS-meter op dezelfde tijden gedurende 30 seconden de standaardafwijking  $\sigma$  van het versnellings-

signaal bepaald. De resultaten zijn te vinden op de tabellen 1 t/m 8 waar zowel de afgelezen maximale waarde als de bepaalde standaardafwijking van het betreffende signaal wordt vermeld. Uitgaande van de vuistregel dat de maximale waarde 3 à 4 keer de standaardafwijking is, komen de resultaten voor de grotere versnellingen redelijk goed overeen.

Om meer inzicht te verkrijgen in het karakter van de gemeten signalen zijn van enkele signalen energiedichtheidsspektra gemaakt en koherentiefunctie en faserelatie bepaald. Tenslotte is aan de hand van de gemeten versnellingen en de tijdens het modelonderzoek gemeten horizontale en verticale statische krachten op de schuif gekeken naar de grootte van de dynamische krachten ten opzichte van de statische krachten.

### 4.3 Resultaten

#### 4.3.1 Gemeten versnellingen

Uit de resultaten zoals die vermeld zijn op de tabellen 1 t/m 8 blijkt dat de gemeten versnellingen klein zijn.

Er van uitgaande dat de maximale waarde 4x de standaardafwijking is, geldt dat de maximale gemeten horizontale versnelling ongeveer 30 mg en de maximale verticale versnelling ongeveer 10 mg is. Deze versnellingen geven bij trilling in de eigenfrequentie verplaatsingen van de orde van grootte van  $10^{-4}$  m. Zoals kon worden verwacht is er een redelijke tot goede overeenkomst tussen de resultaten van de 'vertikale' opnemers op de schuif met elkaar. Dit geldt voor korrekte en voor inkorrekte aanstroming van de schuif. Ten aanzien van de 'horizontale' opnemers blijkt dat de gemeten versnellingen van de onderste opnemer groter zijn dan van de bovenste. Dit geldt met name bij korrekte aanstroming waarbij het water door de schuif heen stroomt. Bij maximaal verval is dan een faktor 5 tussen de resultaten van de bovenste en onderste opnemer niet onmogelijk. Bij inkorrekte aanstroming, waarbij vrijwel geen water door de schuif stroomt, zijn de verschillen veel geringer.

De versnellingen die de schuif ondergaat zijn bij een korrekte aanstroming van de schuif groter dan bij inkorrekte aanstroming, met uitzondering van de verticale versnellingen bij stroming van Grevelingen naar Zee. Het verschil tussen beide mogelijkheden van aanstroming is echter in de regel niet zo groot. Alleen de horizontale versnellingen van de onderkant van de schuif zijn bij korrekte aanstroming veel groter.

Op figuur 10 zijn de RMS-waarden van de versnellingssignalen van de onder-

ste 'horizontale' opnemer B4 bij korrekte aanstroming uitgezet als functie van het verval over de sluis. Dit is gedaan voor alle 8 metingen. Op figuur 11 staan de RMS-waarden van de signalen van 'vertikale' opnemer B1.

Hieruit blijkt allereerst dat het trillingsniveau toeneemt met het verval. Dit is te verwachten bij trillingen als gevolg van stromingsexcitatie, omdat met het verval ook de snelheid onder de schuif toeneemt. Het toenemen van het trillingsniveau met het verval geldt ook voor de met de andere opnemers gemeten signalen, horizontaal en vertikaal.

In de tweede plaats blijkt uit de figuren 10 en 11 dat de gemeten versnelingen het grootst zijn bij de grotere schuifopeningen  $d = 2,50$  m en  $d = 1,25$  m. Bij de kleinere openingen zijn de versnellingen aanzienlijk kleiner. Voor schuifopeningen  $< 0,50$  m zijn de maximale gemeten versnellingen (= 4x RMS-waarde) kleiner dan 10 mg. De bijbehorende verplaatsingen zijn dan ook ten opzichte van de afmetingen van de schuif verwaarloosbaar klein.

#### 4.3.2 Spektrum analyse

Teneinde meer inzicht te verkrijgen in het karakter van de gemeten signalen, zijn enkele signalen geanalyseerd. Het betreft signalen van de eerste drie metingen (schuifopeningen 2,50 , 1,25 en 0,70 m) tijdens maximaal verval bij een korrekte aanstroming van de schuif. De tijdens de andere metingen geregistreerde versnellingen zijn zo klein dat analyseren weinig zinvol is. Omdat het signaal van de bovenste 'horizontale' opnemer niet goed op de band is opgenomen, zijn alleen de signalen van de twee 'vertikale' opnemers B1 en B2 en de onderste 'horizontale' opnemer B4 geanalyseerd. De spektrale analyse heeft plaatsgevonden met een analyser Hewlett Packard 5420A. Er zijn spektra van de versnellingssignalen gemaakt van 0 - 50 Hz. Met deze analyser kunnen ook de verplaatsingsspektra worden gemaakt en wel door het versnellingsspektrum te delen door  $(2\pi f)^4$ . Bij een versnellingsspektrum staat immers de versnellingsamplitude in het kwadraat en in het verplaatsingsspektrum de verplaatsingsamplitude in het kwadraat per eenheid van frekwentie uitgezet. Twee kanttekeningen moeten worden gemaakt. De spektra hebben betrekking op de verplaatsing van de opnemer en niet op die van de schuif. Zoals in paragraaf 3.4 is afgeleid moeten deze spektra worden vermenigvuldigd met  $\left[\frac{1}{H(f)}\right]^2$  om de verplaatsingsspektra van de schuif te krijgen. Dit houdt in feite in dat beneden ongeveer 30 Hz de eigenfrekwentie van de opnemer, de energiedichtheid kleiner wordt en boven 30 Hz groter. Voor frekwenties kleiner dan globaal 10 Hz blijft de energiedichtheid dezelfde. De mate van verster-

king en verzwakking hangt af van de eigenfrequentie en de demping  $\zeta$  van de opnemer. Een tweede punt is dat op de band versnellingssignalen zijn opgenomen. Bij het 2x integreren zal de energiedichtheid in de lage frequenties enorm versterkt worden ten opzichte van die in de hogere frequenties omdat het versnellingsspektrum gedeeld wordt door  $(2\pi f)^4$ . Dit houdt in dat laagfrequentie energie als gevolg van bijvoorbeeld bandruis en bandsnelheidsfluctuaties relatief gezien erg belangrijk wordt en het verplaatsingsspektrum voor de lagere frequenties ( $< \sim 5$  Hz) onbetrouwbaar maakt. In verband hiermee zou het aanbeveling verdienen gemeten versnellingssignalen direct 2x te integreren voordat ze op de band worden opgenomen.

Uit de gemaakte verplaatsingsspektra blijkt inderdaad dat in de buurt van 5 - 7 Hz de energiedichtheid enorm snel oploopt bij afnemende frequentie. Boven de 5 - 7 Hz hebben de spektra een vrij vlak verloop zonder duidelijke scherpe pieken. Aangezien uit de versnellingsspektra blijkt dat deze pieken ook niet voorkomen bij frequenties onder de 5 - 7 Hz kan worden gekonkludeerd dat er geen regelmatige trillingen zijn opgetreden.

Vanwege de grote overeenkomsten in de vorm van de gemaakte verplaatsingsspektra, zijn alleen de spektra van de 1e meting tijdens maximaal verval in dit verslag opgenomen (figuur 12).

#### 4.3.3 Verhouding dynamische en statische krachten op de schuif

Aan de hand van resultaten van het modelonderzoek is het mogelijk globaal te kijken naar de grootte van de dynamische krachten ten opzichte van de grootte van de statische krachten op de schuif. Dit is gedaan bij een korrekte aanstroming.

Hierbij wordt uitgegaan van de volgende schatting van de dynamische kracht:

$$F_{\text{dyn.}} = (m + m_w) g_{\text{max}} \quad \text{met}$$

$m$  als schuifmassa

$m_w$  als meebewegende watermassa

$g_{\text{max}}$  als maximale gemeten versnelling

Voor  $g_{\text{max}}$  is aangehouden 4x de bepaalde standaardafwijking  $\sigma$ . De meebewegende watermassa en de statische kracht op de schuif is voor verschillende situaties tijdens het modelonderzoek bepaald.

De vergelijking is gemaakt bij maximaal verval, dus bij maximale versnellingen, alleen voor de eerste drie metingen omdat bij de laatste metingen de versnel-



lingen en derhalve de dynamische krachten erg klein zijn.

- Vertikaal

Tijdens het modelonderzoek is gebleken dat de verticale statische kracht op de schuif onafhankelijk is van de benedenwaterstand en recht evenredig met het verval  $\Delta h$ . In figuur 13 is deze kracht ten opzichte van het gewicht van de schuif onder water in dimensieloze vorm uitgezet als functie van  $d/D$ . Eveneens is de meebewegende watermassa bepaald bij een verticale trilling van de schuif als er geen stroming is onder de schuif en de schuif geheel onder water staat. Het gewicht van de schuif onder water is 157 kN.

Berekening van de verticale statische en dynamische krachten levert nu op:

*↓ uit fig 13 + 157 kN*

d [m]	d/D [-]	$m+m_w$ [ $10^3$ kg]	$g_{max}$ [ $m/s^2$ ]	$\Delta h$ [m]	$F_{stat}$ [kN]	$F_{dyn}$ [kN]	$F_{dyn}/F_{stat}$ [-]
2,50	0,555	48,4	0,092	1,55	220	4,5	0,020
1,25	0,277	50,0	0,100	1,76	207	5,0	0,024
0,70	0,155	50,0	0,064	1,81	181	3,2	0,018

De dynamische verticale kracht op de schuif is te verwaarlozen ten opzichte van de verticale statische kracht. Dit was te verwachten gezien de resultaten van het modelonderzoek en omdat het in prototype een schuif met glijopleggingen betreft.

- Horizontaal

Ook uit de resultaten van het modelonderzoek naar de horizontale statische krachten op de schuif is gebleken dat deze onafhankelijk is van de benedenwaterstand en ongeveer recht evenredig met het verval over de sluis. De horizontale statische kracht is in dimensieloze vorm als functie van  $d/D$  uitgezet op figuur 13.

Tijdens het modelonderzoek is niet de horizontale meebewegende watermassa bepaald. Een schatting hiervan is derhalve gemaakt aan de hand van de in model gemeten horizontale droge en natte eigenfrequenties van respectievelijk 37 Hz en 10 Hz (prototypewaarden). De schuif rustte hierbij tegen zijn aanslagen.

Uit de resultaten van de prototypetrillingsmetingen is gebleken dat bij korrekte aanstroming van de schuif de gemeten horizontale versnellingen

aan de onderzijde veel groter kunnen zijn dan die aan de bovenzijde. Voor de schatting van de horizontale dynamische kracht wordt uitgegaan van de versnellingen gemeten met de onderste opnemer, hetgeen een ongunstige aanname is. Wanneer het gemiddelde van de horizontale versnellingen onder en boven genomen zou worden, kunnen de dynamische krachten een faktor 1,5 kleiner worden dan hieronder is berekend.

Een berekening van de horizontale statische en dynamische krachten levert op:

d [m]	d/D [-]	$m+m_w$ [ $10^3$ kg]	$g_{max}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\Delta h$ [m]	$F_{stat}$ [kN]	$F_{dyn}$ [kN]	$F_{dyn}/F_{stat}$ [-]
2,50	0,555	~250	0,20	1,55	290	50	0,17
1,25	0,277	~250	0,29	1,76	460	72	0,16
0,70	0,155	~250	0,20	1,81	530	51	0,10

De maximale horizontale dynamische kracht kan ook worden berekend aan de hand van de maximale gemeten horizontale verplaatsing en de horizontale buigstijfheid van de schuif. Uitgegaan is van de horizontale verplaatsingen van de onderkant van de schuif (zie paragraaf 5.4.2 en figuur 16). Dit levert krachten op die 40% ( $d/D = 0,155$ ) tot 100% ( $d/D = 0,555$ ) kleiner zijn. Het verschil tussen deze twee berekeningsmethoden zal te wijten zijn aan de waarde van  $m_w$  die is geschat aan de hand van gemeten eigenfrequenties. Bovendien is aangenomen dat  $m_w$  voor iedere hefhoogte hetzelfde is. De eindkonklusie is dat de dynamische horizontale krachten klein zijn ten opzichte van de statische horizontale kracht.

## 5. Vergelijking met modelresultaten

### 5.1 Inleiding

Een tweede doelstelling van het prototype trillingsonderzoek was, naast het verkrijgen van meer zekerheid omtrent het gedrag van de schuif in prototype, het vergelijken van de resultaten met de resultaten van het modelonderzoek aan de schuiven van de sluis Brouwersdam (M 1272).

Hiertoe wordt eerst een korte beschrijving gegeven van de opzet en de uitvoering van het modelonderzoek, waarna enige beschouwingen volgen over de afwijkingen tussen model en prototype. Hierna vindt er voor zover mogelijk, een vergelijking plaats tussen de resultaten van beide metingen.

### 5.2 Korte beschrijving modelonderzoek

Het modelonderzoek aan de hefschuiven van de stroomsluis Brouwersdam (M 1272) is in twee gedeelten verdeeld: een horizontaal en een vertikaal krachten- en trillingsonderzoek. Beide onderzoeken zijn uitgevoerd met lengteschaal  $n_L = 25$ .

Bij het horizontale krachten- en trillingsonderzoek is gekozen voor een elastisch gelijkvormig model, waarmee het elastisch gedrag van de constructie op schaal gereproduceerd kon worden.

Ter bepaling van de horizontale statische krachten is de schuif opgehangen in krachtopnemers. Voor het bekijken van de statische en dynamische respons van de schuif heeft beproeving van de schuif tegen zijn aanslagen plaatsgevonden, zowel met korrekte als inkorrekte aanstroming. Om de prototype oplegging zo goed mogelijk te benaderen is gekozen voor scharnierende lijnopleggingen.

De hefhoogten van de schuif zijn gevarieerd van 0,025 m tot 4,5 m, de benedenwaterstanden van 3,00<sup>-</sup> tot NAP en de vervallen over de sluis van 0 tot 6 m. Het dynamisch gedrag van de schuif in horizontale richting is vastgelegd door het meten van de materiaalrek in het midden van de overspanning van de schuif.

Voor het vertikale krachten- en trillingsonderzoek is volstaan met een sterk vereenvoudigd model. Omdat de verticale stijfheid van de schuif overheersend is ten opzichte van de stijfheid van de ophangconstructie, is dit model als een enkelvoudig massaveersysteem uitgevoerd. De stijfheid van de ophanging, die afhangt van de schuifopening, was in model variabel en de schuif werd

stijf uitgevoerd. Om te zorgen voor één graad van vrijheid en een minimalisering van de wrijving, is een zogenoemd hydrostatisch lager toegepast.

Naast het trillingsonderzoek zijn metingen gedaan met het doel een analyse te maken van de meebewegende watermassa en de demping.

De verticale krachten zijn gemeten met een trekdrukkrachtopnemer. Deze gemeten veerkracht levert dan via de veerstijfheid de verticale verplaatsing van de schuif op.

### 5.3 Beschouwingen over afwijkingen model-prototype

Voordat wordt overgegaan tot een vergelijking van model- en prototypereultaten zijn beschouwingen over de afwijkingen tussen model en prototype op hun plaats. De belangrijkste verschillen treden op bij de opleggingen. Bij het horizontale krachten- en trillingsonderzoek in model is gebruik gemaakt van lijnopleggingen, waarover de schuif bij een horizontale belasting vrijwel wrijvingsloos kan bewegen. In het prototype zal de schuif een kleine wrijvingskracht te overwinnen hebben.

Bij het verticale krachten- en trillingsonderzoek is een vrijwel wrijvingsloze oplegging toegepast, die wezenlijk verschilt van de prototype-oplossing. Omdat het een glijdschuif betreft zal er tengevolge van een horizontale stromingsbelasting een verticale wrijvingskracht zijn waardoor demping en stijfheid van de schuif in verticale richting toenemen.

In model heeft apart onderzoek naar horizontale en verticale trillingen plaatsgevonden, zodat eventuele interactieverschijnselen daarin niet tot uitdrukking komen.

Het is moeilijk in te schatten welke consequenties dit heeft voor het trillingsgedrag.

Naast de verschillen die er zijn tussen model en prototype spelen ook de verschillen mee die er geweest zijn ten aanzien van het meten en verwerken, inclusief de bijbehorende nauwkeurigheden.

Konkluderend kan worden gesteld dat in ieder geval de vergelijking slechts globaal kan zijn. Een redelijke overeenkomst valt te verwachten ten aanzien van de horizontale trillingen. Vertikaal zullen de in het prototype gemeten dynamische verschijnselen in verband met de wrijving bij de opleggingen kleiner zijn dan in model is gemeten.

## 5.4 Vergelijking

### 5.4.1 Vertikaal

Tijdens het verticale krachten- en trillingsonderzoek zijn in het model, evenmin als in het prototype regelmatige langdurende trillingen gevonden.

In het model is de dynamische belasting op de schuif bepaald bij de volgende relatieve schuifopeningen:  $d/D = 0,1 - 0,2 - 0,3 \dots\dots\dots 0,9$  en  $1,0$ .

Het verval over de sluis bij deze metingen was ongeveer 2 m en de aanstroming van de schuif was korrekt. De grootte van de benedenwaterstand bleek niet van invloed te zijn op de krachten.

In figuur 14 is de in model gemeten maximale verticale dynamische kracht dimensieloos uitgezet als functie van  $d/D$ . Deze maximale kracht is hierbij 4x de standaardafwijking van het dynamische krachtsignaal.

In paragraaf 4.3.3 is aangegeven hoe aan de hand van de in prototype gemeten versnellingen globaal de maximale dynamische kracht kan worden bepaald. Deze dynamische kracht, bij maximaal verval bepaald, is eveneens in dimensieloze vorm uitgezet tegen  $d/D$  in figuur 14.

Beide metingen geven een toename van de dynamische kracht met de schuifopening te zien. Tevens blijkt de verticale dynamische kracht in het prototype kleiner te zijn ( $\sim$  faktor 2) dan in model is gemeten. Dit zou toegeschreven kunnen worden aan het verschil in oplegging.

Ook is het mogelijk de verticale dynamische verplaatsing van de schuif voor model en prototype te vergelijken. De maximale verplaatsing bij het modelonderzoek kan worden berekend uit de maximale dynamische verticale kracht en de ingestelde veerstijfheid.

De maximale verticale dynamische verplaatsing van de schuif in het prototype kan worden bepaald aan de hand van het verplaatsingsspektrum. De oppervlakte van het spektrum is namelijk gelijk aan het kwadraat van de standaardafwijking van de verticale dynamische verplaatsing. Zoals reeds in paragraaf 4.3.2 is vermeld ontstaat er na 2x integreren in de verplaatsingsspektra een laagfrequentie energiepiek als gevolg van o.a. bandruis en bandsnelheidsfluctuaties. Met het oog hierop is als representatieve oppervlakte van het spektrum de oppervlakte gekozen behorend bij de frekwentiebend 5 - 50 Hz. De frequentie van 5 Hz als benedengrens is gekozen omdat de extra energie tengevolge van het opnemen op de band in het algemeen frequenties heeft van 5 Hz en kleiner. In de buurt van deze frequentie gaat het spektrum zeer steil verlopen.

Op figuur 15 zijn de maximale verticale dynamische verplaatsingen van de schuif

bij de model- en prototypemetingen dimensieloos uitgezet als functie van  $d/D$ . Opgemerkt dient nog te worden dat wanneer de laag-frekvente piek geheel wordt afgesneden de berekende verplaatsingen in het prototype tot 30% kleiner worden. De dynamische verticale verplaatsingen in model blijken vele malen groter te zijn dan die in het prototype als gevolg van de wrijvingsloze oplegging in model.

Uit de dynamische verplaatsing van de schuif in het prototype kan via de veerstijfheid van de ophangkonstructie een dynamische kracht worden berekend. Deze is veel kleiner dan de dynamische kracht die bepaald is uit het produkt van gemeten versnelling en  $m + m_w$  (zie figuur 14). Laatstgenoemde kracht is echter de totale verticale dynamische kracht op de schuif die wordt opgenomen door het hefsysteem en de glijdopleggingen, terwijl de andere de dynamische kracht in het hefsysteem is (= veerstijfheid van het hefsysteem maal de dynamische verplaatsing van de schuif).

#### 5.4.2 Horizontaal

Bij het horizontale krachten- en trillingsonderzoek in het model is de benedenwaterstand konstant gehouden en de bovenwaterstand langzaam opgevoerd. Ter vergelijking met de prototypemetingen zijn bij de verschillende hefhoogten alleen de metingen met een benedenwaterstand van NAP gebruikt. Van de onderste van de 4 rekstroken in het midden van de overspanning van de schuif is tijdens het modelonderzoek kontinuu de R.M.S.-waarde van het reksignaal uitgeschreven. Voor 3 gevallen, 2 m - 1,5 m en 1 m, en bij verschillende schuifopeningen is deze R.M.S.-waarde omgerekend naar de maximale horizontale dynamische verplaatsing van de onderkant van de schuif ter plaatse van de middendoorsnede. In figuur 16 zijn deze verplaatsingen dimensieloos uitgezet als functie van  $d/D$ . Op analoge wijze als in paragraaf 5.4.1 beschreven is, zijn uit de oppervlakten van de verplaatsingsspektra van 5 - 50 Hz de maximale horizontale dynamische verplaatsingen van de onderkant van de schuif berekend en eveneens uitgezet in figuur 16. Ook nu moet worden opgemerkt dat wanneer de laag-frekvente piek in het verplaatsingsspektrum geheel wordt afgesneden, de verplaatsingen tot 40% kleiner kunnen zijn. Zoals uit figuur 16 blijkt, is de overeenkomst in de horizontale dynamische verplaatsingen gemeten in model en in prototype redelijk goed.

## Literatuur

- [1] Instituut TNO voor Werktuigkundige Konstrukties  
Ontwikkeling van een gevoelige versnellingsopnemer, Rapport no. 3165,  
oktober 1963
  
- [2] Waterloopkundig Laboratorium  
Stroomsluis Noordland in de Oosterschelddedam, Rapport modelonderzoek  
M 1089, augustus 1974
  
- [3] Waterloopkundig Laboratorium  
Stroomsluis in de Brouwersdam, Rapport modelonderzoek M 1257/M 1306,  
oktober 1975

Tabel 1

Resultaten meting nr. 1

datum: 10-4-1979

schuifopening: 2,50 m

d/D = 0,555

Tijd	Verval $\Delta h$ [m]	Stroomrichting	Aanstroming schuif	Gemeten versnelling [mg]							
				A1		A2		A3		A4	
				$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max
10 u.	0,93	Grevelingen → Zee	korrekt	0,7	3	-	3	0,7	2	1,9	9
11 u.	0,68	"	"	0,5	3	-	2	0,6	2	1,3	8
12 u.	0,35	"	"	0,3	1	-	1	0,6	1	0,7	1
13 u.	0,85	Zee → Grevelingen	inkorrekt	0,6	2	0,5	2	0,8	2	1,1	2
13.30 u	1,35	"	"	0,8	3	0,7	3	0,9	3	1,1	3
14 u.	1,55	"	"	0,9	3	0,9	3	1,0	4	1,3	4
				B1		B2		B3		B4	
				$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max
10 u.	0,93	Grevelingen → Zee	inkorrekt	1,3	4	1,1	5		3		3
11 u.	0,68	"	"	0,9	6	0,8	4		1	0,4	1
12 u.	0,35	"	"	0,3	1	0,2	1		1	0,3	1
13 u.	0,85	Zee → Grevelingen	korrekt	1,3	4	1,3	5		3	1,8	7
13.30 u	1,35	"	"	2,2	6	1,8	6		4	4,3	21
14 u.	1,55	"	"	2,3	8	1,9	8		4	4,9	23



Tabel 2

Resultaten meting nr. 2 datum: 11-4-1979

schuifopening: 1,25 m

d/D = 0,277

Tijd	Verval $\Delta h$ [m]	Stroomrichting	Aanstroming schuif	Gemeten versnelling [mg]									
				A1		A2		A3		A4			
				$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max
10 u.	0,98	Grevelingen → Zee	korrekt	0,6	3	0,5	2	0,6	3	2,8	8		
11 u.	0,86	"	"	0,6	2	0,6	2	0,6	3	2,0	7		
12 u.	0,54	"	"	0,5	1	0,4	1	0,5	1	0,8	1		
13 u.	0,14	Zee → Grevelingen	inkorrekt	0,5	1	0,4	1	0,6	1	0,6	1		
13.30 u	0,90	"	"	0,6	2	0,5	2	0,7	2	0,8	2		
14 u.	1,48	"	"	0,8	2	0,7	2	0,9	2	1,0	2		
14.30 u	1,76	"	"	0,9	2	0,8	2	0,9	2	1,1	2		
				B1		B2		B3		B4			
				$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max
10 u.	0,98	Grevelingen → Zee	inkorrekt	0,8	6	0,7	3		2	0,6	2		
11 u.	0,86	"	"	0,7	5	0,6	3		2	0,5	2		
12 u.	0,54	"	"	0,4	1	0,4	1		1	0,3	1		
13 u.	0,14	Zee → Grevelingen	korrekt	0,5	2	0,3	2		1	0,5	1		
13.30 u	0,90	"	"	1,3	4	0,8	3		1	2,7	6		
14 u.	1,48	"	"	2,3	7	1,6	5		3	7,2	25		
14.30 u	1,76	"	"	2,5	8	1,9	6		4	7,2	25		

Tabel 3

Resultaten meting nr. 3      datum: 12-4-1979      schuifopening: 0,70 m      d/D = 0,155

Tijd	Verval $\Delta h$ [m]	Stroomrichting	Aanstroming schuif	Gemeten versnelling [mg]							
				A1		A2		A3		A4	
				$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max
11 u.	0,87	Grevelingen → Zee	korrekt	0,3	2	0,3	2	0,4	1	0,5	3
12 u.	0,66	"	"	0,3	2	0,3	2	0,3	2	0,4	2
13 u.	0,30	"	"	0,2	1	0,2	1	0,2	1	0,3	1
14 u.	0,71	Zee → Grevelingen	inkorrekt	0,4	1	0,3	1	0,5	1	0,5	1
14.30 u	1,51	"	"	0,5	1	0,4	1	0,7	2	0,9	3
15 u.	1,81	"	"	0,6	1	0,5	1	0,9	3	1,1	3
				B1		B2		B3		B4	
				$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max
11 u.	0,87	Grevelingen → Zee	inkorrekt	1,5	3	1,4	5		2	0,4	2
12 u.	0,66	"	"	0,9	3	1,1	3		1	0,2	1
13 u.	0,30	"	"	0,2	2	0,2	2		1	0,1	1
14 u.	0,71	Zee → Grevelingen	korrekt	1,0	3	1,0	2		1	1,3	2
14.30 u	1,51	"	"	1,3	4	1,3	5		3	2,0	14
15 u.	1,81	"	"	1,6	6	1,6	6		3	5,1	23



Tabel 5

Resultaten meting nr. 5

datum: 24-4-1979

schuifopening: 0,375 m

d/D = 0,083

Tijd	Verval $\Delta h$ [m]	Stroomrichting	Aanstroming schuif	Gemeten versnelling [mg]										
				A1		A2		A3		A4				
				$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max			
9 u.	0,59	Grevelingen → Zee	korrekt		0,1	1	0,2	1	0,2	1	0,2	1	0,2	1
10 u.	0,44	"	"		0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1
11 u.	0,08	"	"		0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1
12 u.	0,81	Zee → Grevelingen	inkorrekt		0,2	2	0,3	2	0,3	2	0,3	2	0,3	2
12.30 u.	1,60	"	"		0,3	2	1,1	3	1,1	3	1,1	3	1,1	3
13 u.	2,05	"	"		0,4	2	1,5	5	1,5	5	1,4	4	1,4	4
					B1		B2		B3		B4			
					$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max		
9 u.	0,59	Grevelingen → Zee	inkorrekt	0,2	2	0,2	2	0,2	2	0,3	2	0,3	2	
10 u.	0,44	"	"	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,2	1	0,2	1	
11 u.	0,08	"	"	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	
12 u.	0,81	Zee → Grevelingen	korrekt	0,4	2	0,4	2	0,4	2	0,5	2	0,5	2	
12.30 u.	1,60	"	"	0,8	3	0,7	3	0,7	3	1,1	3	1,1	3	
13 u.	2,05	"	"	0,8	4	0,8	3	0,8	3	1,3	4	1,3	4	

Tabel 6

Resultaten meting nr. 6 datum: 25-4-1979 schuifopening: 0,31 m d/D = 0,069

Tijd	Verval $\Delta h$ [m]	Stroomrichting	Aanstroming schuif	Gemeten versnelling [mg]								
				A1		A2		A3		A4		
				$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	
10 u.	0,84	Grevelingen → Zee	korrekt		0,2	2	0,3	2	0,3	2	0,3	2
11 u.	0,57	"	"		0,2	1	0,1	1	0,2	1	0,2	1
12 u.	0,20	"	"		0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1
13 u.	0,75	Zee → Grevelingen	inkorrekt		0,2	1	0,4	2	0,4	2	0,4	2
13.30 u	1,57	"	"		0,3	2	1,3	3	1,1	3	1,1	3
14 u.	2,01	"	"		0,4	2	1,5	5	1,4	5	1,4	4
				B1	B2		B3		B4			
$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	
0,2	1	0,2	1	0,2	1	0,2	1	0,2	1	0,2	1	
0,2	1	0,2	1	0,2	1	0,2	1	0,2	1	0,2	1	
0,1	1	0,2	1	0,2	1	0,2	1	0,1	1	0,1	1	
0,3	2	0,3	2	0,3	2	0,3	2	0,4	2	0,4	2	
0,7	3	0,7	3	0,7	3	0,7	3	1,2	4	1,2	4	
1,0	3	0,9	3	0,9	3	0,9	3	1,5	5	1,5	5	

Tabel 7

Resultaten meting nr. 7

datum: 26-4-1979

schuifopening: 0,25 m

d/D = 0,056

Tijd	Verval $\Delta h$ [m]	Stroomrichting	Aanstroming schuif	Gemeten versnelling [mg]															
				A1		A2		A3		A4		B1		B2		B3		B4	
				$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max
11 u.	0,80	Grevelingen → Zee	korrekt			0,1	1	0,3	1	0,3	1	0,3	1						
12 u.	0,52	"	"			0,1	1	0,2	1	0,2	1	0,2	1						
13 u.	0,12	"	"			0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1						
14 u.	0,89	Zee → Grevelingen	inkorrekt			0,2	1	0,7	2	0,6	2	0,6	2						
14,30 u	1,76	"	"			0,5	2	1,5	5	1,3	4	1,3	4						
15 u.	2,00	"	"			0,5	2	1,6	6	1,3	5	1,3	5						
11 u.	0,80	Grevelingen → Zee	inkorrekt			0,2	1	0,2	1	0,2	1	0,2	1						
12 u.	0,52	"	"			0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1						
13 u.	0,12	"	"			0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1						
14 u.	0,89	Zee → Grevelingen	korrekt			0,4	2	0,6	2	0,8	2	0,8	2						
14,30 u	1,76	"	"			1,1	4	1,0	3	1,4	4	1,4	4						
15 u.	2,00	"	"			1,3	5	1,1	4	1,5	5	1,5	5						

Tabel 8

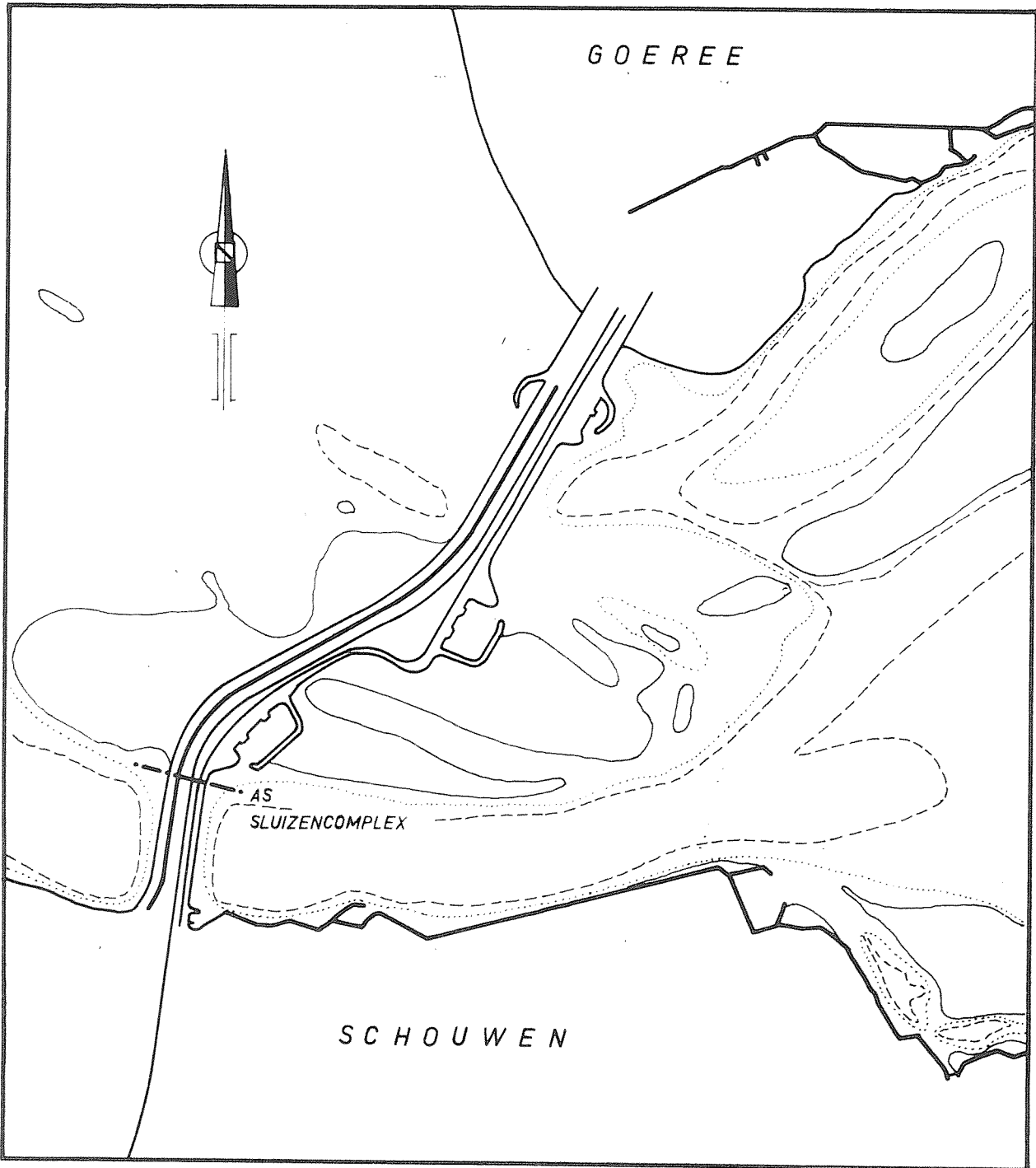
Resultaten meting nr. 8

datum: 27-4-1979

schuifopening: 0,125 m

d/D = 0,028

Tijd	Verval $\Delta h$ [m]	Stroomrichting	Aanstroming schuif	Gemeten versnelling [mg]							
				A1		A2		A3		A4	
				$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max
12 u.	0,75	Grevelingen → Zee	korrekt			0,1	1	0,3	2	0,3	2
13 u.	0,46	"	"			0,1	1	0,2	1	0,2	1
14 u.	0,02	"	"			0,1	1	0,1	1	0,1	1
15 u.	1,29	Zee → Grevelingen	inkorrekt			0,4	2	0,9	2	0,9	2
15.30 u	1,92	"	"			0,5	2	1,1	4	1,2	4
				B1		B2		B3		B4	
				$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max	$\sigma$	max
12 u.	0,75	Grevelingen → Zee	inkorrekt	0,3	2	0,2	1			0,3	2
13 u.	0,46	"	"	0,2	1	0,1	1			0,2	2
14 u.	0,02	"	"	0,2	1	0,1	1			0,1	1
15 u.	1,29	Zee → Grevelingen	korrekt	0,8	3	1,1	3			1,1	3
15.30 u	1,92	"	"	1,3	5	1,4	5			1,4	5



OVERZICHTSITUATIE SLUIS BROUWERSDAM

R.R.

SCHAAL 1:50.000

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

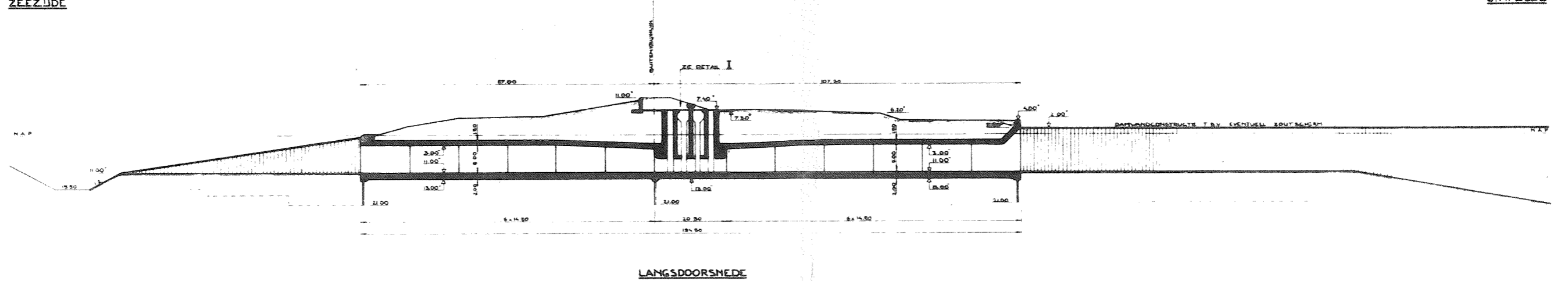
R 1347

FIG. 1

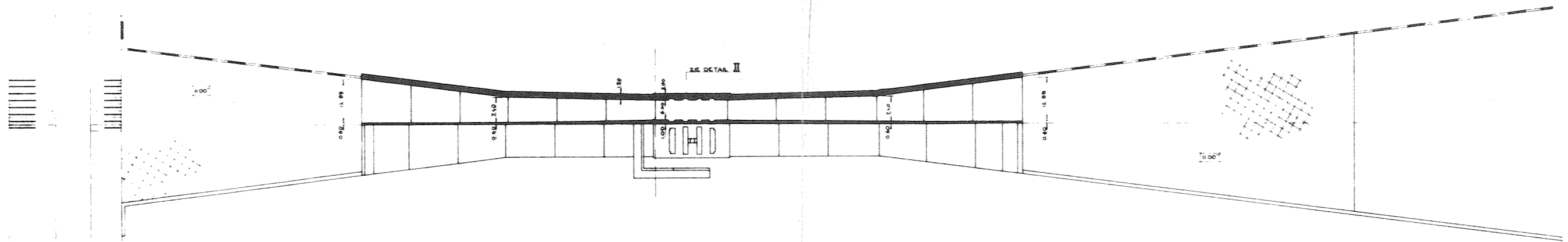


ZEEZIJDE

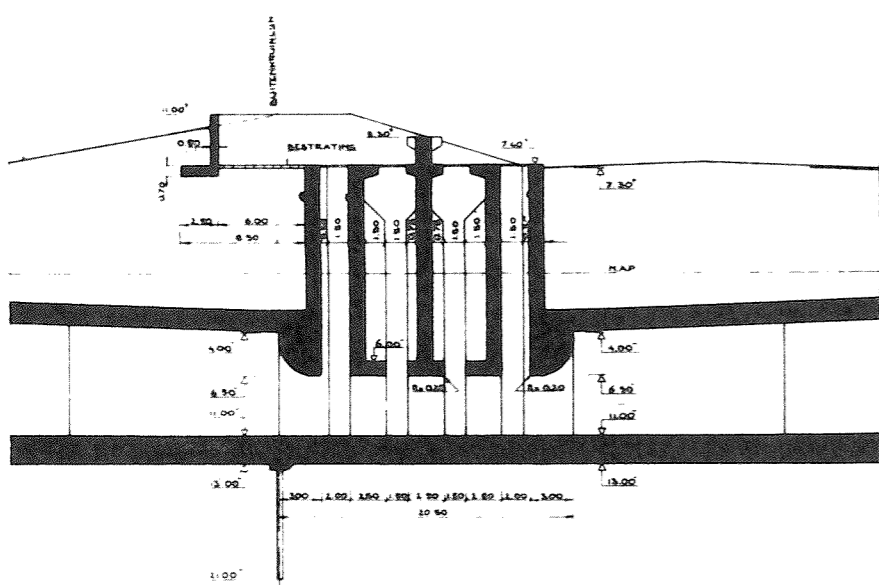
G.M. ZIJDE



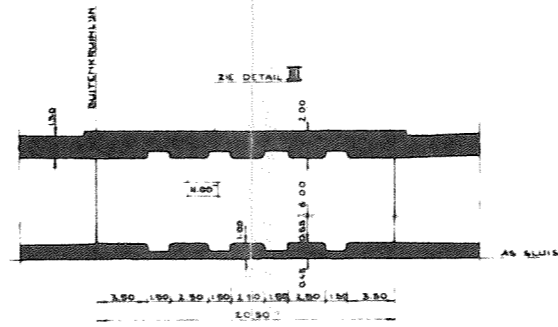
LANGSDOORSNEDE



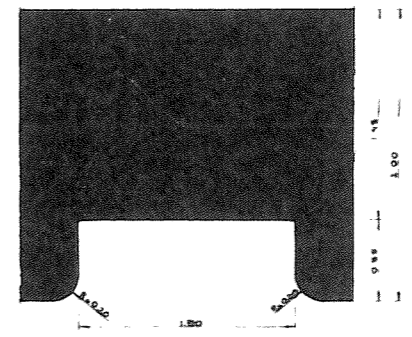
HOR. DOORSNEDE EN BOVENAANZICHT  
BELEGGING EN GRONDWERK VERGELIJKEN



DETAIL I



DETAIL II



DETAIL III

SLUISONTWERP A - 1

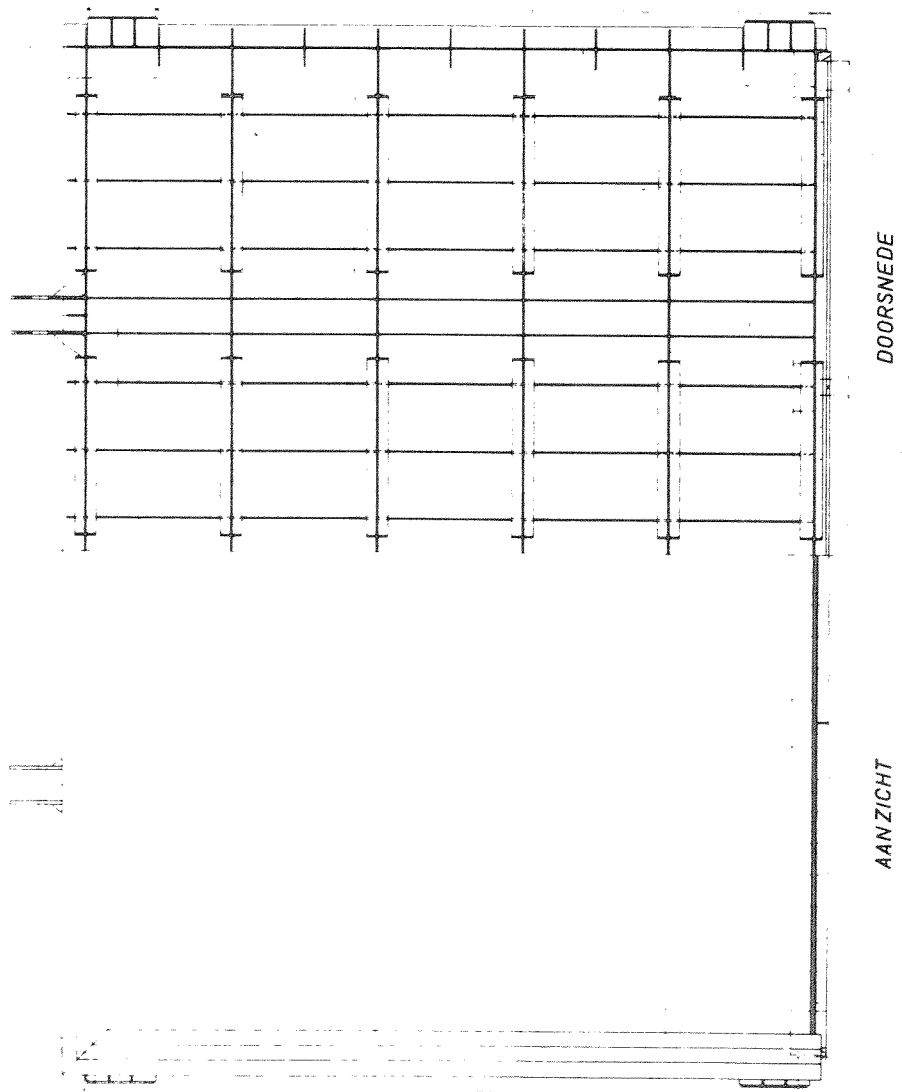
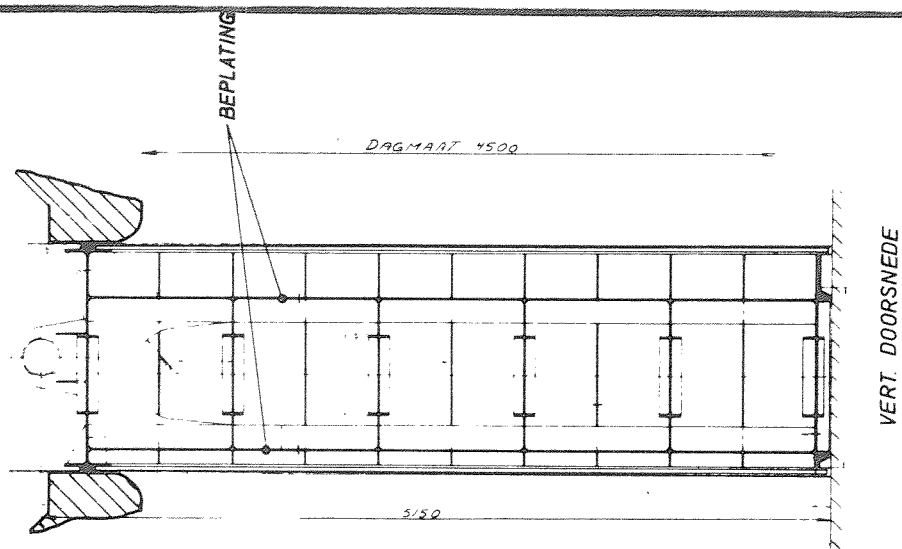
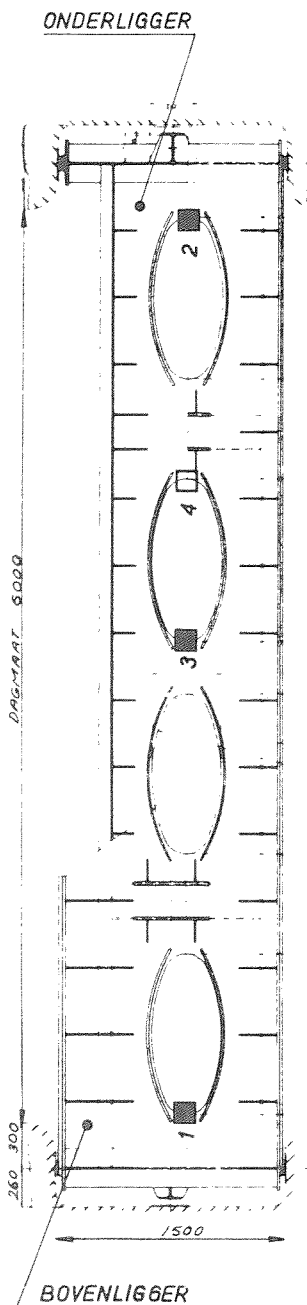
VOLGENS R.W.S.-TEK. G.B14a R.R.

A3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1347

FIG. 2



- 1 EN 2 "VERTIKALE" OPNEMERS
- 3 "HORIZONTALE" OPNEMER BOVEN
- 4 "HORIZONTALE" OPNEMER BENEDEN

SCHUIFONTWERP VAN SLUIS BROUWERSDAM

RWS. DIR. BRUGGEN  
Tek. A III D1100

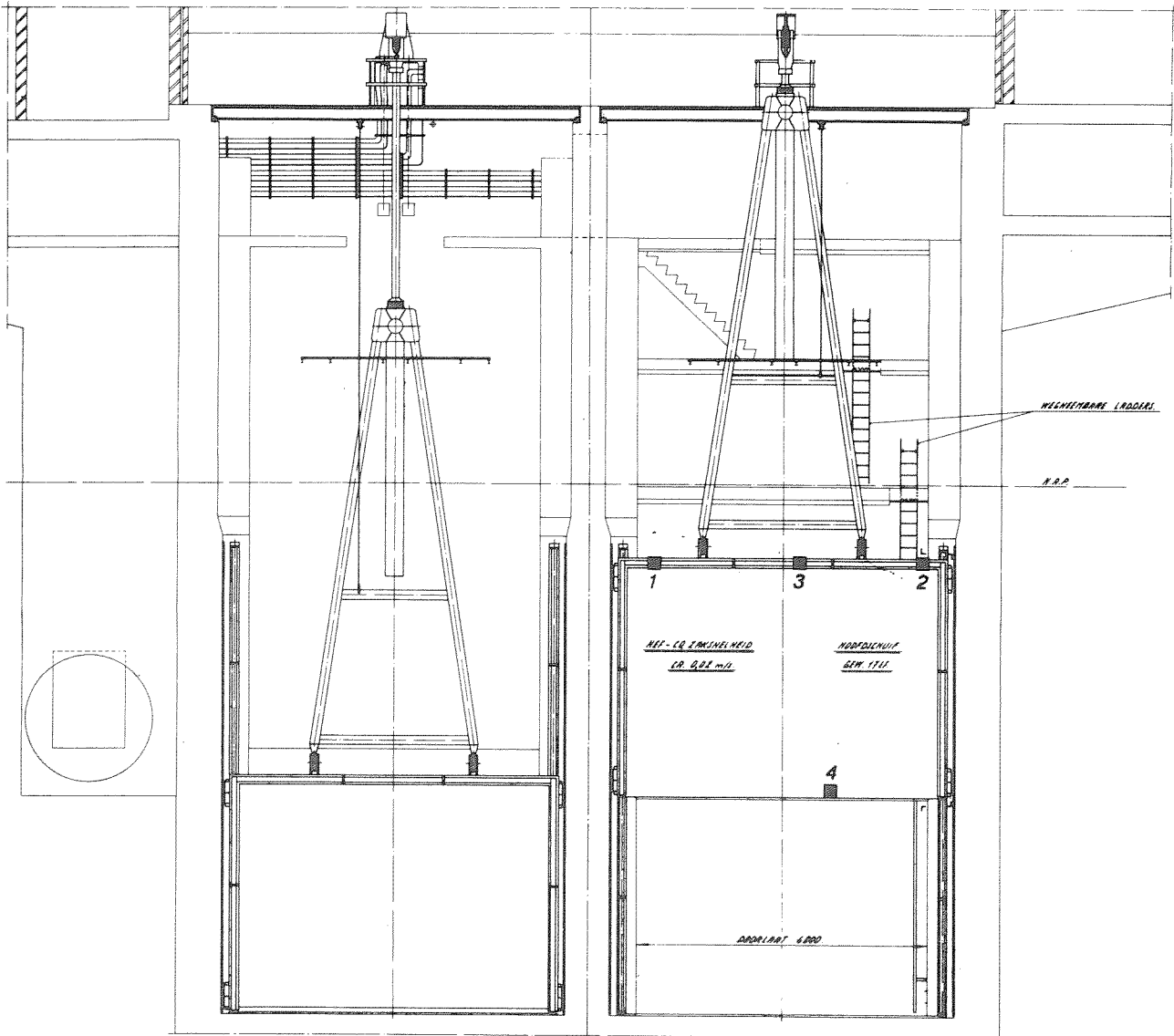
SCHAAL 1:50

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1347

FIG. 3



AANZICHT SCHUIVEN EN BEWEGINGSWERK  
 MET POSITIE VERSNELLINGSOPNEMERS

R.W.S. DIR. BRUGGEN  
 TEK. A 66.416

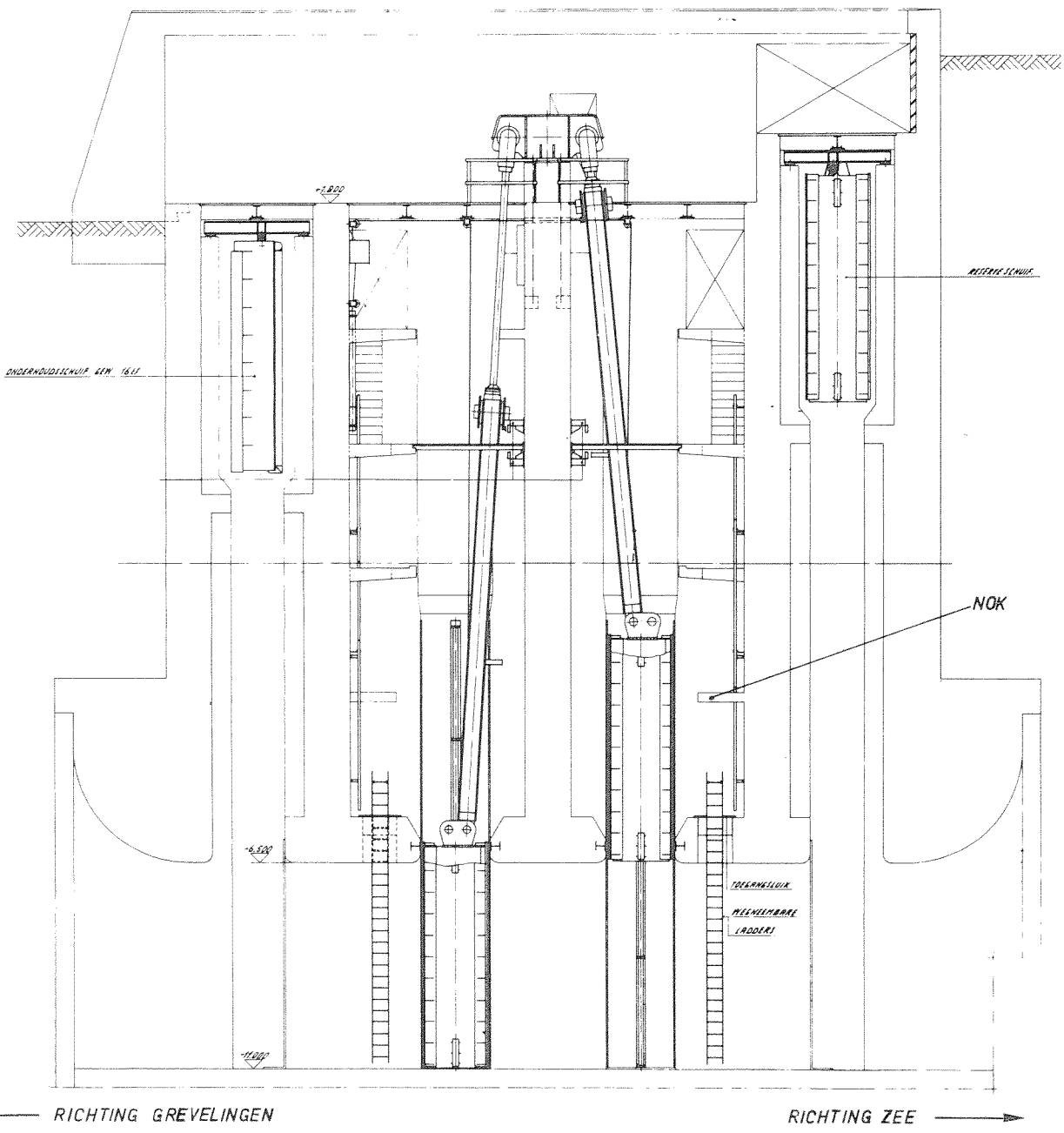
SCHAAL 1:150

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1347

FIG. 4



DOORSNEDE SCHUIVENHUIS MET DE SYMMETRISCHE SCHUIF (AANVANKELIJK ONTWERP)

R.W.S. DIR. BRUGGEN  
TEK. A 66.416

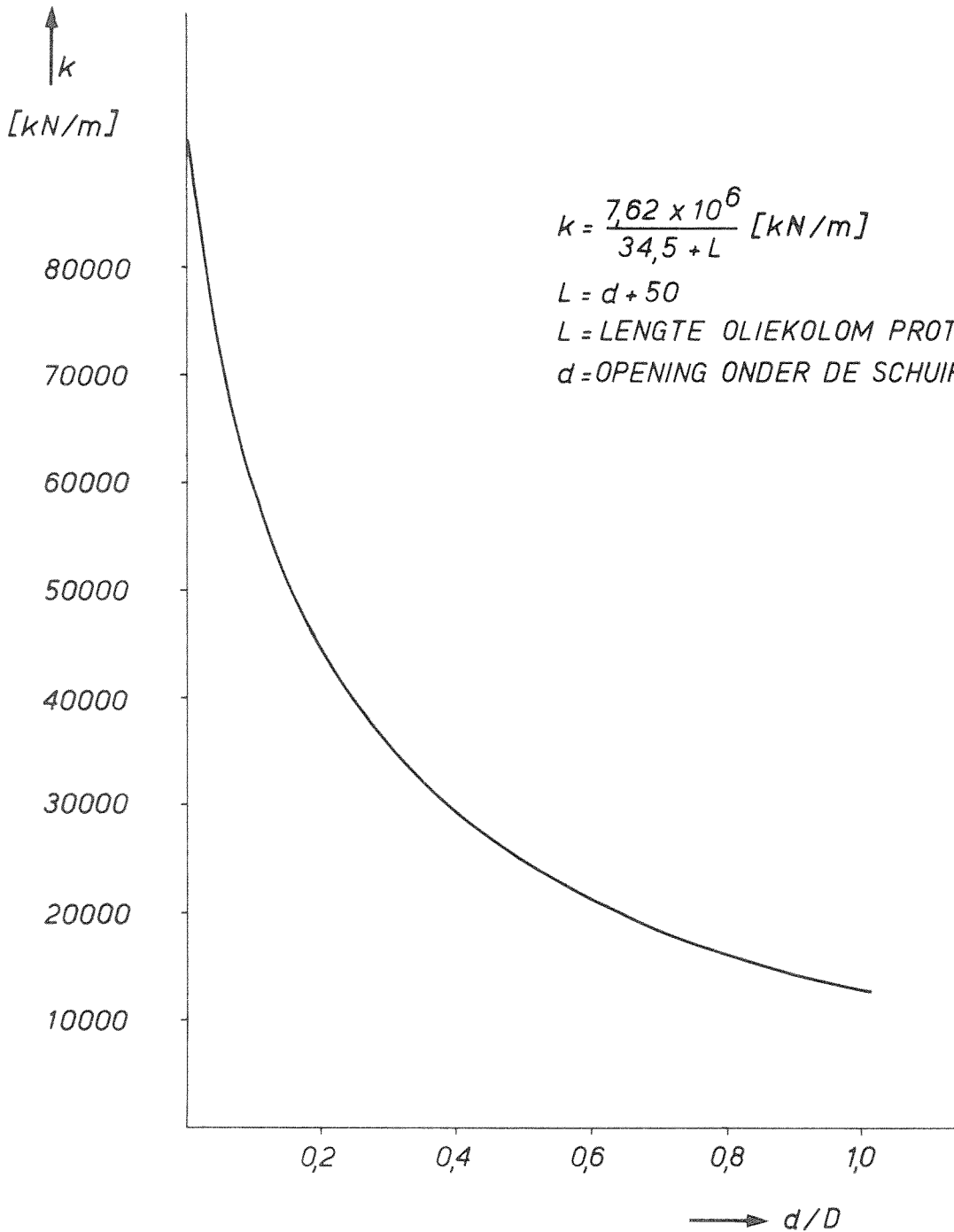
SCHAAL 1:150

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1347

FIG. 5



STIJFHEID OPHANGKONSTRUKTIE SCHUIF ALS  
 FUNKTIE VAN DE RELATIEVE SCHUIFOPENING

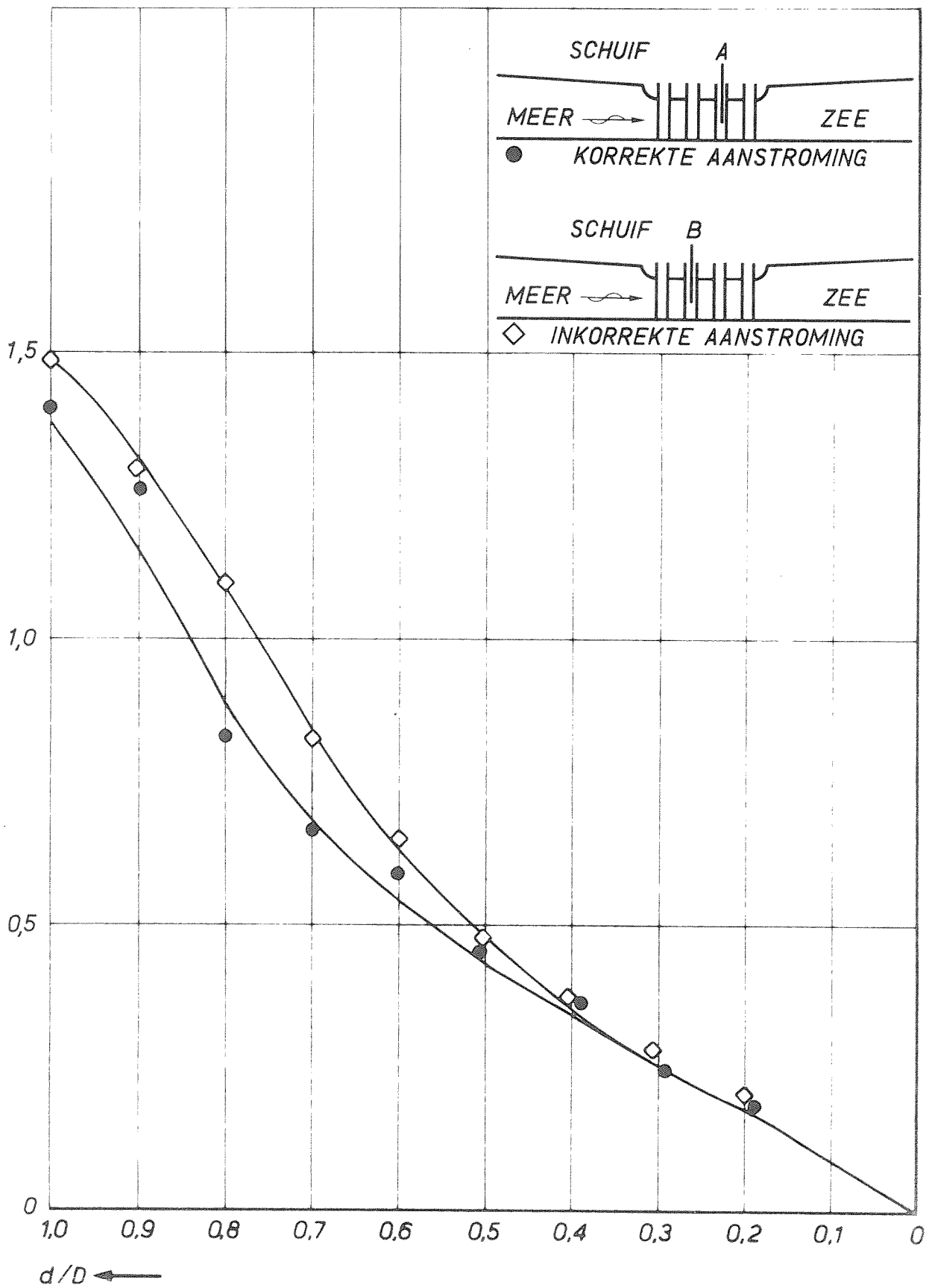
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1347

FIG. 6

$c_Q$

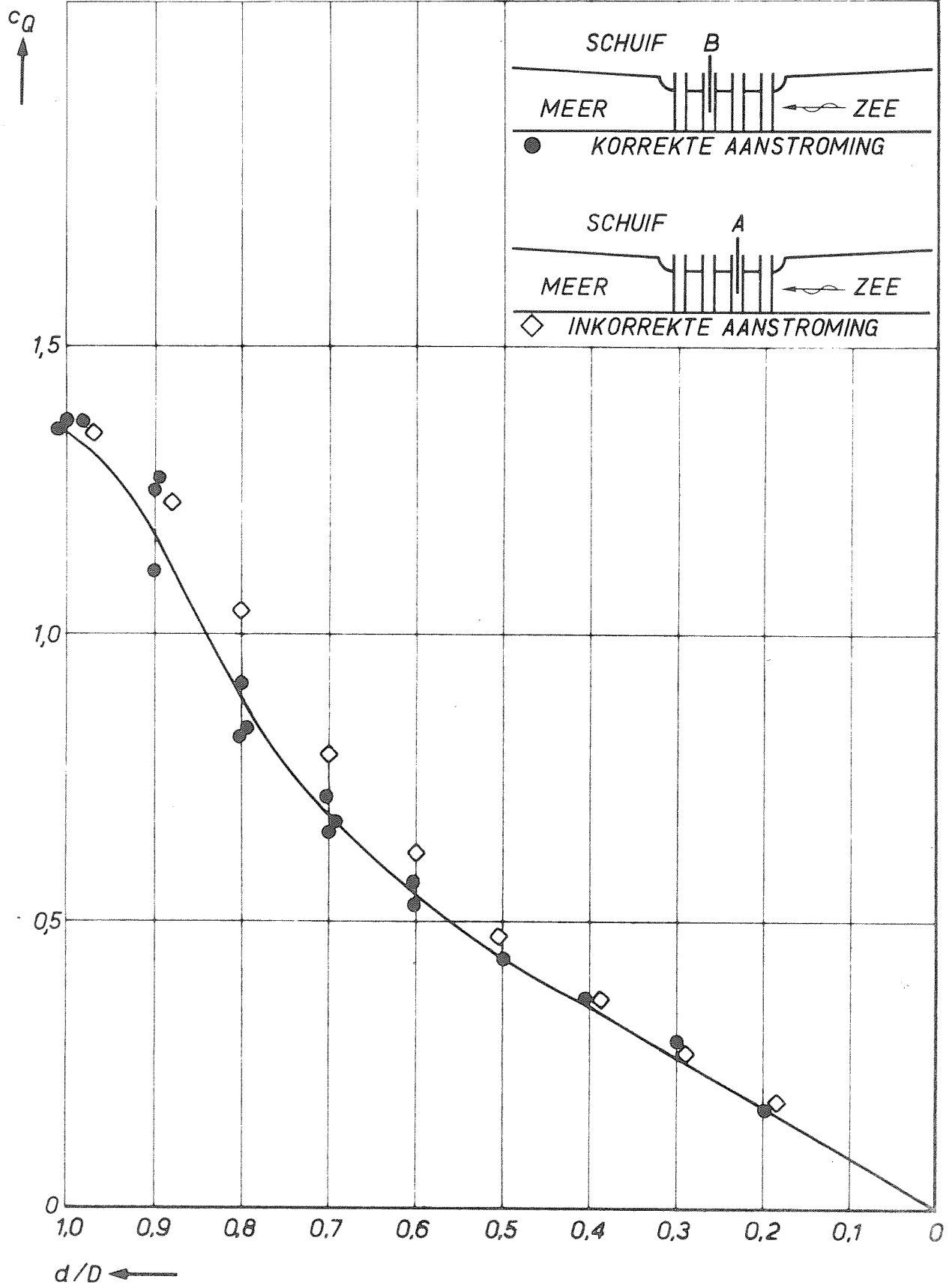
AFVOERCOEFFICIENT VOOR LOZEN, BEPAALD BIJ  
 MODELONDERZOEK M 1257  
 AFVOERCOEFFICIENT BETROKKEN OP KEELDOORSNEDE

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1347

FIG. 7



AFVOERCOEFFICIENT VOOR INLATEN, BEPAALD BIJ  
 MODELONDERZOEK M 1257  
 AFVOERCOEFFICIENT BETROKKEN OP KEELDOORSNEDE

A4

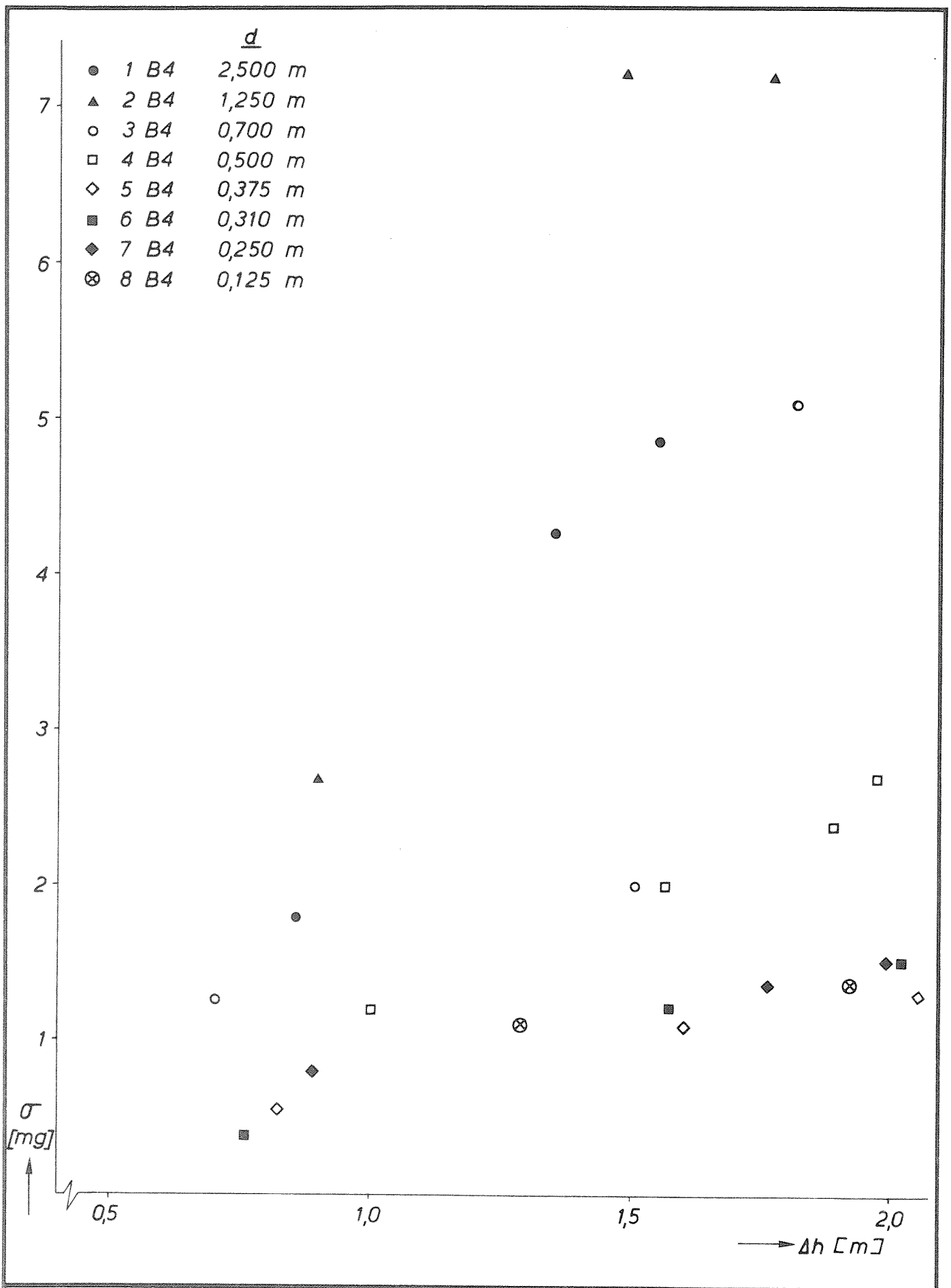
PEIL GREVELINGEN TOV. N.A.P.

- 1: 10 - 4 - 1979 0,25 -
- 2: 11 - 4 - 1979 0,26 -
- 3: 12 - 4 - 1979 0,27 -
- 4: 23 - 4 - 1979 0,29 -
- 5: 24 - 4 - 1979 0,19 -
- 6: 25 - 4 - 1979 0,18 -
- 7: 26 - 4 - 1979 0,18 -
- 8: 27 - 4 - 1979 0,18 -



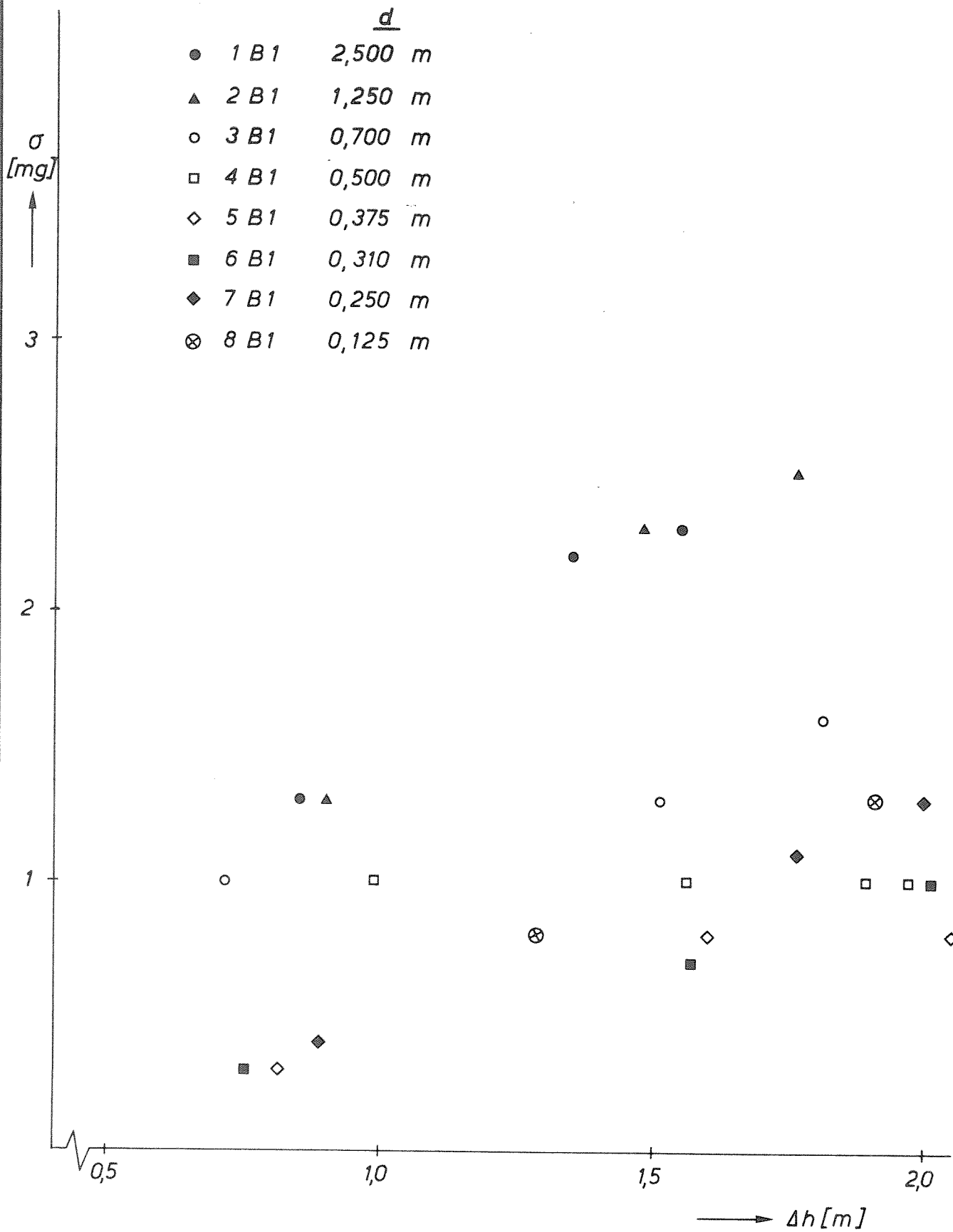
VERLOOP ZEEWATERSTAND (TOV. N.A.P.) TIJDENS MEETDAGEN





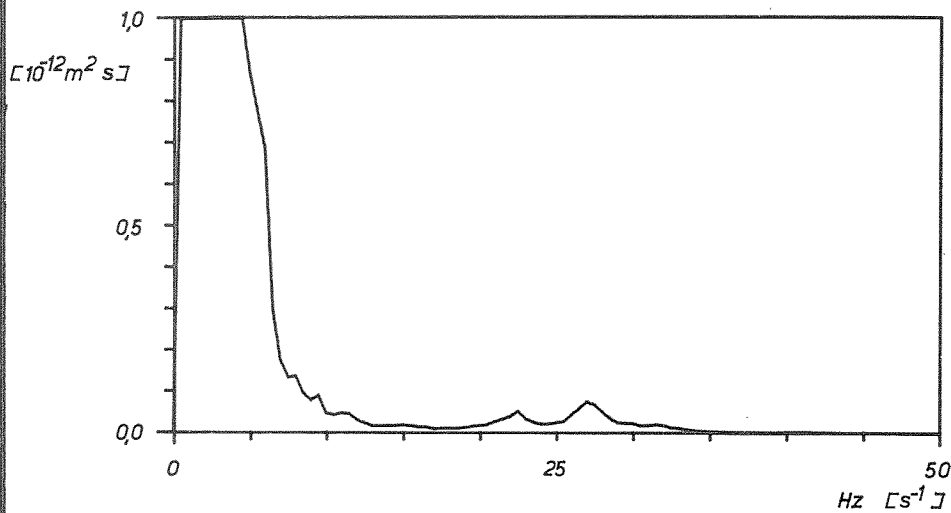
R.M.S. WAARDEN VERSNELLINGSSIGNALLEN ONDERSTE  
 "HORIZONTALE" OPNEMER ALS FUNCTIE VAN HET VERVAL  
 OVER DE SLUIS BIJ KORREKTE AANSTROMING

A4

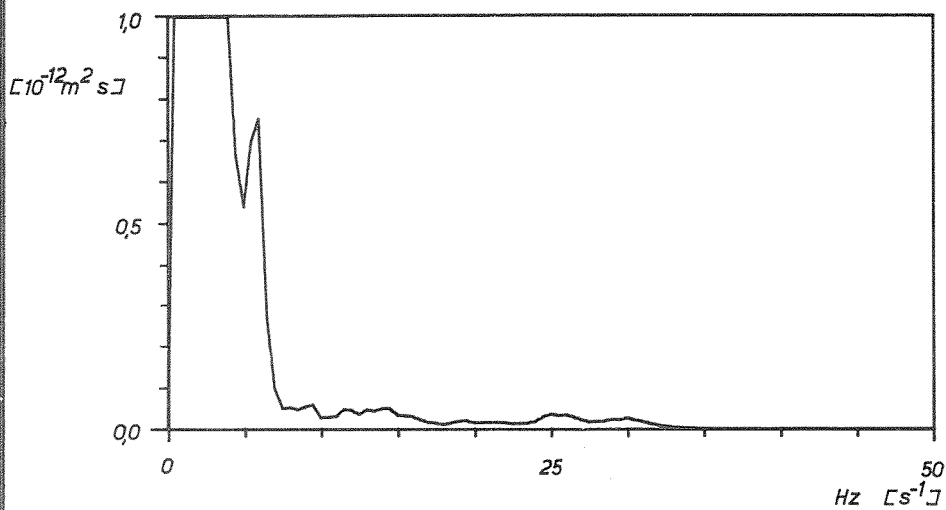


R.M.S. WAARDEN VERSNELLINGSSIGNALLEN VAN DE  
 "VERTIKALE" OPNEMER B1 ALS FUNKTIE VAN HET  
 VERVAL OVER DE SLUIS BIJ KORREKTE AANSTROMING

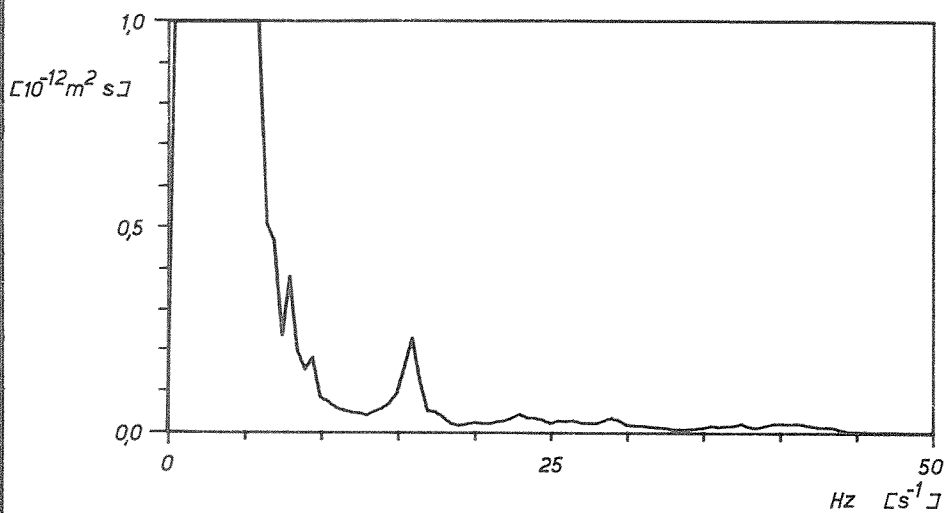
A4



1 B 1  
 VERPLAATSINGSSPEKTRUM  
 VERTIKALE OPNEMER B 1



1 B 2  
 VERPLAATSINGSSPEKTRUM  
 VERTIKALE OPNEMER B 2



1 B 4  
 VERPLAATSINGSSPEKTRUM  
 HORIZONTALE OPNEMER B 4

SPEKTRA VERPLAATSINGSSIGNALEN TIJDENS  
 MAXIMAAL VERVAL 1<sup>e</sup> MEETDAG  
 $\Delta h = 1,51m$  KORREKTE AANSTROMING

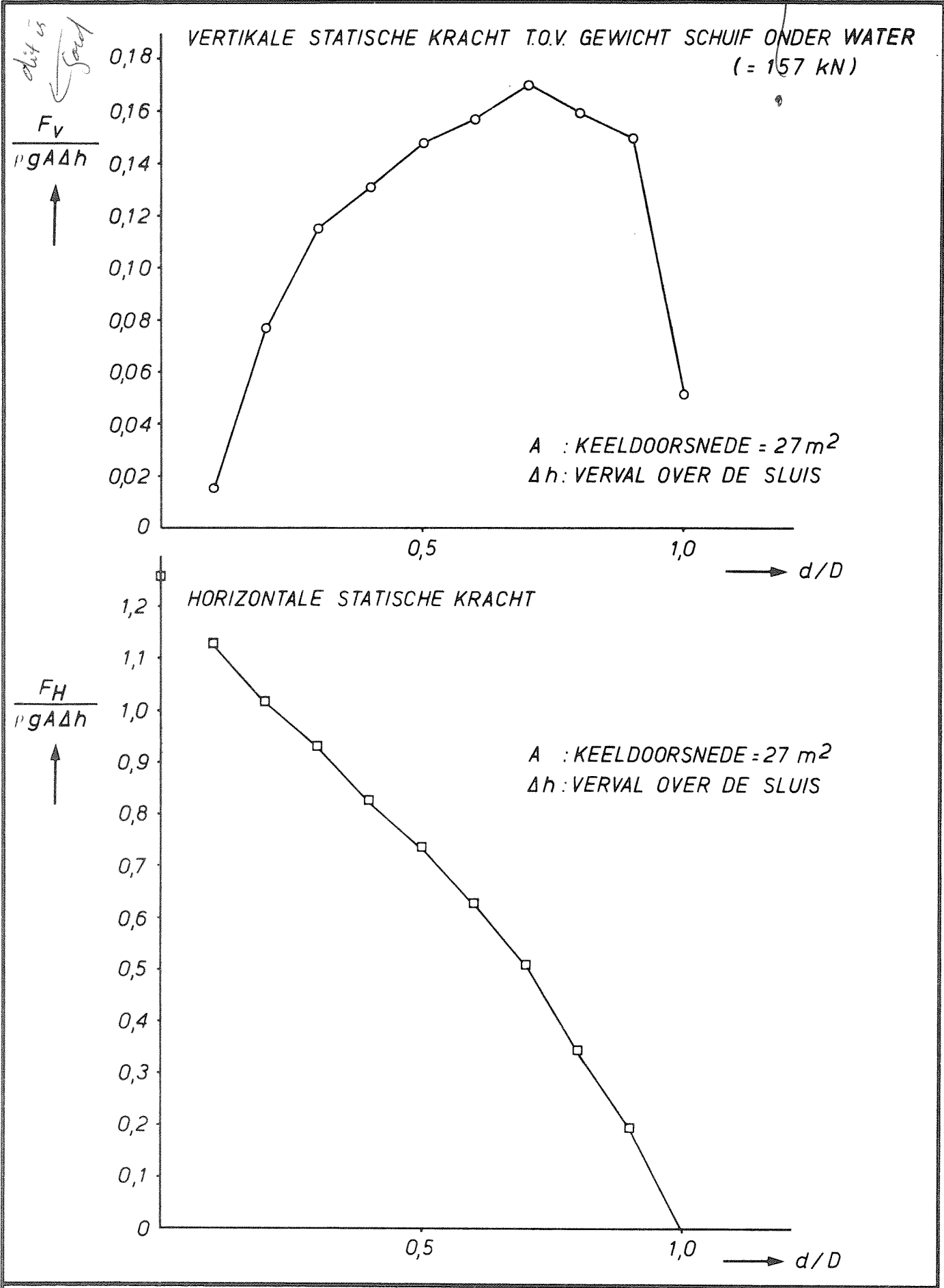
$d = 2,50m$

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1347

FIG. 12



VERTIKALE EN HORIZONTALE STATISCHE KRACHT OP SCHUIVEN SLUIS BROUWERSDAM, ZOALS GEMETEN TIJDENS MODELONDERZOEK M 1272

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1347

FIG. 13

A4

$$\frac{F_{dyn.}}{\rho g A \Delta h}$$



0,08

0,07

0,06

0,05

0,04

0,03

0,02

0,01

0,1

0,2

0,3

0,4

0,5

0,6

0,7

0,8

0,9

1,0

→  $d/D$

- ▲ METINGEN MODEL
- METINGEN PROTOTYPE

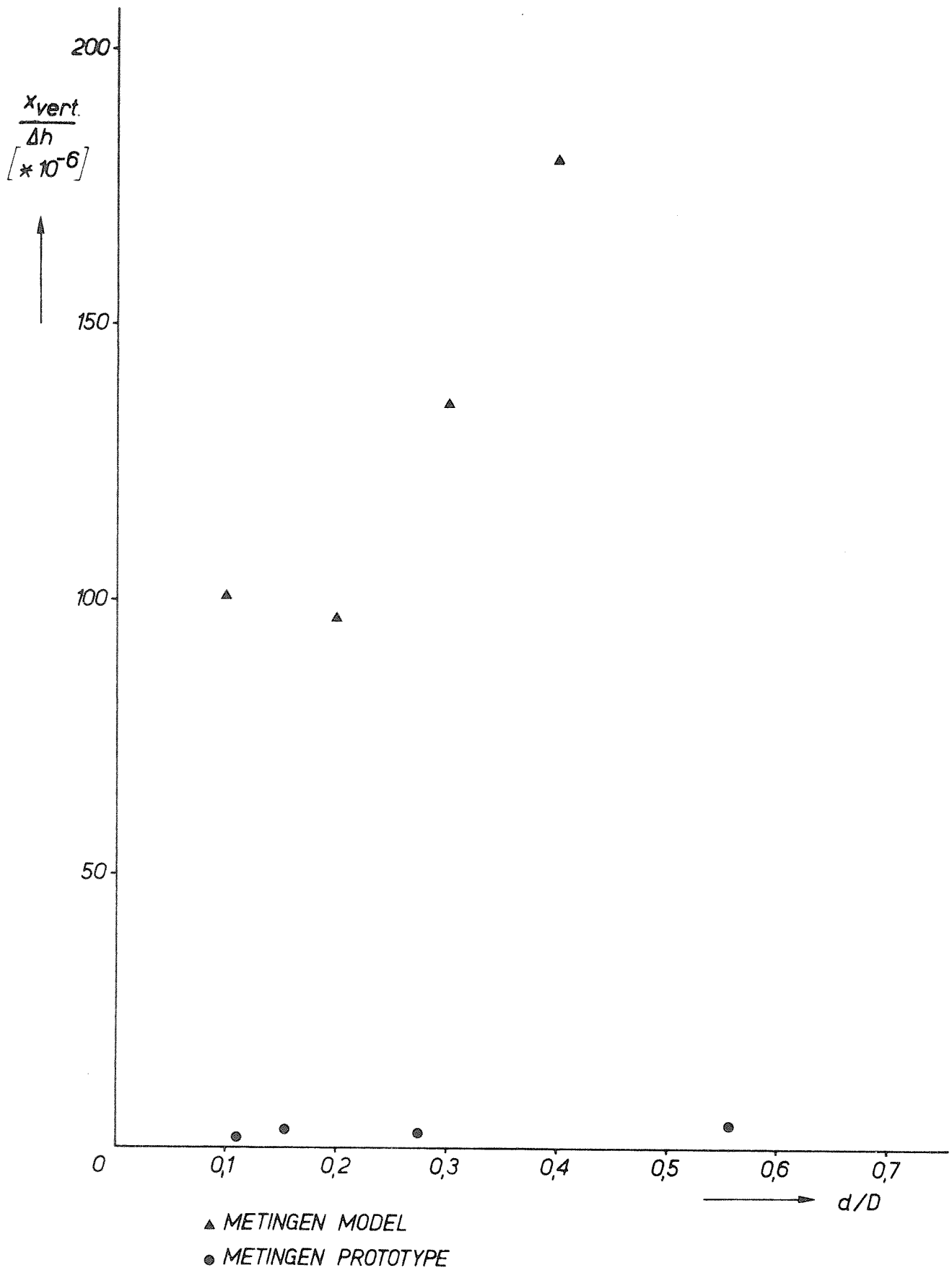
VERTIKALE DYNAMISCHE KRACHT OP DE SCHUIF  
BIJ PROTOTYPEMETINGEN EN MODEL METINGEN

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1347

FIG. 14



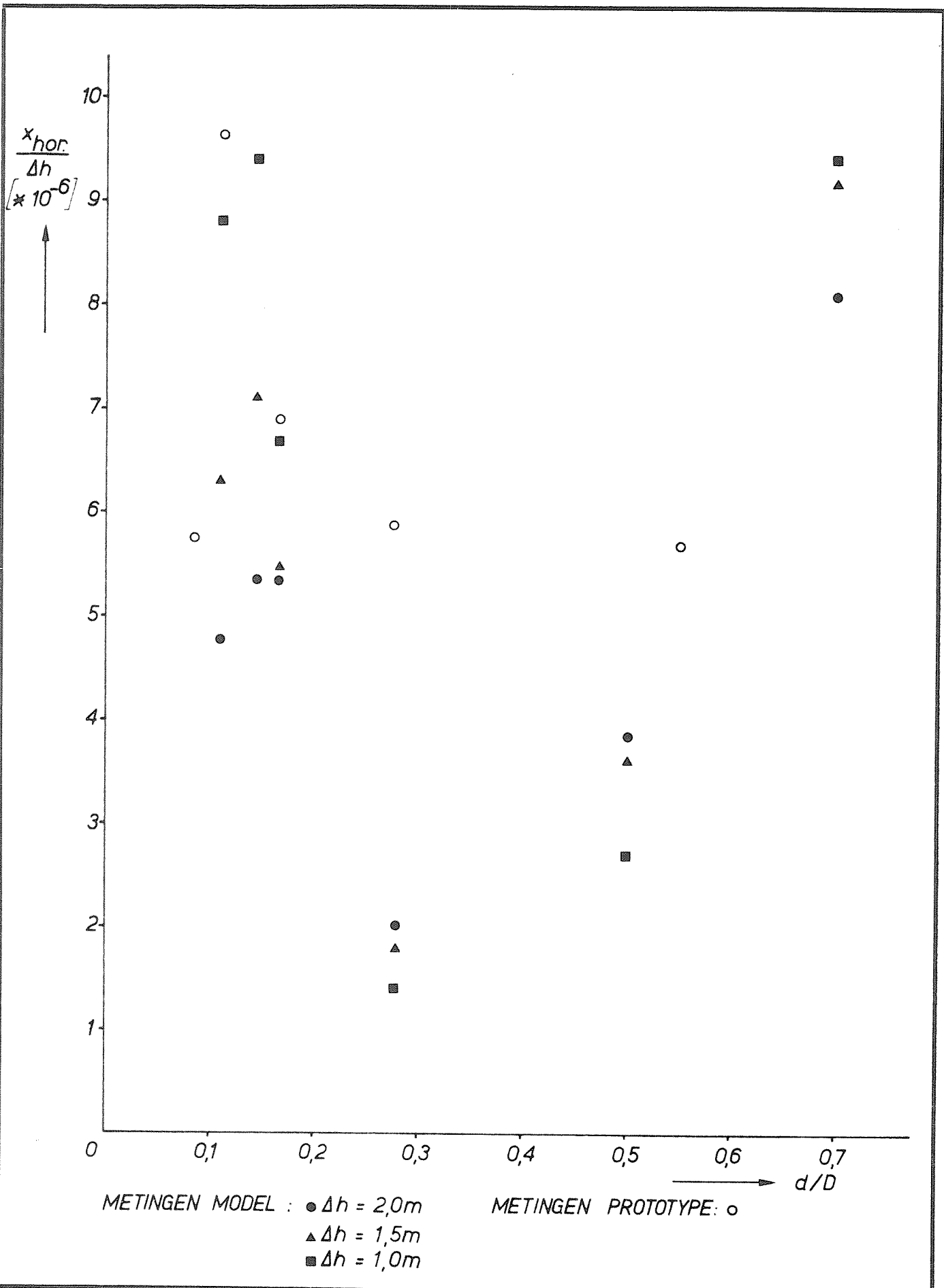
VERTIKALE DYNAMISCHE VERPLAATSING VAN DE SCHUIF  
 BIJ PROTOTYPEMETINGEN EN MODELMETINGEN

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1347

FIG. 15



HORizontale verplaatsing van de onderkant van de schuif  
 bij prototypemetingen en modelmetingen

p.o. box 177

delft

the netherlands