



waterloopkundig laboratorium  
delft hydraulics laboratory

zoutbestrijding Volkerak schutsluizen

vooronderzoek

AFGEHANDELD

verslag modelonderzoek

---

M1432

januari 1977

zoutbestrijding Volkerak schutsluizen

vooronderzoek

verslag modelonderzoek

---

M1432

januari 1977



## INHOUD

Notatie

Lijst van figuren

Lijst van tabellen

Referenties

	blz.
<u>1</u> <u>Inleiding</u> .....	1
1.1      Probleemstelling .....	1
1.2      Zoutbestrijdingsmethoden .....	2
1.3      Doel van het vooronderzoek .....	4
1.4      Methoden van onderzoek .....	4
1.5      Samenvatting en konklusies .....	6
<u>2</u> <u>Gegevens en randvoorwaarden</u> .....	9
2.1      De sluizen en het schutbedrijf .....	9
2.2      De scheepvaart .....	10
2.3      De zouttoestand op het Volkerak en het Hollands Diep .....	11
2.4      Het uitwisselingsproces bij de sluizen .....	11
<u>3</u> <u>Zoutbestrijding door spuien</u> .....	14
3.1      Korte beschrijving van de getijgoot .....	14
3.2      Geometrische schematisatie en gekozen schalen .....	14
3.3      Meetopstelling .....	15
3.4      Proevenprogramma .....	16
3.5      Meetresultaten .....	17
3.6      Berekening rest-zoutbezwaar .....	20
<u>4</u> <u>Zoutbestrijding door een zoutbufferput</u> .....	24
4.1      Beschrijving van het systeem zoutbufferput .....	24
4.2      Opzet van het onderzoek .....	26
4.3      Schaaloverwegingen en modellen .....	28
4.3.1    Hellingonderzoek .....	28
4.3.2    Scheepvaartonderzoek .....	30
4.4      Hellingonderzoek, uitvoering en resultaten .....	31
4.4.1    De invloed van luchtbellenschermen .....	31
4.4.2    Resultaten hellingonderzoek .....	32
4.5      Scheepvaartonderzoek, uitvoering en resultaten .....	35
4.6      Totaal rest-zoutbezwaar, waterverlies en zoetwaterbezwaar ..	36

## NOTATIE

c	concentratie Cl <sup>-</sup> ionen	g/l
$\bar{c}_b$	gemiddelde concentratie in de bovenlaag	g/l
$c_{br}$	concentratie Boven Rijn afvoer	g/l
$c_o$	concentratie in de schutsluizen	g/l
$\bar{c}_p$	gemiddelde concentratie in de zoutbufferput	g/l
$c_z$	concentratie op het Volkerak zonder spuien	g/l
g	versnelling van de zwaartekracht	m/s <sup>2</sup>
H	diepte	m
n	aantal eenheidsschutcycli (ook: aantal scheepspassages) per tijdseenheid	s <sup>-1</sup>
Q	debiet	m <sup>3</sup> /s
$Q_{br}$	Boven Rijn afvoer	m <sup>3</sup> /s
$Q_d$	doorspoeldebiet Hollands Diep	m <sup>3</sup> /s
$Q_s$	spuidebiet richting Volkerak	m <sup>3</sup> /s
$Q_u$	uitwisselingsdebiet schutsluizen	m <sup>3</sup> /s
$Q_v$	waterverlies	m <sup>3</sup> /s
$Q_{zb}$	zoetwaterbezwaar	m <sup>3</sup> /s
S	mengfaktor	-
$\bar{S}_p$	gemiddelde menging in de onderlaag	
$S_h$	menging op de helling	
$S_{tot}$	totale menging op traject sluis-bufferput	
$S_u$	menging bij het uitwisselingsproces	
$u_a^*$	schuifspanningssnelheid	m/s
$u_e$	windentrainment	m/s
$u_t$	uitwisselingscoëfficiënt over een sluisdeur	-
V	kolkinhoud	m <sup>3</sup>
$V_s$	scheepssnelheid	m/s
W	windsnelheid	m/s
x	uitwisselingscoëfficiënt over de schutsluis	-
y	diepte	m
Z	zoutbezwaar	kg/s
$Z_1$	zoutbezwaar tengevolge van de uitwisselingsprocessen	kg/s
$Z_2$	zoutbezwaar tengevolge van de scheepvaart	kg/s
$Z_i$	zoutbezwaar per scheepstype	kg/s
$\Delta Z$	zoutbezwaar per scheepstype per scheepspassage	kg/s
$Z_3$	zoutbezwaar tengevolge van windentrainment	kg/s
$Z_r$	rest-zoutbezwaar	

NOTATIE (vervolg)

$\rho$	dichtheid	$\text{kg/m}^3$
$\rho_a$	luchtdichtheid	$\text{kg/m}^3$
$\rho^z$	dichtheid gemiddeld over een doorsnede en over het getij	$\text{kg/m}^3$

## LIJST VAN FIGUREN

- 1 Situatie Volkerak schut- en inlaatsluizen
- 2 Schematische opzet modelonderzoek en berekeningen
- 3 Schematische weergave  $\text{Cl}^-$  transporten zoutbufferput
- 4 Volkerak duwvaartsluis
- 5 Volkerak jachtensluis
- 6 Afmetingen karakteristieke scheepstypen
- 7 Prototypegegevens zoutbelaar Hollands Diep
- 8 Prototypegegevens  $\text{Cl}^-$  gehalten Zijpe
- 9 Prototypegegevens  $\text{Cl}^-$  gehalten voorhaven, meting 17-7-'69
- 10 Prototypegegevens  $\text{Cl}^-$  gehalten voorhaven, meting mei/juni 1971
- 11 Prototypegegevens  $\text{Cl}^-$  gehalten voorhaven, meting september 1976
- 12 Modelranden getijgootonderzoek
- 12 Overzicht van de getijgoot
- 14 Bemonsteringsschema
- 15 Opstelling meetwagen
- 16 Modelinstelling Zijpe ten opzichte van prototypewaarden (kontinu debiet)
- 17 Modelinstelling Zijpe ten opzichte van prototypewaarden (diskontinu debiet)
- 18 Getijgemiddelde concentraties op meetpunt 7 (kontinu debiet)
- 19 Getijgemiddelde concentraties op meetpunt 7 (kontinu en diskontinu debiet)
- 20 Gemeten dichtheden meetpunten 0 en 7
- 21 Inspeelgedrag proef T541-A
- 22 Inspeeltijden bij reductie van  $Q_s$
- 23 Zoutbalans op het Hollands Diep
- 24 Fiktief spuiprogramma Volkerak inlaatsluis
- 25 Verloop rest-zoutbezwaar voor fiktief spuiprogramma
- 26 Principe van wind-entrainment
- 27 Schematische voorstelling modellen helling- en scheepvaartonderzoek
- 28 Onderzochte varianten bufferput en overgangshelling
- 29 Gemeten zoutvertikaal in de zoutbufferput
- 30 Rest-zoutbezwaar  $Z_1$  en waterverlies  $Q_v$  voor homogene en gelaagde sluis, met en zonder luchtbellenschermen
- 31 Gemeten zoutvertikalen voor en na passage duweenheid
- 32 Toename zout in de bovenlaag per scheepspassage

## LIJST VAN TABELLEN

- I Schuttingen Volkeraksluizen
- II Aantal scheepspassages Volkeraksluizen
- III Gegevens betreffende scheepssnelheden in de voorhaven
- IV Prototype-uitwisselingscoëfficiënt over de schutsluizen
- V Gegevens getijgoot en ingestelde randvoorwaarden
- VI Proevenprogramma getijgootonderzoek
- VII Meetresultaten getijgootonderzoek
- VIII Het rest-zoutbezwaar bij variatie der parameters
- IX Rest-zoutbezwaar bij fiktief spuiprogramma
- X Rest-zoutbezwaar, waterverlies en zoetwaterbezwaar. Oplossing verzoeting Volkerak
- XI Overzicht proeven hellingonderzoek
- XII De invloed van luchtbellenschermen
- XIII Resultaten hellingproeven
- XIV Prognose rest-zoutbezwaar  $Z_1$  en waterverlies  $Q_v$  voor variant III, met en zonder luchtbellenschermen
- XV Overzicht proeven scheepvaartonderzoek
- XVI Resultaten scheepvaartproeven
- XVII Totaal rest-zoutbezwaar, waterverlies en zoetwaterbezwaar. Oplossing zoutbufferput

## REFERENTIES

- 1 Zoutmeting Volkeraksluizen 1974.  
Nota 43.002.03. Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Zuid-West, november 1976.
- 2 Onderzoek naar de zouttoestand bij de Volkerak Sluizen.  
Waterloopkundig Laboratorium, rapport M 896 XXV, juli 1974.
- 3 Invloed luchtbellengordijn op zoutpenetratie.  
Waterloopkundig Laboratorium, rapport M 896 VIII, juli 1971.
- 4 ABRAHAM, G. en BURGH, P. v.d. Reduction of salt water intrusion through locks by pneumatic barriers.  
Delft Hydraulics Laboratory, Publication no. 28, August 1962 (ook: Rijkswaterstaat Communication no. 17).
- 5 Duwvaart in kanalen.  
Waterloopkundig Laboratorium, rapport M 782, april 1973.
- 6 KATO, H. and PHILLIPS, O.M. On the penetration of a turbulent layer into stratified fluid.  
Jnl. of Fluid Mech. 37, p. 643-655, 1969.
- 7 KNUDSEN, M. Hydrographical Tables.  
Copenhagen 1901.
- 8 Gegevens met betrekking tot de waterloopkundige toestand op het Hollands Diep.  
Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Zuid-West, nota nr. 45.002.02.



## M 1432 Zoutbestrijding Volkerak Schutsluizen

### Vooronderzoek

#### 1 Inleiding

Ten einde de mogelijkheden te bestuderen om de zoutbelasting van de Volkerak schutsluizen op het Noordelijk Deltabekken te reduceren werd op 27 maart 1975 een werkgroep opgericht bestaande uit vertegenwoordigers van Rijkswaterstaat en Waterloopkundig Laboratorium. Door deze werkgroep werden een aantal methoden van zoutbestrijding geëvalueerd op basis van de bestaande gegevens erover. De toepassing van een zoutbufferput leek hierbij het gunstigst en zou verder onderzocht worden in hydraulisch modelonderzoek waarvoor het WL een voorstel opstelde. De werkgroep besloot echter om voorafgaande hieraan de zoutvangoplossing te vergelijken met de methode van geforceerd spuien via de Volkerak inlaatsluis naar het Zuiden. Dit vooronderzoek werd nader uitgewerkt door het WL in haar brief van 4 augustus 1975 aan RWS, Directie Benedenrivieren. Het vooronderzoek werd opgedragen in de bijeenkomst van de werkgroep van 17 augustus 1976 en uitgevoerd in november en december 1976. Het gedeelte inzake geforceerd spuien werd uitgevoerd door de irs. A. Roelfzema en G.J.E.M. de Schrijver. De leiding van het totale onderzoek en de samenstelling van dit verslag berustte bij ir. H. Ligteringen.

#### 1.1 Probleemstelling

Algemeen vindt bij schutsluizen in een scheiding van zout- en zoetwater uitwisseling plaats ten gevolge van het voortdurend omzetten van schutkolken. Ook wanneer het niveauverschil aan weerszijden (de schuttschijf) buiten beschouwing wordt gelaten, treedt dit proces op. Immers bij verschil van dichtheid over de sluisdeur zal het openen van de deur een uitwisseling van het dichte (zoute) en minder dichte (zoete) water tot gevolg hebben, resulterend in het over elkaar heen stromen (in tegengestelde richting) van twee lagen.

De zoutbelasting op het Hollands Diep en het Haringvliet ten gevolge van het scheepvaartverkeer van en naar het Volkerak kan in de huidige situatie gereduceerd worden tot ca.  $18 \text{ kg Cl}^-/\text{s}$ , bij een spuiwaterverlies van  $20 \text{ à } 30 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dit wordt bereikt door toepassing van luchtbellenschermen bij de sluisdeuren, door 's nachts bij laag water op het Volkerak terug te spuien en gedurende het schutbedrijf de rinketschuiven enigszins te openen (lekkende ebdeuren).

Verwacht wordt dat na ingebruikname van de derde duwvaartsluis (begin 1977) en de jachtensluis (medio 1977) de gemiddelde zoutbelasting niet sterk zal stijgen, wanneer dezelfde middelen gebruikt worden. De piekbelasting kan dan echter wel veel hoger liggen. Beslissend voor de noodzaak om de zoutbestrijding te intensiveren is het voortduren van deze toestand tot na 1985, terwijl na 1978 de aan de waterkwaliteit gestelde eisen praktisch geen zoutbelasting op het Noordelijke Deltabekken toelaten. De meest voor de hand liggende oplossing van versterkt spuien van zoetwater door de in 1977 eveneens gereedkomende inlaatsluis stuit op twee bezwaren:

1. de beschikbare hoeveelheid water is beperkt gedurende lage afvoeren van Waal en Maas
2. het ontstaan van een brakke toestand op het Volkerak is vanuit waterkwaliteitsoogpunt een ongewenste zaak.

In haar meest algemene vorm luidt de probleemstelling dus om te komen tot een doeltreffende zoutbestrijding, waarbij de effectiviteit van het systeem beoordeeld wordt op drie criteria:

- het rest-zoutbezwaar op het noordelijke Deltabekken, te definiëren als het netto aantal kg  $\text{Cl}^-$  ionen, dat per tijdseenheid de Hellegatsdam passeert
- het waterverlies uit het Noordelijk Deltabekken, het deficit in  $\text{m}^3/\text{s}$ , ongeacht het  $\text{Cl}^-$  gehalte
- het zoetwaterbezwaar op het Volkerak, uitgedrukt in  $\text{m}^3/\text{s}$  volledig zoetwater, dat de Hellegatsdam naar het Zuiden passeert.

Een mogelijke uitdrukking voor dit laatste criterium (nog punt van onderzoek) is:

$$Q_{zb} = Q_v \left(1 - \frac{\bar{c}_p}{c_z}\right) + Q'_u \left(1 - \frac{\bar{c}_b}{c_z}\right)$$

- waarin:  $Q_{zb}$  = zoetwaterbezwaar  
 $Q_v$  = waterverlies door het dichtheidsscherm  
 $Q'_u$  = uitwisselingsdebiet vermeerderd met het debiet ten gevolge van middenstandsverschil (schuttschijf)  
 $\bar{c}_p$  = gemiddelde zoutconcentratie in spuiroom  
 $\bar{c}_b$  = zoutconcentratie in de uitwisselingsstroom richting Volkerak  
 $c_z$  = zoutconcentratie zeewater.

## 1.2 Zoutbestrijdingsmethoden

Uitgaande van de toepassing van zoutbestrijding in een bestaand sluizencomplex en het feit, dat het systeem toch niet permanent dienst zal doen, zijn

de volgende mogelijkheden aanwezig:

- opvangen van de zoute uitwisselingsstroom aan de Noordzijde van de sluizen en terugvoeren naar het Volkerak. Hierbij geldt dat het rendement van de methode toeneemt naarmate het zout dichterbij de sluizen wordt opgevangen. In principe is dus een systeem Terneuzen (mits goed uitgevoerd: opvangen direkt achter de schutsluizen en momentaan terugpompen van het zoute water) het meest aantrekkelijk. De vele speciale voorzieningen die het vergt maken het systeem moeilijk toe te passen in een bestaande sluis. Dit is niet het geval voor een zoutbufferput op enige afstand van de sluizen, waaruit het opgezamelde zoute water selektief onttrokken wordt door middel van een dichtheidsscherm. De ligging van schutsluizen en inlaatsluis lenen zich uitstekend voor een dergelijke oplossing, die dan ook onderwerp is geweest van deze studie (zie situatie fig. 1).

- reduceren van het zoutgehalte aan de Volkerakzijde door een zoete spuistroom naar het Zuiden. Dit principe wordt al toegepast in de huidige situatie (nachtspuien, lekkende ebdeuren) met redelijk resultaat. Wanneer de inlaatsluis gereed is, kan deze de spuifunctie overnemen. De grootste efficiëntie bij deze methode wordt echter bereikt, wanneer de spuistroom in de Z. voorhaven terecht zou komen, hetgeen echter ongewenst is in verband met de invloed op de scheepvaart.

Een zoete spuistroom, die indirekt de  $\text{Cl}^-$  gehalten in de voorhaven gaat beïnvloeden, leek in eerste instantie minder effectief dan de huidige methode en dus onvoldoende. Toch is deze methode in dit onderzoek betrokken en vergeleken met het principe van de zoutbufferput. Primair was hierbij het doel om na te gaan of de gedurende hogere spuidebieten opgebouwde (acceptabele)  $\text{Cl}^-$  gehalten in de voorhaven voldoende traag zouden reageren bij een reductie van de spuidebieten tijdens droogte om een droge periode te kunnen overbruggen.

Twee opmerkingen dienen toegevoegd te worden aan deze uiteenzetting:

- zoutbestrijding volgens het Kreekraksysteem (in principe verschillend van de beide genoemde methoden, doordat het zout wordt verwijderd bij de bron) valt in dit probleem buiten de beschouwing, doordat het niet te verwezenlijken is in een bestaande schutsluis
- de zoutbestrijding door middel van luchtbellenschermen zal bij de tweede methode onderdeel blijven van het totale pakket maatregelen. Bij de eerste methode kunnen de luchtbellenschermen mogelijk achterwege gelaten worden, óf omdat ze ongunstig werken óf omdat de methode zelf zo gunstig is, dat deze additionele maatregel niet langer nodig is. Een en ander is punt van onderzoek geweest.

### 1.3 Doel van het vooronderzoek

Primair doel van het vooronderzoek was een afweging te maken tussen de twee genoemde methoden van zoutbestrijding, de zoutbufferput en het verzoeten van het Volkerak. Zoals in paragraaf 1.1 gesteld waren de criteria hierbij het rest-zoutbezwaar, het waterverlies en het zoetwaterbezwaar. Het onderzoek diende vooral ook om het inzicht in beide processen te vergroten, waardoor het toepassingsgebied breder kon worden dan de Volkerakschutsluizen alleen. Daarnaast behield het vooronderzoek met betrekking tot de zoutbufferput de doelstelling, die het in het oorspronkelijke onderzoeksvoorstel van WL reeds had, namelijk het optimaliseren van de overgang van de schutsluizen naar de bufferput, alvorens het systeem als geheel in een overzichtsmodel te onderzoeken. Punten van onderzoek hierbij waren de geometrie van het overgangsgedeelte (hellingshoek, lengte, abrupte verdieping) en de evenwichtsdiepte van het grensvlak (of van een bepaald  $\text{Cl}^-$  gehalte, zoals uit het onderzoek zou blijken).

Tenslotte vormde de vraag of de luchtbellenschermen achterwege zouden kunnen blijven bij deze vorm van zoutbestrijding een belangrijk doel van het vooronderzoek.

### 1.4 Methoden van onderzoek

Waar in de hoofdstukken 3 en 4 uitvoeriger ingegaan zal worden op de gekozen methoden van onderzoek en de daaraan verbonden beperkingen, wordt het zinvol geacht hier de opzet in grote lijnen weer te geven. In figuur 2 is deze opzet voor beide gedeelten van het onderzoek in schema gezet. Een korte toelichting op deze schema's volgt hieronder.

#### Verzoeten Volkerak (fig. 2a)

Een reductie van de  $\text{Cl}^-$  concentratie in de Zuidelijke voorhaven zal een vermindering van het zoutbezwaar op het Noordelijk bekken tot gevolg hebben. Dit zoutbezwaar als zodanig heeft een verhoging van het  $\text{Cl}^-$  gehalte van het spuiwater ten gevolge. Het rest-zoutbezwaar is het zoutbezwaar door de schutsluizen verminderd met het transport van zout in het spuiwater.

Uit prototypegegevens, gebaseerd op zoutmetingen tijdens normaal schutbedrijf in de Volkerakschutsluizen, is een uitwisseling per tijdseenheid bepaald als functie van het verschil in tijdsgemiddeld  $\text{Cl}^-$  gehalte over de sluizen. De relatie tussen spuidebiet en tijdsgemiddelde  $\text{Cl}^-$  gehalte en vooral de reactietijd bij reductie van het spuidebiet is bepaald door middel van modelonderzoek

in de getijgoot. Tenslotte wordt de teruggevoerde hoeveelheid zout in de spui-  
stroom bepaald onder aanname, dat de toename in  $\text{Cl}^-$  gehalte ten gevolge van  
het zoutbezwaar bij de inlaatsluis gelijk is aan die ter plaatse van de Haring-  
vlietbruggen. Dit maakt het mogelijk een eenvoudige balans op te stellen voor  
het Noordelijk bekken (fig. 23).

#### Zoutbufferput (fig. 2b en 3)

De uitwisseling van zout- en zoetwater bij geopende deur van de schutsluis  
heeft menging tot gevolg, die toeneemt door toepassing van luchtbellenscher-  
men. Voorts vindt menging plaats in de translatiegolf op het overgangsgedeelte  
naar de bufferput toe. In de put zelf vindt menging plaats door wind-entrain-  
ment. Scheepvaart in de voorhaven tenslotte veroorzaakt menging, zowel in de  
translatiegolf als aan het grensvlak in de bufferput, voorzover dit zich tot  
in de voorhaven uitstrekt.

Het resultaat van uitwisselingsstroom en scheepvaart is een bepaalde zoutver-  
deling in de vertikaal, die zal toegroeien naar een evenwichtstoestand onder  
invloed van

- onttrekking uit de bufferput door het dichtheidsscherm
- verversing van het voorhavenwater vanuit het Hollands Diep.

Deze verversing heeft tot gevolg, dat een zeker gedeelte van het zout in de  
bovenste laag als zoutbezwaar op het Hollands Diep terecht komt. Het waterver-  
lies is gelijk aan de totale hoeveelheid water die gespuid moet worden om het  
grensvlak in de bufferput op een bepaald niveau te handhaven. Dit is direkt  
afhankelijk van de verschillende vormen van menging.

Buiten de voorhaven speelt de scheepvaart verder geen rol, maar levert wel de  
menging door wind een extra bijdrage tot het zoutbezwaar.

Hoewel de verschillende processen moeilijk te scheiden zijn is voor een af-  
schatting van de orden van grootte van de verschillende componenten gebruik  
gemaakt van de volgende benadering:

- in een tweedimensionaal model van één schutkolk en een gedeelte van de hel-  
ling naar de bufferput toe is experimenteel bepaald hoe groot de menging is  
door de uitwisseling, de luchtbellenschermen, de stroming op de helling en  
is de vorm van de zoutvertikaal bepaald. Dit model diende ook ter optimali-  
sering van geometrie en grensvlakdiepte.
- met het resultaat van het hellingonderzoek als uitgangspunt is experimen-  
teel de additionele menging door scheepvaart bepaald. Deze geeft wel extra  
zoutbezwaar, maar vrijwel geen bijdrage tot het waterverlies.
- op basis van het eerstgenoemde resultaat is door berekening een schatting



gemaakt van het zoutbezwaar door wind-entrainment.

### 1.5 Samenvatting en konklusies

In een modelonderzoek in de getijgoot is de respons van het systeem Zijpe-Hellegatsdam op het spuiproces bij de inlaatsluis gemeten. De resultaten van dit onderzoek, in de vorm van een getij- en profielgemiddeld  $Cl^-$  gehalte op een raai, ca. 3 km zuidelijk van de schutsluizen, is vertaald naar een rest-zoutbezwaar. Hierbij werd de terugvoer van zout in de spuistroom in de berekening betrokken.

In tabel X wordt een overzicht gegeven van de spuidebieten (= waterverliezen) en de in de evenwichtssituatie optredende rest-zoutbezwaren, die daarbij horen. Een indruk van de invloed van de reaktietijd van het systeem wordt gegeven in figuur 25, waarin de rest-zoutbelasting voor een fiktief spuiprogramma is uitgerekend. Aangezien het niet mogelijk was in het onderzoek de reaktietijd bij stijgend spuidebiet te bepalen, is de berekening uitgevoerd voor twee aannemen hieromtrent:

- reaktietijd gelijk aan die bij afname debiet
- reaktietijd half zo groot als die bij afname debiet.

Deze onzekerheid heeft op de vergelijking van deze resultaten met die van de zoutbufferput geen invloed.

In een model van één schutsluis en een deel van de voorhaven boven de overgang naar de bufferput is het uitwisselingsproces bij de kolkdeuren en de uitstroming naar de zoutbufferput gereproduceerd zonder scheepvaart.

De resulterende evenwichts-zoutverdeling (zie bijv. fig. 29) in dit model vormde de basis voor de berekening van waterverlies en van één komponent van het rest-zoutbezwaar, namelijk de uitwisseling in de bovenlaag op de overgang naar het Hollands Diep met zoet Hollands Diep water. Aangezien dit laatste proces niet gereproduceerd kon worden in model, vormen deze berekeningen een orde-grootte afschatting, waarbij weliswaar een ongunstige benadering is gekozen. De invloed van het debiet door de rinkel-schuiven heeft naar verwachting weinig effect op de evenwichtszoutverdeling, als gevonden in dit model, en is daarom niet apart onderzocht. Tabel XIII geeft een overzicht van de resultaten van dit deel van het onderzoek voor een zoutbufferput en aansluitende overgangshelling als aangegeven in figuur 28, variant III. Uit de resultaten volgde zeer overtuigend de voorkeur voor deze variant, waarbij de afstand tussen sluis en zoutbufferput zo kort mogelijk is.

In een model van de overgangshelling zoals resulterende uit het bovengenoemde onderzoek, werd vervolgens de mengende invloed van schepen bepaald. Ook hier moet benadrukt worden, dat de resultaten een orde-grootte afschatting vormen door de vrij grove schematisatie van het onderzoek en de daarop gebaseerde berekeningen. De resultaten van dit scheepvaartonderzoek, getabelleerd in tabel XVI geven een zeer grote invloed van de duweenheid, hetgeen juist het schip is waarvoor de grootste onnauwkeurigheden zijn te verwachten.

Het totaal van rest-zoutbezwaar, waterverlies en zoetwaterbezwaar voor de oplossing zoutbufferput zijn in tabel XVII gegeven. Bij het rest-zoutbezwaar is de bijdrage van wind-entrainment tussen haakjes vermeld, in verband met de mogelijkheid om deze invloed vrijwel geheel te elimineren door de zoutbufferput te scheiden van het Hollands Diep. Het waterverlies is nog vermeerderd met het debiet door de schutsluizen ten gevolge van het verschil in middenstand aan weerszijden.

Op basis van de vergelijking van de tabellen X en XVII is de volgende konklusie te trekken:

- de oplossing zoutbufferput is in alle opzichten beter dan die van verzoefting van het Volkerak. Het zoutbezwaar is voor de zoutbufferput lager, dan bij de hoogste spuidebieten zonder bufferput gevonden wordt. Het waterverlies is zelfs bij achterwege laten van luchtbellenschermen aanzienlijk lager, evenals het zoetwaterbezwaar.

De resultaten van de verschillende facetten van de zoutbufferput leiden tot de volgende konklusies:

- de vergelijking van de invloed van uitwisselingsstroom en scheepvaart, toont aan dat deze laatste een belangrijke bijdrage levert. In een overzichtsmoedel van de zoutbufferput dient de scheepvaart daarom op realistische wijze gereproduceerd te worden
- hoewel een nauwkeuriger bepaling van rest-zoutbezwaar en waterverlies in een driedimensionaal model dient plaats te vinden (gezien de schematisaties gehanteerd in dit vooronderzoek) zijn deze resultaten alleszins aanleiding tot verdere uitwerking van het systeem zoutbufferput.
- het verdient aanbeveling de invloed van wind-entrainment te verminderen door geheel of gedeeltelijke afsluiting van de zoutbufferput van het Hollands Diep

- deze konstruktieve ingreep heeft bovendien een positieve invloed op het rest-zoutbezwaar in de voorhaven (al het zoete water wordt via de voorhaven aangetrokken), terwijl ook de golfaanval op het dichtheidsscherm er door zal verminderen.

Betreffende de detailresultaten van het hellingonderzoek kan tenslotte gekonkludeerd worden:

- een zeer korte overgangshelling verdient de voorkeur
- luchtbellenschermen geven op zichzelf een verkleining van het waterverlies  
Het totaal resultaat lijkt echter ook zonder luchtbellenschermen voldoende gunstig om deze zoutbestrijdingsmaatregel achterwege te kunnen laten.

## 2 Gegevens en randvoorwaarden

### 2.1 De sluizen en het schutbedrijf

In figuur 4 is één der duwvaartsluizen in verticale doorsnede en plattegrond gegeven. De drie sluiskolken zijn identiek, behalve dat de Westelijke kolk geen tussenhoofd heeft. Het remmingwerk, dat aangegeven staat op de situatie in figuur 1, bestaat uit stalen palen  $\emptyset$  1200, waartussen drijflichamen zijn bevestigd, die tot een diepte NAP - 2,5 m reiken. Figuur 5 geeft een plattegrond en een langsdoorsnede van de jachtensluis. Alle sluizen zijn voorzien van puntdeuren, die bij opening wegvallen in deurkassen in de sluiswand (N.B. de schaal voor lengte- en breedteafmetingen is verschillend op de fig. 4 en 5).

In tabel I wordt een overzicht gegeven van de schuttingen bij de Volkeraksluizen in de afgelopen jaren, verdeeld over schuttingen met de hele kolk en een halve kolk. In deze zelfde tabel is ook de prognose opgenomen, die RWS gemaakt heeft voor de komende jaren. De prognose van 1976 was gebaseerd op de gegevens van 9 maanden. Voor de daarop volgende jaren was de prognose gebaseerd op de volgende gegevens en verwachtingen:

- derde schutsluis in gebruik in januari 1977
- jachtensluis in gebruik in juni 1977, gerekend als schuttingen halve kolk
- Oostsluis in het algemeen voor de opvaart (éénrichting schutten)
- Westsluis in het algemeen voor de afvaart
- Middensluis voor het opvangen van aanbodspieken, schutten met halve kolk bij gering aanbod Hollands Diep zijde.

Zoals uit de prognose blijkt wordt geen toename in het aanbod verwacht. De getallen geven schuttingen in één richting, lege omzettingen zijn niet begrepen in de getallen. Deze worden voor de combinatie van één- en tweerichting schutten geschat op 15% van het aantal schuttingen.

Een eenheidsschutcyclus wordt gedefinieerd als een volledige cyclus van open en afvaart met de gehele kolk van één der duwvaartsluizen, waarbij het schutten met deelkolken of de jachtensluis gerekend wordt naar rato de verhouding der netto-inhoud ten opzichte van een gehele kolk. Het aantal eenheidsschutcycli per dag wordt dan:

$$n = \frac{(15.000 + \frac{1}{2} \cdot 9000) \cdot 1,15}{2 \times 365} \sim 31.$$

Wat betreft de verdeling hiervan over het etmaal is uitgegaan van 5 eenheids-

schutcycli gedurende de nacht (van 23 tot 6 uur) en de rest gelijkmatig verspreid over de dag.

## 2.2 De scheepvaart

Het konstant blijven van het aantal omzettingen in de komende jaren is gebaseerd op een gelijkblijvend scheepsaanbod.

Voor een schatting van het aantal schepen, dat in de verschillende categorieën de sluisen passeert is gebruik gemaakt van de gegevens van 1974, weergegeven in tabel II. Aangezien voor het onderzoek gebruik werd gemaakt van drie hoofdgroepen, weten

- grote jachten
- grote motorschepen (Rijn-Herne Kanaalschip)
- Europa II duweenheid met 4 bakken

zijn ten behoeve van verdere interpretatie der modelresultaten de prototypegegevens zo goed mogelijk hierin gegroepeerd:

- vissersvaartuigen + jachten + een deel overige vaart : 20.000
- motorschepen + sleepboten incl. sleepschepen : 130.000
- duweenheden : 2.500.

Dit laatste getal is lager dan het aantal duwboten en afgeleid van het aantal duwbakken. Kennelijk passeren veel duwboten de sluisen met minder dan 4 bakken. De stijging in het aantal duwboten ten opzichte van motorschepen is significant en wijst op een mogelijke herverdeling tussen deze twee categorieën bij gelijkblijvend aantal schuttingen. Hiermee is geen rekening gehouden.

Wel is het (geringe) aantal zeeschepen meegerekend in deze categorie.

De afmetingen van een schip uit elk der drie hoofdgroepen zijn gegeven in figuur 6, tezamen met gegevens betreffende schroefdiameter en spoed.

De snelheid der schepen boven het overgangsstuk van sluisen naar bufferput zal afhangen van de te kiezen lengte hiervan, de scheepsvermogens en het versnellings-respektievelijk vertraginggedrag van uit-en invarende schepen. Uitvarende schepen hebben in het algemeen hogere snelheden dan invarende schepen, zoals ook blijkt uit een prototypemeting van scheepsmanoeuvres bij de Volkeraksluisen door middel van luchtfoto's. Op basis van resultaten van dit onderzoek en door berekening van de snelheden op beperkt water uit de motorvermogens is de in tabel III gegeven snelheidstabel samengesteld. Hierbij wordt met "normaal" een overschrijdingspercentage van 20% geschat, "extreem" zijn



de snelheden, die niet overschreden zullen worden (maximaal mogelijk). Hoewel voor verdere interpretatie van meetresultaten de lage en normale snelheid in aanmerking zullen komen, is deze extreme snelheid aangegeven om na te kunnen gaan wat het verband is tussen snelheid en optredend rest-zoutbezwaar.

### 2.3 De zouttoestand op het Volkerak en het Hollands Diep

De zoutconcentraties op het Hollands Diep worden beïnvloed door de afvoeren van Waal en Maas en de zoutbelasting door de Volkeraksluizen. Op het Volkerak worden de concentraties beïnvloedt door spuidebieten van de sluizen en de Brabantse riviertjes en door de getijbeweging. Aangezien het in de onderhavige studie gaat om gemiddelde waarden van zoutbezwaar en zoetwaterverlies is zowel in het modelonderzoek als in de verdere interpretatie gebruik gemaakt van getijgemiddelde  $\text{Cl}^-$  gehalten.

Een voorbeeld van de relatie tussen bovenafvoer, toename in  $\text{Cl}^-$  gehalte en zoutbezwaar door de schutsluizen, levert figuur 7 voor 1974.

Grotere onzekerheid bestaat er over de relatie tussen spuidebiet en  $\text{Cl}^-$  gehalten op het Volkerak. Weliswaar zijn er veel metingen in prototype uitgevoerd, een probleem blijft echter de vaststelling van het spuidebiet in de periode voorafgaande aan de meting. Voor het Zijpe, waar de benedenrand was gekozen van het getijmodel, worden de resultaten van de prototypemetingen weergegeven in figuur 8. Extrapolatie ervan tot waarden van het spuidebiet, als onderzocht in het model (maximaal  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ ) levert een serie getijgemiddelde  $\text{Cl}^-$  gehalten, die slechts een zeer grove schatting geven van de benodigde randvoorwaarden. In het onderdeel zelf is getracht door middel van gevoeligheidsproeven de invloed hiervan op de modelresultaten te bepalen (zie par. 3).

### 2.4 Het uitwisselingsproces bij de sluizen

Ten behoeve van verdere interpretatie van de resultaten van het getijgootonderzoek stonden de resultaten van prototypemetingen in de schutsluizen zelf ter beschikking. De metingen, uitgevoerd in 1974 door RWS, geven een relatie tussen het gemiddelde zouttransport door de sluizen als functie van de gemeten  $\text{Cl}^-$  gehalten in de Noordelijke en de Zuidelijke voorhaven [1]. Het zouttransport is gedefinieerd als:

$$Z = n.V.x.\Delta c \quad (\text{kg Cl}^-/\text{s})$$

waarin:  $n$  = aantal eenheidsschutcycli per tijdseenheid

$V$  = kolkvolume

$x$  = uitwisselingskoëfficiënt

$\Delta c$  = concentratieverschil tussen Rak Noord en Rak Zuid.

Aangezien de interpretatie van de modelresultaten berustte op concentraties op respektievelijk meetpunt 1A (zie fig. 12) en het Hollands Diep werd de uit de prototypemeting volgende koëfficiënt  $x$  omgerekend naar deze waarden. In tabel IV zijn de voor de berekening gebruikte waarden voor  $x$  gegeven, naast de oorspronkelijke. De uitwisselingskoëfficiënt bij toepassing van luchtbellenschermen is aanzienlijk lager, dat die zonder luchtbellenschermen, zoals blijkt uit deze tabel. De interpretatie van de getijgootproeven is er dan ook op gebaseerd dat de luchtballen in gebruik blijven bij deze methode. Bij toepassing van de zoutbufferput wordt het nut van de luchtbellenschermen echter verminderd door de extra menging, die ze teweeg brengen. In paragraaf 4 wordt hier verder op ingegaan in verband met modelproeven, hier wordt volstaan met het geven van enkele prototypegegevens bij de Volkeraksluizen, die verband houden met het effect van luchtbellenschermen: de vraag is of de concentratie in de uitwisselingsstroom in prototype merkbaar beïnvloed worden door de luchtbellenschermen.

De volgende prototypemetingen bij de Volkeraksluizen zijn beschikbaar voor beoordeling van het eventuele effect van luchtbellenschermen in prototype:

- a. 17 juli 1969, getij op Haringvliet, geen luchtbellenschermen, zoutmeting in drie vertikalen in N.- en Z.-voorhaven (zie fig. 9)
- b. 13 mei - 1 juli 1971, Haringvliet afgesloten, overgang periode zonder zoutbestrijding naar periode met intensieve zoutbestrijding o.a. door middel van luchtbellenschermen.  
Zoutgehalten in drie punten in de vertikalen ter plaatse van de beëindiging van de remmingwerken in N.- en Z.-voorhaven als uurgemiddelden (zie fig. 10)
- c. 13, 16 en 17 september 1976, luchtballen gedurende de eerste twee dagen wel en gedurende de derde dag niet in werking. Zoutmeting aan de bodem bij de beëindiging van het remmingwerk in de N.-voorhaven (zie fig. 11).

Getij: Gedurende de eerste meting was er sprake van een laag  $Cl^-$  gehalte op het Noordelijk Bekken ten gevolge van hoge Rijnafvoer. Het verval over de sluis was gering, waardoor geen duidelijke invloed merkbaar is van het Volkerak getij op de  $Cl^-$  gehalten in de Noordelijke voorhaven.

Bij de metingen b. en c. is dit wel het geval waarbij de variatie in het zoutgehalte een periodiek karakter krijgt met de periode van het getij en een faseverschil ten opzichte van de vertikale getijbeweging van 1 à 2 uur (meting b.) tot 2½ - 3 uur (meting c.).

Deze invloed is deels een gevolg van de schuttschijf, die geheel op het Hollands Diep terecht komt in de vloedfase (Volkerak) en deels van de variatie in het  $\text{Cl}^-$  gehalte op het Volkerak.

Luchtbellenschermen: De invloed van luchtbellenschermen op de  $\text{Cl}^-$  gehalten in de voorhaven komt zeer duidelijk naar voren uit meting b. (RWS Deltadienst nr. 71.992). Na volledige ingebruikname zijn de  $\text{Cl}^-$  waarden in  $\text{N}_3$  tot 50% gereduceerd, de piekwaarden (vloed) van 4000 mg/l → 2000 mg/l en de minima (eb) van 500 mg/l → 250 mg/l. Door de aard van de gegevens is echter geen correlatie te leggen tussen  $\text{Cl}^-$  gehalte in de uitwisselingsstroom en het functioneren van de schermen.

De meting van 1976 geeft een zeer vage correlatie tussen  $\text{Cl}^-$  gehalte en het open staan van de N.-deuren van Oost- of West sluis. Juist doordat er nu twee sluisen in gebruik zijn is er echter nauwelijks iets van te zeggen. Vergelijking van de momentane  $\text{Cl}^-$  gehalten met en zonder luchtbellenschermen geeft geen significante verschillen. Wel neemt het gemiddelde  $\text{Cl}^-$  gehalte op 17/9 sneller toe dan op de twee andere meetdagen. Waarschijnlijk is in enkele uren geen evenwichtstoestand bereikt, gezien het feit dat de toename slechts 20 à 25% bedraagt.

Resumerend kan naar aanleiding van de prototypemetingen gesteld worden:

- door de werking van de luchtbellenschermen neemt het gemiddelde  $\text{Cl}^-$  gehalte in de voorhaven af met 50%. Aangezien de uitwisseling over het sluisencomplex afneemt met meer dan 60% is deze reductie daardoor al ruimschoots verklaard.
- voorzover uit de meting van 1976 momentane  $\text{Cl}^-$  gehalten in de uitwisselingsstroom zijn te herkennen zijn er geen significante verschillen ten gevolge van de werking van de luchtbellenschermen.

### 3 Zoutbestrijding door spuien

#### 3.1 Korte beschrijving van de getijgoot

Het onderzoek is uitgevoerd in de getijgoot (fig. 13). Deze goot heeft een lengte van 101,5 m, een breedte van 0,67 m en een diepte van 0,50 m. De bodem van de goot is horizontaal. De goot is aan het benedenstroomse einde verbonden met een zeebassin van  $6 \times 8 \times 1,5 \text{ m}^3$ . In het zeebassin kan door middel van een overstortende, regelbare klep een verticale getijbeweging verkregen worden. In het bassin bevindt zich zoutwater, waarvan de dichtheid door middel van injectie van pekewater op een gewenste waarde kan worden ingesteld. Met behulp van een op dichtheid controlerend regelmechanisme wordt de hoeveelheid geïnjecteerd pekewater zodanig geregeld, dat de dichtheid van het water in het zeebassin gedurende een proef niet verandert.

Op ongeveer 64 m vanaf het zeebassin is de goot over  $180^\circ$  omgebogen.

Het bovenstroomse einde van de goot werd bij de proeven gevormd door een in de goot geplaatst schot, waar overheen een in te stellen zoetwaterdebiet werd toegevoerd (overstort).

De getijgoot is zodanig ingericht (gladde wanden en voldoende breed), dat een tweedimensionale stroming kan worden ingesteld.

Om de volgens de schaalregels benodigde extra weerstand te verkrijgen zijn verticale vierkante messingstaafjes ( $5 \times 5 \text{ mm}^2$ ) toegepast. De staafjes reikten tot boven de waterspiegel.

#### 3.2 Geometrische schematisatie en gekozen schalen

Het onderzoek is uitgevoerd volgens schematisatie II uit rapport M 896-XXV, "Onderzoek naar de zouttoestand bij de Volkeraksluizen" (zie fig. 12) [2]. Deze schematisatie houdt in, dat het traject vanaf Zijpe tot Hellegat geschematiseerd wordt tot een prismatisch rechthoekige geul met een diepte van 6 m (bij benadering gemiddelde diepte) en met een breedte van 1500 m (bij benadering gemiddelde breedte). De lengte van het traject is circa 23,5 km.

Voor de schalen zijn dezelfde waarden gekozen als in rapport M 896-XXV. Deze zijn:

lengteschaal :  $n_l = 800$

hoogteschaal :  $n_h = 40$

breedteschaal :  $n_b = 2240$

$$\begin{aligned} \text{snelheidsschaal: } n_u &= (n_h)^{\frac{1}{2}} = 6,32 \\ \text{tijdschaal} &: n_t = n_l \cdot n_h^{-\frac{1}{2}} = 125,65 \\ \text{schaal voor de ruwheid } C_q. \text{ Chézy-waarde: } n_C &= \sqrt{n_l \cdot n_h^{-1}} = 4,47 \\ \text{debietschaal} &: n_Q = n_u \cdot n_b \cdot n_h = 566.272 \\ \text{schaal voor de dichtheid respectievelijk het dichtheidsverschil:} \\ n_\rho &= n_{\Delta\rho} = 1. \end{aligned}$$

In tabel V zijn de gegevens van de uitgevoerde proeven in model en prototype-maten weergegeven.

### 3.3 Meetopstelling

In figuur 14 is het bemonsteringsschema bij de toegepaste schematisatie weergegeven.

Hierin zijn acht meetpunten aangegeven op de plaatsen van de wavo's (waterstandsvolgers) in de getijgoot.

Deze meetpunten hebben een onderlinge afstand van  $\Delta x = 3,656$  m. Meetpunt 0 bevindt zich op een afstand van 1 m van de zeerand en 2,656 m van meetpunt 1. Het schot aan de bovenstroomse zijde van de getijgoot was direkt achter meetpunt 8 geplaatst. Hierdoor werd de totale lengte van de goot 29,5 m.

In al de meetpunten werden de waterstand en de geleidbaarheid, welke een maat is voor de dichtheid, gemeten. De geleidbaarheid werd gemeten op zes posities in de vertikaal in de as van de goot op afstand  $\Delta y = \frac{1}{7} H = 2,14$  cm van elkaar. Hierin is H de middenstand (= 15 cm) ten opzichte van de gootbodem. De waterstand werd gemeten met acht wavo's.

De geleidbaarheid werd gemeten met twee meetwagens, die op rails boven de goot verrijdbaar zijn. Op iedere wagen bevinden zich drie vazo's (vaste zoutopnemers) voor het meten van de geleidbaarheid (zie fig. 15).

Er werd een serie proeven met een kontinuu spuidebiet en een serie met een diskontinuu spuidebiet uitgevoerd (zie par. 3.4). Het diskontinue spuidebiet werd verkregen, door tijdens vloed niet te spuien en tijdens eb met een tweemaal zo groot debiet te spuien. Dit werd geregeld met automatische afsluiters voorzien van een tijdklok. Het kontinue spuidebiet werd ingesteld met een V-stuw, het diskontinue door middel van een Rotameter.



### 3.4 Proevenprogramma

In tabel VI is het proevenprogramma weergegeven.

De serie proeven met debieten van 200 , 150, 100, 60 en 30 m<sup>3</sup>/s is als volgt ontstaan. Het debiet van 30 m<sup>3</sup>/s komt goed overeen met het huidige, in het prototype optredende, debiet. De debieten van 200 en 100 m<sup>3</sup>/s zijn genomen, daar de resultaten dan te vergelijken zijn met het rapport M 896-XXV, waarin dezelfde debieten worden gehanteerd. Daar de opdrachtgever het debiet van 200 m<sup>3</sup>/s als spuidebiet wel erg hoog achtte is het debiet van 150 m<sup>3</sup>/s, dat reëler is, tussengevoegd. Het debiet van 60 m<sup>3</sup>/s tenslotte is er bijgevoegd, om de stapgrootte van 100 naar 30 m<sup>3</sup>/s te verkleinen. De proeven werden als serie uitgevoerd, om de reaktietijden bij de overgangen van de diverse debieten te kunnen bepalen. Hierbij werd steeds de reductie in het spuidebiet aangebracht, wanneer voor het ingestelde debiet de toestand stationair was geworden.

De proeven T 530 en T 531 zijn uitgevoerd als referentieproeven, om te bepalen of er ten gevolge van het continue of diskontinue spuidebiet een significant verschil in de dichtheidsverdeling zou ontstaan. Het diskontinue spuidebiet stemt beter met de werkelijkheid overeen, maar bij een continue spuidebiet is de proefopstelling eenvoudiger en de reproduceerbaarheid van de proeven beter.

De proeven T 530 en T 531 werden uitgevoerd met een spuidebiet van 100 m<sup>3</sup>/s. Aan de hand van de eventuele verschillen in de dichtheden op meetpunt 7 zou dan beslist worden, of de serie (200 tot en met 30 m<sup>3</sup>/s) met een continu dan wel met een diskontinu spuidebiet uitgevoerd moest worden. Er bestond wel enig verschil tussen de resultaten van proef T 530 en T 531, maar er bestond twijfel over de juiste randinstelling bij proef T 531. Het diskontinue spuidebiet werd hier namelijk met de hand geregeld.

Daarom werd besloten, om eerst de hele serie (200 tot en met 30 m<sup>3</sup>/s) met een continu spuidebiet uit te voeren en daarna de serie te herhalen met een diskontinu spuidebiet, waarvoor tijdens het uitvoeren van de eerste serie een opstelling met een tijd klok werd aangebracht (T 539 t/m T 543).

Na de continue serie zijn de gevoeligheidsproeven T 537 en T 538 uitgevoerd. Deze proeven zijn gedaan om de gevoeligheid van het in te stellen dichtheidsverschil tussen de zee en het spuidebiet af te schatten.

Beide proeven werden uitgevoerd met een continu spuidebiet van  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Bij proef T 537 werd een dichtheidsverschil  $\rho_{\text{zee}} - \rho_{\text{spui}}$  ingesteld, dat ongeveer  $1,5 \text{ kg/m}^3$  kleiner was ten opzichte van het verschil bij T 530, terwijl bij T 538 dit verschil ongeveer  $1,5 \text{ kg/m}^3$  groter was ten opzichte van T 530. Op deze manier kon de invloed van een verandering in  $\rho_{\text{zee}} - \rho_{\text{spui}}$  op de zouttoestand ter plaatse van meetpunt 7 worden nagegaan.

De in te stellen dichtheidsverschillen tussen het zeebassin en het spuidebiet zijn evenals het getijverschil op het Zijpe afgeleid uit natuurmetingen verricht door Rijkswaterstaat (zie par. 2).

De chloridegehalten van de natuurmetingen zijn met behulp van Knudsen, "Hydrografische tables", 1901, omgerekend tot dichtheden [7].

### 3.5 Meetresultaten

Het doel van de metingen is een basis te verschaffen voor de berekening van het rest-zoutbezwaar op het Hollands Diep/Haringvliet.

Hiervoor zijn twee factoren uit de metingen van belang, namelijk de dichtheid op meetpunt 7 en de reaktietijd bij de overgang naar een ander spuidebiet.

#### 3.5.1 Dichtheid op meetpunt 7

Als uitgangspunt voor de berekening van het rest-zoutbezwaar is gekozen de dichtheid op meetpunt 7, in prototype raai 1a, ongeveer 3 kilometer voor de Volkerakdam.

De reden, om niet uit te gaan van een raai dicht bij de dam is, dat er daar in prototype driedimensionale effecten zullen optreden ten gevolge van de schutsluizen en de spuisluis, waardoor een vergelijking met het tweedimensionale beeld van het model minder goed mogelijk zou zijn.

De meetresultaten van de proeven zijn weergegeven in tabel VII.

Het was moeilijk om door een juiste keuze van de dichtheid op de modelzee de vereiste dichtheid op meetpunt 0 te verkrijgen.

In de figuren 16 en 17 is het verschil aangegeven tussen de in te stellen dichtheidsverschillen volgens de natuurmetingen en de gerealiseerde dichtheidsverschillen op meetpunt 0.

Getracht is, door de dichtheid van het zeebassin iets te verhogen, het verschil in de opvolgende proeven te verkleinen.

In figuur 16 zijn tevens de waarden van de gevoeligheidsproeven T 537 en T 538 uitgezet in vergelijking met die van proef T 530.

De getijgemiddelde dichtheden  $\bar{\rho}$  op meetpunt 7 zijn uitgezet in de figuren 18 en 19. (In figuur 19 zijn de lijnen uitgezet voor een kontinu zowel als voor een diskontinu spuidebiet.) De waarden voor  $\bar{\rho}$  zijn de gemiddelden van 6 punten in de vertikaal op 25 tijdstippen in een getijperiode.

Door deze 25 waarden is dan een lijn te trekken, die het verloop gedurende het getij van de dichtheid, gemiddeld over de vertikaal, weergeeft. Een voorbeeld hiervan is gegeven in figuur 20, voor meetpunt 0 en meetpunt 7. Tevens is de gemiddelde waarde van het dichtheidsverschil over het getij aangegeven. In figuur 18 zijn ook de waarden van de dichtheidsverschillen op meetpunt 7 bij de gevoeligheidsproeven T 537 en T 538 uitgezet.

Hieruit blijkt dat het verschil tussen deze twee proeven, dat op meetpunt 0  $3,2 \text{ kg/m}^3$  bedroeg (zie fig. 16), op meetpunt 7 afgenomen is tot  $2,3 \text{ kg/m}^3$ .

Dit is een afname van ongeveer 30%.

Uit figuur 19 blijkt, dat de verschillen tussen de waarden voor het dichtheidsverschil op meetpunt 7 bij kontinu en diskontinu spuidebiet zeer gering zijn ( $< 0,3 \text{ kg/m}^3$ ).

De verschillen zijn niet systematisch; procentueel en absoluut is het verschil tussen kontinu en diskontinu spuien het grootst bij  $Q_s = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Uit de figuur kan gekonkludeerd worden, dat het voor de getijgemiddelde dichtheden op meetpunt 7 praktisch geen verschil maakt of er kontinu gespuid wordt of diskontinu (volgens  $Q_s = 2Q$  tijdens  $\frac{1}{2}T$  (eb) en  $Q_s = 0$  tijdens  $\frac{1}{2}T$  (vloed)).

Voor de lage spuidebieten ( $20-60 \text{ m}^3/\text{s}$ ) waren gegevens uit het prototype vorhanden op een meetpunt in de raai overeenkomend met meetpunt 7 in dit onderzoek. Deze gegevens zijn in figuur 18 aangegeven, waarbij het uitwisselingsdebiet bij de sluizen niet in het spuidebiet is meegerekend.

De redenen, dat deze waarden niet zonder meer worden gebruikt voor verdere berekening of voor extrapolatie naar hogere spuidebieten zijn de volgende:

- als gevolg van de opbouw van het spuidebiet uit diverse componenten is het spuidebiet over het traject Volkerak-Zijpe niet konstant, met andere woorden er treedt nooit een stationaire toestand op
- de bijdrage van de Brabantse riviertjes ( $0-10 \text{ m}^3/\text{s}$ ) is niet te verwaarlozen ten opzichte van het spuidebiet door de sluizen, maar zal een geheel ander effect hebben op het zoutgehalte in meetpunt 7, doordat de riviertjes stroomafwaarts van dit punt uitmonden
- de zoutmetingen werden gedaan in een 10-tal vertikalen in de diepste geul,

waardoor het gemiddelde der meting waarschijnlijk groter is dan het gemiddelde over de dwarsdoorsnede (zoals uit de modelproeven volgt)

- de uitvoering van een groot deel der metingen (een 60-tal) werd gedaan door het traject in ca. 4 à 5 uur in beide richtingen te bevaren, waardoor de metingen op willekeurige tijdstippen in het getij gerealiseerd werden. De spreiding in de resultaten is dan ook groot.

De onzekerheid, die hierdoor aan de meetwaarden kleeft, geeft een betrouwbaarheidsinterval van  $\pm 4 \text{ kg/m}^3$  (zie fig. 18).

Echter ook de modelmetingen hebben hun nauwkeurigheidsbeperkingen, door de gekozen schematisatie, de nauwkeurigheid in de metingen en de randinstelling. In rapport M 896-XXV is een systematische variatie van de drie belangrijkste parameters uitgevoerd: het getijverschil, het dichtheidsverschil tussen beide randen en de grootte van het spuidebiet.

Gebruikmakend van deze resultaten blijkt dat in het ongunstigste geval (alle afwijkingen naar één kant) de variatie rond de gevonden resultaten in dit onderzoek  $\pm 1 \text{ kg/m}^3$  kan bedragen. Ook dit nauwkeurighedsinterval is aangegeven in figuur 18.

Op basis van beide beschouwingen werd besloten de verdere berekeningen te baseren op de modelresultaten, waarbij de maximale afwijking van  $\pm 1 \text{ kg/m}^3$  naar boven als veiligheidsmarge is aangehouden. Deze lijn is uitgezet in figuur 18.

### 3.5.2 Reaktietijd

De reaktietijd is van belang voor de berekening van het rest-zoutbezwaar, daar uit de grootte van de reaktietijd, bij de overgang naar een ander spuidebiet, gekonkludeerd kan worden of het zin heeft om gedurende korte tijd met een groot debiet te spuien en of het ernstige gevolgen heeft als er gedurende korte tijd met een klein debiet gespuid wordt.

De reaktietijd werd bepaald uit het inspeelgedrag van de proeven.

Voordat er bij iedere proef gemeten kon worden moest er ingespeeld worden. Dat wil zeggen, dat er na verandering van het spuidebiet en de bijbehorende dichtheid van het zeebassin een zekere tijd verliep, voordat het dichtheidsverloop over het getij konstant bleef.

De aanpassing van de zeedichtheid bij verandering van spuidebiet werd in een aantal stappen verwezenlijkt.

Het was tijdens de proeven moeilijk vast te stellen of er werkelijk voor 100% ingespeeld was, daar de veranderingen per getij op het laatst nauwelijks

waarneembaar waren. Uit de achteraf verkregen automatische gegevensverwerking bleek toch dat iedere proef voor minimaal 90 à 95% ingespeeld was. Een voorbeeld van dit inspeelgedrag is gegeven in figuur 21. Hierin is uitgezet het inspeelgedrag bij hoog en laag water op de meetpunten 0 en 7.

De toestand op meetpunt 0 was sneller ingespeeld dan die op meetpunt 7.

In figuur 22 is de procentuele reductie van het spuidebiet uitgezet tegen de gemeten inspeeltijd voor 50, 80, 90 en 100% inspelings.

De vier punten per lijn geven de inspeeltijden aan bij een reductie van respectievelijk 25% ( $200 \text{ m}^3/\text{s}$  naar  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ),  $33 \frac{1}{3} \%$  ( $150 \text{ m}^3/\text{s}$  naar  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 40% ( $100 \text{ m}^3/\text{s}$  naar  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ ) en 50% ( $60 \text{ m}^3/\text{s}$  naar  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

De vier lijnen zijn tot een reductie van het spuidebiet van 50% goed te benaderen door een rechte lijn.

Voor een afschatting van de inspeeltijd bij een verdere reductie van het spuidebiet zijn de lijnen lineair geëxtrapoleerd.

### 3.6 Berekening rest-zoutbezwaar

Voor een berekening van het rest-zoutbezwaar moet het zoutbezwaar door de schutsluizen uitgerekend worden op basis van de resultaten van het getijgoot-onderzoek. Dit moet vervolgens verminderd worden met het teruggaande transport in het spuidebiet.

In dit hoofdstuk is allereerst de opzet van de berekening gegeven, waarna een referentieberekening uitgevoerd is, waarbij de invloed van diverse factoren op de grootte van het rest-zoutbezwaar bekeken is. Tot slot is een rekenvoorbeeld gegeven, waarvoor door Rijkswaterstaat een fictief spuiprogramma met bijbehorende Bovenrijnafvoer geleverd is.

#### Berekeningsopzet

In figuur 23 is schematisch het Hollands Diep weergegeven, met daarin door middel van pijlen het zouttransport.

De zoutbalans voor dit gebied is:

$$Z - (Q_d - Q_s) c_1 - Q_s \cdot c_2 = 0.$$

Hierin is: Z = zoutbezwaar door de schutsluizen

$Q_d$  = doorspoeldebiet van het Hollands Diep

$Q_s$  = spuidebiet



$c_1$  = chloridegehalte van het Haringvliet ten opzichte van dat van de Bovenrijn, dus  $c_1 = c_h - c_{br}$   
( $c_h$  = chloridegehalte van het Haringvliet  
 $c_{br}$  = chloridegehalte op het Hollands Diep)  
 $c_2$  = chloridegehalte van het spuiwater ten opzichte van dat van de Bovenrijn, dus  $c_2 = c_s - c_{br}$  ( $c_s$  = chloridegehalte van het spuiwater).

Als er een rest-zoutbezwaar is, dan is dit gelijk aan het verschil tussen het zout, wat er door de schutsluizen in komt en het zout, wat er door de spuisluis weer uit gaat. Dus:  $Z_r = Z - Q_s \cdot c_2$ .

Uit de zoutbalans volgt, dat geldt:  $Z_r = (Q_d - Q_s) \cdot c_1$ .

In bovenstaande formules is:

$$Z = \frac{n \cdot V}{24 \cdot 3600} \cdot x \cdot \Delta c$$

Hierin is:  $n$  = het aantal eenheidsschutcycli per etmaal

$V$  = het kolkvolume van een hele schutkolk

$x$  = de uitwisselingscoëfficiënt (zie tabel IV)

$\Delta c$  = het verschil in chloridegehalte over het sluizencomplex (meetraai 1a - Hollands Diep).

$\Delta c$  is uit de proeven bepaald (zie fig. 18).

### Referentieberekening

Zoutbalans:  $Z_r = Z - Q_s \cdot c_2 = (Q_d - Q_s) \cdot c_1$

$$Z = \frac{n \cdot V}{24 \cdot 3600} \cdot x \cdot \Delta c$$

Hierin is:  $n = 31$

$V = 56.000 \text{ m}^3$

$x = 0,14$

$\Delta c = 8,4 \text{ kg/m}^3$ , bij  $Q_s = 30 \text{ m}^3/\text{s}$  (zie fig. 18).

Hieruit volgt:  $Z \sim 24 \text{ kg/s}$ .

Een redelijke aanname voor  $c_2$  is:  $c_2 = c_1$ .

Uit de vergelijking  $Z - Q_s \cdot c_2 = (Q_d - Q_s) \cdot c_1$  volgt dan voor  $c_2$ :  
 $c_2 = 0,118 \text{ kg/m}^3$ . (Hierbij is voor  $Q_d$   $200 \text{ m}^3/\text{s}$  aangenomen.)  
 $Z_r$  wordt nu:  $Z_r = Z - Q_s \cdot c_2 = 20 \text{ kg/s}$ .

Hierna is bekeken, wat de invloed is van een variatie in de factoren ( $n \cdot V$ ),  $x$ ,  $\Delta c$ ,  $Q_d$ ,  $Q_s$  en  $c_2$  op de grootte van  $Z_r$ . De resultaten van deze berekeningen zijn weergegeven in tabel VIII.

Hieruit is te zien, dat ( $n \cdot V$ ),  $x$  en  $\Delta c$  de grootste invloed hebben op de grootte van  $Z_r$ . Deze beïnvloeden namelijk direkt de hoogte van  $Z$  en  $c_2$ , dus een verdubbeling of halvering van deze factoren geeft ook een verdubbeling of halvering van het rest-zoutbezwaar  $Z_r$ .

De invloed van  $Q_d$ ,  $Q_s$  en  $c_2$  op de hoogte van  $Z_r$  is veel minder groot dan de invloed van ( $n \cdot V$ ),  $x$  en  $\Delta c$ .

#### Rest-zoutbezwaar voor een fiktief spuiprogramma

Tenslotte is het rest-zoutbezwaar berekend voor het fiktieve spuiprogramma zoals dat geleverd is door RWS (zie fig. 24).

De resultaten van de berekeningen zijn vermeld in tabel IX. Bij deze berekeningen zijn de parameters  $n \cdot V = 31 \cdot 56.000 \text{ m}^3/\text{etmaal}$  en  $x = 14\%$  (uitwisselingspercentage bij toepassing van een luchtbellenscherm) konstant gehouden.

De verschillende combinaties van de factoren  $Q_d$  en  $Q_s$  zijn bepaald uit figuur 24 na omrekening van  $Q_{\text{Bovenrijn-Lobith}}$  naar  $Q_d$  volgens gegevens uit de nota 45.002.02 van RWS, betreffende de waterbeweging op het Hollands Diep [8].  $\Delta c$  volgt uit figuur 18. Het verloop van het rest-zoutbezwaar gedurende een jaar bij het spuiprogramma van figuur 24 is aangegeven in figuur 25.

Dit verloop wordt ook bepaald door de reaktietijd bij de overgang van de diverse debieten naar een ander debiet.

Er zijn echter in model alleen inspeeltijden gemeten bij afname van het debiet. De reden hiervoor is, dat bij een afname van het debiet de bijbehorende dichtheid van het zeebassin wel gemakkelijk in te stellen is door middel van pekelinjectie, maar een afnemend zoutgehalte op de zeerand daarentegen moeilijk te verwezenlijken is.

In eerste instantie is daarom aangenomen, dat voor een gelijke afname c.q. toename van het spuidebiet dezelfde reaktietijd geldt. Mogelijk zal de reaktietijd voor de toestand op meetpunt 7 bij een toename van het spuidebiet echter korter zijn dan bij een afname van het spuidebiet.

Daarom is de berekening van het verloop van de hoogte van het rest-zoutbe-

zwaar ook uitgevoerd onder aanname dat de reaktietijd bij een toename van het spuidebiet de helft is van de reaktietijd bij een afname van het spuidebiet.

Deze reaktietijden zijn bepaald uit figuur 22.

Uit beide berekeningen volgt dat een korte periode van lage spuidebieten, orde 1 à 2 weken, te overbruggen is door de trage reactie van het systeem. Maar dan moet in de ervoor liggende periode een hoog spuidebiet zijn toegepast. Bij een geleidelijke reductie van het spuidebiet, zoals deze in de praktijk ook zal plaatsvinden ( waarop ook de uitvoering van de proeven was afgestemd) zijn hoge zoutbezwaren niet te vermijden.

Daarom is in tabel X een overzicht gegeven van de evenwichtswaarden van restzoutbezwaar, waterverlies en zoetwaterbezwaar voor deze methode van zoutbestrijding.

## 4 Zoutbestrijding door een zoutbufferput

### 4.1 Beschrijving van het systeem zoutbufferput

Figuur 3 geeft een schematische voorstelling van de processen die bij toepassing van een zoutbufferput een rol spelen.

Bij toepassing van een zoutbufferput vindt het uitwisselingsproces bij de schutsluizen plaats, zoals in de huidige toestand, al dan niet gereduceerd door toepassing van luchtbellenschermen. De zoute golf loopt aan de bodem de sluis uit, terwijl schepen in- of uitvaren. Een zekere mate van menging is inherent aan het uitwisselingsproces, toepassing van luchtbellenschermen verhoogt deze menging. De golf spreidt zich in breedterichting en plant zich voort over het hellende overgangsgedeelte naar de bufferput. Een geleidelijke afbuiging vindt plaats door de buitenste begrenzing van de helling. Enige overslag bij dit onderwatertalud geeft direkt zoutbezwaar en dient dus voorkomen te worden. Menging vindt plaats in het golffront en door entrainment van zoeter water op het grensvlak tussen de stromende onderlaag en het voorhavenwater. In de zoutbufferput verliest de golf amplitude en snelheid door de toename van diepte en breedte. Verdere menging in de golf is dan ook te verwaarlozen.

Het zoute water wordt uit de zoutbufferput onttrokken door tijdens eb op het Volkerak de uitlaatsluis te laten spuien, waarbij een dichtheidsscherm (een vertikale wand met een spleet op de bodem) voorkomt dat alleen zoet Hollands Diep water gespuid wordt. Ook tijdens dit selektief afzuigen uit de bufferput zullen de snelheden zo klein zijn, dat hierdoor geen extra menging optreedt. Wel zal dit gebeuren door stromingen ten gevolge van wind in de bovenlaag, zogenaamde wind-entrainment. Indien de bufferput in open verbinding staat met het Haringvliet zal dit tot het rest-zoutbezwaar gerekend moeten worden. Wanneer de dam om de bufferput heen echter boven het oppervlak komt, vormt de wind-entrainment vrijwel geen extra zoutbezwaar.

Gedurende de getijperiode zal het grensvlak in de bufferput een fluktuatie ondergaan ten gevolge van het diskontinue spuien. Het niveau, dat hiervoor gekozen wordt, heeft konsekventies voor zoutbezwaar en waterverlies. Immers een laag grensvlak betekent een lange weg voor de uitwisselingsstroom met veel menging, maar voorkomt dat in de voorhaven zelf permanent een zoute laag aanwezig is. Hierdoor zal de menging ten gevolge van scheepvaart in de voorhaven beperkt blijven tot de invloed van schepen op de uitwisselingsstroom zelf. Een hoog grensvlak geeft minder menging in de uitwisselingsstroom, maar biedt tevens meer kans op menging door de scheepvaart.

De in figuur 3 gegeven zouttransporten moeten gezien worden als gemiddelden over de tijd, in werkelijkheid is zowel het schut- als het spuiproces diskontinu.

De zoutvertikaal, die in het schema getekend is, dient ook gezien te worden als een gemiddelde over het getij. In de evenwichtstoestand zal deze gemiddelde vertikaal niet meer veranderen, wel kan hij verschillen van plaats tot plaats, vooral op de overgangshelling. Hier immers vindt éénzijdig een toevoer van "zoet" Hollands Diep water plaats, waardoor een toename van zoutconcentratie in de bovenlaag naar de sluizen toe valt te verwachten.

De  $Cl^-$  balans voor het systeem is als volgt:

$$Q_u \cdot c_o + Q_z \cdot c_{br} - Q_u \cdot \bar{c}_b - Q_v \cdot \bar{c}_p - Q_z \cdot \bar{c}_b = 0 .$$

Wanneer de  $Cl^-$  concentraties relatief ten opzichte van de Hollands Diep concentratie ( $c_{br}$ ) worden genomen wijzigt dit in:

$$Q_u \cdot c_o - Q_u \cdot \bar{c}_b - Q_v \cdot \bar{c}_p - Q_z \cdot \bar{c}_b = 0 .$$

De term  $Q_u \cdot \bar{c}_b$  kan impliciet verdiskonteerd worden in de definitie van de uitwisselingscoëfficiënt:

$$u_t = \frac{\bar{c}_{\text{voor}} - \bar{c}_{\text{na}}}{\bar{c}_{\text{voor}} - c_{\text{zoet}}} \times 100\%$$

waarbij met "voor" en "na" de situaties voor het openen en na het sluiten van de sluisdeuren bedoeld zijn.

Men krijgt dus:

$$n \cdot V \cdot u_t \cdot c_o = Q_v \cdot \bar{c}_p + Q_z \cdot \bar{c}_b$$

waarin  $n$  = aantal schutcycli per sek

$V$  = kolkvolume.

De laatste term zal veel kleiner zijn dan de eerste term in het rechter lid.

Bij benadering geldt dus:

$$Q_v = n.V.u_t \cdot \frac{c_o}{c_p} = n.V.u_t \cdot \bar{S}_p .$$

De grootte van  $Q_z$  zal afhangen van het evenwicht dat zich in de bovenlaag instelt en de aard van het uitwisselingsproces op de rand naar de voorhaven toe.

#### 4.2 Opzet van het onderzoek

Het zal duidelijk zijn, dat het uiterst complexe systeem, als beschreven in de vorige paragraaf, moeilijk te onderzoeken is in een tweedimensionaal model. Ook dit deel van het vooronderzoek droeg daarom slechts een verkennend karakter: doel was een afschatting te maken van de grootteorde der afzonderlijke componenten in het totale rest-zoutbezwaar en een vergelijking te maken met het systeem van verzoeting van het Volkerak. Als opzet werd daarvoor gekozen voor een splitsing van de invloeden van uitwisselingsstroom en scheepsbeweging door deze zaken los van elkaar te onderzoeken

- in een model van één sluiscolk en een deel van de voorhaven tot aan de beëindiging van de overgangshelling werd voor verschillende varianten van de overgangshelling de evenwichtssituatie ingesteld zonder scheepvaart en zonder de mogelijkheid tot uitwisseling in de bovenlaag ( $Q_z$ )
- in een model van een deel van de voorhaven boven de overgangshelling werd de menging door schepen op een verticale zoutverdeling, als resulterend uit de hiervoor genoemde proeven, vastgesteld.

In de praktijk leidt combinatie van uitwisselingsstroom en scheepvaart natuurlijk tot een ander evenwicht in de zoutverdeling en daarmee tot een andere waarde voor  $Z$ . In de interpretatie van het onderzoek zijn beide vormen van zoutbezwaar afzonderlijk geschat en vervolgens gesuperponeerd. De bijdrage van de schutgolf was daarbij het moeilijkst vast te stellen. Aangenomen is dat het in de bovenlaag opgemengde zout in prototype over de gehele breedte van de voorhaven uitzakt, waardoor de gemiddelde concentratie in de bovenlaag een faktor  $\frac{B_{\text{model}}}{B_{\text{proto}}}$  kleiner is, dan in model gemeten. Dit impliceert, dat de totale zoutinhoud in model en prototype gelijk is. In de evenwichtssituatie zal er aan de rand van de overgangshelling evenveel zout naar het Hollands Diep getransporteerd worden als door de schuttingen in de bovenlaag gebracht wordt. Dit proces zal in prototype waarschijnlijk een longitudinale gradiënt in de zoutverdeling boven de overgangshelling ten gevolge hebben, waardoor het op

basis van de modelgegevens erg moeilijk is om een uitwisselingsdebiet te berekenen. De aanname dat deze zoutinhoud omgezet wordt in de tijd die nodig is om het gehele volume in de bovenlaag te verversen, leidt tot een veilige schatting. In formule:

$$Z_1 = \frac{\bar{c}_b \cdot V_{\text{strook}}}{V_b / Q_v}$$

waarin  $\bar{c}_b$  = gemiddelde  $\text{Cl}^-$  gehalte bovenlaag in model  
 $V_{\text{strook}}$  = volume van de bovenlaag in model, omgerekend naar prototype-afmetingen  
 $V_b$  = volume bovenlaag in prototype.

De bijdrage van de scheepvaart tot het zoutbezwaar is bepaald op grond van de toename in gemiddelde concentratie door de scheepsbeweging. Ook hier is aangenomen dat deze toename gelijk zal zijn in model en prototype, qua zoutinhoud.

Het zoutbezwaar per scheepstype kan dan berekend worden met:

$$Z_2 = \sum_i \bar{\Delta c} \cdot V_{\text{strook}} \cdot n_i$$

waarin  $\bar{\Delta c}$  = de gemiddelde toename in  $\text{Cl}^-$  gehalte in de bovenlaag per scheepstype, gewogen naar snelheden  
 $V_{\text{strook}}$  = volume van de bovenlaag in model, omgerekend naar prototype-afmetingen  
 $n_i$  = aantal passages per sek. per scheepstype.

Tenslotte moet het totale zoutbezwaar in de voorhaven ( $Z_1 + Z_2$ ) vermeerderd worden met een extra komponent ten gevolge van wind-entrainment indien de bufferput niet gescheiden is van het Hollands Diep. (Deze dam heeft ook invloed op de grootte van  $Z_1$ , door verkleining van het oppervlak waardoor uitwisseling kan plaatsvinden.) Empirisch is vastgesteld, dat de verdieping van een grensvlak, door opmenging van het daar aanwezige zout in de bovenlaag, gekarakteriseerd wordt door de snelheid waarmee het proces plaatsvindt (zie fig. 26, [6]).

$$u_e = 0,026 \frac{\rho_a \cdot u_a^{*3}}{\Delta\rho \cdot g \cdot H_1}$$

waarin  $\rho_a$  = dichtheid lucht (= 1,3 kg/m<sup>3</sup>)

$u_a^*$  = schuifspanningssnelheid wind (= 0,045 W)

$H_1$  = diepte grensvlak

voor  $H_1 = 8,0$  m:

$$\therefore u_e = 3,8 \times 10^{-8} \frac{W^3}{\Delta\rho}$$

met  $W$  = windsnelheid.

Het waterverlies  $Q_v$  in prototype is op grond van het eerste model bepaald uit de gemeten zoutverdeling in de onderlaag in de evenwichtstoestand. Dus:

$$Q_v = n \cdot V \cdot u_t \cdot \bar{S}_p$$

waarbij  $\bar{S}_p = \frac{c_o}{c_p}$  uit model volgt.

Het zoetwaterbezwaar op het Volkerak volgt dan als

$$Q_{zb} = Q_v \left(1 - \frac{\bar{c}_p}{c_z}\right) + Q'_u \left(1 - \frac{\bar{c}_b}{c_z}\right)$$

waarin  $c_z$  = zoutconcentratie zeewater

$Q'_u$  = uitwisselingsdebiet, inclusief bijdrage schuttschijf.

### 4.3 Schaaloverwegingen en modellen

#### 4.3.1 Hellingonderzoek

De te reproduceren verschijnselen zijn in het kort samengevat: de uitwisseling in de sluis, de invloed van eventuele luchtbellenschermen, de stroming op de helling. Gekozen is voor een onvertrokken model, schaal 1:64, waarmee in ieder geval het uitwisselingsproces goed weergegeven wordt. De stroming op de hel-



ling blijft in model turbulent, maar de grensvlakschuifspanning zal relatief te groot zijn, waardoor de golfamplitude iets afneemt en er wellicht te weinig menging optreedt. Daar staat tegenover, dat een belangrijk deel van de menging in het golffront plaatsvindt en hier is de reproductie in model wel goed.

De overige schalen zijn gebaseerd op gelijkheid van het interne Froudegetal in model en prototype.

Samengevat:

$$\begin{aligned}n_L &= n_h = 64 \\n_v &= 8 \\n_T &= 8 \\n_\rho &= n_{\Delta\rho} = 1 \\n_Q &= 32768.\end{aligned}$$

Het modelluchtdebiet moet gekorrigeerd worden voor het feit dat de relatief te grote bellen een sterker meesleurend effect hebben en daardoor een sterker circulatiestroming doen ontstaan, dan op grond van de Froude schaalwet verwacht zou worden. Er is voor het bepalen van dit luchtdebiet gebruik gemaakt van vroeger onderzoek [3], waarbij als criterium gold, dat de reproductie van de stroming in de bovenlaag goed moet zijn:

$$n_{q_a} = 0,6 (n_h)^{3/2} = 310.$$

Een schematische voorstelling van het model is gegeven in figuur 27. De schutkolk was geometrisch gelijkvormig, met inbegrip van de deuren en drempels. De voorhaven was geschematiseerd tot een tweedimensionaal vertikaal profiel, bij de overgang naar de bufferput voorzien van een verdiepte bak. De geleidewerken waren in model weergegeven met verticale ronde staafjes. Het talud dat in prototype de helling afscheidt van de rest van de voorhaven was in model een verticale wand. Dit had effect op de amplitude van de teruggekaatste golf, maar gaf weinig extra menging.

De zoutvertikalen werden gemeten met geleidendheidsapparatuur. In de sluis werd de concentratie bepaald door middel van een vaste zoutopnemer (VAZO). Buiten de sluis legde een bewegende zoutopnemer (BEZO) de geleidendheidsvertikalen in de uitwisselingsstroom vast. Aan het einde van de helling werd een zoutvertikaal bepaald voor en na iedere schutcyclus door middel van een tweede BEZO, die echter tijdens de proef de functie kreeg om het ingestelde grensvlak te volgen (GREVO). Hierdoor kon de amplitude van de golf op het

grensvlak goed worden vastgesteld. De instelling van de zouttoestand in de sluis gebeurde door in een apart reservoir water van de gewenste dichtheid te maken en hiermee de kolk per schutcyclus geheel of half te vullen.

In dit laatste geval werd in de sluis een scherp grensvlak verkregen door het zoute water onder reeds in de sluis aanwezig zoetwater te brengen.

#### 4.3.2 Scheepvaartonderzoek

De schaaloverwegingen bij het scheepvaartonderzoek zijn geheel verschillend. In dit geval moet primair aandacht besteed worden aan reproductie van de waterbeweging rond het schip (spiegeldaling, retourstroomsnelheden) en de snelheid in de schroefstraal.

In een geometrisch gelijkvormig model wordt hieraan met een schaal voor lengte en diepte 1:40 nog redelijk voldaan. Voor alle drie gekozen scheepstypen was een modelschip in deze schaal ter beschikking. De goot, waarin het onderzoek uitgevoerd werd, was echter vooral voor de duweenheid veel te smal. Dit betekende dat modelscheepssnelheden volgens Froudeschaal overdreven waterbeweging zou geven. De oplossing, die hiervoor toegepast is, gaat uit van een juiste reproductie van de waterbeweging door reductie van de scheepssnelheden. Dit impliceert wel dat een zwakke schakel is geïntroduceerd, doordat de waterbeweging in prototype is uitgerekend op grond van de scheepssnelheden en de geometrie en vervolgens de modelsnelheid is uitgerekend op grond van de gewenste waterbeweging in model en de gootafmetingen. In het raam van de algemene opzet van dit vooronderzoek was dit echter acceptabel.

De snelheden in de schroefstraal (en daarmee de schroefdebieten) werden wel in model volgens Froudeschaal ingesteld.

Figuur 27 geeft een schematische voorstelling van de goot en de opstelling der meetinstrumenten.

Scheepsbewegingen werden in één richting uitgevoerd (richting Hollands Diep), waarbij het schip gesleept werd door middel van een kabel. De sleepsnelheid werd ingesteld met een variabele toerenmotor. Het toerental van de scheepsschroef werd ingesteld met een elektrische voeding en gemeten.

In het model was een zout-zoetgelaagdheid ingesteld, overeenkomstig de evenwichtstoestand in de proeven voor het hellingonderzoek. Voor en na een passage werd de zoutvertikaal gemeten met 2 BEZO's, verdeeld over de lengte van de overgangshelling. Tijdens een scheepspassage werd de beweging van het grensvlak geregistreerd door middel van een GREVO en die van het wateroppervlak met een waterstandsvolger (WAVO).

De beëindiging van de overgangshelling was ter plaatse van het onderwatertalud voorzien van een schuif. Dit was om modeltechnische redenen, enerzijds om het plotselinge afstoppen van het schip geen invloed te geven op de zoutbufferput, anderzijds om de uitwisselingsstroom naar het zoete deel van de goot tegen te houden.

Door de schuif alleen even vóór en direkt na de passage van een schip te heffen, was de werkelijke opmenging ten gevolge van de scheepspassages eenvoudig te bepalen.

#### 4.4 Hellingonderzoek, uitvoering en resultaten

In tabel XI is een overzicht gegeven van de uitgevoerde proeven. Het onderzoek werd gestart met een viertal proeven, waarbij uitsluitend de menging tijdens de uitwisseling en de invloed van luchtbellenschermen daarop van belang waren. Vervolgens werd het onderzoek voortgezet met een optimalisering van de overgangshelling, waarbij een aantal varianten (fig. 28) qua geometrie, maar ook wat betreft diepte van het grensvlak onderzocht werden. Voor beide fasen worden de proeven en de resultaten afzonderlijk beschreven.

##### 4.4.1 De invloed van luchtbellenschermen

De reductie van het uitwisselingsdebiet bij geopende deuren maakt luchtbellenschermen op zich een geslaagd middel tot zoutbestrijding. De verticale circulatie veroorzaakt echter ook meer menging tijdens de uitwisseling, waardoor in combinatie met een zoutbufferput de luchtbellenschermen veel van hun waarde verliezen. Dit heeft vooral betrekking op het totale waterverlies:

$$Q_v = n \cdot V \cdot u_t \cdot S_{tot}$$

waarin  $S_{tot} = S_u \times S_h$ , het produkt van de menging tijdens de uitwisseling ( $S_u$ ) en de verdere menging op het traject sluis-bufferput ( $S_h$ ). Aangezien deze laatste menging onafhankelijk is van het effect van luchtbellenschermen op de menging kan gesteld worden dat het totale waterverlies toch beperkt wordt zodra geldt

$$(u_t \cdot S_u)_{\text{met l.b.s.}} < (u_t \cdot S_u)_{\text{zonder l.b.s.}}$$

De eerste vier proeven werden uitgevoerd met een sluis, die exakt 40 min. prototijd open stond. Ingesteld werd een konstant luchtdebiet van  $1,75 \text{ m}^3/\text{m}/\text{m}'$ . De menging in de uitwisselingsstroom werd bepaald op grond van continue registraties van de zoutvertikaal buiten de direkte invloedssfeer van de luchtbellenschermen. De waarden in tabel XII volgen uit de gemiddelde concentraties in de onderlaag gedurende de periode van uitwisseling. (Het debiet neemt iets af in de tijd, waardoor de menging toeneemt.)

In tabel XII zijn ook de waarden voor de uitwisselingscoëfficiënt gegeven zoals deze in model na sluiting van de deur bepaald is. Deze waarden geven indirect een verifikatie van de effectiviteit van het ingestelde luchtdebiet. De uitwisselingscoëfficiënt kan berekend worden onder aanname dat het gedeelte onder de drempel (NAP - 6,25 tot NAP - 7,50 m) voor een bepaald percentage mede uitgewisseld wordt. Daarvoor is, mede op basis van gegevens uit prototype, 50% gekozen. De aldus gevonden waarden voor de uitwisselingscoëfficiënt  $u_t$  corresponderen goed met hetgeen op grond van theorie en prototypemetingen verwacht mag worden [4].

Uit tabel XII blijkt, dat zowel voor een homogeen zoute sluis, als voor een gelaagde begintoestand in de kolk het produkt  $S_u \times u_t$  afneemt door toepassing van luchtbellenschermen. De extra menging ten gevolge van luchtbellenschermen is minder dan de afname in uitwisselingsdebiet. Dit strookt met de resultaten der prototypemetingen (par. 2.4), waaruit geen duidelijke invloed van de luchtbellenschermen op de concentratie in de onderlaag naar voren kwam. Op grond van deze resultaten is besloten om de verdere proeven van dit hellingonderzoek met luchtbellenschermen uit te voeren. Hiermee werd bereikt dat de modelresultaten met betrekking tot zoutbezwaar aan de veilige kant zouden liggen. Of het inderdaad wenselijk zal zijn om luchtbellenschermen te handhaven in combinatie met een zoutbufferput hangt af van de vraag of de resulterende waterverliezen ook zonder luchtbellenschermen acceptabel zullen zijn.

#### 4.4.2 Resultaten hellingonderzoek

Hoewel op grond van de eerste vier proeven een indruk was verkregen van de totale menging op de helling, was het moeilijk een begintoestand voor de hellingproeven te bepalen. Daarom werd een blokvormig dichtheidsprofiel ingesteld met het grensvlak op het voor de proef karakteristieke niveau. Vervolgens werd een aantal malen achtereen dezelfde procedure herhaald:

- een schutkolk werd uitgewisseld, waarbij de golfbeweging op het grensvlak werd geregistreerd

- na sluiten van de sluisdeuren werd de uitwisselingscoëfficiënt bepaald en vervolgens de kolk opnieuw ingesteld op de juiste dichtheid(sverdeling)
- in de put werd voorzichtig aan de bodem onttrokken, terwijl aan het oppervlak even voorzichtig zoetwater werd bijgevuld, tot zowel grensvlak als oppervlak weer op niveau waren.

Na 5 à 10 schutcycli trad pas evenwicht op, d.w.z. dat opeenvolgende zoutvertikalen in de put identiek waren. Dit is in wezen een dynamisch evenwicht, aangezien de vertikalen in lengterichting nog uiteenliepen. Voor een bepaling van de totale menging in de onderlaag (met een beperkt aantal instrumenten) was het dan ook nodig om na bereiken van het dynamische evenwicht de zaak uit te laten zakken tot een statisch evenwicht was bereikt. In figuur 29 zijn als voorbeeld beide zoutvertikalen gegeven voor proef 17.

Waar de grens ligt tussen bovenlaag (= het gedeelte dat deel neemt aan uitwisseling naar het Hollands Diep) en onderlaag (= het gedeelte dat afgezogen wordt) is afhankelijk van de wijze waarop deze processen in prototype plaats zullen vinden. Een belangrijke faktor hierbij is echter de diepte van de bodemligging van het overige deel van de voorhaven. Deze ligt op ca. 6,50 - NAP. Rekening houdend met een zekere invloed onder dit niveau is de grens tussen boven- en onderlaag gedefinieerd op NAP - 7,50 m, ook voor de proeven met een "grensvlak" op NAP - 12,50 m. Zoals uit de figuur namelijk blijkt is er geen sprake van een duidelijk grensvlak. Wat in het oorspronkelijke meetprogramma dan ook werd aangeduid met een hoog respectievelijk laag grensvlak, resulteerde in de verdere interpretatie in een hoge respectievelijk een lage waarde van het  $Cl^-$  gehalte op NAP - 7,50 m.

De proeven 11 t/m 14 werden uitgevoerd met een langdurig openstaande sluisdeur. Achteraf werd dit betreurd, gezien het feit dat de mengende werking van luchtbellenschermen een functie bleek van de grootte van het uitwisselingsdebiet. Het zeer geringe debiet dat na lange openingsduur nog uit de sluis komt wordt relatief teveel opgemengd. Besloten werd om alleen de proeven met een homogene sluis te herhalen met een realistische sluisopeningsduur van 40 min prototype. (Proef 15 en 17.)

Inmiddels was uit de eerste vier proeven wel naar voren gekomen, dat het optredende verschil in  $S_{tot}$  tussen variant I en II het gevolg was van het verschil in zoutverdeling. Het verschil in helling tussen de varianten was insignificant, terwijl de "woelbak" van variant II geen positief resultaat opleverde: visuele waarneming toonde ter plaatse van de woelbak (diskontinuiteit)

een plotselinge vergroting van de golfamplitude die met enige menging gepaard ging; hier staat tegenover dat in het eerste gedeelte na de woelbak de snelheden in de golf iets minder zijn, waardoor minder entrainment op zal treden. Proef 17 is dan ook uitgevoerd met een hoog "grensvlak", maar zonder woelbak.

De resultaten van de proeven 11 t/m 14 gaven voldoende goed de tendens in de verschillen tussen een volledig homogene sluis en een gelaagde sluis weer om de verdere proeven alleen met homogene sluis te kunnen uitvoeren.

De resultaten van de proeven betreffende variant I en II zijn weergegeven in tabel XIII. Duidelijk is de invloed van de initiële toestand in de sluis kolk uit de resultaten af te leiden: het rest-zoutbezwaar neemt voor een gelaagde sluis af met een faktor 1,5 à 2, de menging neemt toe (ook hier het effect van een lager uitwisselingsdebiet bij konstant luchtdebiet), maar desondanks is het waterverlies ook een faktor 1,5 lager. De uitwisselingspercentages over de deur zijn in de achtste kolom gegeven als de gemiddelde waarde over alle schutcycli per proef. Voor de berekening van (prototype-)rest-zoutbezwaar en waterverlies is gebruik gemaakt van een konstante waarde  $u_t = 0,4$  en uitgegaan van zout kolkvolume van  $56.000 \text{ m}^3$  voor de homogene sluis en  $28.000 \text{ m}^3$  voor de gelaagde sluis.

Op grond van deze resultaten werd het wenselijk gevonden een derde variant van de overgangshelling te onderzoeken: variant III op figuur 28. Door de aanzet tot de helling dichter bij de sluis te leggen, de helling steiler te maken en de afbuiging naar de bufferput toe een grotere kromming te geven, werd de afstand tussen sluis en bufferput drastisch gereduceerd. Ook hier werden alleen proeven gedaan met een homogene sluis. De resultaten van proef 19 en 21 (zie tabel XIII) geven inderdaad een verbetering ten opzichte van de varianten I en II van zowel het zoutbezwaar als het waterverlies. Deze resultaten zijn verder geanalyseerd.

De resultaten van de proeven zijn in beperkte mate bruikbaar voor situaties met kleine verschillen in de ingestelde concentratie op het niveau NAP - 7,50 m. Hiertoe worden  $\bar{c}_b$  en  $\bar{c}_p$  bepaald uit de proefresultaten door het grensniveau te verleggen naar de gewenste concentratie. Op deze wijze verkrijgt men een interpolatie tussen de resultaten van bijvoorbeeld proef 19 en 21, zoals weergegeven in tabel XIV. In deze tabel zijn de waterverliezen tevens omgerekend naar de situatie zonder luchtbellenschermen, op basis van de resultaten van de proeven 1-4.

De resultaten voor een gelaagde sluis zijn afgeleid uit de bovengenoemde op grond van de gevonden verschillen in  $\bar{S}_p$  voor gelaagde en homogene sluis in de proeven 11-14. Het zal duidelijk zijn dat deze getallen niet meer betekenis hebben dan het aangeven van een tendens. Dit zelfde geldt tenslotte voor het onderste blok van de tabel, waarin de schatting van  $Q_v$  en  $Z_1$  wordt gegeven onder aanname, dat de toestand in de sluis kolk in de toekomst het midden zal houden tussen een homogene verdeling en een half-gelaagde toestand.

De in tabel XIV gepresenteerde resultaten voor  $Z_1$  en  $Q_v$  zijn in figuur 30 nogmaals weergegeven. Uit het verloop van de relaties blijkt, dat opvoeren van de concentratie op NAP - 7,50 m het zoutbezwaar gestaag doet stijgen, maar dat de daling van het waterverlies sterk afneemt. Dit laatste is een gevolg van het feit dat de gradiënt in de concentratievertikaal erg vlak loopt in het gebied met een  $Cl^-$  gehalte tussen 1,0 en 2,0 g/l (fig. 29). De keuze van een optimum in de combinatie zoutbezwaar-waterverlies is op grond van figuur 30 eenvoudig te maken. Op basis hiervan ook is de beslissing genomen om voor de instelling tijdens de scheepvaartproeven uit te gaan van 1 g/l op NAP - 7,50 m.

#### 4.5 Scheepvaartonderzoek, uitvoering en resultaten

Tabel XV geeft een overzicht van de uitgevoerde scheepvaartproeven, de ingestelde kondities, zoals scheepssnelheid, snelheid in de retourstroom. Daarnaast is de berekende spiegeldaling aangegeven, die in model gerealiseerd moest worden.

De proeven werden steeds zo uitgevoerd, dat begonnen werd met de hoogste scheepssnelheid om op basis van die resultaten te kunnen beslissen of lagere scheepssnelheden zin hadden. Op deze wijze is proef 33 komen te vervallen. De snelheid in de schroefstraal op 20 m achter de schroef,  $u_s$ , was bepaald aan de hand van vroeger onderzoek [5]. Deze werd in model ingesteld. Hierbij bleek de hoogste snelheid voor het kleine schip niet te halen met de geïnstalleerde motor. Deze proef is daarom niet uitgevoerd met de goede scheepssnelheid, maar met een schroefsnelheid, die onder de opgegeven waarde lag. De correctie op het toerental was nodig in verband met het feit dat de relatieve schroefsnelheid (ten opzichte van de stilstaande onderlaag) te groot zou zijn, doordat de modelscheepssnelheid kunstmatig verlaagd is.

Voor het kleine schip waren 20 passages nodig om een registreerbaar effect te bewerkstelligen. Het middelgrote schip werd bij de hoge snelheid 10 maal over de bufferput gesleept en voor de lagere snelheden ook 20 maal. In alle gevallen was er visueel nauwelijks menging vast te stellen. Dit was wel het

geval met de duweenheid, waarbij 1 passage al voldoende was om een zoutbezwaar te kunnen bepalen. Bij dit schip was een belangrijk effect de schroefinvloed op het achter het schip omhoogkomende grensvlak. Het resultaat van proef 38 is weergegeven in figuur 31 en toont duidelijk aan dat de scheepsinvloed een zelfde karakter heeft als de in paragraaf 4.2 beschreven wind-entrainment: een verdieping van het grensvlak, waarbij het opgewoelde zout gelijkmatig over de bovenlaag gespreid wordt.

De resultaten van de scheepvaartproeven, omgerekend naar  $\text{kg Cl}^-$  per passage zijn weergegeven in figuur 32. Voor het kleine schip is het rest-zoutbezwaar 0, er vindt slechts een (geringe) herverdeling plaats binnen de bovenlaag. Het verloop van het aantal  $\text{kg Cl}^-$  per scheepspassage als functie van de scheepssnelheid is voor de beide andere scheepstypen regelmatig, zodat de berekening van het rest-zoutbezwaar  $Z_2$  kan plaatsvinden met de waarden voor normale snelheid. De resultaten van deze berekening, waarbij dus aangenomen is dat gemiddeld de schepen in alle categorieën op normale snelheid varen, zijn gegeven in tabel XVI.

#### 4.6 Totaal rest-zoutbezwaar, waterverlies en zoetwaterbezwaar

Met de in paragraaf 4.2 gegeven formule voor wind-entrainment is de derde bijdrage tot het rest-zoutbezwaar uit te rekenen. Hierbij dient opgemerkt te worden, dat de koëfficiënt empirisch bepaald is op grond van proeven met een zeer duidelijk gedefinieerd grensvlak [6]. De zoutvertikaal, waarvan nu uitgegaan wordt vertoont een minder duidelijke diskontinuiteit. Daar staat tegenover dat juist door de wind-entrainment een onduidelijk grensvlak verscherpt zal worden.

De entrainmentsnelheid is omgekeerd evenredig met het dichtheidsverschil. Omdat het zouttransport naar de bovenlaag gelijk is aan het produkt van entrainmentsnelheid en  $\text{Cl}^-$  concentratie (evenredig met  $\Delta\rho$ ) is dit onafhankelijk van de uitgangskoncentratie.

Voor een windsnelheid van 5 m/s, die in dit gebied slechts 50% van de tijd overschreden wordt, is de bijdrage tot het rest-zoutbezwaar geïntegreerd over het oppervlak van de bufferput voor variant III, ca. 1  $\text{kg Cl}^-/\text{s}$ .

Voor een windsnelheid van 10 m/s, die 20% van de tijd overschreden wordt, wordt de bijdrage ca. 8  $\text{kg Cl}^-/\text{s}$ . Het is duidelijk, dat het effect van wind-entrainment niet verwaarloosbaar is, hetgeen sterk pleit voor een afscheiding van de bufferput met een dam, die hoogwatervrij is. In dat geval kan alleen via de voorhaven een gedeelte van deze bijdrage op het Hollands Diep terecht komen.



Een overzicht van de resultaten van beide modellen en berekeningen wordt tenslotte gegeven in tabel XVII. Hierin is volledigheidshalve ook het zoetwaterbezwaar opgenomen, zoals berekend uit de formule in paragraaf 4.2. Aan het waternverlies is toegevoegd het netto debiet door de schutsluizen heen, ten gevolge van het verschil in middenstand tussen Hollands Diep en Volkerak.

Jaar	Schuttingen hele kolk	Schuttingen halve kolk
1968	25.694	690
1969	22.632	147
1970	21.106	24
1971	20.088	885
1972	14.867	7.287
1973	15.012	7.981
1974	15.456	8.815
1975	13.006	11.676
1976	+ 15.600	+ 7.000
1977	+ 15.000	+ 9.000
1978	+ 15.000	+ 9.000
1979	+ 15.000	+ 9.000
1980	+ 15.000	+ 9.000

Tabel I: Schuttingen Volkeraksluizen

Scheeps- categorie	Aantal passages per jaar		
	in 1974	per hoofdgroep	modelinterpretatie
jachten	14734	18531	20000
vissersvaartuigen	3797		
motorschepen	122179		
sleepboten	6052	128231	130000
sleepschepen	1935		
duwboten	4038	$\frac{9277}{4} + 222 =$	
duwbakken	9277	2541	2500
zeeschepen	222		
overige vaart	3445	-	-

Tabel II: Aantal scheepspassages Volkeraksluizen

Scheepstype	Vissersvaartuig/ groot jacht	RHK-schip	Duweenheid Europa II
Motorvermogen (kW)			
normaal	100	600	1000
extreem	500	1200	4000
Snelheid (m/s)			
normaal	4,0	4,5	4,0
extreem	5,0	5,5	6,0
Prognose snelheid boven de helling*			
laag	3,0	3,0	2,5
normaal	4,0	4,5	3,5
extreem	5,0	5,5	5,0
Prototypemetingen			
Volkeraksluizen			
invaren	-	2,8	-
uitvaren	4,1	3,9	2,65

Tabel III: Gegevens betreffende sloopssnelheden in de voorhaven

\*Rekening houdend met verwachte toename motorvermogen en het niet op volle snelheid varen.

Meetdag	Luchtbellenscherm	Meting		$\Delta c'$ (g/l)	$x'$
		$x$	$x \cdot \Delta c$		
16-7-'74	aan	0,19	1,54	10,3	0,15
17-7-'74	uit	0,56	5,20	11,8	0,44
18-7-'74	aan	0,16	1,75	13,2	0,13
19-7-'74	uit	0,52	5,40	13,0	0,42

Verklaring:  $\Delta c$  = verschil concentraties rak Noord - rak Zuid

$\Delta c'$  = verschil concentraties Volkerak meetpunt 1a - Hollands Diep

$x'$  = in de verdere berekeningen gehanteerde uitwisselingscoëfficiënten (gemiddelde waarde luchtbellenschermen aan  $x' = 0,14$ )

Tabel IV: Prototype-uitwisselingscoëfficiënt over de schutsluizen

omschrijving	proto	model
getijverschil $2a_o$	3,35 m	0,084 m
bovenafvoer $Q_{spui}$	30 m <sup>3</sup> /s	0,053 l/s
bovenafvoer $Q_{spui}$	60 m <sup>3</sup> /s	0,106 l/s
bovenafvoer $Q_{spui}$	100 m <sup>3</sup> /s	0,177 l/s
bovenafvoer $Q_{spui}$	150 m <sup>3</sup> /s	0,265 l/s
bovenafvoer $Q_{spui}$	200 m <sup>3</sup> /s	0,353 l/s
waterdiepte	6,00 m	0,15 m
ruwheid (Chézy-waarde) bij 6,0 m waterdiepte (prototypemaat)	$C = 54 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$	$C = 12 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$
gootlengte	23600	29,5 m
gootbreedte	1500	0,67 m
getijperiode T	12 u 25 min	5 min 53 sek
toegepaste ruwheid bij de proeven	staafjes (5 x 5 mm <sup>2</sup> ) (aantal: 135 per 2 m gootlengte)	

Tabel V: Gegevens getijgoot en ingestelde randvoorwaarden

proef nr.	$Q_s$ $m^3/s$	spuidebiet kontinu of diskontinu	getijverschil $2a_o$ (m)	$\rho_{zee} - \rho_{spui}$ $kg/m^3$	gem. chloride- gehalte op de rand
<u>referentieproeven</u>					
T 530	100	kontinu	3,35	18,51	13,3
T 531	100	diskontinu	3,35	18,49	13,3
<u>serie kontinu</u>					
T 532	200	kontinu	3,35	15,55	11,3
T 533	150	kontinu	3,35	17,17	12,3
T 534	100	kontinu	3,35	18,46	13,3
T 535	60	kontinu	3,35	19,89	14,3
T 536	30	kontinu	3,35	21,14	15,1
<u>gevoeligheidsproeven</u>					
T 537	100	kontinu	3,35	16,84	13,3
T 538	100	kontinu	3,35	20,12	13,3
<u>serie diskontinu</u>					
T 539	200	diskontinu	3,35	15,85	11,3
T 540	150	diskontinu	3,35	17,03	12,3
T 541	100	diskontinu	3,35	18,58	13,3
T 542	60	diskontinu	3,35	19,82	14,3
T 543	30	diskontinu	3,35	20,99	15,1

Het gemiddeld chloridegehalte is afgeleid uit natuurmetingen. Voor de omrekening van chloridegehalten naar dichtheden is gebruik gemaakt van Knudsen "Hydrofrafical Tables", 1901 [7].

Tabel VI: Proevenprogramma getijgootonderzoek

proefnr.	$Q_s$ (m <sup>3</sup> /s) (K) = kontinu (D) = diskontinu	$\rho_{\text{zee}} - \rho_{\text{spui}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{x=0} - \rho_{\text{spui}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{\frac{x}{\Delta x}=7} - \rho_{\text{spui}}$ (kg/m <sup>3</sup> )
T 530	100 (K)	18,51	17,62	5,04
T 531	100 (D)	18,49	17,74	6,01
T 532	200 (K)	15,55	14,59	1,12
T 533	150 (K)	17,17	16,47	3,18
T 534	100 (K)	18,46	18,07	5,50
T 535	60 (K)	19,89	19,44	7,59
T 536	30 (K)	21,14	21,06	10,69
T 537	100 (K)	16,84	16,17	3,69
T 538	100 (K)	20,12	19,37	6,00
T 539	200 (D)	15,85	14,98	1,53
T 540	150 (D)	17,03	16,18	3,03
T 541	100 (D)	18,58	17,78	5,34
T 542	60 (D)	19,82	19,15	7,94
T 543	30 (D)	20,99	20,38	10,84

Tabel VII: Meetresultaten getijgootonderzoek



n . V (m <sup>3</sup> /etm.)	x	$\Delta c$ (kg Cl/m <sup>3</sup> )	$Q_d$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_s$ (m <sup>3</sup> /s)	$c_2$ (in verh. tot $c_1$ )	$Z_r$ (kg/s)
31 . 56.000	0,14	8,4	200	30	$c_1$	20
2 . 31 . 56.000	-	-	-	-	-	40
$\frac{1}{2}$ . 31 . 56.000	-	-	-	-	-	10
-	0,28	-	-	-	-	40
-	0,07	-	-	-	-	10
-	-	16,8	-	-	-	40
-	-	4,2	-	-	-	10
-	-	-	400	-	-	22
-	-	-	100	-	-	17
-	-	-	-	60	-	17
-	-	-	-	15	-	22
-	-	-	-	-	$2c_1$	18
-	-	-	-	-	$\frac{1}{2}c_1$	22

Tabel VIII: Het rest-zoutbezwaar bij variatie der parameters

$Q_{br}$ ( $m^3/s$ )	$Q_d$ ( $m^3/s$ )	$Q_g$ ( $m^3/s$ )	$\Delta c$ ( $kg/m^3$ )	$Z$ ( $kg/s$ )	$c_2$ ( $kg/m^3$ )	$Z_r$ ( $kg/s$ )
1050	125	30	8,4	24	0,189	18
2200	320	150	3,0	8	0,026	5
1550	210	100	4,7	13	0,063	7
1250	160	60	6,1	17	0,107	11
1100	135	30	8,4	24	0,175	18
1200	150	60	6,1	17	0,114	10
1300	170	60	6,1	17	0,101	11
950	110	20	9,5	27	0,243	22
1600	220	150	3,0	8	0,038	3

Tabel IX: Rest-zoutbezwaar bij fiktief spuitprogramma

Rest-zoutbezwaar (kg/s)	Waternverlies SPUIDEBIET (m <sup>3</sup> /s)	Zoetwaterbezwaar* (m <sup>3</sup> /s)
18	30	38
11	60	68
7	100	108
5	150	158

Tabel X Rest-zoutbezwaar, waternverlies en zoetwaterbezwaar.

Methode geforceerd spuien.

\*  $c_z = 18 \text{ g/l Cl}^-$  aangenomen in de berekening.  
zoetwaterbezwaar tengevolge van uitwisselingsdebiet apart in rekening gebracht (in hoeverre dit gerechtvaardigd is wordt nog nagegaan),  
zoetwaterbezwaar tengevolge van schuttschijf in spuidebiet betrokken.

Proef no.	luchtbellenschermen		sluis		$\Delta\rho_{\text{sluis}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	variant helling	diepte grensvlak (m - NAP)
	aan	uit	homog.	gelaagd			
1	x		x		10	-	-
2	x			x	10	-	-
3		x	x		10	-	-
4		x		x	10	-	-
11	x		x		10	I 0,005	12,5
12	x			x	10	I 0,005	12,5
13	x		x		10	II 0,0035	7,5
14	x			x	10	II 0,0035	7,5
15	x		x		10	I 0,005	12,5
17	x		x		10	I 0,005	7,5
19	x		x		10	III 0,015	12,5
21	x		x		10	III 0,015	7,5

Tabel XI: Overzicht proeven hellingonderzoek

Proef	luchtbellenscherm		sluis		$S_u$	$u_t$	$S_u \times u_t$
	aan	uit	homog.	gelaagd			
1	x		x		1,8	0,43	0,77
2	x			x	3,55	0,38	1,35
3		x	x		1,45	0,90	1,30
4		x		x	1,95	0,91	1,77

Tabel XII: De invloed van luchtbellenschermen

Proef	lucht- bellen- scherm aan	sluiskolk	$\Delta p$ sluis	Variant (helling)	diepte grensvl. (m)	openings- duur sluis (min.)	$\bar{u}_t$	$Z_1$ (kg/s)	$\bar{S}_p$	$Q_v$ ( $m^3/s$ )
11	x	homogeen	10	I (0,005)	- 12,5	240	0,75	1,5	5,4	43
12	x	gelaagd	10	I (0,005)	- 12,5	240	0,82	1,0	7,1	30
13	x	homogeen	10	II (0,0035)	- 7,5	240	0,75	2,1	3,9	31
14	x	gelaagd	10	II (0,0035)	- 7,5	240	-	1,1	5,1	20
15	x	homogeen	10	I (0,005)	- 12,5	40	0,39	0,4	5,5	44
17	x	homogeen	10	I (0,005)	- 7,5	40	0,38	1,4	2,8	23
19	x	homogeen	10	III (0,015)	- 12,5	40	0,39	0,25	4,3	35
21	x	homogeen	10	III (0,015)	- 7,5	40	0,40	1,0	2,2	18

Tabel XIII Resultaten hellingproeven.

	Cl <sup>-</sup> gehalte op NAP - 7,50 m	luchtbellenschermen aan		luchtbellenschermen uit	
		Z <sub>1</sub> (kg/s)	Q <sub>v</sub> <sup>*</sup> (m <sup>3</sup> /s)	Z <sub>1</sub> (kg/s)	Q <sub>v</sub> <sup>*</sup> (m <sup>3</sup> /s)
Homogene sluis	0,1 (proef 19)	0,25	35	≤ 0,25	63
	0,5	0,5	22	≤ 0,5	40
	1,0	0,7	20	≤ 0,7	35
	1,6 (proef 21)	1,0	18	≤ 1,0	33
Gelaagde sluis	0,1	0,15	22	≤ 0,15	27
	0,5	0,35	14	≤ 0,35	17
	1,0	0,4	13	≤ 0,4	16
	1,6	0,5	12	≤ 0,5	15
Gemiddelde	0,1	0,2	30	≤ 0,2	45
	0,5	0,4	20	≤ 0,4	30
	1,0	0,5	15	≤ 0,5	25
	1,6	0,75	15	≤ 0,75	25

Tabel XIV: Prognose rest-zoutbezwaar Z<sub>1</sub> en waterverlies Q<sub>v</sub> voor variant III, met en zonder luchtbellenschermen

\* waterverlies, exclusief bijdrage ten gevolge van schuttschijf

Proef no.	Scheepstype	Diepgang (m)	Proto-snelheid (m/s)	Model-snelheid (m/s proto)	$u_s$ (m/s)	Korrektietoerental (1/s)	Spiegel-daling (m)
31	klein	1,2	5,0	5,0	1,5 <sup>2)</sup>	7	1,0
32	klein	1,2	4,0	4,0	1,0	0	0,4
34	middelgroot	3,0 <sup>1)</sup>	5,5	4,3	2,5	11	0,45
35	middelgroot	3,0	4,5	3,5	2,0	9	0,25
36	middelgroot	3,0	3,0	2,9	1,3	1	0,15
37	duweenheid	3,0	5,0	2,5	2,75	12	0,7
38	duweenheid	3,0	3,5	2,0	1,75	7	0,3
39	duweenheid	3,0	2,5	1,4	1,30	5	0,15

Tabel XV: Overzicht proeven scheepvaartonderzoek

1) Diepgang relatief te groot, in verband met diepte schroef.

2) Gerealiseerd (ongekorrigeerd): 1,1 m/s.



Scheeptype	Aantal/jaar	$\Delta Z$ /passage (normale snelheid)	$Z_i$
motorjacht	20.000	0	0
R.H.K. motor- schip	130.000	250	1,0
Duweenheid	2.500	15.300	1,2

$$\Sigma Z_i = 2,2 \text{ kg Cl}^-/\text{s}$$

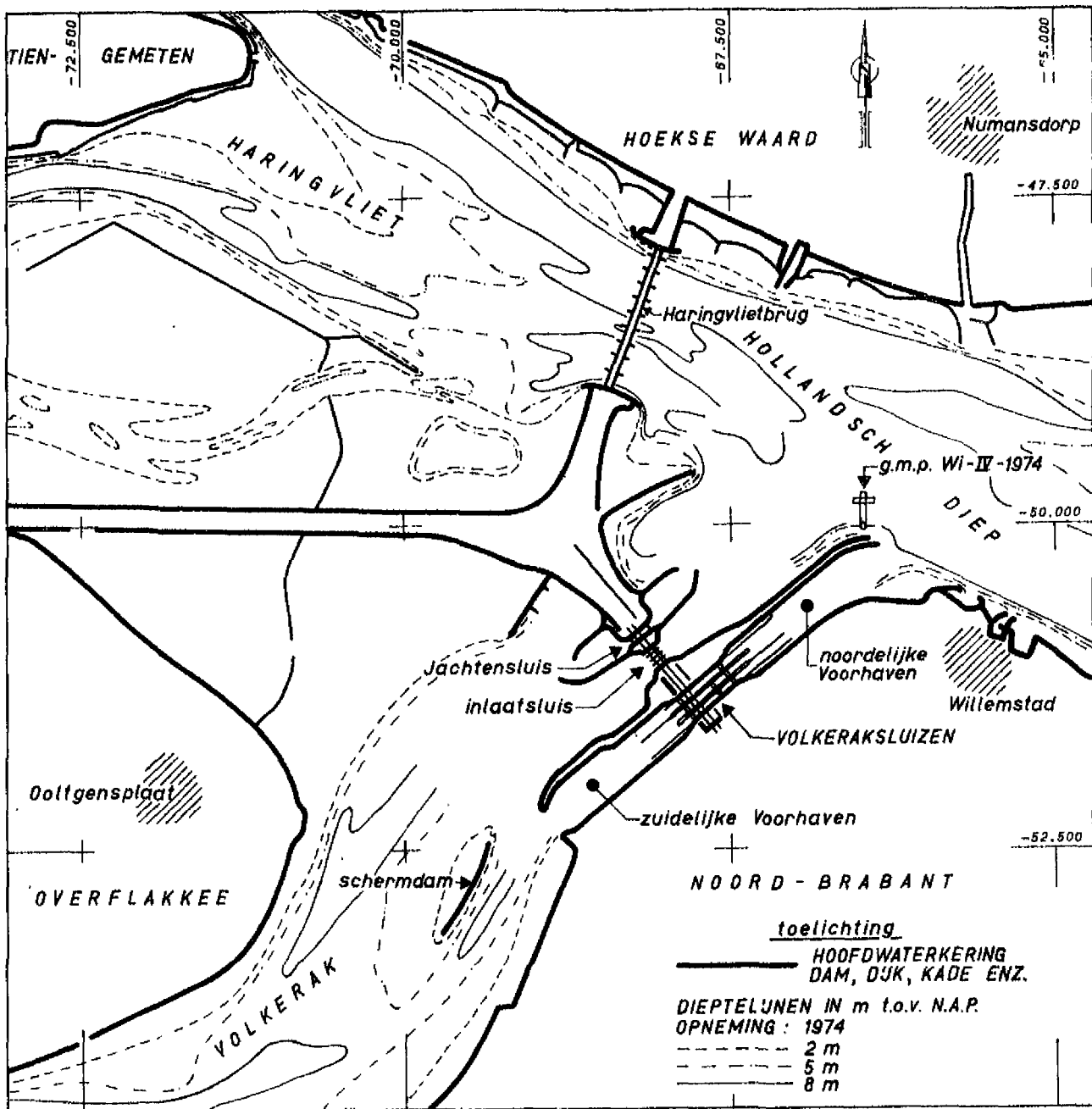
Tabel XVI Resultaten scheepvaartproeven.

		Rest-zoutbezwaar		Waternverlies		Zoetwaterbezwaar*	
		Oorzaak	Z (kg/s)	Oorzaak	Qv (m <sup>3</sup> /s)	Oorzaak	Q <sub>z.b</sub> (m <sup>3</sup> /s)
luchtbellschermen	aan	Uitwisseling	0,5	Spuien	15	Spuien	12
		Scheepvaart	2,2	Schutschijf	~ 1,0	Uitwisseling	8
		Windentrainm.	1,0			Schutschijf	~ 1
		Totaal	2,7 (+1,0)	Totaal	16		21
	uit	Uitwisseling	≤ 0,5	Spuien	25	Spuien	21
		Scheepvaart	2,2	Schutschijf	1	Uitwisseling	16
		Windentrainm.	1,0			Schutschijf	1
		Totaal	2,7 (+1,0)	Totaal	26		38

Tabel XVII Totaal rest-zoutbezwaar, waternverlies en zoetwaterbezwaar.  
Oplossing zoutbufferput.

\*  $c_2 = 18 \text{ g/l Cl}^-$  aangenomen in de berekening.

In hoeverre de berekening van het zoetwaterbezwaar volgens deze wijze terecht is wordt nader bestudeerd.



SITUATIE VOLKERAK SCHUT- EN INLAATSLUIZEN

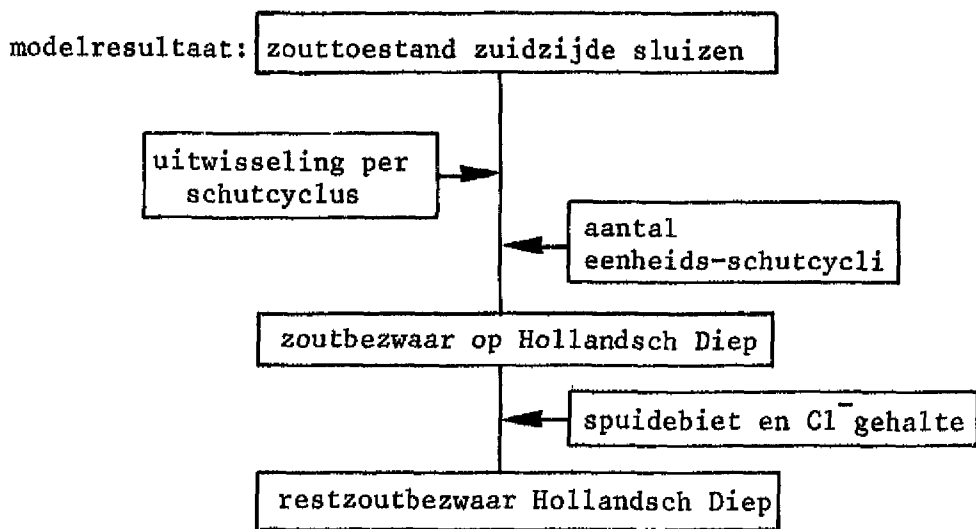
j.w.

SCHAAL 1:50 000

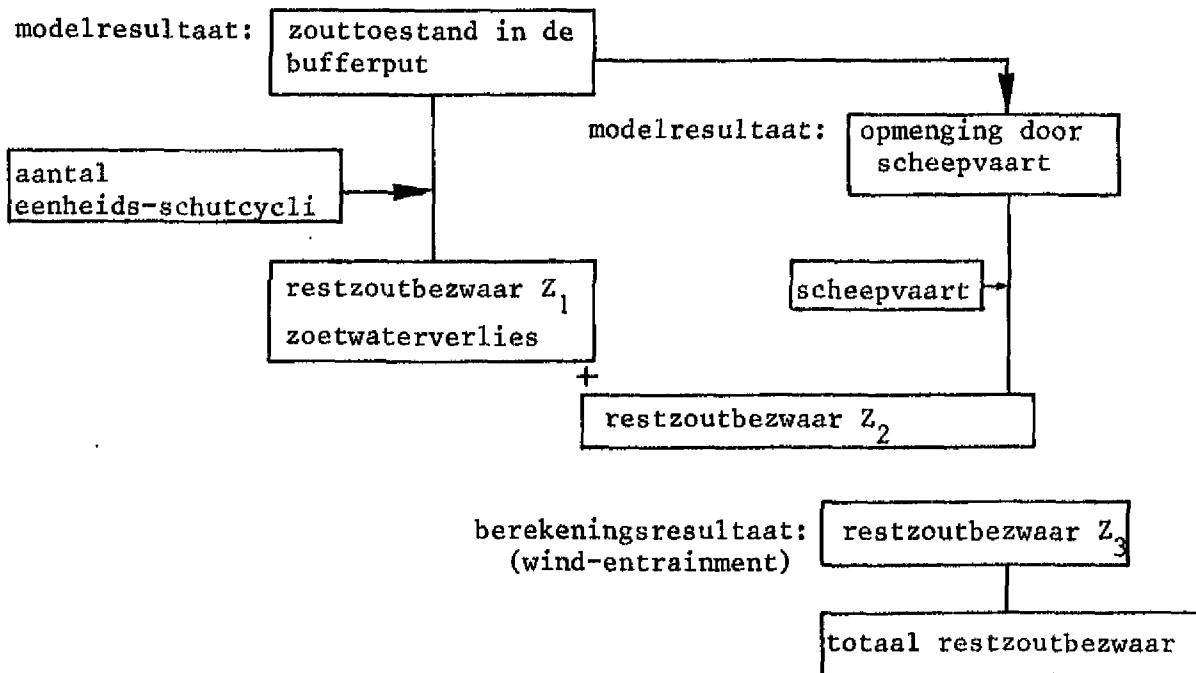
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1432-1001 FIG. 1

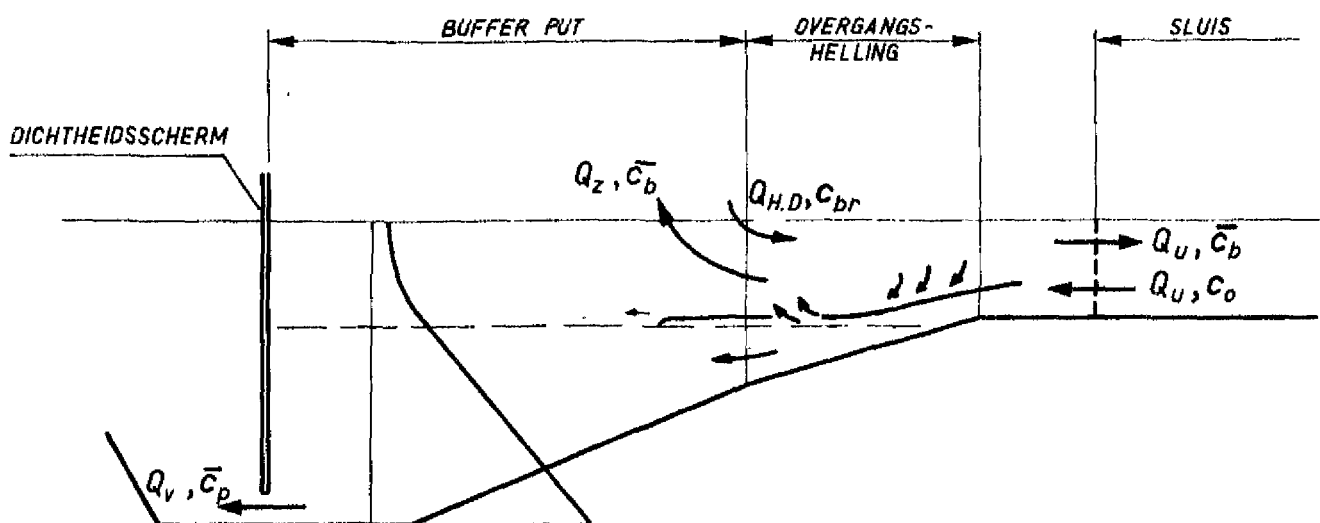


a : Interpretatie modelresultaat getijgootonderzoek



b : Interpretatie modelresultaten zoutgootonderzoek

SCHEMATISCHE OPZET MODELONDERZOEK EN BEREKENINGEN		JM
		A4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1432 -	FIG. 2



$Q_u$  = UITWISSELINGSDEBIET

$c_o$  = CONCENTRATIE IN DE (ONDERLAAG VAN DE) SLUIS

$\bar{c}_b$  = GEMIDDELDE CONCENTRATIE IN BOVENLAAG BOVEN DE HELLING

$c_{br}$  = CONCENTRATIE OP HOLLANDS DIEP

$\bar{c}_p$  = GEMIDDELDE CONCENTRATIE IN DE ONDERLAAG, IN HET SPUIDEBIET

$Q_v$  = WATERVERLIJES

$Q_{H.D}$  = ZOETWATER TOEVOER

$Q_z$  = ZOUTWATER BEZWAAR ( $Z_1 = Q_z \cdot \bar{c}_b$ )

SCHEMATISCHE WEERGAVE  $Cl^-$  TRANSPORTEN ZOUTBUFFER-  
PUT

j.w.

A4

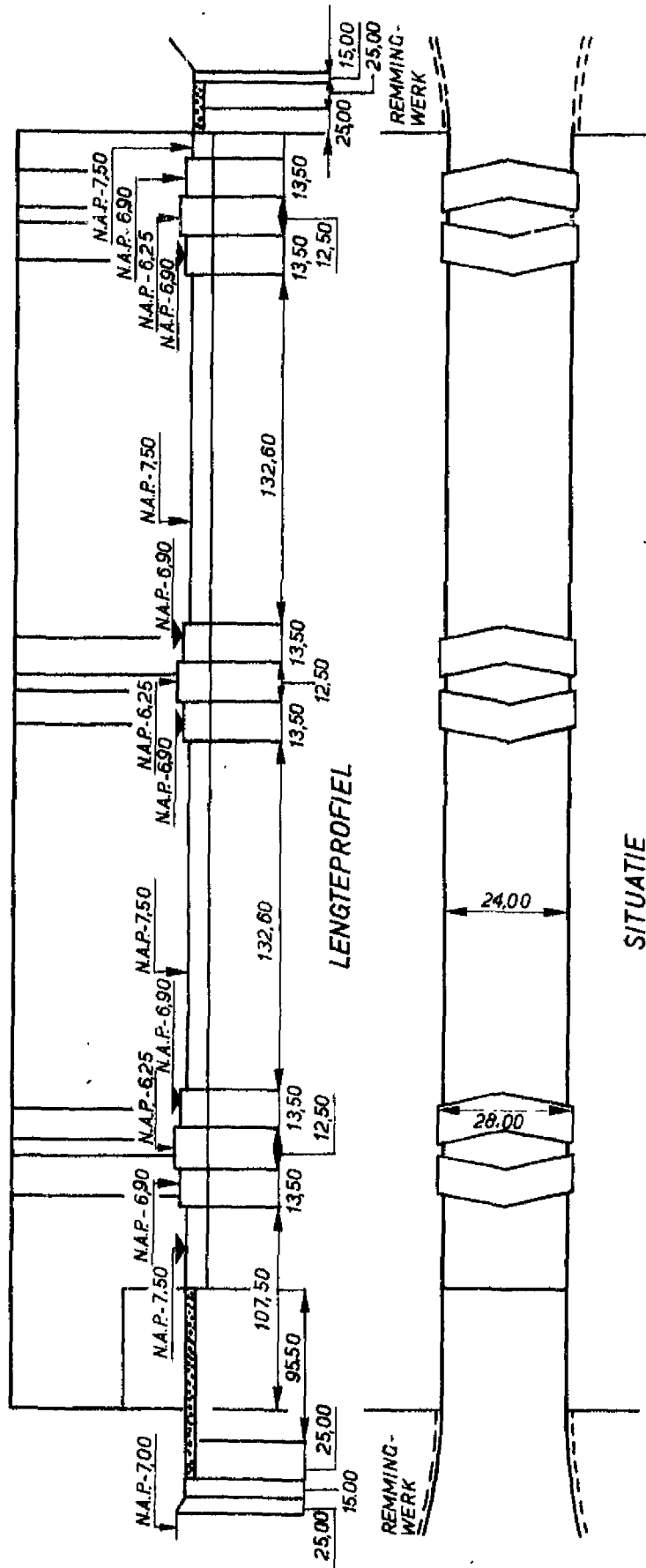
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1432-1003

FIG. 3

VOLKERAKSLUIZEN

N.A.P. + 5.00



LENGTEPROFIEL

SITUATIE

SCHALEN:  
 LENGTE ≈ 1 : 2500  
 BREEDTE ≈ 1 : 1300  
 HOOGTE ≈ 1 : 475

VOLKERAK DUWVAARTSLUIS

MATEN IN m PROTO

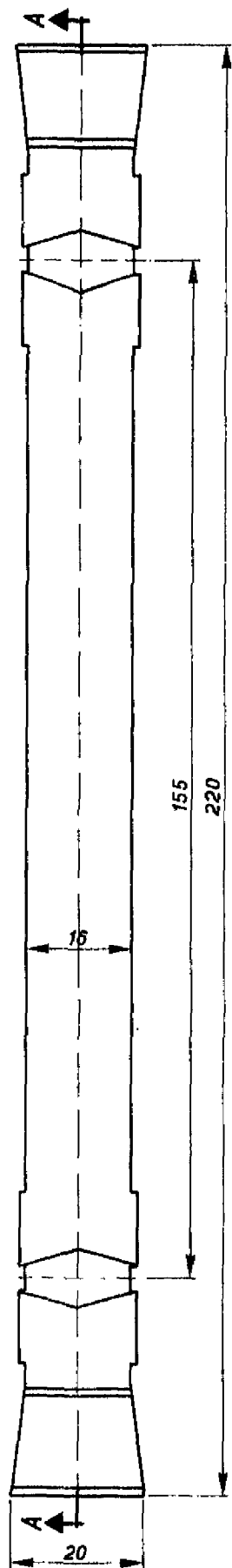
JM

A4

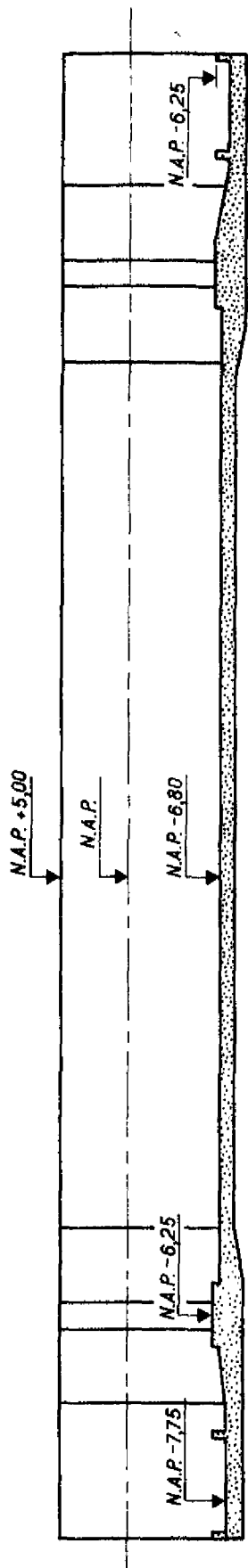
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1432 - 1004

FIG. 4



BOVENAANZICHT



DOORSNEDE A-A

VOLKERAK JACHTENSLUIS

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

MATEN IN m PROTO

j.w.

SCHAAL : HOR. 1 : 100  
VERT. 1 : 50

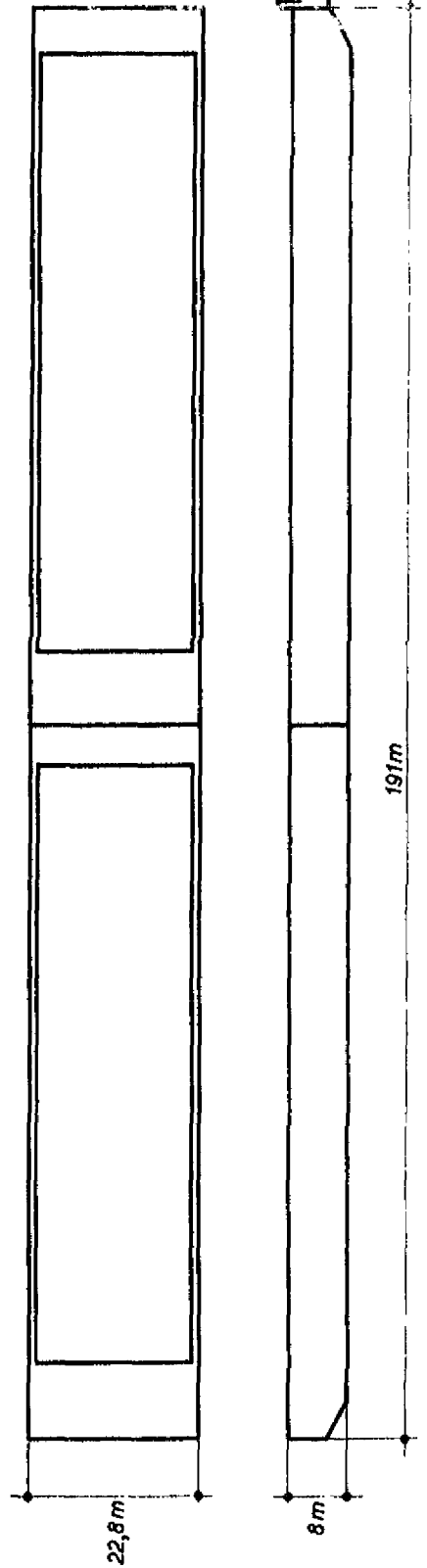
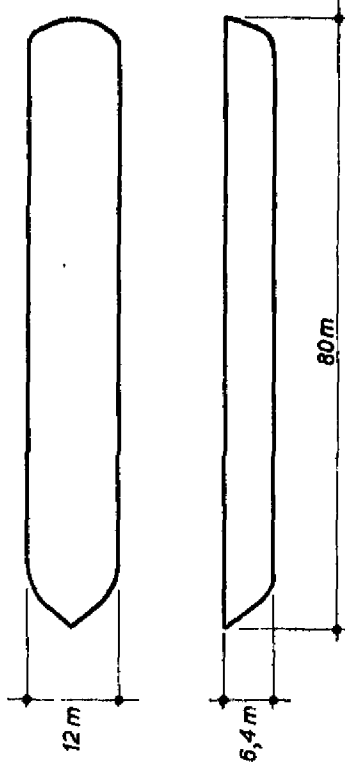
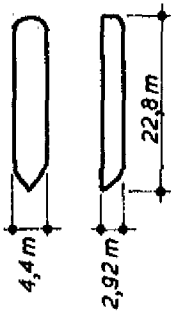
A4

M. 1432-1005

FIG. 5

**SCHROEFGEGEVENS PROTO**

MODELSCHIP	DIAMETER (D)	SPOED (P)
KLEIN	1,0 m	0,47 m
MIDDEL	1,8 m	0,70 m
GRROOT	2 x 2,0 m	1,60 m



AFMETINGEN KARAKTERISTIEKE SCHEEPSTYPEN

MATEN IN m PROTO

J.W.

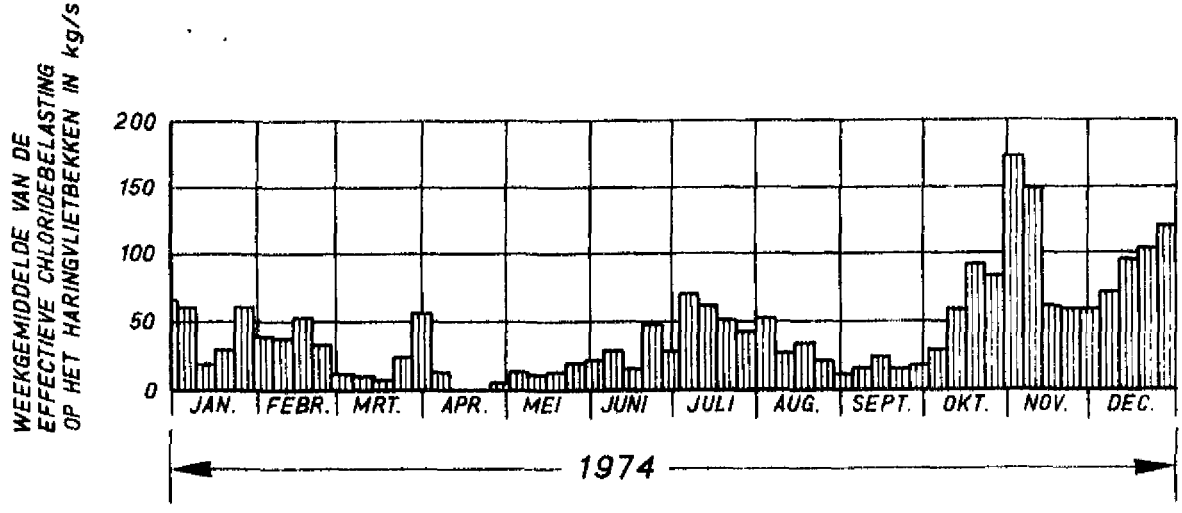
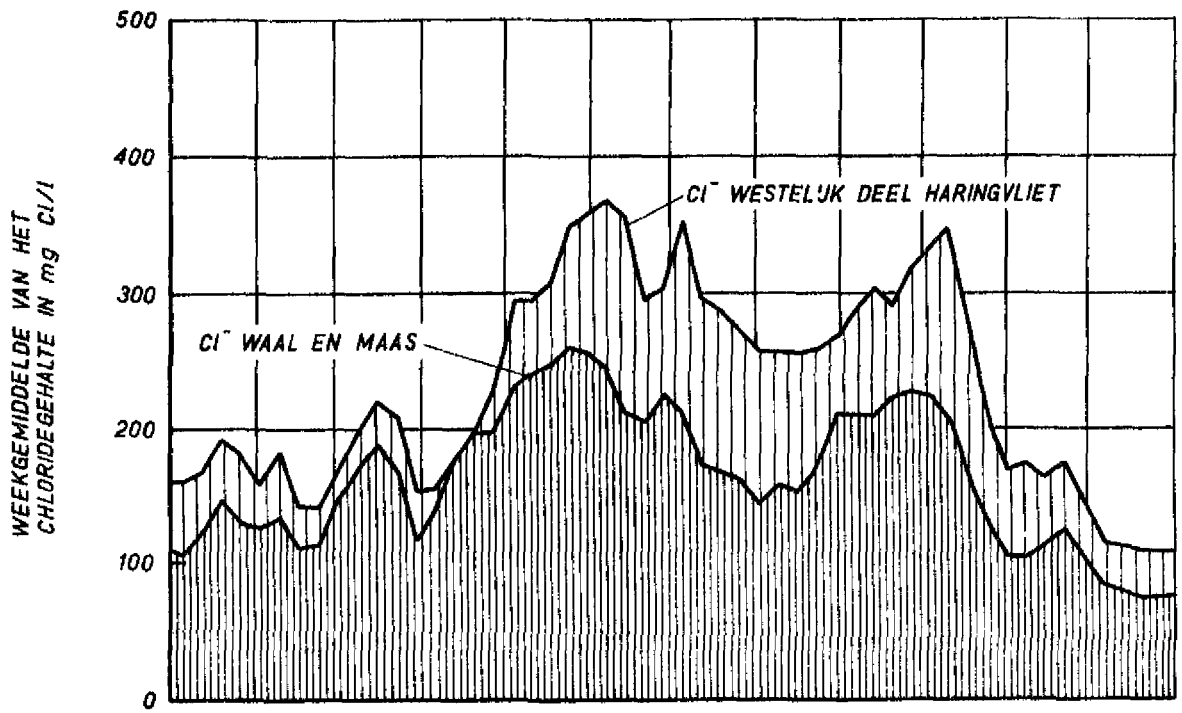
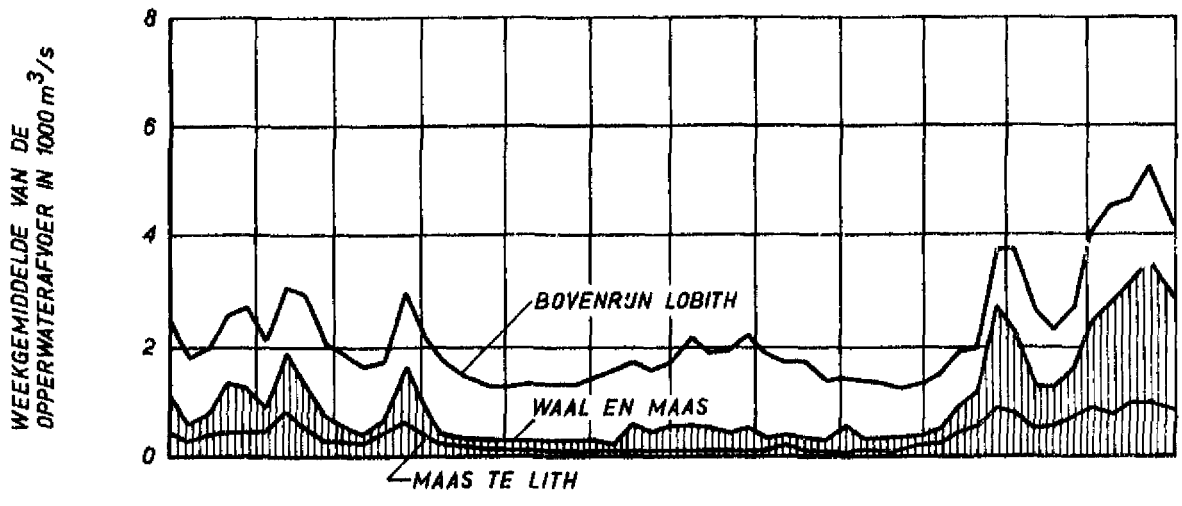
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1432 - 1006

FIG. 6





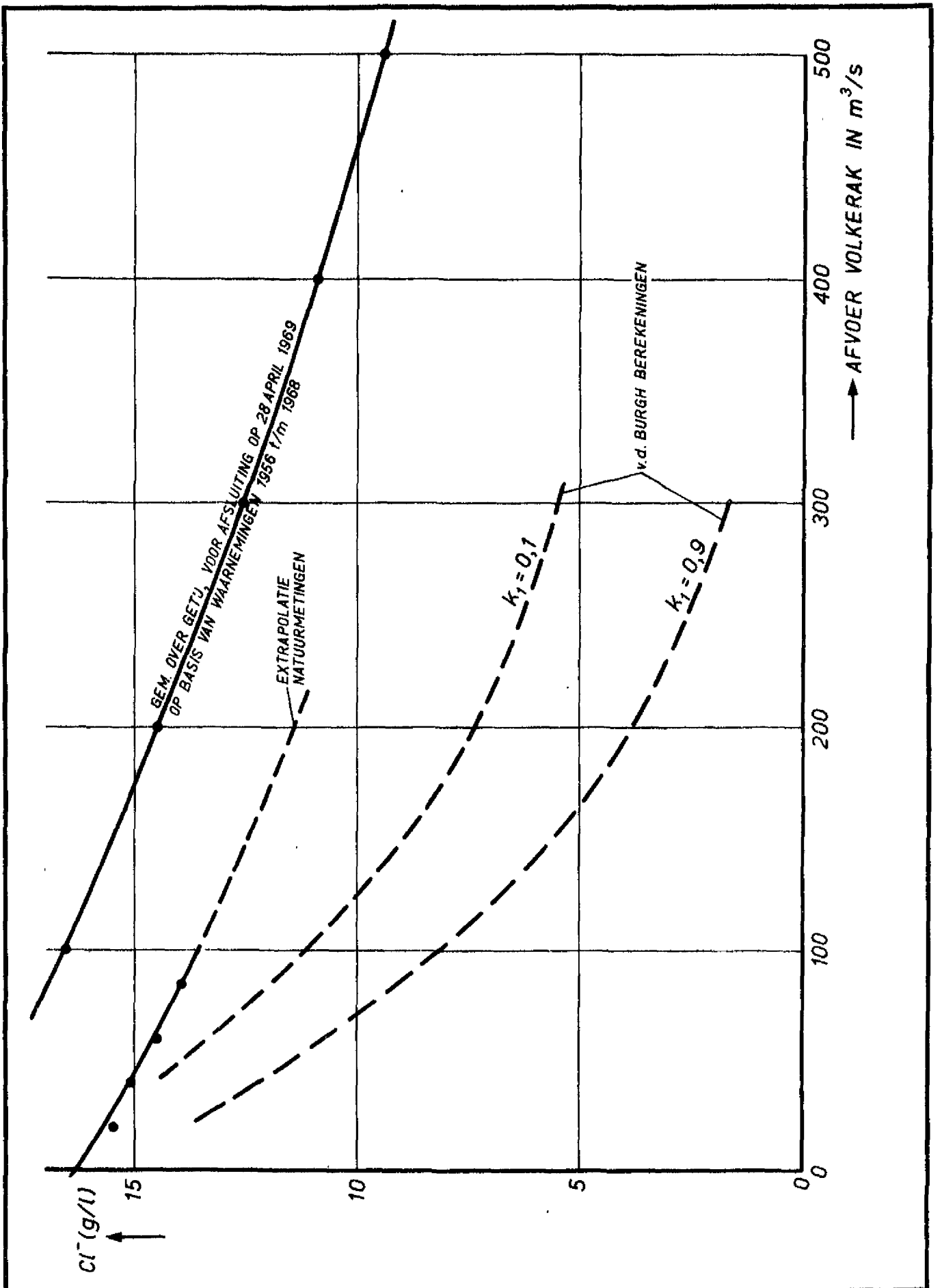
PROTOTYPEGEGEVENS ZOUTBEWAAR HOLLANDS DIEP

j.w.  
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1432-1007

FIG. 7



PROTOTYPEGEGEVENS  $Cl^-$  GEHALTEN ZUPE

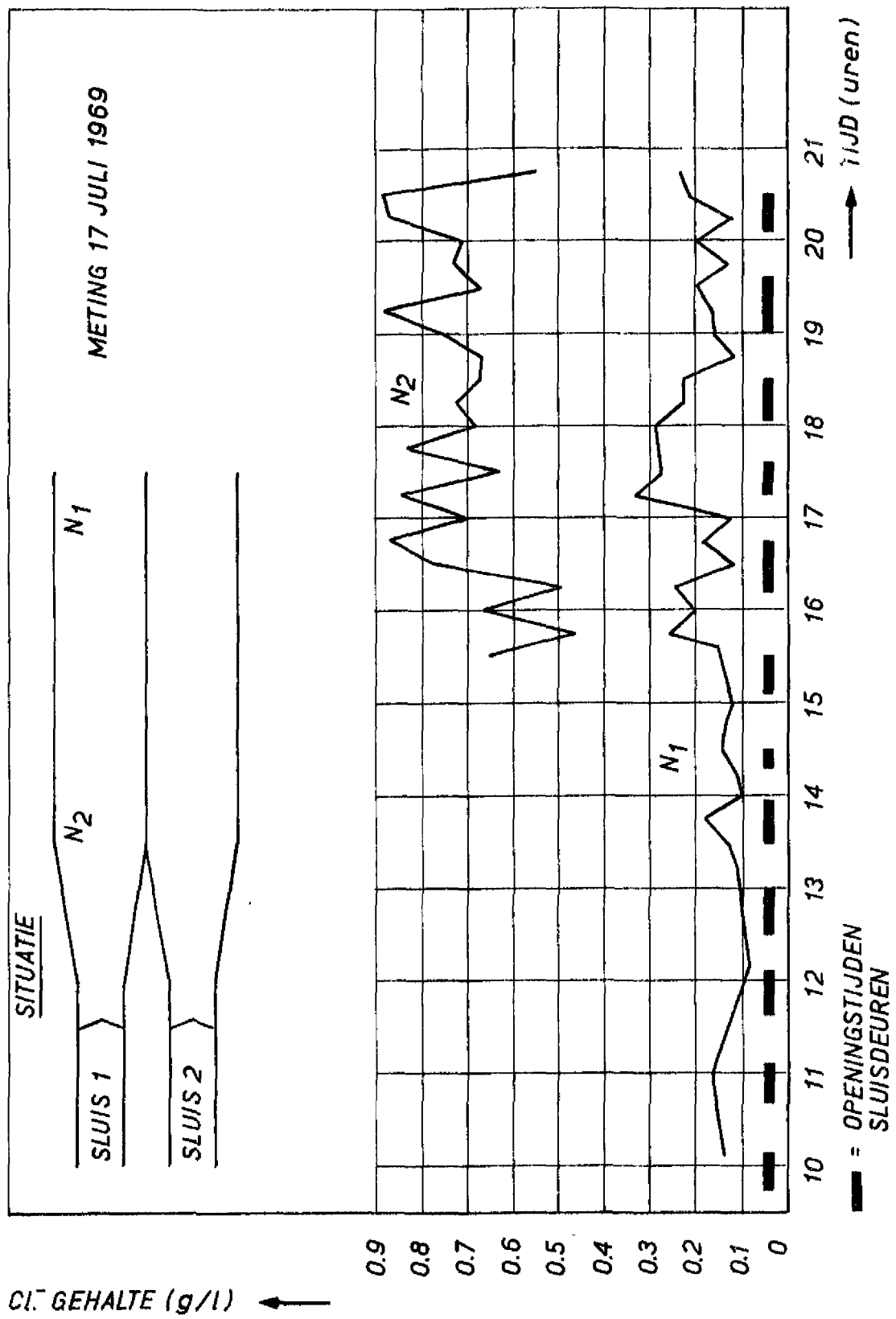
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

j.w.

A4

M. 1432 - 1008

FIG. 8



PROTOTYPEGEGEVENS CI<sup>-</sup>GEHALTEN VOORHAVEN

METING 17-7-'69

JM

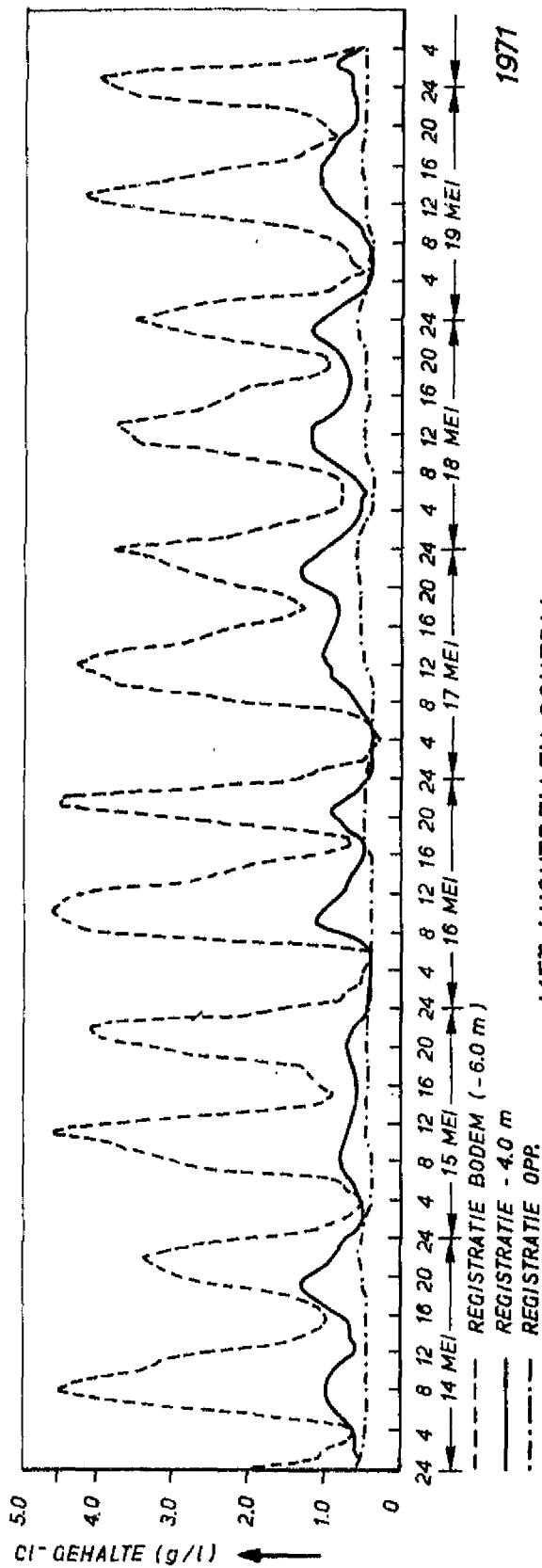
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

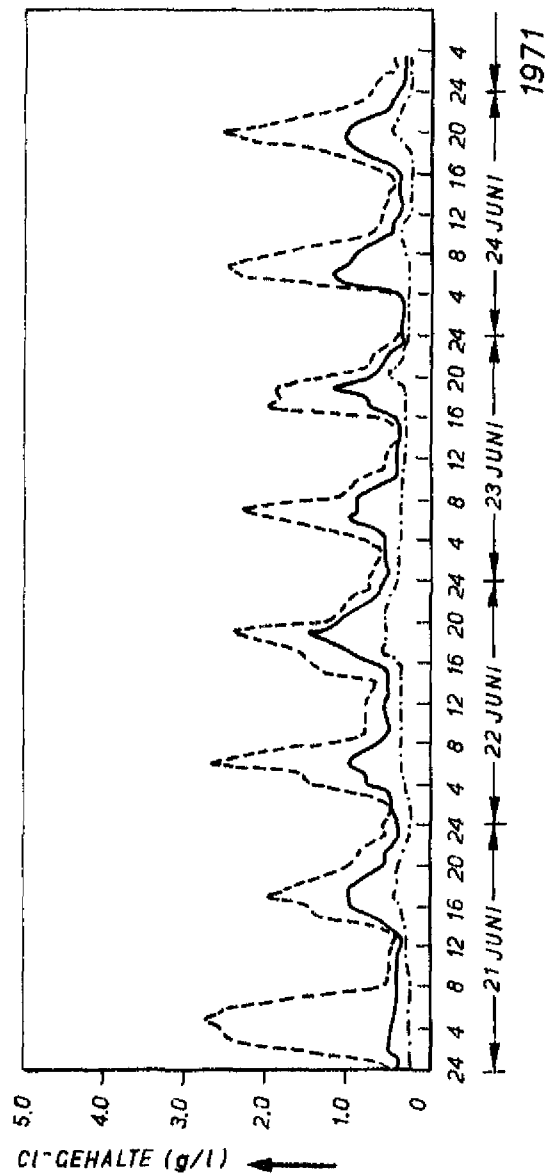
M1432 - 1009

FIG. 9

ZONDER LUCHTBELLEN SCHERM

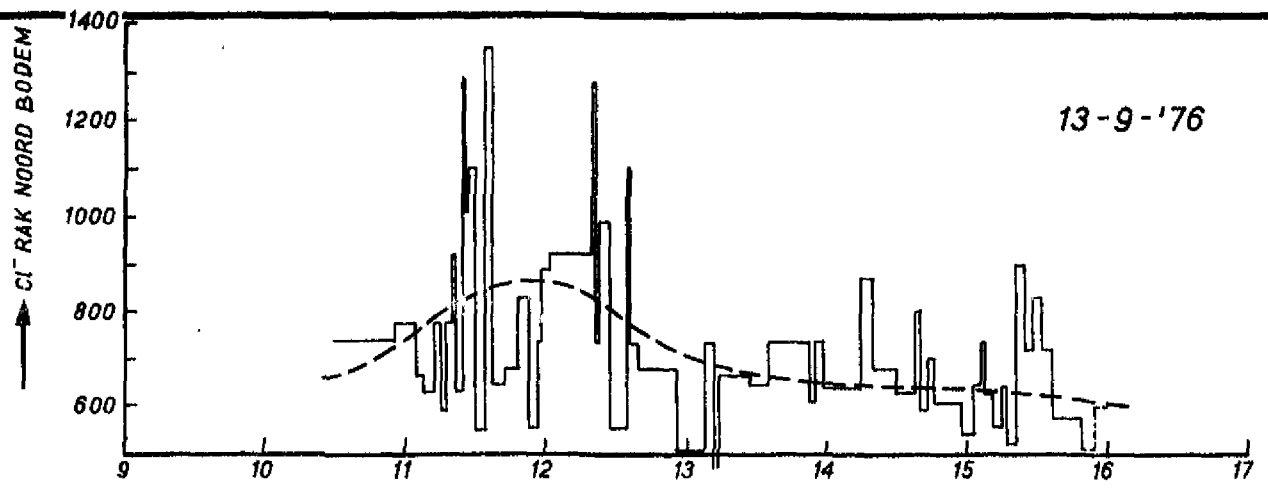


MET LUCHTBELLEN SCHERM

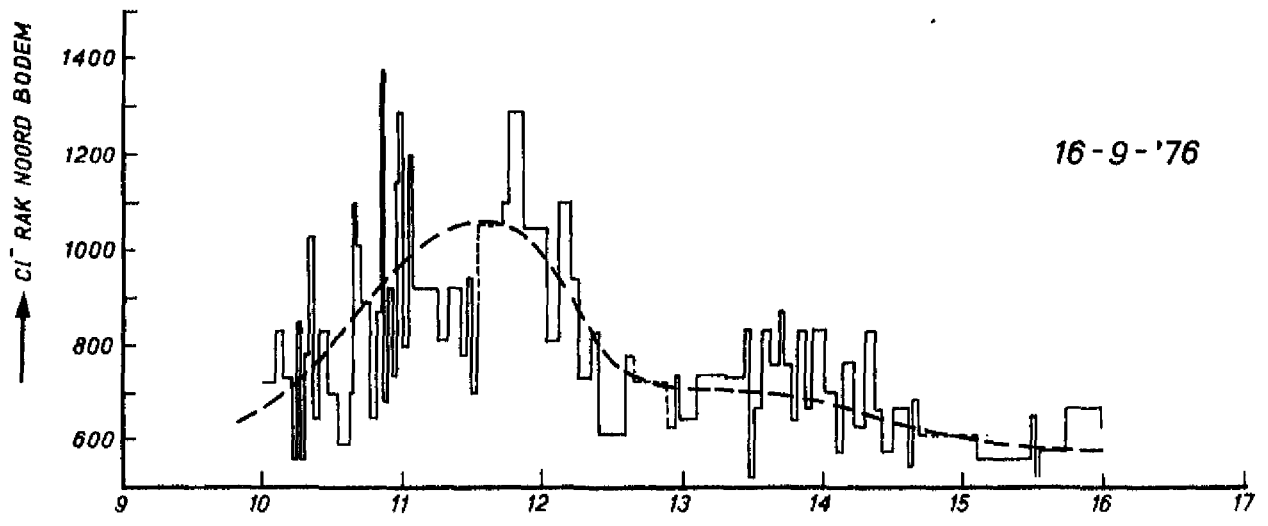


PROTOTYPEGEGEVENS Cl<sup>-</sup> GEHALTEN VOORHAVEN  
 METING MEI/JUNI 1971

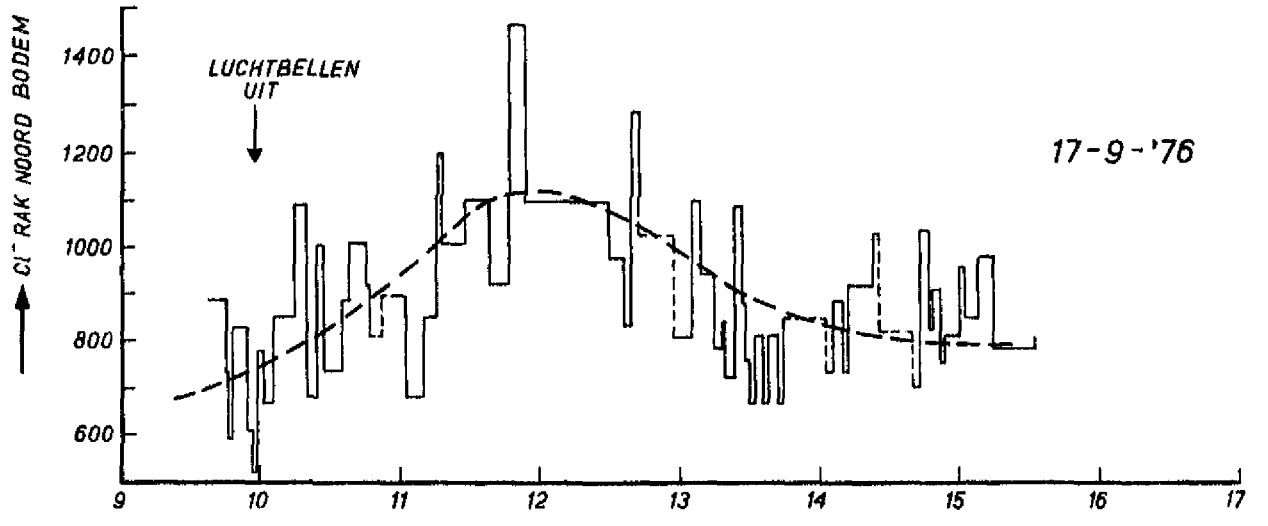
JM  
 A4



13-9-'76



16-9-'76

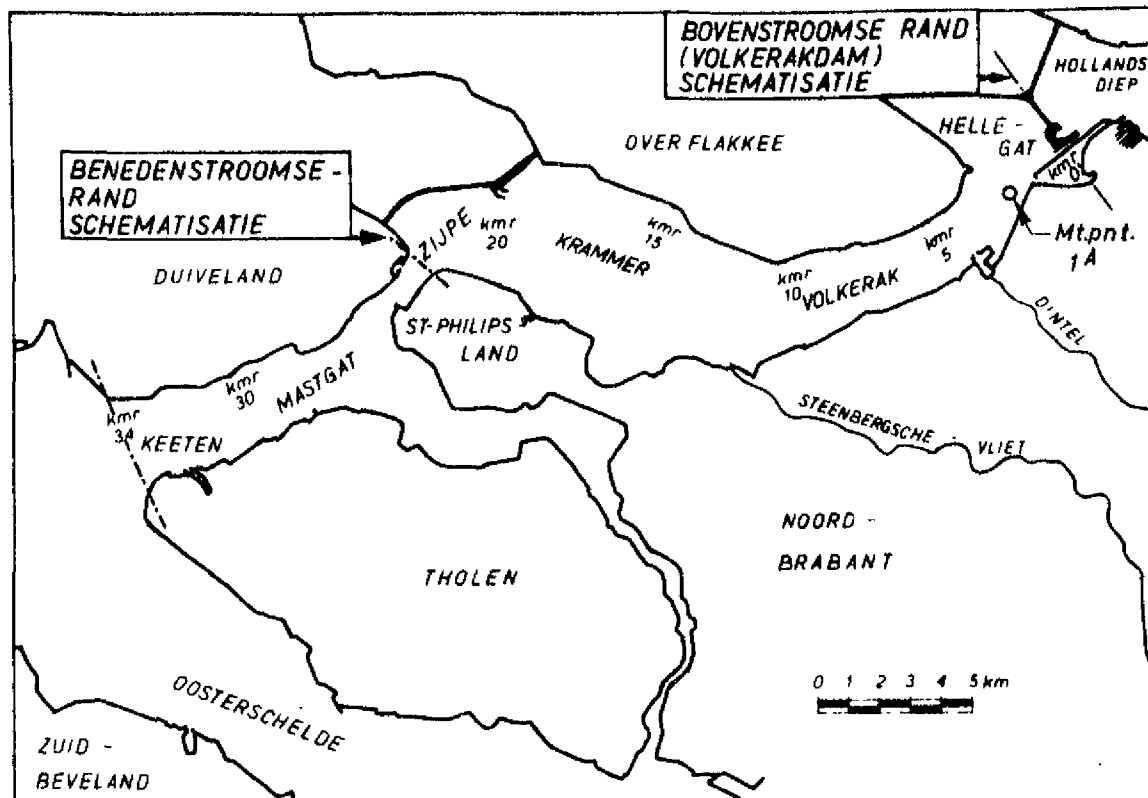


17-9-'76

PROTOTYPEGEGEVENS  $Cl^-$  GEHALTEN VOORHAVEN,  
METING SEPTEMBER 1976

j.w.

A4



MODEL RANDEN GETIJGOOTONDERZOEK

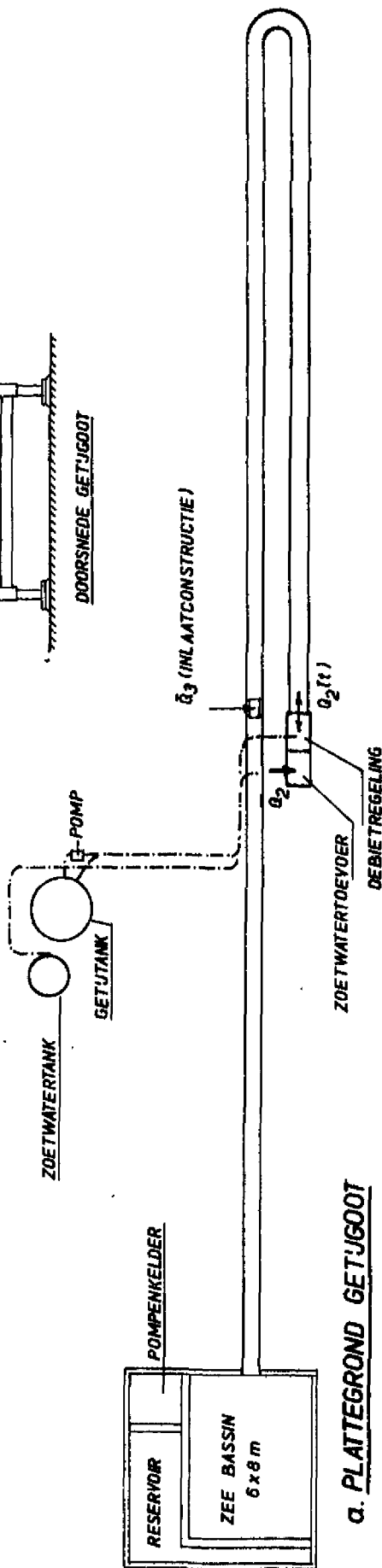
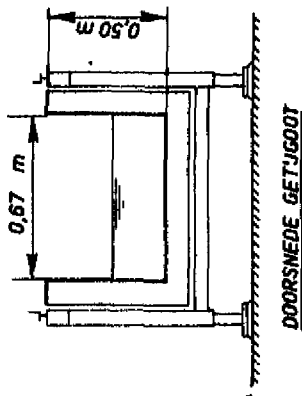
JM

A4

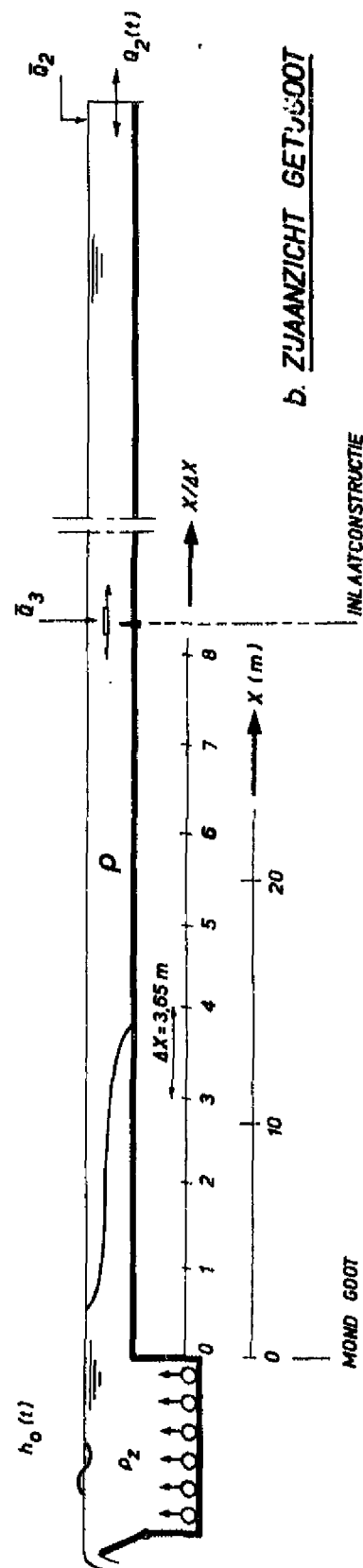
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1432 - 1012 FIG.12

RANDINSTELLING	
ZEE	: $h_0(t), \rho_2$
RIVIER	: $Q_2(t), \bar{Q}_2$
INLAATCONSTR.	: $\bar{Q}_3$

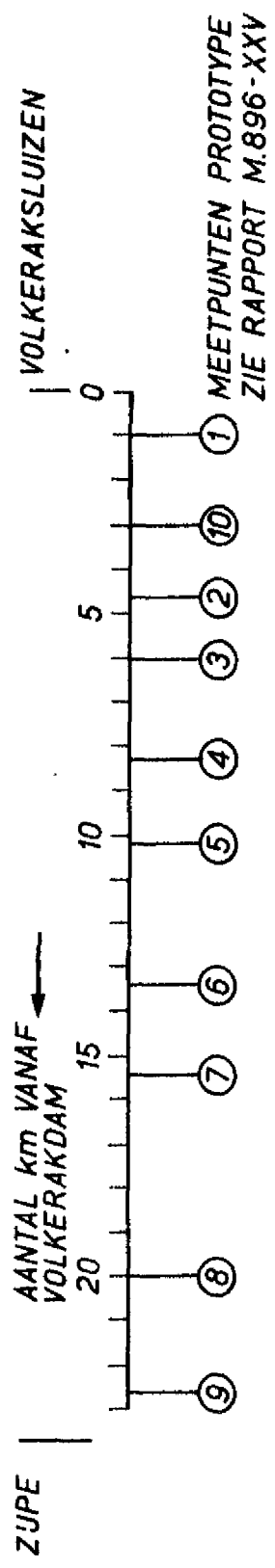
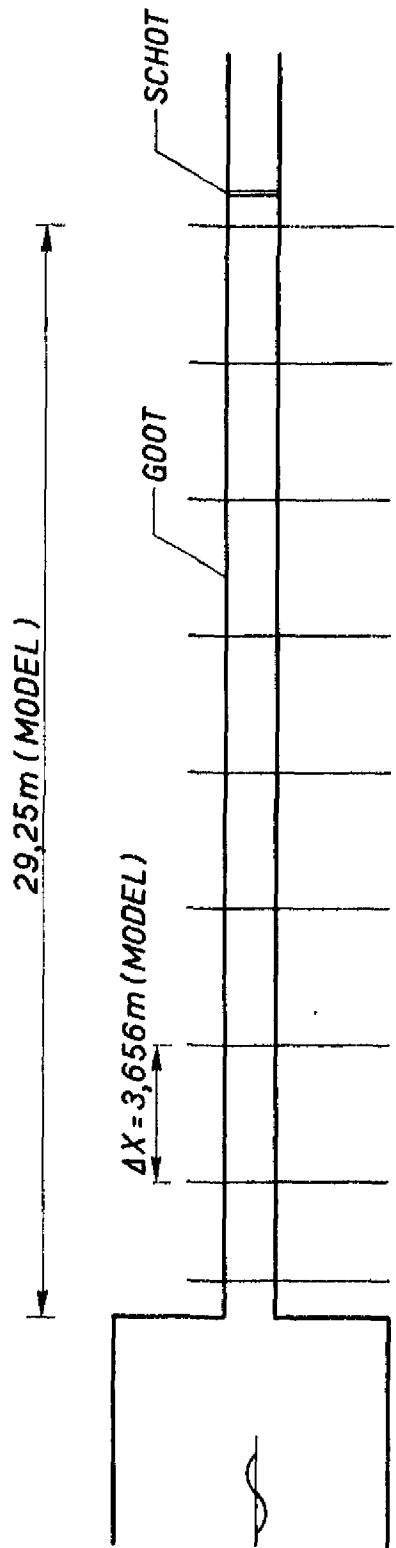


a. PLATTEGROND GETUGOOT



b. ZJAANZICHT GETUGOOT

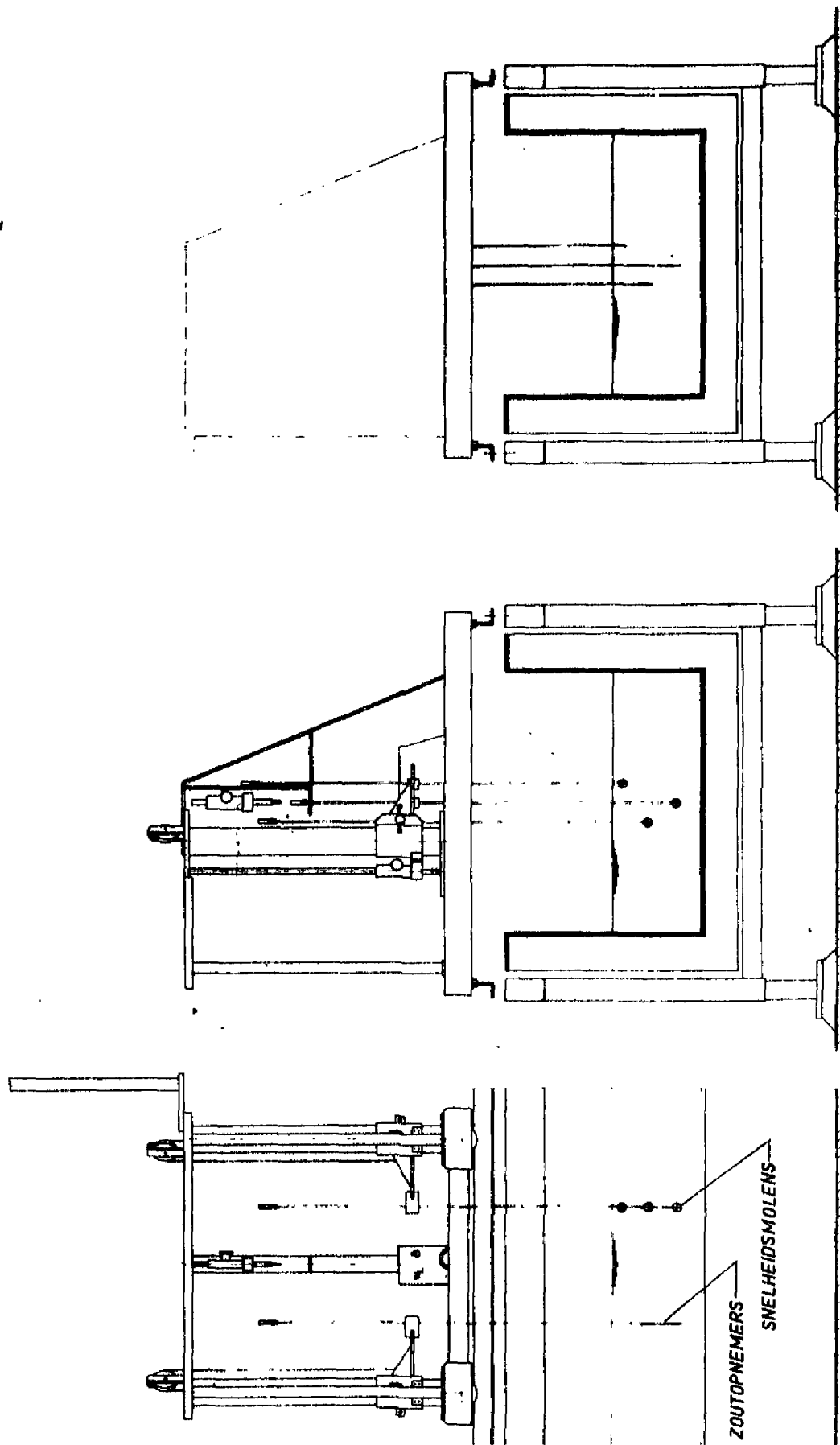
OVERZICHT VAN DE GETUGOOT



BEMONSTERINGSSCHEMA

j.w.  
A4





DOORSNEDE GOOT t.p.v. ZOUTOPNEMERS

DOORSNEDE GOOT t.p.v. SNELHEIDSMOLENS

AANZICHT MEETWAGEN MET MEETAPPARATUUR

ZOUTOPNEMERS  
SNELHEIDSMOLENS

OPSTELLING MET MEETWAGENS

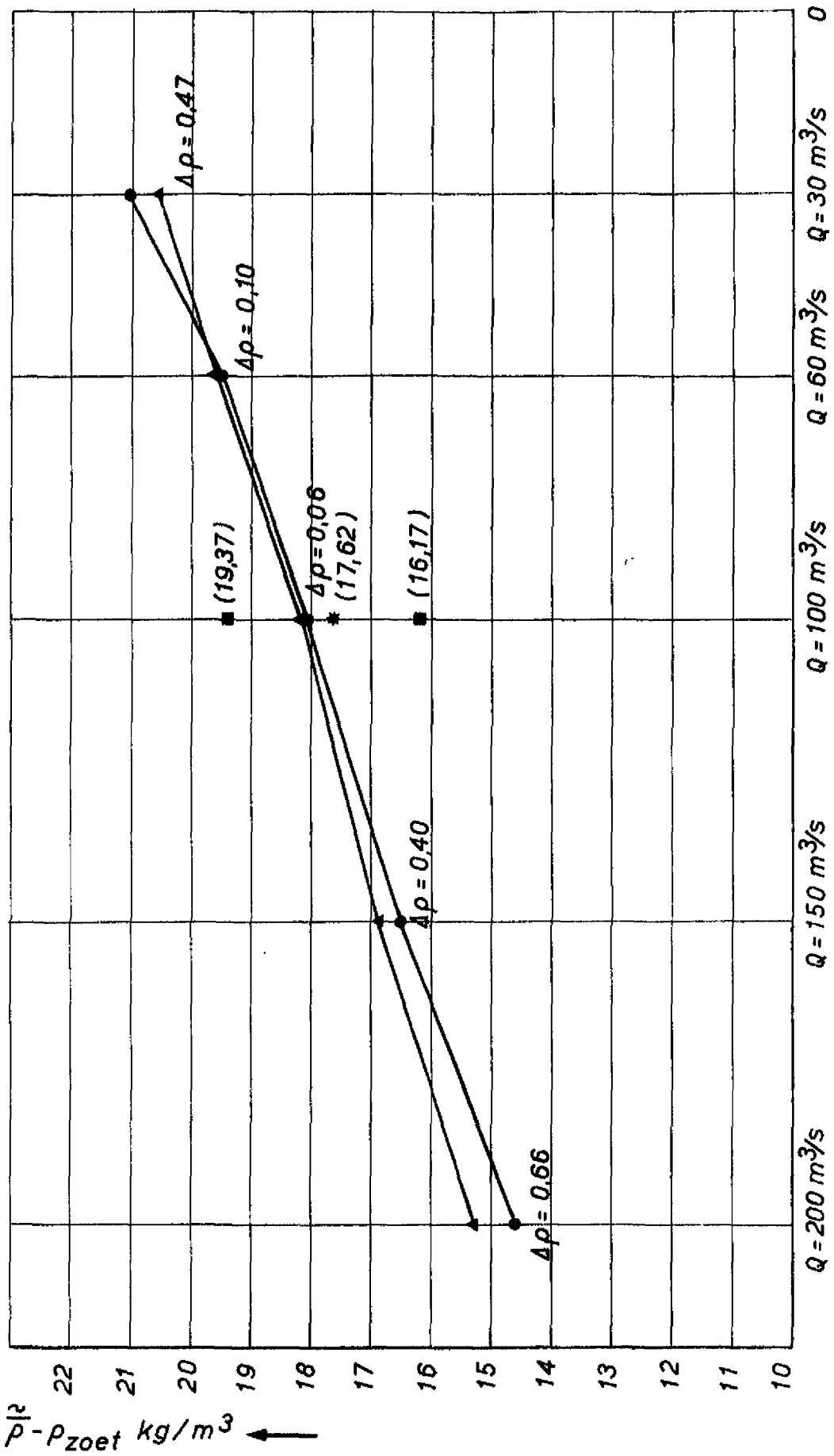
j.w.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1432 - 1015

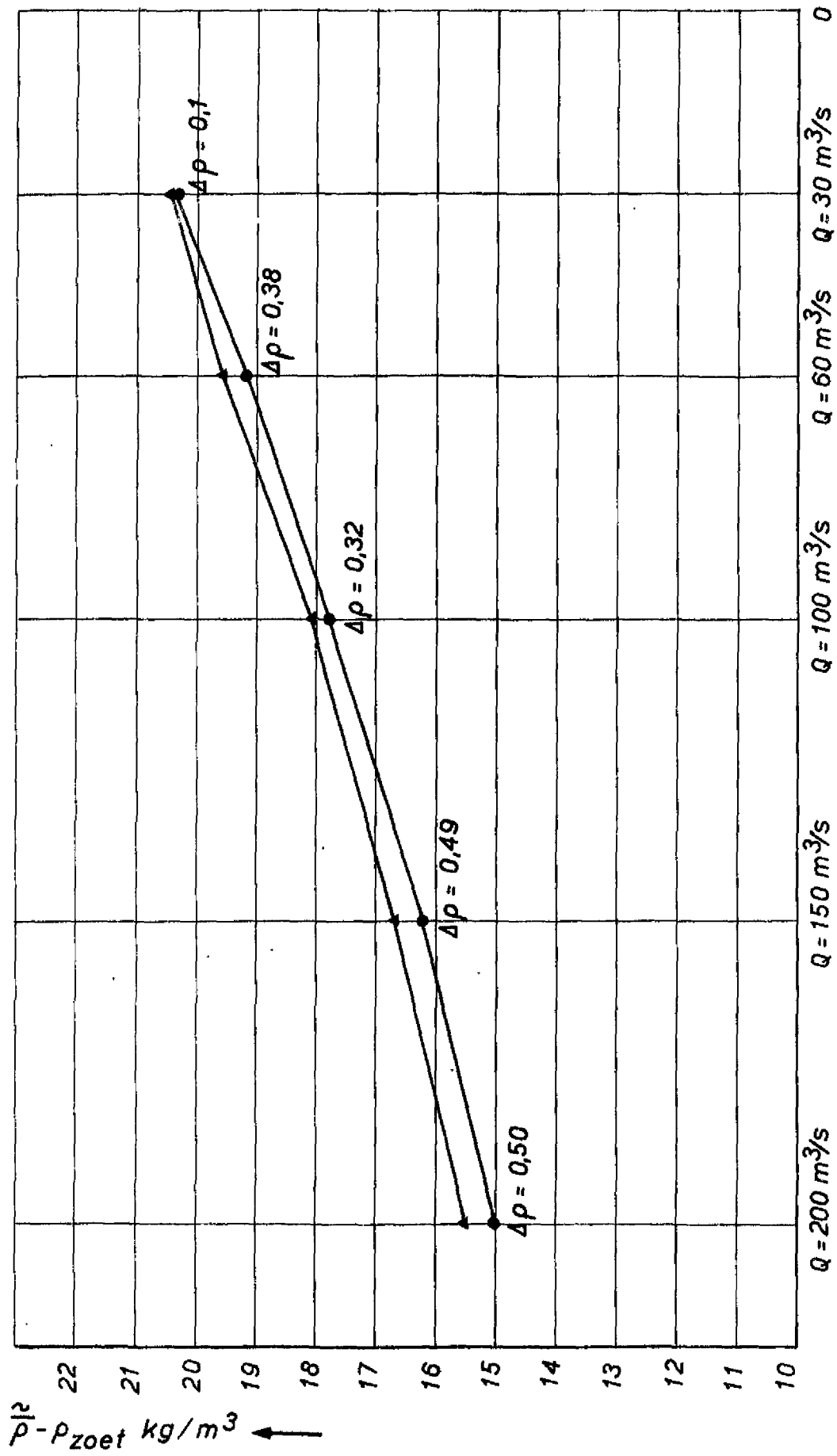
FIG. 15



▲ = NATUURMETINGEN  
 ● = MODELMETINGEN  
 \* = PROEF T 530  
 ■ = PROEF T 537 EN T 538

MODELINSTELLING ZIJPE t.o.v. PROTOTYPEWAARDEN  
 KONTINU SPUIDEBIET

JM  
 A4

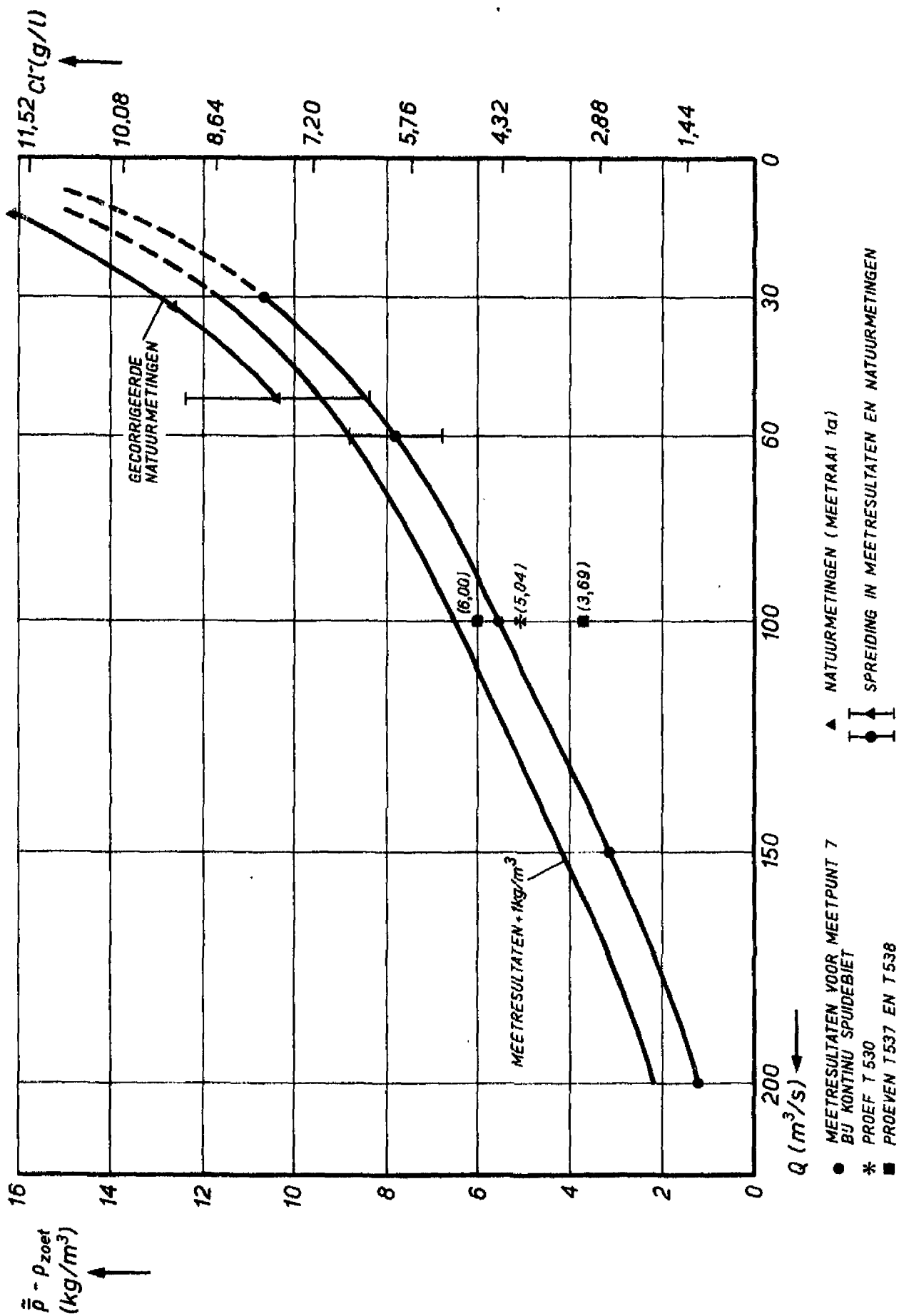


▲ = NATUURMETINGEN  
 ● = MODELMETINGEN

MODELINSTELLING ZIJPE t.o.v. PROTOTYPEWAARDEN  
 DISKONTINU SPUIDEBIET

JM

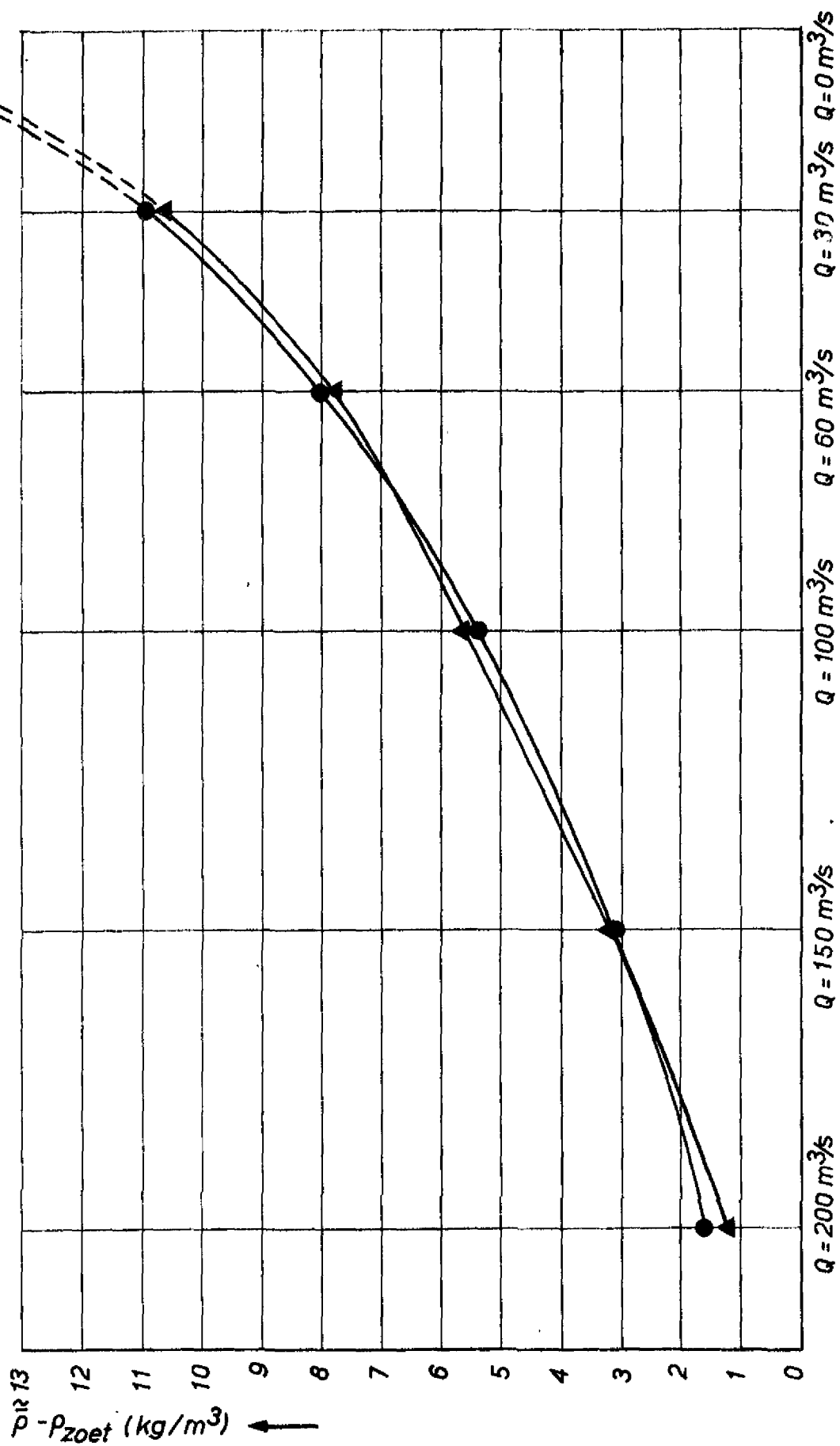
A4



GETUGEMIDDELDE KONCENTRATIES OP MEETPUNT 7 (KONTINU DEBIET)

j.w.

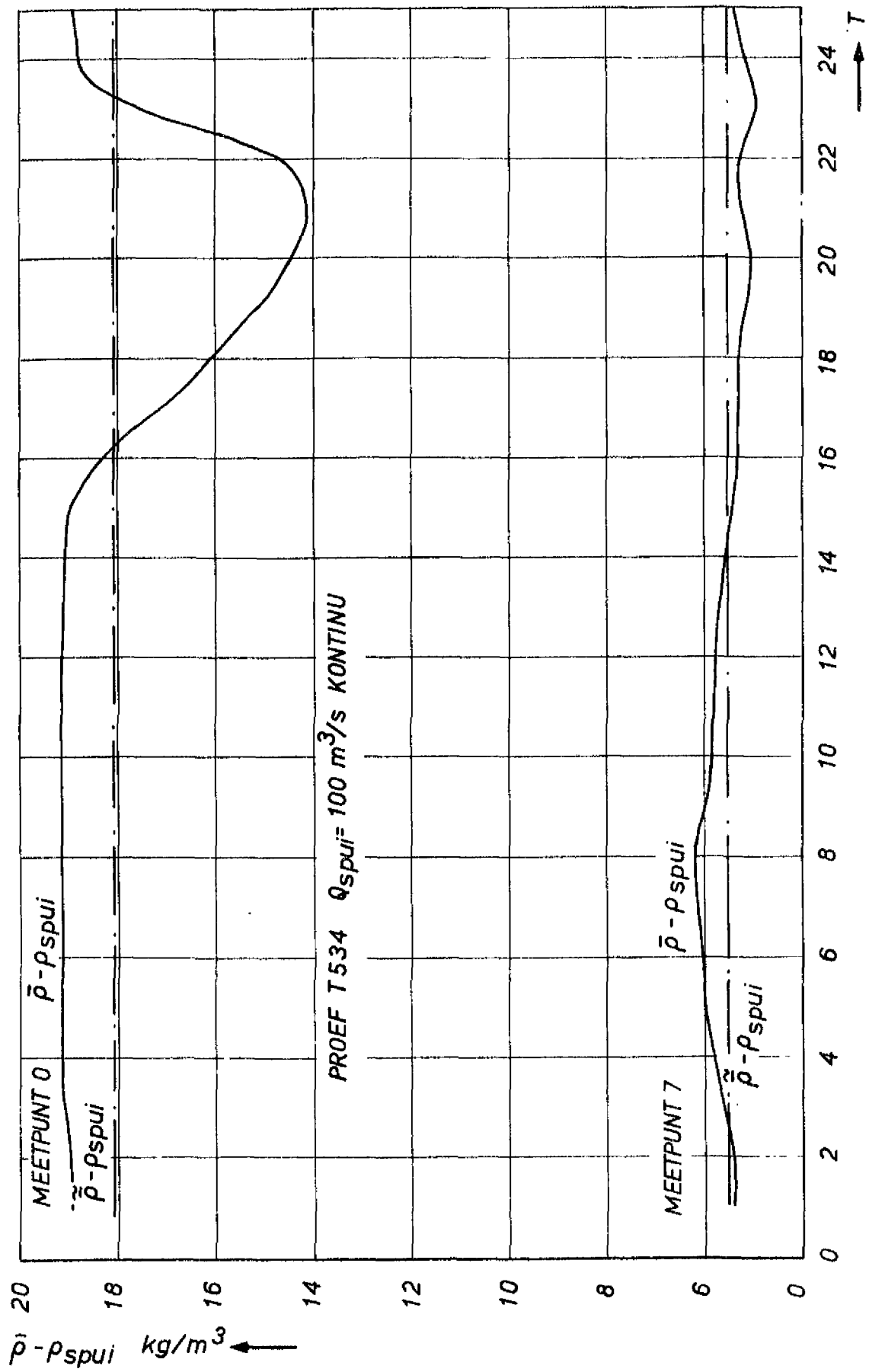
A4



- MEETRESULTATEN VOOR MEETPUNT 7 BIJ DISKONTINUU SPIJDEBIET
- ▲ MEETRESULTATEN VOOR MEETPUNT 7 BIJ KONTINUU SPIJDEBIET

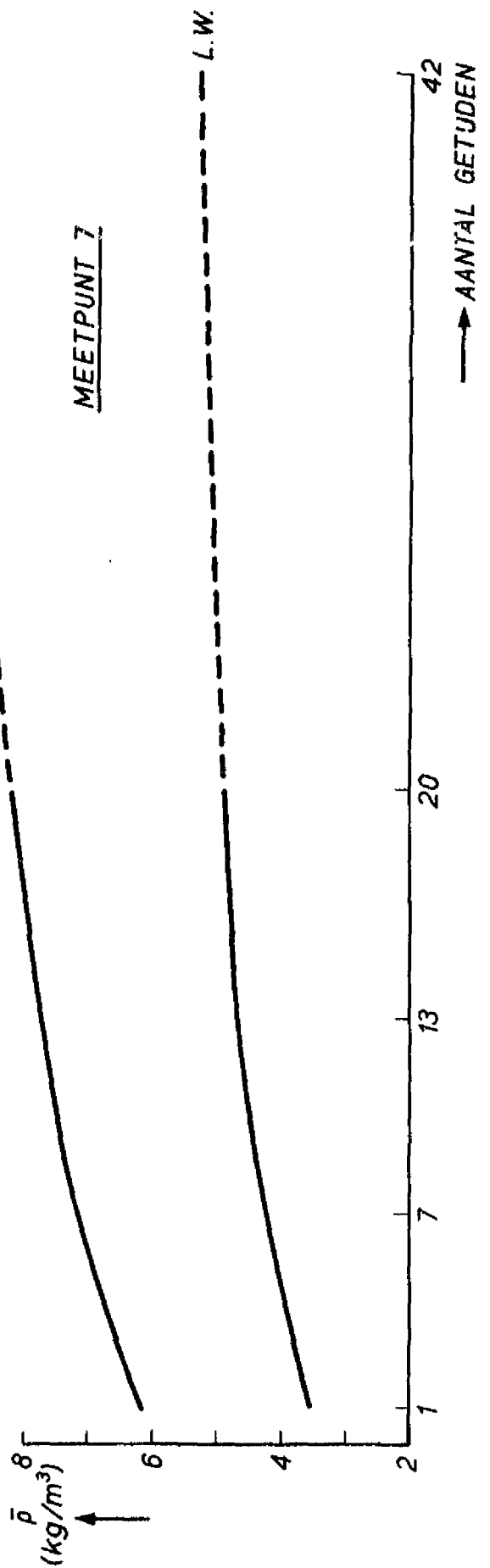
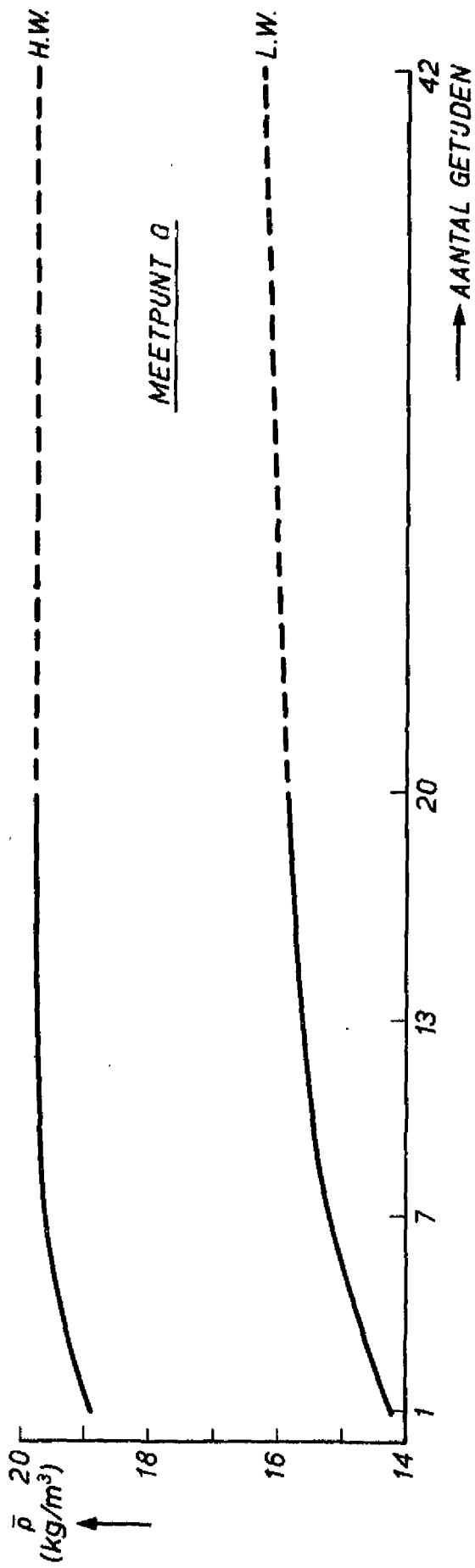
GETIJGEMIDDELTE KONCENTRATIES OP MEETPUNT 7  
( KONTINU EN DISKONTINU SPIJDEBIET )

JM  
A4



GEMETEN DICHTHEDEN MEETPT. 0 EN 7

JM  
A4



INSPEELGEDRAG PROEF T541-A

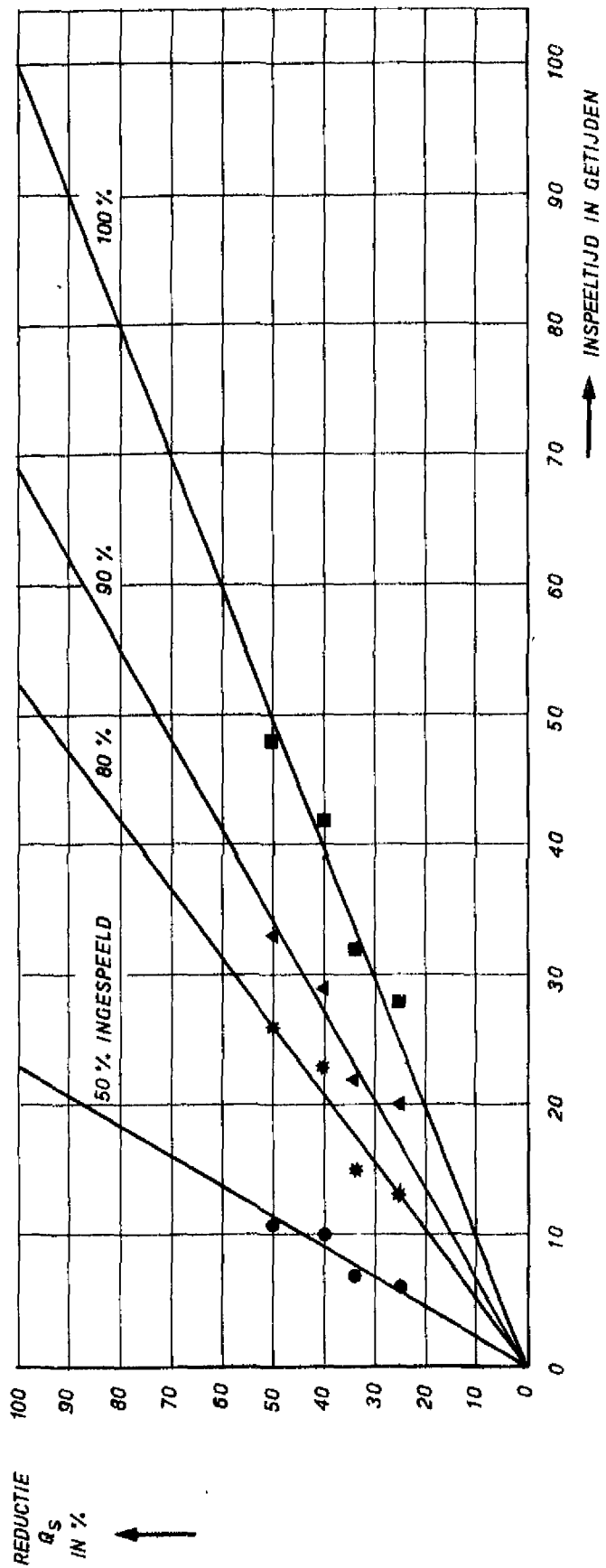
j.w.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1432 - 1021

FIG. 21

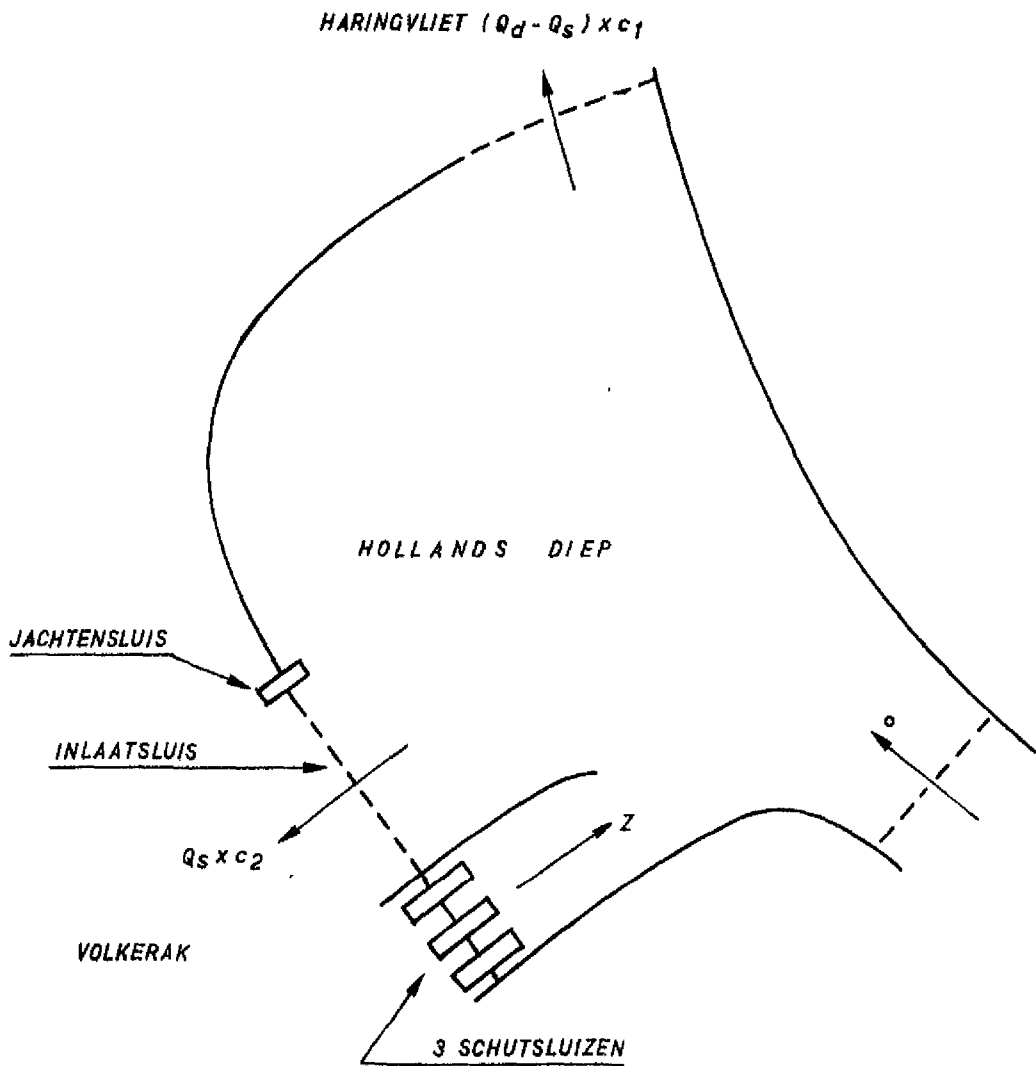


INSPEELTIJDEN BIJ REDUKTIE VAN  $Q_s$

JM

A4





$$Z - (Q_d - Q_s) c_1 - Q_s \cdot c_2 = 0$$

ZOUTBALANS OP HET HOLLANDSDIEP

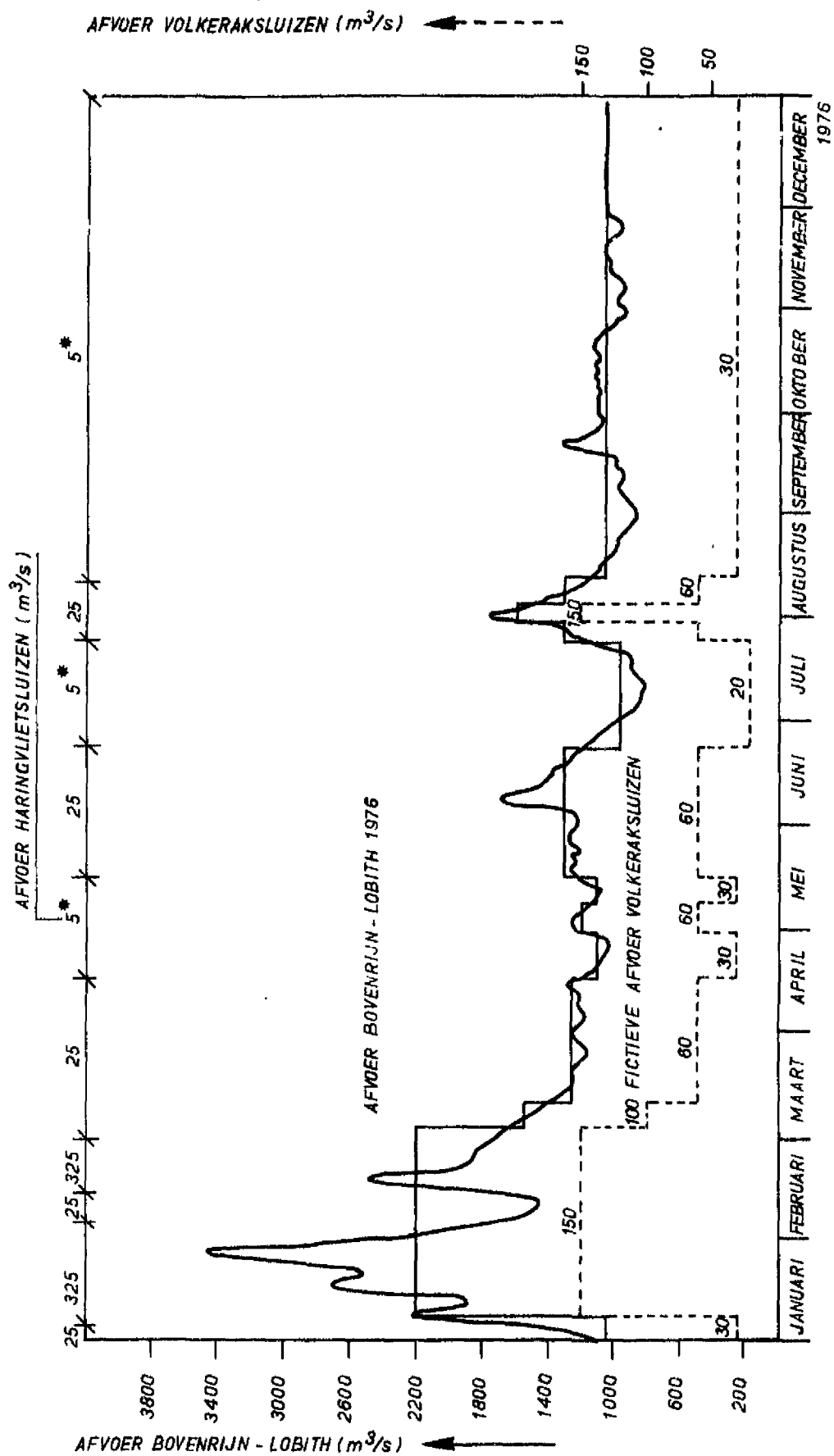
JM

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1432 - 1023

FIG. 23



\* MINIMUM DEBIET, MOET TE ALLEN TIJDE AFGEVOERD WORDEN

FIKTIEF SUIPROGRAMMA VOLKERAK INLAATSLUIS

JM

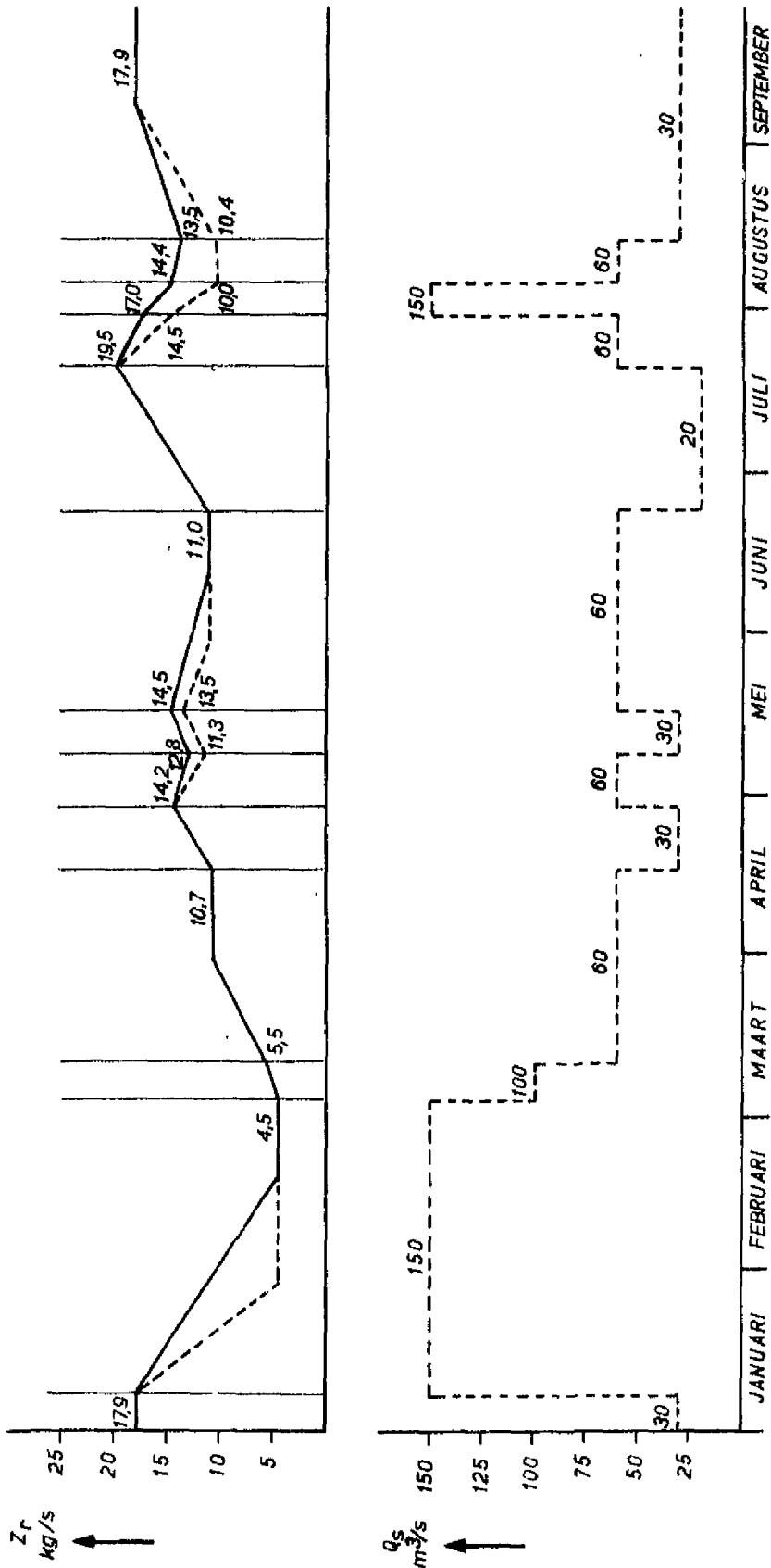
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1432-1024

FIG. 24

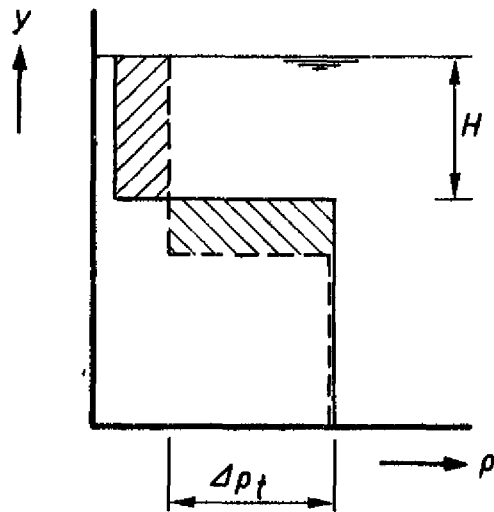
— REAKTIETIJD TOENAME  $Q_S =$  REAKTIETIJD AFNAME  $Q_S$   
 - - - " " =  $\frac{1}{2} \times$  " "



VERLOOP VAN HET RESTZOUTBEZWAAR  
 BIJ FIKTIEF SPUIPROGRAMMA

JM

A4



———— DICHTHEIDSVERLOOP OP  $t = t_1$

----- DICHTHEIDSVERLOOP OP  $t = t_2 = t_1 + \Delta t$

$$\text{VERT. TRANSPORT: } T_y = - \int \frac{\Delta \rho_t (y)}{\Delta t} dy$$

$$T_y \cdot \Delta t = |\Delta \rho_t| \cdot \Delta H$$

$$\text{ENTRAINMENTSNELHEID: } U_e = \frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{T_y}{\Delta \rho_t}$$

PRINCIPE VAN WIND-ENTRAINMENT

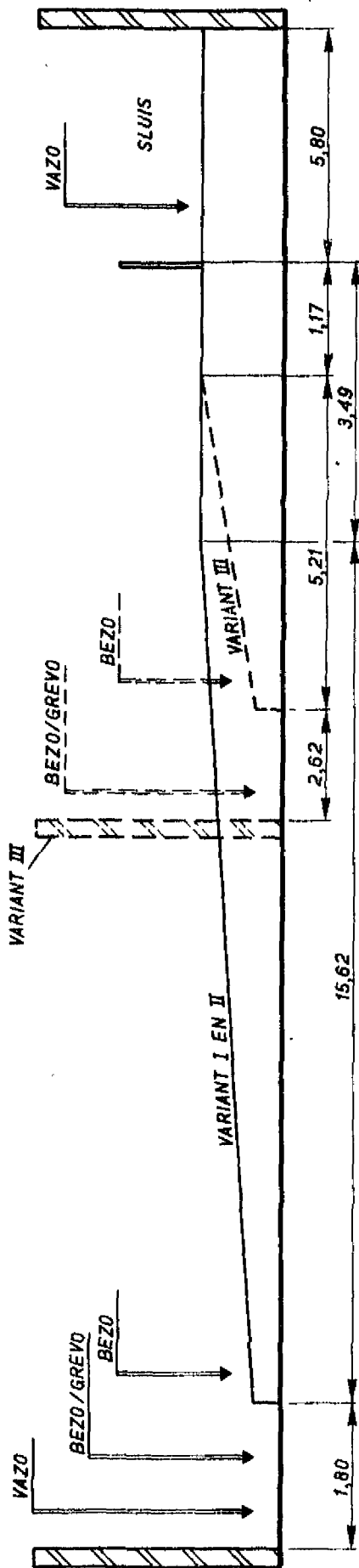
j.w.

A4

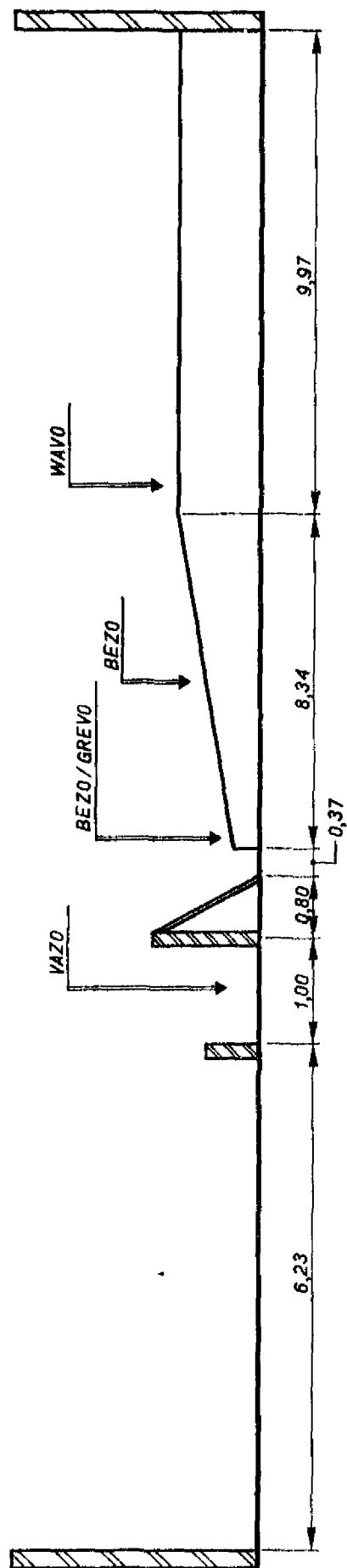
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1432 - 1026

FIG. 26



HELLINGONDERZOEK



SCHEEPVAARTONDERZOEK

SCHEMATISCHE VOORSTELLING MODELLEN HELLING -  
EN SCHEEPVAARTONDERZOEK

MATEN IN m MODEL

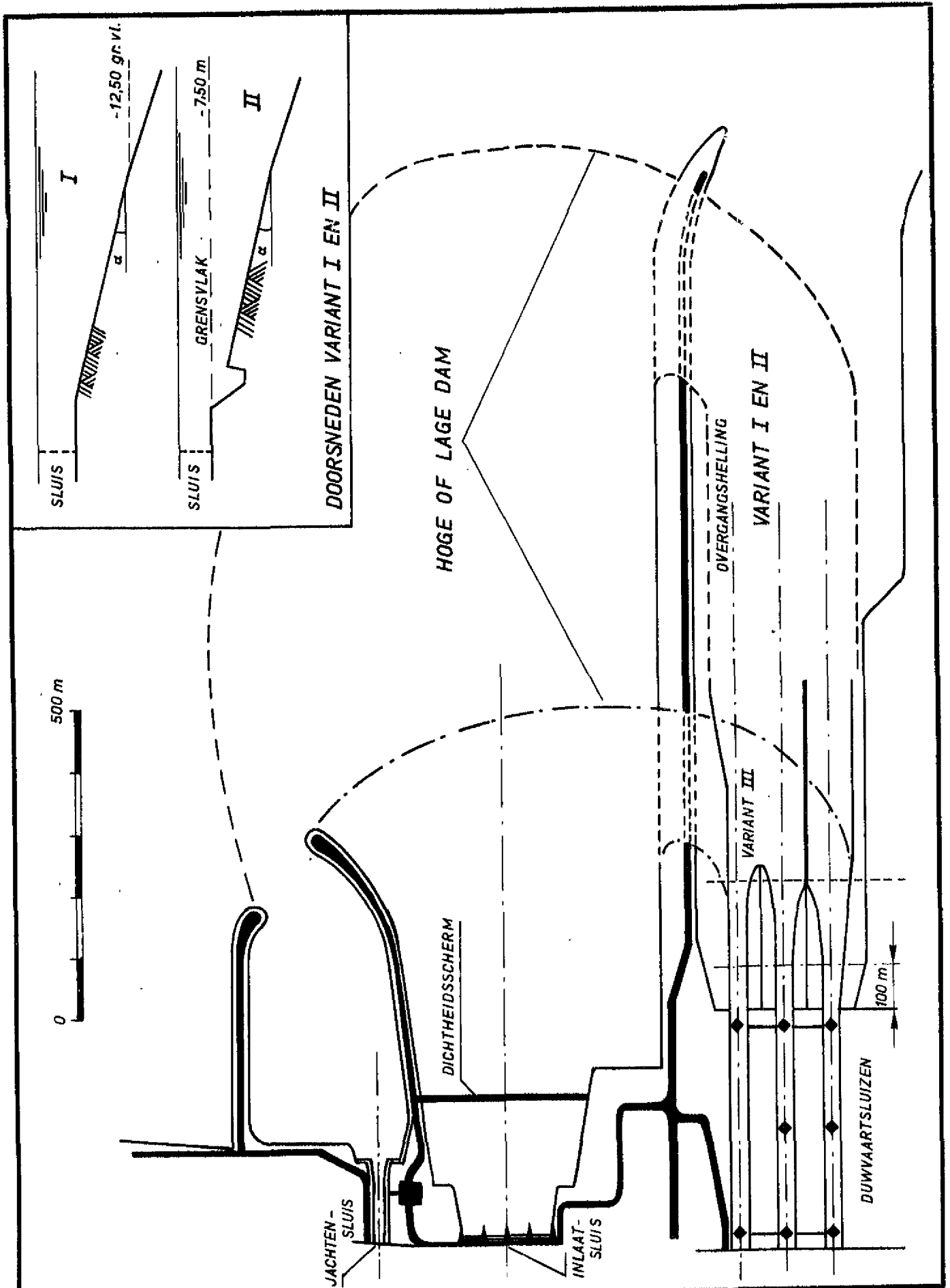
j.w.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1432 - 1027

FIG. 27



ONDERZOCHE VARIANTEN ZOUTBUFFERPUT  
EN OVERGANGSHELLING

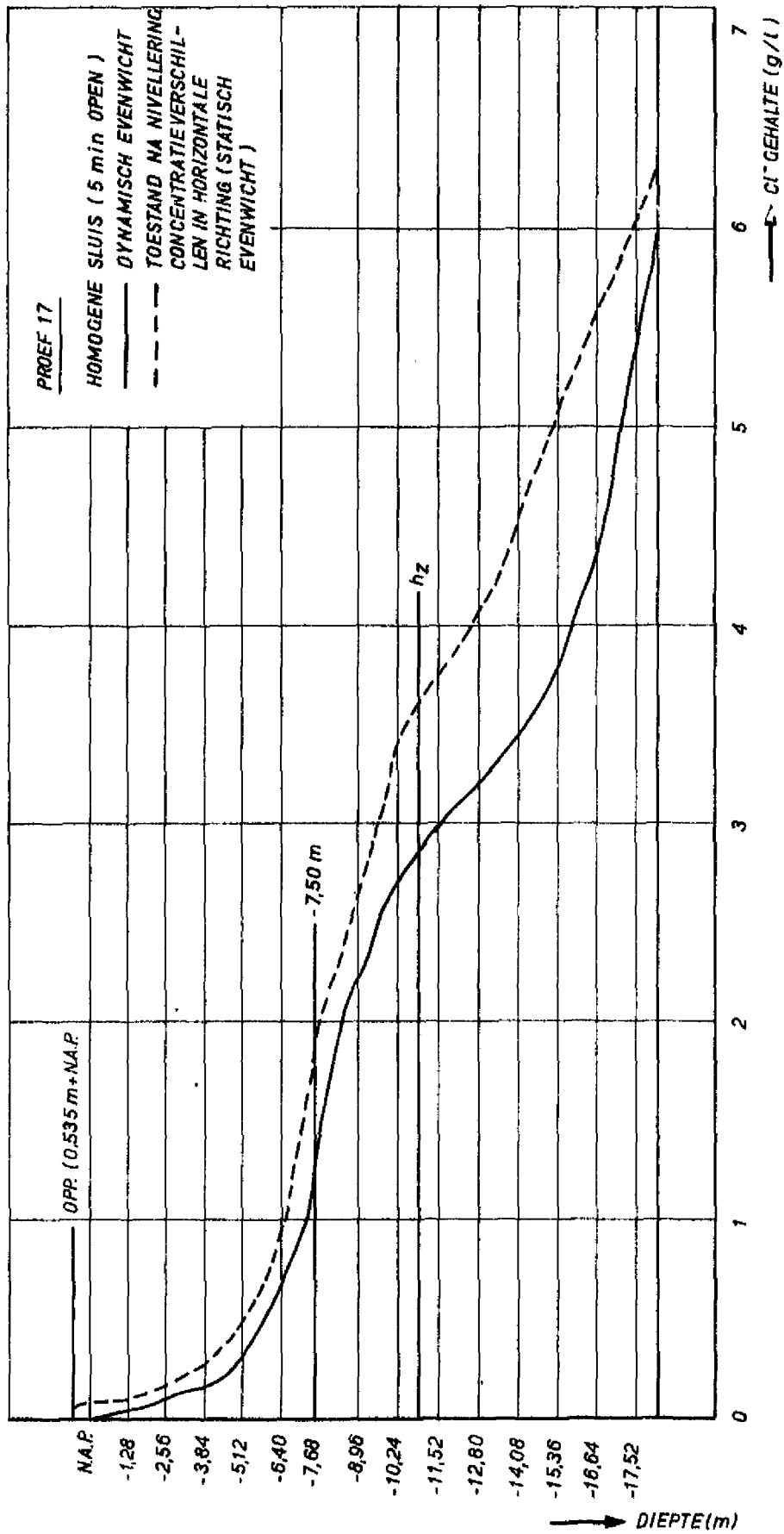
JM

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1432 - 1028

FIG. 28



GEMETEN ZOUTVERTIKAAL IN DE ZOUTBUFFERPUT

MATEN IN m PROTO

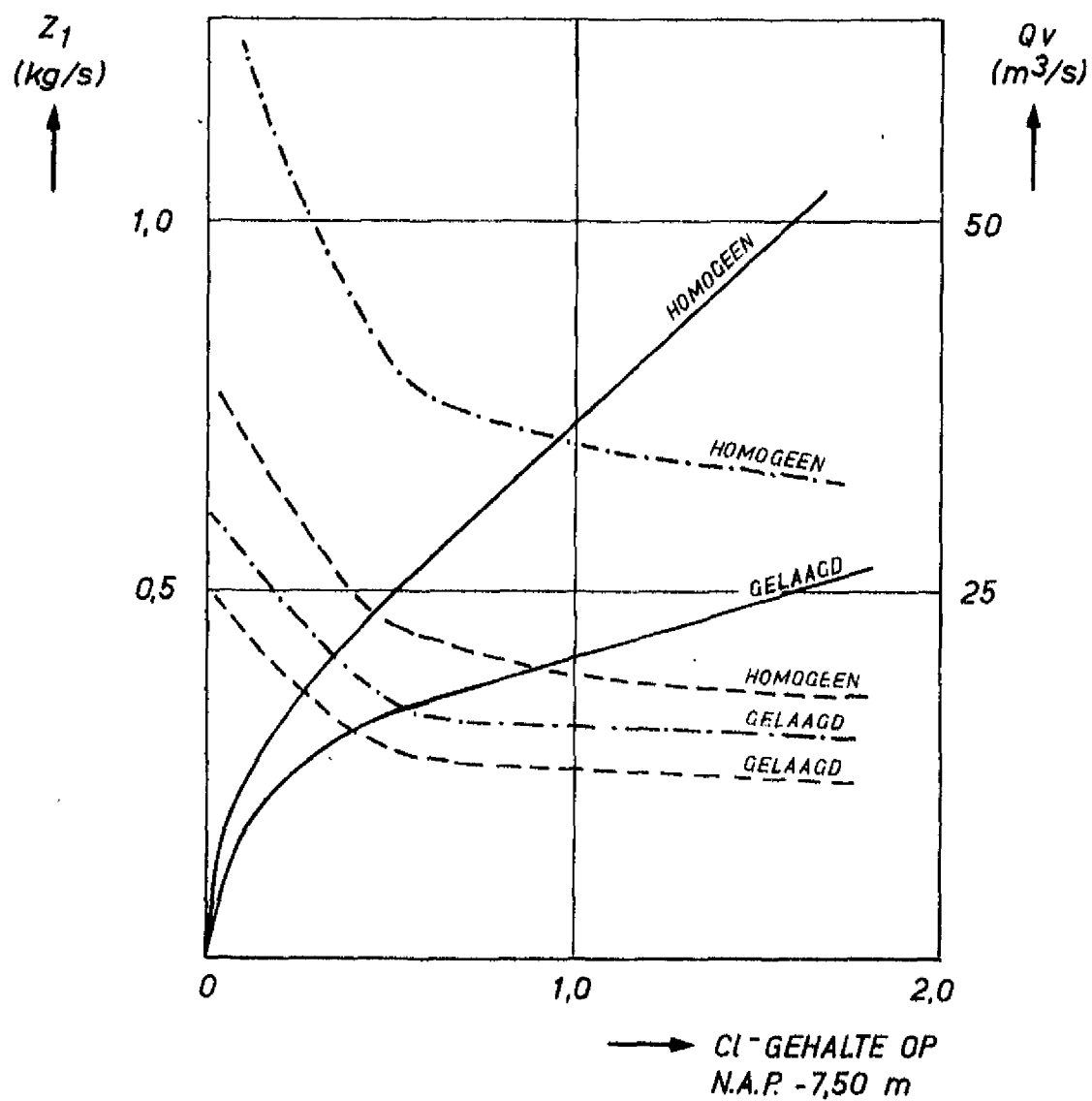
JM

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1432 - 1029

FIG.29



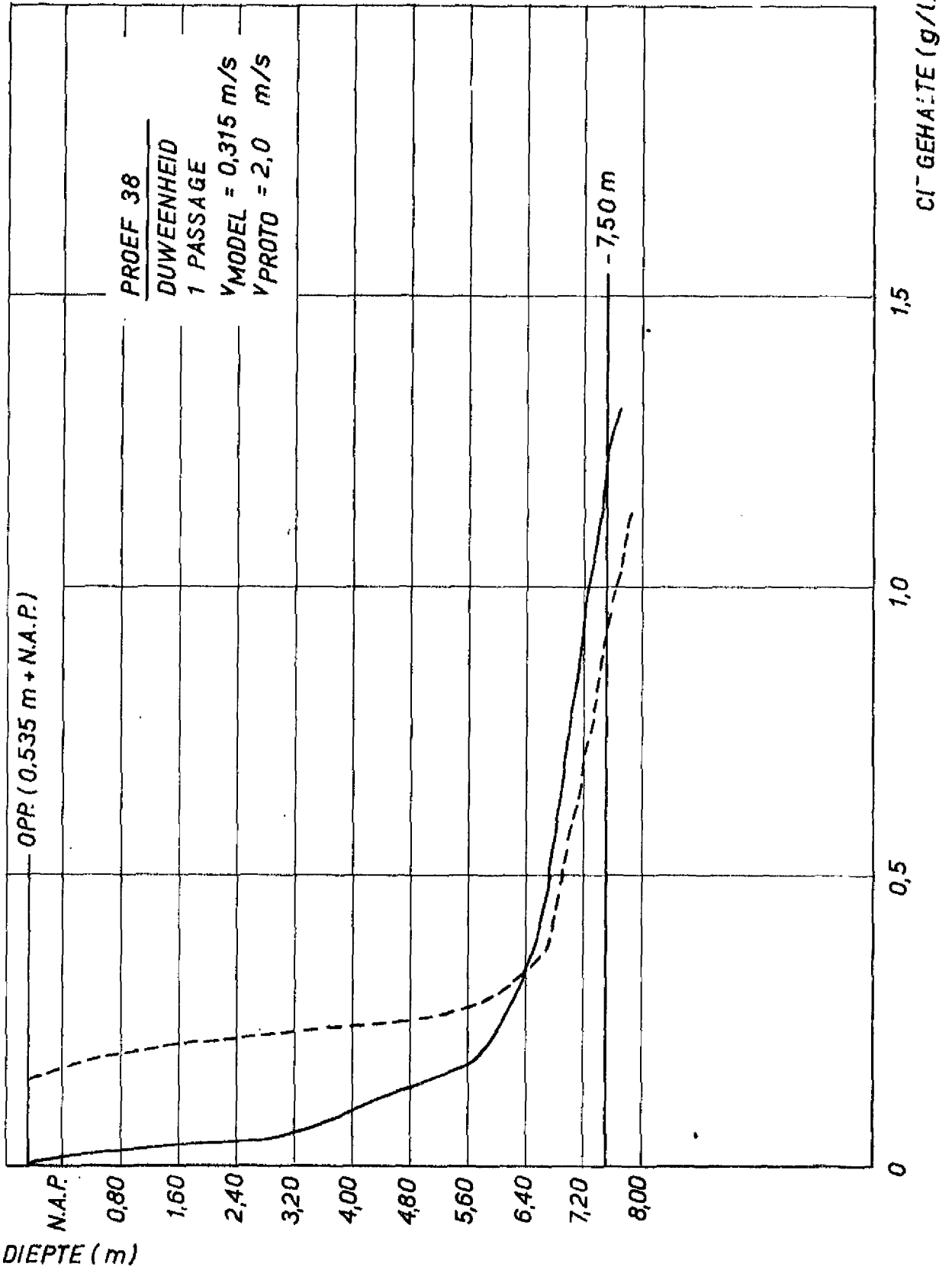
- RESTZOUTBEZWAAR
- - - - - WATERVERLIES MET LUCHTBELLEN SCHERM
- · - · - WATERVERLIES ZONDER LUCHTB. SCHERM

RESTZOUTBEZWAAR  $Z_1$  EN WATERVERLIES  $Q_v$  VOOR  
 HOMOGENE EN GELAAGDE SLUIS, MET EN ZONDER  
 LUCHTBELLENSCHERMEN

JM

A4





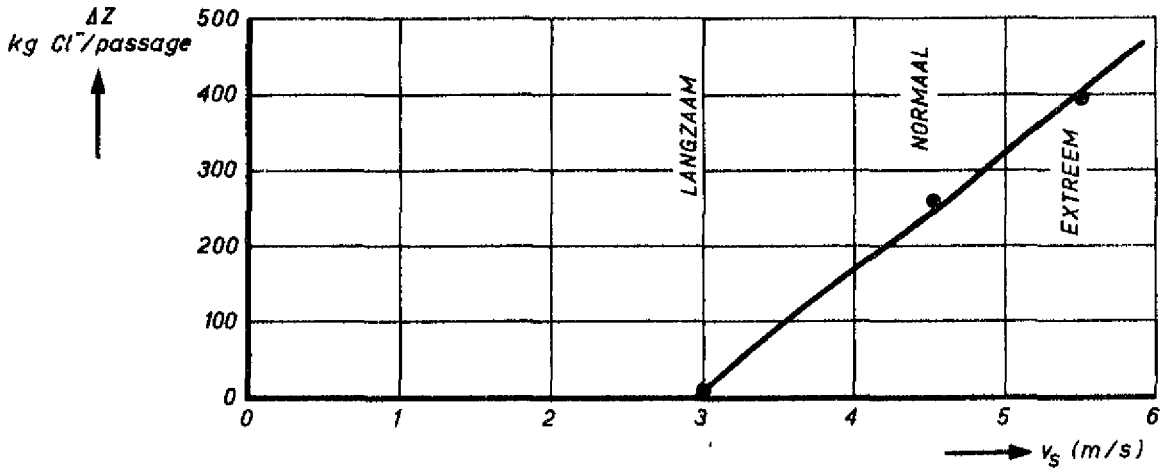
GEMETEN ZOUTVERTIKALEN VOOR EN NA  
PASSAGE DUWEEENHEID

JM

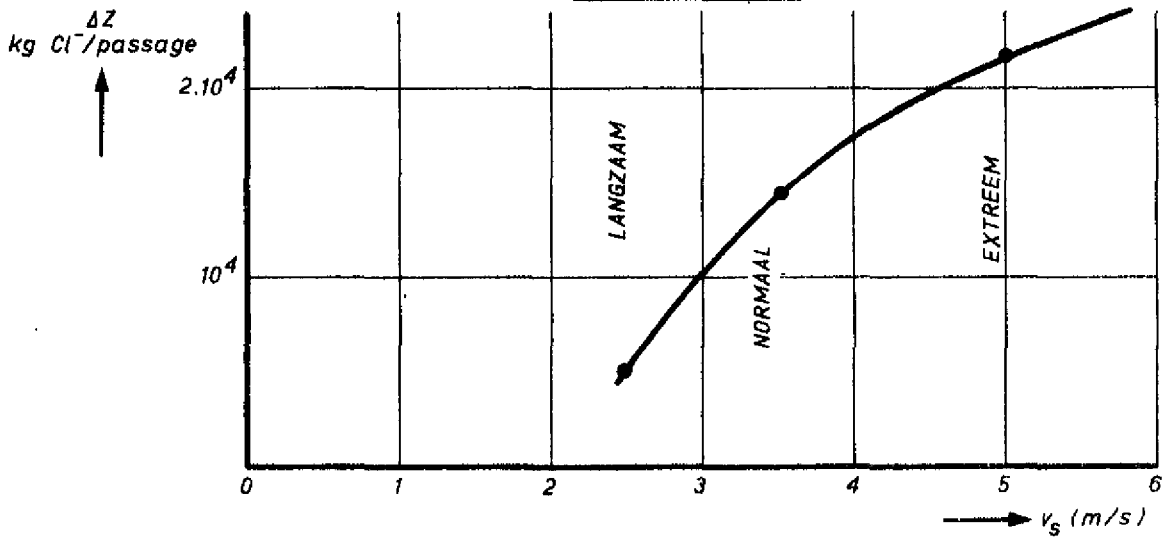
A4

KLEINE SCHIP: GEEN REST ZOUTBEZWAAR

MIDDELGROTE SCHIP



DUWEENHEID



TOENAME ZOUT IN DE BOVENLAAG PER SCHEEPSPASSAGE

j.w.

A4

p.o. box 177

delft

the netherlands