

REPRODUCTIE ZOUTTOESTAND
GETIJ RIVIEREN

XXII

SAMENVATTING ONDERZOEK 1967-1972

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
DELFT M896-XXII

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

REPRODUCTIE ZOUTTOESTAND GETIJRIVIEREN

XXII

Samenvatting onderzoek 1967 - 1972

M 896 - XXII

mei 1973

INHOUD

blz.

NOTATIES

LIJST VAN FIGUREN

<u>1. Inleiding</u>	1
1.1. Opdracht	1
1.2. Onderverdeling onderzoek	1
1.3. Tijdschema	3
1.4. Gegevensverwerking	4
1.5. Uitvoerders van het onderzoek	5
1.6. Rapportering	5
<u>2. Meetopstelling en gemeten grootheden</u>	6
<u>3. Vergelijking van de karakteristieken van de getijgoot met die van de Rotterdamse Waterweg</u>	10
3.1. Inleiding	10
3.2. Systematisch onderzoek	10
3.3. Reproductie Rotterdamse Waterweg in getijgoot	13
3.4. Samenvatting	16
<u>4. Toegepast onderzoek gericht op de Rotterdamse Waterweg</u>	17
4.1. Inleiding	17
4.2. Veranderingen in de zouttoestand ten gevolge van veranderingen in het getijregime als veroorzaakt door de afsluiting van het Haringvliet	17
4.3. Effect van plaatselijke verondieping van de rivier op de zouttoestand	18
4.4. Effect van dwars op de as van de rivier aangebrachte luchtbellengordijnen op de zouttoestand	18
4.5. Verandering in zoutpenetratie bij middenstandsverhoging op zee ten gevolge van opwaaiing	19
4.6. Oosterschelde, zoutbezwaar bij de Volkeraksluizen	20
<u>5. Schaalonderzoek</u>	20
5.1. Inleiding	20

INHOUD (vervolg)

5.2. Beperkingen van het onderzoek	21
5.3. Uitgevoerde proeven	22
5.3.1. Afmetingen fictief prototype	22
5.3.2. Modelschalen bij het schaalonderzoek	22
5.3.3. Meetresultaten	23
5.4. Conclusies	24
<u>6. Fundamenteel onderzoek</u>	26
6.1. Theoretische grondslagen	26
6.1.1. Twee-dimensionale beschrijving	26
6.1.2. Eén-dimensionale beschrijving	27
6.2. Twee-dimensionaal onderzoek	29
6.2.1. Grootte van turbulente diffusie- en schuifspannings- coëfficiënten	29
6.2.2. Onderzoek naar de geldigheid van het twee-dimensionaal stelsel differentiaalvergelijkingen	32
6.2.3. Numerieke techniek voor het oplossen van de twee- dimensionale vergelijkingen	33
6.3. Eén-dimensionaal onderzoek	34
6.3.1. Toetsing van één-dimensionale en verwante modellen	34
6.3.2. Dimensie-analyse	35
6.3.3. Onderzoek van dispersiecoëfficiënt	36
6.3.4. Numerieke techniek voor het oplossen van de één- dimensionale vergelijkingen	36
<u>7. Voorstellen tot verder onderzoek</u>	37
7.1. Fundamenteel onderzoek	37
7.1.1. Twee-dimensionaal onderzoek	37
7.1.2. Eén-dimensionaal onderzoek	40
7.2. Onderzoek gericht op modeltechniek	40
<u>Appendix I : Convectief, diffusief en dispersief zout- transport</u>	41

INHOUD (vervolg)

<u>Appendix II : Kanttekeningen bij het schaalonderzoek</u>	45
1. Keuze van middelen tot vergroting van stromingsweerstand	45
2. Niet in de getijgoot bestudeerde effecten	47
2.1. Dispersief transport door dwarsvariatiaties in vergelijking met dispersief transport door verticale variatiaties	47
2.2. Niet in de getijgoot gereproduceerde mengmechanismen	49
2.2.1. Schaalregel voor menging	49
2.2.2. Reproductie van menging veroorzaakt door kribben	50
2.2.3. Reproductie van menging ten gevolge van instabiliteit van ge-laagde stroming	51
2.2.4. Samenvatting	52
 <u>Appendix III: Lange golftheorie toegepast voor twee-dimensionale storing in atmosferische druk boven twee-lagenstroming</u>	53
1. Probleemstelling	53
2. Oplossing	53
 <u>REFERENTIES</u>	57

FIGUREN

NOTATIES

- a_0 : verticale getij-amplitude ($2a_0 =$ getijverschil)
- a_1 : variatie in dikte bovenlaag bij een twee-lagensysteem (appendix III)
- a_2 : variatie in dikte onderlaag bij een twee-lagensysteem (appendix III)
- c : zoutconcentratie (chloride gehalte)
- \bar{c} : zoutconcentratie, gemiddelde over het dwarsprofiel
- c_z : zoutconcentratie (constant) op zeerand getijgoot
- c'' : $c'' = c - \bar{c}$, afwijking van de lokale zoutconcentratie van de over het dwarsprofiel gemiddelde waarde (fig. I.5)
- g : zwaartekrachtsversnelling
- h : waterhoogte
- h_0 : over het getij gemiddelde waterdiepte (middenstand)
- h_z : waterhoogte zeerand getijgoot (randvoorwaarde)
- $n..$: schaal van met index aangegeven grootheid (waarde in het model gedeeld door waarde in het prototype)
- n : vertrekking ($n = n_n/n_1$)
- p : druk
- \hat{q}_{eb} : maximale ebdebiet per m breedte
- q_r : bovenafvoer per m breedte
- t : tijd, gemeten vanaf tijdstip met een waterstand gelijk aan de middenstand in de mond van de goot bij stijgend water
- u : horizontale snelheidscomponent in x-richting
- \bar{u} : horizontale snelheidscomponent in x-richting, gemiddelde over het dwarsprofiel
- u' : turbulente afwijking van de lokale snelheid u
- u'' : $u'' = u - \bar{u}$, afwijking van de lokale snelheid van de over het dwarsprofiel gemiddelde snelheid (fig. I.5)
- u_{*} : schuifspanningssnelheid volgens $u_{*}^2 = \tau/\rho$
- u_{*b} : schuifspanningssnelheid aan de bodem volgens $u_{*b}^2 = \tau_b/\rho$
- u_1 : variatie in de snelheid U_1 van de bovenlaag bij een twee-lagensysteem (appendix III)
- u_2 : variatie in de snelheid U_2 van de onderlaag bij een twee-lagensysteem (appendix III)
- v : verticale snelheidscomponent (in y-richting)
- v' : turbulente afwijking van de lokale snelheid v
- x : horizontale coördinaat (lengterichting getijgoot) (gemeten vanaf de mond van de getijgoot)
- y : verticale coördinaat (gemeten vanaf de bodem)

NOTATIES (vervolg)

- A : oppervlakte beschouwde doorsnede
- A_1 : dikte bovenlaag bij twee-lagensysteem (appendix III)
- A_2 : dikte onderlaag bij twee-lagensysteem (appendix III)
- C : weerstandscoefficiënt volgens Chézy
- D_x : diffusie coëfficiënt voor de x-richting
- D_y : diffusie coëfficiënt voor de y-richting
- D_x' : dispersie coëfficiënt
- F_r : getal van Froude
- F_r' : intern Froudegetal
- F_z : totale convectieve zouttransport
- F_D : dispersief zouttransport
- K_e : getal van Keulegan
- K_y : turbulente viscositeit
- L : lengte van beschouwde gootvormige rivier (zie par. 3.2.); lengtemaat
- L_R : resonantielengte ($L_R = \frac{1}{4} T \sqrt{gh_0}$)
- L_i : zoutindringingslengte
- Q : debiet
- $\bar{Q}; Q_R$: constante bovenafvoer; rivierdebiet
- Q_{BR} : bovenafvoer van de Rijn
- R : hydraulische straal
- Re : getal van Reynolds
- R_p : verhoudingsgetal drukgradiënten
- R_i : getal-van Richardson
- T : getijperiode
- T_x : diffusief transport in x-richting
- T_x' : dispersief transport
- T_y : diffusief transport in y-richting
- T_v : dispersief transport ten gevolge van variaties in snelheid en zoutconcentratie in verticale richting
- T_T : dispersief transport ten gevolge van variaties in snelheid en zoutconcentratie in dwarsrichting
- U_1 : snelheid in x-richting in bovenlaag bij twee-lagensysteem (appendix III)
- U_2 : snelheid in x-richting in onderlaag bij twee-lagensysteem (appendix III)
- Δt : $\Delta t = 0,04 T$ (zie fig. 2.2.)
- Δx : meetafstand in lengterichting (~ 2340 m prototypemaat, zie fig. 2.2.)
- Δy : meetafstand in verticale richting ($= 0,077 h_0$, zie fig. 2.2.)

NOTATIES (vervolg)

- δ : vertrekking ($\delta = n_h/n_l$)
 ϵ : $\epsilon = \Delta\rho/\rho = (\rho_z - \rho_o)/\rho_z$
 λ : lengte getijgolf volgens $\lambda = \sqrt{gh_o} \cdot T$.
 ν : kinematische viscositeit
 ρ : dichtheid
 ρ_z : dichtheid zeewater (randvoorwaarde)
 ρ_o : dichtheid zoetwater (rivierwater)
 $\bar{\rho}$: dichtheid, gemiddelde over het dwarsprofiel
 ρ' : turbulente afwijking van de lokale dichtheid
 ρ_1 : dichtheid bovenlaag bij twee-lagensysteem
 ρ_2 : dichtheid onderlaag bij twee-lagensysteem
 $\Delta\rho$: $\Delta\rho = \rho_z - \rho_o$ respectievelijk $\rho_2 - \rho_1$
 τ : schuifspanning, turbulente schuifspanning
 τ_b : schuifspanning aan de bodem

- H.W.K. (H.W.) : hoogwaterkentering
L.W.K. (L.W.) : laagwaterkentering
M.V.S. (M.V.) : maximum vloedstroom
M.E.S. (M.E.) : maximum ebstroom

LIJST VAN FIGUREN

MEETOPSTELLING (par. 2)

- Fig. 2-1 : Meetopstelling getijgootproeven
- Fig. 2-2 : Opzet getijgootonderzoek
- Fig. 2-3 : Schema meetopstelling

VERGELIJKING VAN DE KARAKTERISTIEKEN VAN DE GETIJGOOT MET DIE VAN DE ROTTERDAMSE WATERWEG (par. 3)

Onderzoek variatie randvoorwaarden en stromingscondities

- Fig. 3-1 : Zoutindringing bij variatie waterhoogte
- Fig. 3-2 : Zoutindringing bij variatie gootlengte
- Fig. 3-3 : Zoutindringing bij variatie bovenafvoer
- Fig. 3-4 : Zoutindringing bij variatie getijverschil
- Fig. 3-5 : Zoutindringing bij variatie zoutconcentratie zee
- Fig. 3-6 : Zoutindringing bij variatie Chézy-coëfficiënt
- Fig. 3-7 : Zoutindringing bij variatie luchtinjectie goot
- Fig. 3-8 : Gemiddelde snelheden - invloed lengte en Chézy-coëfficiënt
- Fig. 3-9 : Overzicht geometrie Rotterdamse Waterweg in 1908
- Fig. 3-10 : Overzicht geometrie Rotterdamse Waterweg in 1956
- Fig. 3-11 : Overzicht geometrie Rotterdamse Waterweg in 1966
- Fig. 3-12 : IJking dichtheden Rotterdamse Waterweg 21 juni 1956
- Fig. 3-13 : Maximale zoutindringing Rotterdamse Waterweg, 21 juni 1956, 17.00 M.E.T. Vergelijking model - prototype
- Fig. 3-14 : Minimum indringingslengten isopycnen. Vergelijking getijgoot (model) - Rotterdamse Waterweg (prototype)
- Fig. 3-15 : Maximum indringingslengten isopycnen. Vergelijking getijgoot (model) - Rotterdamse Waterweg (prototype)
- Fig. 3-16 : Indringing isopycnen 1002 kg/m^3 . Vergelijking getijgoot (model) - Rotterdamse Waterweg (prototype)

SCHAALONDERZOEK (par. 5)

- Fig. 5-1 : Vergelijking zoutmetingen in getijgoot bij vertrekking 5,10 en 20. (staafjesruwheid). Relatieve dichtheden als functie van x, y en t
- Fig. 5-2 : Vergelijking zoutmetingen in getijgoot bij vertrekking 5,10 en

LIJST VAN FIGUREN (vervolg)

- 20 (staafjesruwheid). Relatieve dichtheid $(\rho - \rho_0)/(\rho_z - \rho_0)$ als $f(y)$
voor $x/\Delta x = 2$
- Fig. 5-3 : Vergelijking zoutmetingen in getijgoot bij vertrekking 5,10 en
20 (staafjesruwheid). Relatieve dichtheid $(\rho - \rho_0)/(\rho_z - \rho_0)$ als $f(y)$
voor $x/\Delta x = 7$
- Fig. 5-4 : Vergelijking zoutmetingen in getijgoot bij vertrekking 5,10 en
20 (bodemruwheid). Relatieve dichtheden als functie van x , y en t
- Fig. 5-5 : Vergelijking zoutmetingen in getijgoot bij vertrekking 5,10 en
20 (bodemruwheid). Relatieve dichtheid $(\rho - \rho_0)/(\rho_z - \rho_0)$ als $f(y)$
voor $x/\Delta x = 2$
- Fig. 5-6 : Vergelijking zoutmetingen in getijgoot bij vertrekking 5,10 en
20 (bodemruwheid). Relatieve dichtheid $(\rho - \rho_0)/(\rho_z - \rho_0)$ als $f(y)$
voor $x/\Delta x = 7$

FUNDAMENTEEL ONDERZOEK (par. 6)

- Fig. 6-1 : Schema twee-dimensionaal onderzoek
- Fig. 6-2 : Overzicht uitgevoerde grootheden
- Fig. 6-3 : Schema één-dimensionaal onderzoek
- Fig. 6-4 : Uitwisselingscoëfficiënten volgens literatuuronderzoek Vreugdenhil
(1967) (ref. 20)
- Fig. 6-5 : Dimensie-analyse zoutindringing
- Fig. 6-6 : Dispersief transport $u'c'$ als $f(x, t)$ voor proef T145 in de ge-
tijgoot met bodemruwheid
- Fig. 6-7 : Dispersief transport $\overline{u'c'}$ in Rotterdamse Waterweg, kmr. 1030,
datum 21-6-1956. Splitsing in verticale - (T_v) en dwarsbijdrage (T_T)

Appendix I : CONVECTIEF, DIFFUSIEF EN DISPERSIEF ZOUTTRANSPORT

- Fig. I-1 : Dichtheid $\rho - 1000$ als $f(y)$ bij staafjesruwheid
- Fig. I-2 : Snelheid u als $f(y)$ bij staafjesruwheid
- Fig. I-3 : Dichtheid $\rho - 1000$ als $f(y)$ bij bodemruwheid
- Fig. I-4 : Snelheid u als $f(y)$ bij bodemruwheid
- Fig. I-5 : Structuur dispersief transport bij staafjesruwheid

1. Inleiding

1.1. Opdracht

Bij brief nr. 6698, d.d. 10 augustus 1966, werd door de Deltadienst van Rijkswaterstaat aan het Waterloopkundig Laboratorium opdracht gegeven tot het verrichten van modelonderzoek met dichtheidsstromen in een getijgoot. Bij voorafgaand overleg op 14 juli 1966 werd de doelstelling van het onderzoek als volgt geformuleerd:

- het verbeteren van de modeltechniek van waterloopkundige modellen met niet-permanente dichtheidsstromen in verband met het in het getijmodel Rijnmond (M 900) te verrichten onderzoek
- het verder ontwikkelen van theorieën, met behulp waarvan dichtheidsstromen in estuaria beschreven kunnen worden.

Nauwkeurige voorspellingen van de zoutverdeling, die een gevolg is van de in een estuarium optredende dichtheidsstromen, kunnen met behulp van de bestaande theorieën over dit onderwerp niet worden gegeven (ref. 1). Op grond hiervan werd het wenselijk geacht om naast het onderzoek in het getijmodel Rijnmond een meer fundamenteel gericht onderzoek over de zoutverdeling in een estuarium uit te voeren (ref. 2).

Lopende het onderzoek bleek de getijgoot tot in zekere mate geschikt te zijn voor het bepalen van de tendensen in de veranderingen in de zouttoestand op de Rotterdamse Waterweg bij veranderingen in deze rivier. Dit leidde er toe de getijgoot ook in te schakelen ter beantwoording van enige praktijkvragen over de zouttoestand op de Rotterdamse Waterweg. Dit geschiedde omdat het getijmodel Rijnmond hiertoe niet kon worden gebruikt daar het volledig voor het onderzoek van de nieuwe havenmond was ingeschakeld.

1.2. Onderverdeling onderzoek

Het in maandelijks overleg met de Waterloopkundige Afdeling van de Deltadienst uitgevoerde onderzoek omvatte de volgende onderdelen:

- I. Vergelijking van de karakteristieken van de getijgoot met die van de Rotterdamse Waterweg

1. Systematisch onderzoek waarbij de invloed van de volgende parameters op de zoutindringing is bepaald:
 - waterdiepte
 - lengte van de rivier
 - bovenafvoer
 - amplitude van het vertikale getij op zee
 - dichtheid van zeewater
 - Chézy-coëfficiënt van de rivier
 - kunstmatige versterking van de menging in de rivier
2. Reproductie in de getijgoot van de zouttoestand in de Rotterdamse Waterweg als opgetreden in 1908, 1956 en 1966/67.

II. Toegepast onderzoek gericht op de Rotterdamse Waterweg

1. Bestudering van veranderingen in de zouttoestand ten gevolge van veranderingen in het getijregime als veroorzaakt door de afsluiting van het Haringvliet.
2. Bestudering van het effect van een plaatselijke verondieping van de rivier op de zouttoestand.
3. Bestudering van het effect van een dwars op de as van de rivier in de mond van de rivier aangebracht luchtbellengordijn op de zouttoestand.
4. Bestudering van het gevolg van een opwaaiing op zee voor de zouttoestand.

Daarnaast zijn enige proeven verricht ter vergelijking van de zouttoestand op het traject Zijpe-Volkeraksluizen vlak vóór en vlak nà de afsluiting van de Oosterschelde.

III. Onderzoek gericht op modeltechniek

1. Onderzoek van de invloed van de modelschalen, in het bijzonder van de invloed van de mate van vertrekking op de reproductie van de zoutverdeling.
2. Onderzoek om na te gaan op welke wijze de mate van reproductie kan worden beïnvloed. (Dit onderzoek staat in nauw verband met het onder I.2. genoemde onderzoek.)

IV. Fundamenteel onderzoek

1. Aanvulling van het onder I.1. genoemde systematische onderzoek.
2. Analyse van bovengenoemde meetgegevens om daarin aanwezige verbanden te onderkennen. Hiertoe is onder meer gebruik gemaakt van dimensie-analyse en van in de literatuur beschreven methoden.

V. Toegevoegde onderzoeken

Naast het getijgootonderzoek zijn de volgende in hoofdzaak uit het speurwerkbudget van het Waterloopkundig Laboratorium gefinancierde onderzoeken uitgevoerd, omdat zij indirect een ondersteuning voor het getijgootonderzoek zouden kunnen leveren.

1. turbulentiemetingen (ref. 3 en 4, rapport M 896-16)
2. ontwikkelen van numerieke techniek voor twee lagen benadering en voor een één-dimensionale benadering (ref. 5 en 6)
3. lineaire instabiliteitstheorie toegepast op drie-lagensysteem (ref. 7)
4. stabiliteitsonderzoek van gelaagde stroming over gegolfde bodem (ref. 8).

Voor deze onderzoeken wordt verwezen naar de betrokken referenties.

1.3. Tijdschema

De bouw van de getijgoot (eigenlijke goot en gebouw) kwam gereed 4e kwartaal 1967. Het inspelen van de goot en het onder de knie krijgen van de meettechniek duurde tot 2e kwartaal 1968.

In 1968 werden de proeven ter reproductie van de zouttoestand op de Rotterdamse Waterweg als opgetreden in 1956 en 1967 uitgevoerd. Tevens werd een aanvang gemaakt met de in het kader van het systematisch onderzoek uitgevoerde proeven-serie.

Deze serie proeven werd in de loop van 1969 voltooid.

De proeven ter reproductie van de zouttoestand op de Rotterdamse Waterweg als opgetreden in 1908 zijn begin 1970 uitgevoerd. Daarna is in 1970 een aanzet gegeven tot het praktisch gerichte onderzoek (getij-omstandigheden als na Deltaplan, verondieping, eerste deel luchtbellengordijn) en tot het schaalonderzoek. In 1971 werd het praktisch gerichte onderzoek voortgezet (tweede deel

luchtbellengordijn, opwaaiing) evenals het schaalonderzoek ter aanvulling van de serie systematische proeven.

In 1972 werden wederom enige proeven uitgevoerd ter aanvulling van de systematische proeven en ter aanvulling van het onderzoek van de modeltechniek.

1.4. Gegevensverwerking

Bij de proeven wordt het verloop van de dichtheden en snelheden (veelal in 16 raaien op 12 niveaux) en van de waterstanden (veelal in 16 raaien) met de tijd in een getijperiode gemeten. De meetgegevens worden op papier uitgeschreven als een analoog signaal. Met behulp van een lijnvolger worden de analoge signalen gedigitaliseerd, waarbij de turbulente variaties worden geëlimineerd (visueel middelen). Op basis van de op deze wijze verkregen invoergegevens kunnen met behulp van de computer berekeningen worden uitgevoerd. De uitvoer wordt daarbij in tabelvorm geleverd. Daarnaast is het mogelijk de berekende gegevens door middel van een plotter grafisch weer te geven.

Bij de aanvang van het getijgootonderzoek beschikte het Waterloopkundig Laboratorium over een geringe ervaring in het op grote schaal verwerken van meetgegevens. Daarom werd de verwerking gebaseerd op digitaliseren met behulp van de lijnvolger.

Digitaliseren van de meetgegevens zonder tussenschakelen van een visuele presentatie van de meetgegevens werd te riskant geacht.

Lopende het onderzoek is het digitaliseren van de vele meetgegevens met behulp van de lijnvolger (handarbeid) zeer tijdrovend gebleken (veelal 400 registraties van een met de tijd in een getijperiode variërend signaal per proef). De verwerkte signalen kwamen pas in de orde van een half jaar na het verrichten van de proeven beschikbaar, waardoor de verslagen over de verschillende onderdelen van het onderzoek veelal een jaar of langer na het verrichten van de betrokken proeven ter beschikking kwamen. Inmiddels zijn er voorbereidingen getroffen om de lijnvolger als tussenstap bij het digitaliseren uit te schakelen. In de loop van 1973 zal het mogelijk zijn tijdens de proeven gedigitaliseerde meetsignalen rechtstreeks (on line) bij de computer in te leveren.

Markante tijdstippen:

- van oktober 1967 tot oktober 1968: ontwikkeling rekenprogramma's

- van oktober 1968 tot september 1969: ontwikkeling programma's nodig voor inschakelen van plotter
- eind 1971: aanvang voorbereiding digitaliseren tijdens meting
- 1973: mogelijkheid tot digitaliseren tijdens meting beschikbaar.

1.5. Uitvoerders van het onderzoek

Nadat de getijgoot was gedimensioneerd door ir. C. Stigter, werd het ontwerp, de bouw en de voorbereiding van de gegevensverwerking verzorgd door ir. A.J. v. Rees, onder wiens leiding vervolgens tot medio 1969 gedurende een periode van omstreeks anderhalf jaar de proeven zijn uitgevoerd.

Onderdelen van het getijgootonderzoek zijn uitgevoerd door ir. B.P. Rigter (wetenschappelijk medewerker, TH) vanaf januari 1968 tot oktober 1971, door ir. A. v. Mazijk vanaf juli 1969 en door drs. M. Karelse vanaf oktober 1970. De bijdrage van drs. Karelse wordt gedeeltelijk vanuit het speurwerkbudget van het Waterloopkundig Laboratorium gefinancierd. Het getijgootonderzoek stond onder leiding van dr.ir. G. Abraham.

1.6. Rapportering

Over het getijgootonderzoek zijn de volgende verslagen verschenen:

nr.	titel	datum	auteur
M 896- 3	Theoretische grondslagen	sept. 1971	ir. B.P. Rigter
5	Numerieke aspecten gegevensverwerking	febr. 1972	K.D. Maiwald
6	Reproductie Rotterdamse Waterweg in getijgoot	juli 1970	ir. B.P. Rigter
7	Invloed getijbeweging en bodemverhoging op zouttoestand	maart 1971	ir. B.P. Rigter
8	Invloed luchtbellengordijn op zoutpenetratie	juli 1971	ir. A.v. Mazijk
9	Onderzoek bodemruwheid	nov. 1970	ir. A.J.v. Rees ir. A.v. Mazijk
10	Systematisch onderzoek variaties randvoorwaarden en stromingscondities	nov. 1970	ir. A.J.v. Rees
13	Schaalonderzoek (1)	febr. 1972	ir. A.v. Mazijk
14	Invloed luchtbellengordijn op zoutpenetratie (aanvullend onderzoek omrekeningsfactor luchtdebiet)	juni 1972	ir. A.v. Mazijk

15	Dimensie-analyse zoutindringing (systematisch onderzoek)	juli 1971	ir. B.P. Rigter
16	Turbulentiemetingen (S 73)	dec. 1971	drs. M. Karelse
17	Systematisch onderzoek variatie randvoorwaarden en stromingscondities met bodemruwheid	dec. 1972	ir. A.v. Mazijk
18	Verandering in zoutpenetratie bij middenstandsverhoging en verandering van vertikaal getij op zee	febr. 1973	ir. A.v. Mazijk
19	Schaalonderzoek (2)	sept. 1972	ir. A.v. Mazijk
21	Invloed afsluiting Oosterschelde op zoutbezwaar bij Volkeraksluizen	jan. 1973	ir. A.v. Mazijk

Daarnaast zijn de volgende verslagen in voorbereiding:

nr.	titel	datum	auteur
M 896- 1	Vooronderzoek	-	ir. A.v. Mazijk
2	Ontwerp getijgoot	-	ir. A.J.v. Rees P. de Jong
4	Vooronderzoek gegevensverwerking	-	ir. A.J.v. Rees
11	Twee-dimensionaal onderzoek	in conc. gereed	ir. A.J.v. Rees
12	Eén-dimensionaal onderzoek	-	ir. A.J.v. Rees
20	Toetsing theoretische modellen	in conc. gereed	drs. M. Karelse
23	Analytische overwegingen in ver- band met het twee-dimensionale stelsel differentiaal vergelij- kingen	in conc. gereed	ir. J.H.G. Verhagen

2. Meetopstelling en gemeten grootheden

De getijgoot is een 101,5 m lange goot met een rechthoekig profiel (0,67 m breed en 0,50 m diep) (fig. 2.1.). De bodem is horizontaal. De goot is aan het benedenstroomse einde verbonden met een zeebassin van 6 x 8 x 1,5 m. In het zeebassin kan door middel van een overstortende, regelbare klep een verticale getijbeweging verkregen worden. In het bassin bevindt zich zout water (zeewater), waarvan de dichtheid op een gewenste waarde door middel van injectie van pekewater kan worden ingesteld. Met behulp van een op dichtheid controlerend regelmechanisme wordt de hoeveelheid geïnjecteerd pekewater zo-

danig geregeld, dat de dichtheid van het zeewater in het bassin gedurende een proef niet varieert. Via zogenaamde "skimmers" (oppervlakte-afzuigers) kan een eventuele zoetwaterlaag in het zeebassin worden afgezogen.

Op ongeveer 64 m vanaf het zeebassin is de goot over 180° omgebogen. Aan het bovenstroomse einde van de goot zijn voorzieningen getroffen om onafhankelijk van elkaar te kunnen instellen: een in de tijd constant debiet en een in de tijd variabel debiet aan zoet water. Het in de tijd variabele debiet wordt ingesteld met behulp van een getijtank, waarmee de horizontale getijbeweging aan de bovenstroomse rand van de getijgoot wordt geregeld. Het in de tijd constante debiet wordt ingebracht via een meetstuw, waarmee een constante oppervlakerafvoer wordt ingesteld.

Dichtheden, snelheden en waterstanden worden bepaald als functie van plaats en tijd (fig. 2.2.). Deze meetgegevens worden oppapier uitgeschreven als een analoog signaal (= elektrische spanning). Met behulp van een lijnvolger wordt dit analoge signaal met de hand gedigitaliseerd, waarbij de turbulente ruis wordt geëlimineerd. Met behulp van ijkgrafieken worden de gedigitaliseerde signalen door de computer omgezet in de gemeten waarde van de dichtheden (kg/m^3), snelheden (m/s) en waterstanden (m).

Met deze meetgegevens kunnen afgeleide grootheden worden berekend.

De directe meetgegevens en uit de meetgegevens berekende grootheden, kunnen met behulp van een plotter in beeld worden gebracht.

De dichtheden en de snelheden worden gemeten vanaf twee, over de goot verrijdbare meetwagens.

De dichtheid wordt gemeten met geleidbaarheidsmeetapparatuur.

Vóór en na de metingen wordt een ijkgrafiek bepaald, waarmee de gemeten geleidbaarheden (elektrische spanning) kunnen worden omgerekend naar dichtheden. Hierbij wordt een aantal ijkmonsters gebruikt, waarvan naast de geleidbaarheid ook de dichtheid wordt bepaald. Dit laatste geschiedt met behulp van een areometer. De fout in deze dichtheidsbepalingen bedraagt $\pm 0,2 \text{ kg/m}^3$.

De geleidbaarheid en de dichtheid variëren niet alleen met het zoutgehalte, maar ook met de temperatuur van het water. Daarom wordt sinds augustus 1970 de temperatuur van het leidingwater, dat ter reproductie van de oppervlakerafvoer in de goot wordt gebracht, constant gehouden op een waarde overeenkomend met de temperatuur van het zeewater bij het begin van de proef. Dit gebeurt

met behulp van een warmwaterinjectie (het leidingwater is doorgaans kouder dan het zeewater). De optredende afwijkingen ten opzichte van de gewenste in te stellen temperatuur van het opgewarmde leidingwater bedragen maximaal $\pm 0,5$ °C.

Bij de verwerking van de meetgegevens, wordt de ijkgrafiek, waarmee de gemeten geleidbaarheden worden omgerekend naar dichtheden, gelineariseerd. Dit geeft aanleiding tot een systematische fout in de dichtheidsbepaling.

De fout, die maximaal in de gemeten dichtheid kan optreden ten gevolge van de onnauwkeurigheid van de geleidbaarheidsmeetapparatuur en de wijze van verwerking van de meetgegevens (systematische fout, onnauwkeurigheid bij het met de hand digitaliseren van het analoge meetsignaal etc.) wordt geschat op ± 1 kg/m³, terwijl de fout gemiddeld $\pm 0,5$ kg/m³ bedraagt.

De snelheid wordt gemeten met micromolens. De micromolens worden in een aparte goot geijkt (verband tussen watersnelheid en afgegeven elektrische spanning). Het ijkverband wordt gelineariseerd. De verschillen tussen de ijkverbanden van de bij de getijgoot gebruikte micromolens zijn zo klein, dat voor alle molens hetzelfde ijkverband mag worden toegepast. Als gevolg van het bovenstaande en de wijze van verwerking van het meetsignaal (het met de hand digitaliseren) wordt de fout in de gemeten snelheid op kleiner of gelijk aan ± 1 cm/s geschat. Snelheden kleiner dan 3 cm/s kunnen vanwege aanloopverschijnselen van de molen niet betrouwbaar worden gemeten.

Waterstanden worden gemeten door middel van waterstandsvolgers, waarvan zich op iedere meetwagen één bevindt. De mogelijke fout bedraagt bij deze aanvankelijk gebruikte opstelling $\pm 0,3$ à $0,5$ mm (inclusief onnauwkeurigheid ten gevolge van de wijze van verwerken). Deze fout is voor een deel een gevolg van de onnauwkeurigheid in de bepaling van het referentieniveau, wat als volgt geschiedt: In de meetpunten zijn waterpasbakjes opgesteld, die onderling met elkaar verbonden zijn en werken als communicerende vaten. De waterspiegel in de bakjes vormt het referentieniveau. Per meetpunt wordt, nadat de meetwagen boven het betreffende meetpunt is opgesteld, het referentieniveau bepaald door de waterspiegel in het waterpasbakje te meten.

In verband met de onnauwkeurigheid in de bepaling van het referentieniveau zijn in 1971 zestien waterstandsvolgers in verschillende meetvertikalen vast opgesteld. Het referentieniveau voor de waterstandsvolgers wordt nu vooraf-

gaande aan een proef vastgelegd. De horizontale waterspiegel in de goot dient hierbij als vergelijkingsvlak, waarvan het niveau met behulp van een peilnaald op 0,1 mm nauwkeurig kan worden gemeten.

Door de vaste opstelling van de waterstandsvolgers wordt de fout in de waterstandsmeting bij benadering 0,2 à 0,3 mm.

Bij de proeven in de getijgoot wordt ook de zoutindringingslengte (maximaal en/of minimaal) bepaald, waaronder wordt verstaan de afstand waarover het zoute water vanuit het zeebassin nabij de bodem de getijgoot binnendringt.

De zoutindringingslengten worden doorgaans visueel en/of met een over de bodem verplaatsbare geleidbaarheidsmeter (zoutcel) bepaald. Het is mogelijk de zoutindringing visueel te volgen, doordat aan het zoute water methyleenblauw als kleurstof wordt toegevoegd. De afstand, waarover het zout de goot binnendringt kan met de zoutcel op 20 cm nauwkeurig worden vastgesteld, omdat nabij het front van het binnendringende zout een verplaatsing van de zoutcel over deze afstand gepaard gaat met een toename van de geleidbaarheid van de waarde behorende bij rivierwater (zoet water) tot een waarde behorende bij water met een circa $0,4 \text{ kg/m}^3$ grotere dichtheid. De met behulp van de geleidbaarheidsmeter met deze nauwkeurigheid vastgestelde plaats van het front van het binnendringende zout valt samen met de visueel vastgestelde plaats.

Daarnaast kunnen met behulp van de geleidbaarheidsapparatuur gemeten dichtheden lijnen van gelijke dichtheid worden bepaald voor bepaalde tijdstippen (isopycnen). Met behulp van de isopycnen kan worden bepaald op welke afstand van de mond een gegeven dichtheid wordt aangetroffen, bijvoorbeeld bij maximale zoutindringing. Het is niet mogelijk deze bepalingwijze in de plaats te stellen van de visuele methode voor de bepaling van de zoutindringingslengte, omdat de ligging van de isopycnen met zoutgehalte nul evenals in het prototype niet nauwkeurig kan worden bepaald.

In de goot kan vanaf de bodem lucht worden ingeblazen ter versterking van de menging. Hiertoe worden geperforeerde buisjes gebruikt, die loodrecht op de stromingsrichting worden aangebracht.

De buisjes hebben een uitwendige diameter van 3 mm. De diameter van de perforaties bedraagt 0,2 mm, terwijl de onderlinge afstand van de perforaties 2 cm is.

3. Vergelijking van de karakteristieken van de getijgoot met die van de Rotterdamse Waterweg

3.1. Inleiding

Het doel van het getijgootonderzoek als omschreven in par. 1.1. maakt het nodig te weten in hoeverre de zouttoestand in de getijgoot in overeenstemming kan worden gebracht met die in de Rotterdamse Waterweg. Ter beantwoording van deze vraag is het volgende onderzoek uitgevoerd:

- a. Systematisch onderzoek waarbij de invloed van verschillende parameters op de zoutindringing in de getijgoot experimenteel is bepaald.
- b. Onderzoek ter reproductie van de zouttoestand als gemeten in de Rotterdamse Waterweg in 1908, 1956 en 1966/67 in de getijgoot.

In de volgende paragrafen wordt een korte beschrijving van deze onderzoeken gegeven. Een volledige beschrijving van het systematisch onderzoek is gegeven in verslag M 896-10, "Systematisch onderzoek variatie randvoorwaarden en stromingscondities", d.d. november 1970. Het onderzoek ter reproductie van de zouttoestand als gemeten in de Rotterdamse Waterweg in de getijgoot is beschreven in verslag M 896-6, "Reproductie Rotterdamse Waterweg in getijgoot", d.d. juli 1970.

3.2. Systematisch onderzoek

Bij het systematisch onderzoek is de invloed van de volgende parameters op de zoutindringing in een getijrivier experimenteel bepaald:

- waterdiepte
- lengte van de rivier
- bovenafvoer
- amplitude van het verticale getij op zee
- dichtheid van zeewater
- Chézy-coëfficiënt van de rivier
- kunstmatige versterking van de menging in de rivier door inblazen van lucht.

Het systematisch onderzoek had als uitgangspunt de zouttoestand in de Rotterdamse Waterweg 1956 als gereproduceerd in de getijgoot. (De mate waarin deze zouttoestand kon worden gereproduceerd is in de volgende paragraaf beschreven.) Door telkens één van de bovengenoemde variabelen te variëren is het effect van elk van deze variabelen op de zoutindringing afzonderlijk bepaald.

Bij het systematisch onderzoek is aan de getijgoot een horizontale schaal $1/640$ en een vertikale schaal $1/64$ toegekend. De bij deze vertrekking vereiste extra stromingsweerstand is aangebracht in de vorm van weerstandsstaafjes. Bij de gekozen schalen komt de getijgoot overeen met een rivier met horizontale bodem en een rechthoekig dwarsprofiel met over de gehele lengte een breedte van 430 m en met bij de referentieproef een waterdiepte van 13,80 m.

Het resultaat van het systematisch onderzoek is weergegeven in fig. 3.1. t/m 3.7., waarbij de meetresultaten zijn omgerekend naar het bovenomschreven fictieve prototype. De figuren geven de grootste afstand waarover het zout bij de bodem de rivier binnendringt als functie van de verschillende variabelen. Het was mogelijk deze afstand met het oog vast te stellen doordat aan het zoute water methyleenblauw als kleurstof was toegevoegd. Ter controle werd met behulp van een verplaatsbare geleidbaarheidsmeter de nauwkeurigheid van de visueel waargenomen zoutindringingslengten bepaald. Verplaatsing van de meter over een afstand van 20 cm gaf een duidelijke overgang van rivierwater naar water met een ca. $0,4 \text{ kg/m}^3$ hogere dichtheid. Voorts bleek dat de visueel bepaalde zoutindringing tussen een meetstation met een hoger zoutgehalte dan die van het rivierwater en een station met hetzelfde zoutgehalte als het rivierwater in lag.

Bij het systematisch onderzoek is de lengte van de rivier gevarieerd. Deze lengte is gedefinieerd als de afstand tussen de mond en een in de rivier aangebrachte dam, waarover heen het rivierwater met constant debiet wordt aangevoerd. Bij het onderzoek in de getijgoot kon de op deze wijze gedefinieerde lengte eenvoudig worden gevarieerd, ook als de lengte van de rivier groter diende te zijn dan die van de getijgoot. In dat geval werden getijberekeningen uitgevoerd met verwaarlozing van de invloed van dichtheidsverschillen, om te bepalen hoe het debiet ter plaatse van het bovenstroomse einde van de getijgoot diende te variëren in de tijd, opdat de waterbeweging in de getijgoot tussen het bovenstroomse einde en de mond overeenkwam met die in de rivier van de gewenste lengte. Met behulp van de regelmechanismen van de goot werd vervolgens de gewenste variatie van het debiet aan het bovenstroomse einde van de getijgoot ingesteld.

De lengte van de rivier heeft een sterke invloed op de afstand waarover het zout de rivier binnendringt. De indringing is het geringst, wanneer de lengte

van de rivier ongeveer gelijk is aan de resonantielengte L_R , gedefinieerd als

$$L_R = \frac{1}{4} T \sqrt{g h_0} \quad (3.1.)$$

waarin T : getijperiode

h_0 : over tijd gemiddelde diepte.

Indien de lengte van de rivier kleiner is dan de resonantielengte neemt de afstand waarover het zout binnendringt toe bij afnemende lengte van de rivier. Indien de lengte van de rivier groter is dan de resonantielengte neemt de afstand waarover het zout binnendringt toe bij toenemende lengte van de rivier (zie fig. 3.2.). Dit is een gevolg van het feit dat de getijbeweging het sterkst is, indien de lengte van de rivier gelijk is aan de resonantielengte. Dit kan worden afgeleid uit fig. 3.8., waarin het verloop van de snelheid met de tijd voor verschillende stations in de rivier is aangegeven bij verschillende lengten van de rivier. Dat de getijbeweging bij een rivierlengte gelijk aan de resonantielengte het sterkst is, houdt in dat dan ook de menging tussen het zeewater en het rivierwater het sterkst is. Op grond hiervan wordt bij een rivierlengte gelijk aan de resonantielengte de kleinste zoutindringing gevonden.

Bij overigens gelijkblijvende omstandigheden neemt de afstand waarover het zout de rivier binnendringt aanvankelijk sterk af bij toenemende amplitude van het verticale getij op zee. Dit is in de eerste plaats een gevolg van het feit dat bij toenemende amplitude de menging tussen zeewater en rivierwater groter wordt. Bij toenemende amplitude neemt eveneens de vloedweg toe. Dit verklaart waarom de afstand waarover het zout de rivier binnendringt ongevoelig wordt voor de amplitude van het verticale getij op zee, wanneer de amplitude een gegeven waarde overschrijdt. Dat menging de zoutindringing doet afnemen volgt uit de proeven waarbij de menging kunstmatig is versterkt door in de rivier lucht in te blazen. De afstand waarover het zout binnendringt was kleiner naarmate meer lucht werd ingeblazen (zie fig. 3.7.).

Het effect van de overige variabelen (waterdiepte, bovenafvoer, dichtheid van zeewater, Chézy-coëfficiënt van de rivier), dat is weergegeven in fig. 3.1., 3.3., 3.5. en 3.6. behoeft geen toelichting.

3.3. Reproductie Rotterdamse Waterweg in getijgoot

Bij het onderzoek ter reproductie in de getijgoot van de zouttoestand in de Rotterdamse Waterweg is nagegaan of in 1908, 1956 en 1966/67 in de Rotterdamse Waterweg gemeten zouttoestanden in de getijgoot konden worden gereproduceerd. Ook bij dit onderzoek is aan de getijgoot een horizontale schaal 1/640 en een verticale schaal 1/64 toegekend. De vereiste extra stromingsweerstand is aangebracht in de vorm van weerstandsstaafjes.

Bij het onderzoek diende de Rotterdamse Waterweg wegens de geometrie van de getijgoot te worden geschematiseerd tot een fictieve rivier met rechthoekige doorsnede en gladde wanden. De diepte is daarbij zo gekozen dat de diepte van de fictieve rivier in ligt tussen de maximale diepte in het gebied met zoutindringing en de over de dwarsdoorsnede gemiddelde diepte. De gekozen diepten waren voor

1908	7,70 m
1956	13,50 m
1966/67	15,80 m

Door de gekozen schalen en de gegeven breedte van de getijgoot was de breedte van de fictieve rivier 430 m. Op deze wijze werden de volgende dwarsdoorsneden verkregen.

Voor 1908	3300 m ²
1956	5800 m ²
1966/67	6800 m ²

Blijkens figuren 3.9., 3.10. en 3.11. stemmen de op deze wijze verkregen oppervlakten van de dwarsdoorsneden en waterdiepten voor de situaties 1908 en 1956 redelijk overeen met de gemiddelde oppervlakte van de doorsneden en de diepte van de Rotterdamse Waterweg over het gebied van de zoutindringing. Voor de situatie 1966/67 is het verschil tussen de maximale diepte in de Rotterdamse Waterweg ten westen van de Oude Maas en de bij de schematisatie gekozen diepte relatief groter dan voor de situaties 1908 en 1956. Hierdoor zou mogen worden verwacht dat bij reproductie van de situatie 1966/67 een te kleine zoutindringing zou worden gevonden. Hier staat tegenover dat ten gevolge van het circa 15% te grote dwarsprofiel bij de situatie 1966/67 de zoetwatersnelheden (rivierafvoer gedeeld door dwarsprofiel) circa 15% te klein zijn, waardoor een te grote zoutindringing zou worden gevonden. Door deze beide elkaar tegenwerkende factoren mag worden verwacht dat de situaties 1908, 1956 en 1966/67 met bij benadering gelijke mate van nauwkeurigheid zullen worden gereproduceerd.

De lengte van de fictieve rivier is bij de reproductie van de Rotterdamse Waterweg in de getijgoot zo gekozen dat het verticale en het horizontale getij (waterstanden en snelheid als functie van tijd, afname van amplitude en faseverschuiving landinwaarts) in het gebied met zoutindringing in de fictieve rivier en in de Rotterdamse Waterweg zo goed mogelijk op schaal met elkaar overeenstemden. Bij deze keuze zijn het horizontale en het verticale getij voor de fictieve rivier door middel van getijberekeningen met verwaarlozing van de invloed van dichtheidsverschillen voor verschillende lengten van de rivier, conform de in par. 3.2. gegeven definitie, bepaald en vergeleken met in de Rotterdamse Waterweg uitgevoerde metingen. De beste overeenkomst tussen de fictieve rivier en de Rotterdamse Waterweg werd verkregen bij de volgende lengten van de fictieve rivier (L).

Voor 1908 L = 81.900 m L/L_R = 0,87
 1956 L = 100.620 m L/L_R = 0,75
 1966/67 L = 109.980 m L/L_R = 0,77

Bij deze lengten werd een bevredigende overeenstemming met de getijbeweging in de Rotterdamse Waterweg verkregen. De grootste afwijkingen traden op tijdens maximaal vloeddebiet. De maximale vloeddebieten waren in de getijgoot 10 tot 15% te klein. De amplitude van de waterstandsvariatiës werd juist weergegeven. Omgerekend naar de fictieve rivier bedroeg de Chézy-coëfficiënt van de goot $60 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$.

Bij de in het voorafgaande aangegeven diepte, breedte en lengte van de fictieve rivier werden het verticale getij op zee en de rivierafvoer als opgetreden in het prototype op de in onderstaande tabel aangegeven dagen op schaal in de getijgoot ingesteld:

meetdatum prototype	afvoer Lobith 2 dagen eerder	max. getij- verschil te Hoek van Holland	diepte in ge- tijgoot (prototype- maat)
22-7-1908	1500 m ³ /s	170 cm	7,70 m
21-6-1956	2400	148	13,50
16-4-1966	3250	168	15,80
24-9-1966	1810	103	15,80
23-4-1967	2490	209	15,80

De zouttoestand, die daarbij in de fictieve rivier optrad, werd vastgelegd en vergeleken met voor de Rotterdamse Waterweg beschikbare meetgegevens. Representatieve resultaten zijn gegeven in figuren 3.12. en 3.13. De verkregen resultaten mogen als volgt worden samengevat.

Bij instelling van het verticale en horizontale getij met de in het voorafgaande genoemde nauwkeurigheid werd bij een grote variatie in de waterstaatkundige toestand (diepten van 7,7 m, 13,5 m en 15,8 m, dood-, normaal- en springtij) zonder kunstmatige versterking van de menging tussen zeewater en rivierwater in de rivier een reproductie van de zoutindringing verkregen die, gezien de sterke mate van schematisatie, bevredigend kan worden genoemd. Ondanks afwijkingen in de mate van gelaagdheid stemde de horizontale zoutindringing overeen met de zoutindringing in het prototype. De isopycnen 1002 kg/m^3 hebben een overeenkomstige indringing als in het prototype, de isopycnen 1005 kg/m^3 dringen iets te ver door, terwijl de isopycnen 1015 kg/m^3 en 1020 kg/m^3 te ver doordringen (zie fig. 3.14. t/m 3.16.). Indien de menging in de goot niet kunstmatig wordt versterkt blijkt een onvolledige reproductie van de gelaagdheid niet prohibitief te zijn voor een goede reproductie van de zoutindringingslengte (de afstand waarover het zout de rivier binnendringt).

De resultaten van het onderzoek rechtvaardigden de verwachting dat de zoutindringing bij veranderingen in de waterstaatkundige toestand met een zelfde mate van overeenkomst als bij het hier beschreven onderzoek kan worden bestudeerd in de getijgoot. Voorwaarde hiertoe is dat bij de gewijzigde omstandigheden het horizontale en het verticale getij met dezelfde nauwkeurigheid als het hier beschreven onderzoek kan worden ingesteld. Dit houdt in dat ook voor de nieuwe situatie een passende lengte van de fictieve rivier moet kunnen worden gevonden.

Het onderzoek "Reproductie Rotterdamse Waterweg in getijgoot" is gedeeltelijk uitgevoerd bij omstandigheden waarbij weinig zout voorbij de splitsing Oude Maas/Nieuwe Maas kwam (1908, 1956). Daarnaast stond de verhouding van de hoeveelheid rivierwater, die door de Oude Maas en de Nieuwe Maas wordt afgevoerd in de juiste relatie tot de verhouding tussen het dwarsprofiel van de Oude Maas en de Nieuwe Maas (1966/67) (zie verslag M 896-6, par. 5.4.). Dit waren gunstige omstandigheden.

Bij het reproductie-onderzoek waren de havens aan de Rotterdamse Waterweg en de kribben in de rivier niet gereproduceerd in de getijgoot. Dat desondanks

een goede reproductie in de getijgoot kon worden verkregen zou een gevolg kunnen zijn van het feit dat blijkens een oriënterend onderzoek het dispersief transport ten gevolge van variaties van de snelheid en zoutconcentratie over de vertikaal op de Rotterdamse Waterweg groter is dan het dispersief transport ten gevolge van variaties in dwarsrichting.

Voor een beschrijving van het begrip dispersief transport wordt in dit verband verwezen naar appendix I. In deze appendix is tevens aannemelijk gemaakt dat een onvolledige reproductie van de gelaagdheid een goede reproductie van de zoutindringingslengte niet in de weg behoeft te staan bij gebruik van weerstandsstaafjes als toegepast bij het reproductie-onderzoek.

3.4. Samenvatting

Het effect van de verschillende variabelen op de zoutindringing als gevonden bij het systematisch onderzoek kwam overeen met de verwachtingen hierover, die verkregen waren uit in de Rotterdamse Waterweg verzamelde meetgegevens. In dit verband dient te worden genoemd dat volgens het reproductie-onderzoek de condities op de Rotterdamse Waterweg in de jaren 1956 en 1966/67, i.e. voor de afsluiting van het Haringvliet, mogen worden beschreven door uit te gaan van een fictieve rivier met een lengte gelijk omstreeks 0,8 maal de resonantielengte. Blijkens fig. 3.2. houdt dit in dat de zoutindringing bij gegeven bovenafvoer en vertikaal getij op zee dan minimaal is. De verandering in de getijcondities op de Rotterdamse Waterweg ten gevolge van de afsluiting van het Haringvliet mogen naar verwachting worden beschreven als een verandering van de lengte van de fictieve rivier. Derhalve mag op grond van het systematisch onderzoek worden verwacht dat de zoutindringing bij de afsluiting van het Haringvliet zou toenemen, indien niet gelijktijdig door de afsluiting de bovenafvoer zou worden vergroot. Ook dit stemde overeen met de verwachtingen, die hierover uit de prototypemetingen waren verkregen.

Naast bovengenoemde kwalitatieve overeenkomst tussen de Rotterdamse Waterweg en de getijgoot werd bij het reproductie-onderzoek in zekere mate een kwantitatieve overeenkomst gevonden. Dit alles leidde ertoe de getijgoot te gebruiken ter beantwoording van enige praktijkvragen over de zoutindringing op de Rotterdamse Waterweg, omdat het getijmodel Rijnmond hiertoe niet beschikbaar was, daar het volledig voor het onderzoek van de nieuwe havenmond was ingeschakeld. Dit praktijkonderzoek wordt in het volgende hoofdstuk beschreven. Gezien de in appendix I gegeven overwegingen is bij het praktijkonderzoek uitgegaan

van weerstandsstaafjes als middel ter vergroting van de stromingsweerstand, nodig bij de voor het praktijkonderzoek gekozen schalen. Deze bedroegen, in navolging van het reproductie-onderzoek, 1/640 horizontaal en 1/64 vertikaal.

4. Toegepast onderzoek gericht op de Rotterdamse Waterweg

4.1. Inleiding

Het toegepaste onderzoek was erop gericht om tendensen aan te geven in de te verwachten veranderingen van de zouttoestand op de Rotterdamse Waterweg bij veranderingen in deze rivier. Indien het getijmodel M 900 voor dit onderzoek beschikbaar zou zijn geweest, zou het stellig in dit model zijn uitgevoerd. Mede om deze reden viel het toegepaste onderzoek buiten de oorspronkelijk geformuleerde doelstelling op lange termijn. Het toegepaste onderzoek vormt hierdoor een intermezzo dat slechts in beknopte vorm besproken zal worden. Voor details wordt verwezen naar de verslagen over de betrokken onderzoeken.

4.2. Veranderingen in de zouttoestand ten gevolge van veranderingen in het getijregime als veroorzaakt door de afsluiting van het Haringvliet

Het bleek, evenals bij het reproductie-onderzoek 1908-1956-1966/67 mogelijk een fictieve rivier met zodanige lengte te vinden dat het horizontale en verticale getij in de fictieve rivier in bevredigende mate overeenstemden met de getij-omstandigheden op de Rotterdamse Waterweg na de afsluiting. Informatie over deze getij-omstandigheden waren door Rijkswaterstaat verstrekt op basis van Deltarberekeningen. Daar stond tegenover dat de verhouding van de hoeveelheid rivierwater, die door de Oude Maas en de Nieuwe Maas werd afgevoerd voor de toestand na afsluiting van het Haringvliet zodanig was dat ter plaatse van de splitsing Oude Maas/Nieuwe Maas een injectie van zoet water in de getijgoot diende plaats te vinden om het effect van de afvoer van de Oude Maas schematisch weer te geven. Voor de toestand voor de afsluiting was dit niet nodig. Hierdoor kon de interpretatie van het reproductie-onderzoek 1908-1956-1966/67 op eenvoudiger wijze geschieden dan de interpretatie van het onderzoek bij afgesloten Haringvliet.

Op grond van bovenstaande overwegingen mogen de resultaten van het onderzoek, die zijn beschreven in verslag M 896-7 slechts kwalitatief worden gehanteerd. Nochtans kan het inzicht geven in de mogelijkheden van de getijgoot door de

resultaten van het onderzoek te vergelijken met de inmiddels in de praktijk opgedane ervaringen.

4.3. Effect van plaatselijke verondieping van de rivier op de zouttoestand

Bij dit onderdeel van het onderzoek is uitgegaan van een instelling van de getijgoot overeenkomend met die van het onderzoek dat in de voorafgaande paragraaf is beschreven. Terwijl de diepte van de fictieve rivier bij de uitgangssituatie over de gehele lengte 15,80 m bedroeg, is bij het onderzoek van het effect van de verondieping de diepte over een traject van circa 30 km van de zee tot circa 45 km van zee teruggebracht tot 8 m.

Door deze verondieping werd een reductie van de zoutindringing tot stand gebracht.

Zout dat bij vloed tot boven de verondieping was doorgedrongen werd tijdens eb teruggedrongen tot aan het begin (zeewaartse einde) van de verondieping. Dit werd gevonden bij een gezamenlijke afvoer van de Oude en Nieuwe Maas groter dan $600 \text{ m}^3/\text{sec}$. Voor lagere afvoeren konden geen proeven worden uitgevoerd.

Door het niet gelijkvormig zijn van de getijgoot en de Nieuwe Maas kan niet worden aangegeven of het zout ook in de verondiepte Nieuwe Maas bij eb tot aan het zeewaartse einde van de verondieping zal worden teruggedrongen bij een gezamenlijke afvoer van de Oude en Nieuwe Maas groter dan $600 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Ook het onderzoek van het effect van een verondieping is beschreven in verslag M 896-7.

4.4. Effect van dwars op de as van de rivier aangebrachte luchtbellengordijnen op de zouttoestand

Bij het onderzoek, dat een oriënterend karakter had, werden de volgende naar de Rotterdamse Waterweg omgerekende resultaten verkregen. Bij een oppervlakterafvoer van $1500 \text{ m}^3/\text{sec}$. door de Nieuwe Waterweg werd een reductie van de maximale zoutindringing gevonden van circa 5 km bij toepassing van twee nabij de mond van de rivier aangebrachte luchtbellengordijnen op een onderlinge afstand van 6,5 km. De hierbij benodigde hoeveelheid lucht wordt geschat op $6 \text{ m}^3/\text{min}$. per strekkende meter buis, in te blazen gedurende een periode van 3 à 4 uren rond laagwaterkentering. Het aangegeven luchtdebiet is gemeten bij atmosferische druk. Bij oppervlakterafvoeren van $600 \text{ m}^3/\text{sec}$. en $1000 \text{ m}^3/\text{sec}$. leek een

nog wat grotere reductie mogelijk. Gezien het verschil in geometrie tussen de getijgoot en de Rotterdamse Waterweg mogen bovenstaande getallen slechts als een eerste aanduiding worden beschouwd.

Dit deel van het toegepaste onderzoek is beschreven in de verslagen M 896-8 en M 896-14.

4.5. Verandering in zoutpenetratie bij middenstandsverhoging op zee ten gevolge van opwaaiing

Een verhoging van de middenstand op zee heeft tot gevolg, dat de waterstand op de rivier eveneens oploopt. Dit gaat gepaard met een landinwaartse verplaatsing van het in de rivier aanwezige zoute water. Proeven hebben aangetoond, dat indien een middenstandsverhoging van 2 m snel tot stand komt (binnen 1 à 2 getijperioden van 12 uur en 25 min.), de landinwaartse verplaatsing van het zout overeenstemt met de bij de middenstandsverhoging behorende convectieve verplaatsing. Deze kan worden berekend door middel van een homogene getijberekening op basis van de lange golftheorie. Indien deze middenstandsverhoging in een langere periode dan 1 à 2 getijperioden tot stand komt, past de zouttoestand op de rivier zich reeds tijdens de verhoging aan de gewijzigde randcondities aan. De mate, waarin de zouttoestand zich reeds tijdens de middenstandsverhoging aanpast aan de gewijzigde randcondities is groter naarmate de periode, waarin de middenstandsverhoging tot stand komt langer is.

Gebleken is dat bij getij-omstandigheden, zoals die optraden in de Rotterdamse Waterweg in 1956, de periode gedurende welke een blijvende middenstandsverhoging van 2 m tot stand komt 12 à 13 getijperioden van 12 uur 25 min. (oftewel ruim 6 dagen) lang moet zijn, opdat de zoutverdeling zich tijdens de verhoging van de middenstand reeds volledig aan de gewijzigde omstandigheden kan aanpassen.

Indien de verhoging van de middenstand slechts gedurende één of twee getijperioden optreedt en indien de middenstand in de daarop volgende getijcyclus weer verlaagd wordt tot de uitgangssituatie, blijkt uit gedane proeven, dat de toename en de daarop volgende afname van de zoutindringing overeenstemt met de door deze tijdelijke middenstandsverhoging veroorzaakte convectieve verplaatsingen. De invloed van de tijdelijke middenstandsverhoging op de zouttoestand is nog gedurende 2 à 3 getijperioden merkbaar, nadat de middenstand op de uitgangswaarde is teruggekomen. De middenstandsverhoging bedroeg bij deze proeven eveneens 2 m. De getij-omstandigheden waren kwalitatief vergelijkbaar met die in de Rotterdamse Waterweg in 1956.

Het vorenstaande onderzoek wordt beschreven in verslag M 896-18, dat inzicht geeft in de vraag in hoeverre bij de ijking van een hydraulisch model de voorgeschiedenis van het vertikale getij aan de mond van de rivier ingesteld dient te worden in het model.

4.6. Oosterschelde, zoutbezwaar bij de Volkeraksluizen

De wateren Keeten, Mastgat, Zijpe, Krammer en Volkerak staan in open verbinding met de Oosterschelde, alwaar een getijbeweging heerst. Bij de afsluiting van het Oosterschelde-bekken valt het getij in dit gebied weg, terwijl het bekken direct na de afsluiting nog met zout water is gevuld. Met behulp van een aantal principe-proeven is in de getijgoot het effect van het wegvallen van het getij op de zouttoestand in deze wateren en met name bij de Volkerakdam kwalitatief onderzocht. Uit de proeven bleek, dat de zoutconcentratie bij de schutsluizen in de Volkerakdam direct na de afsluiting van de Oosterschelde zal toenemen, hetgeen een toename van het zoutbezwaar via de schutsluizen op het Hollands Diep tot gevolg heeft, indien niet tegelijkertijd het spuidebiet aanmerkelijk wordt vergroot.

Voor een meer gedetailleerde beschrijving wordt verwezen naar verslag M 896-21.

5. Schaalonderzoek

5.1. Inleiding

Het in de hoofdstukken 3 en 4 beschreven onderzoek is uitgevoerd uitgaande van een fictief gootvormig prototype, waarvan de afmetingen zo waren gekozen dat een zo groot mogelijke overeenkomst tussen het stroombeeld in het fictieve prototype en in de Rotterdamse Waterweg mag worden verwacht. Ook bij het schaalonderzoek is uitgegaan van dit fictieve prototype. Bij het onderzoek is het op verschillende schalen in de getijgoot gereproduceerd, om na te gaan welke invloed modelschalen hebben op de reproductie van de zouttoestand in vertrokken modellen, dat wil zeggen modellen waarin de vertikale afmetingen op een andere schaal worden afgebeeld dan de horizontale afmetingen.

Bij het onderzoek zijn aan de getijgoot verschillende schalen toegekend. Hierbij is de tijdschaal ingesteld als de verhouding tussen de duur van de getijperiode in het model en in het prototype. Evenzo is de vertikale schaal ingesteld als de verhouding tussen de waterdiepte in het model en het prototype.

Als op deze wijze de tijdschaal en de diepteschaal zijn vastgelegd kunnen de overige schalen (bijvoorbeeld de horizontale schaal en de schaal voor de horizontale snelheidscomponenten) worden afgeleid volgens de schaalregels van Froude. Dit is toegelicht in de tweede appendix bij verslag M 896-13, Schaalonderzoek, d.d. februari 1973, waarin is afgeleid:

- a. voor goede reproductie van het verticale getij dient de stromingsweerstand in vertrokken modellen kunstmatig te worden vergroot
- b. voor goede reproductie van de zouttoestand dient de menging tussen zee-water en rivierwater in vertrokken modellen kunstmatig te worden versterkt. ¹⁾

Bij het schaalonderzoek zijn proeven gedaan met weerstandsstaafjes enerzijds en vergrote bodemruwheid anderzijds als middel tot vergroting van de stromingsweerstand. Een meer gedetailleerde beschouwing over deze middelen is gegeven in appendix II. Bij de proeven werd gebruik gemaakt van deze middelen tot vergroting van de weerstand gecombineerd met het al dan niet inblazen van lucht ter versterking van de menging.

In een vooronderzoek, dat is beschreven in verslag M 923, Vooronderzoek Getijgoot, Ontwikkeling mengmiddelen (in voorbereiding), zijn verschillende middelen ter beïnvloeding van de menging vergeleken. Hierbij bleek dat door weerstandsstaafjes en vergrote bodemruwheid weinig menging tot stand wordt gebracht.

Het inblazen van lucht ging daarentegen gepaard met een versterking van de menging zonder beïnvloeding van de stromingsweerstand, omdat de stromingsweerstand van de luchtbellens verwaarloosbaar bleek te zijn. Op grond hiervan is bij het getijgoot onderzoek gekozen voor kunstmatige versterking van de menging door middel van lucht inblazen.

5.2. Beperkingen van het onderzoek

Het schaalonderzoek is uitgevoerd uitgaande van een twee-dimensionale stroming (gladde gootwanden, geen wandruwheid) in een goot met constant dwarsprofiel. Hierdoor wijkt de geometrie van de goot af van die van de Rotterdamse Waterweg. Belangrijke verschillen zijn de kribben, het niet rechthoekige dwarsprofiel, het feit dat het dwarsprofiel van de rivier niet over de

¹⁾ Deze conclusie is verder uitgewerkt in appendix II, par. 2.2.1.

gehele lengte constant is en oneffenheden van de bodem. Hierdoor mogen de resultaten van het onderzoek niet zonder meer voor een model van de Rotterdamse Waterweg worden toegepast. Hierop wordt in appendix II verder ingegaan.

Bij het afleiden van de noodzaak tot het kunstmatig versterken van de menging in vertrokken modellen wordt er van uitgegaan dat de menging in het prototype in hoofdzaak een gevolg is van turbulente diffusie (uitwisseling van impuls en massa) in verticale richting. Zonder kunstmatige versterking van de menging worden de gevolgen van dit verschijnsel in vertrokken modellen niet juist weergegeven. Bij het fundamentele onderzoek zijn aanwijzingen verkregen dat in het prototype verschijnselen kunnen optreden, die menging tussen zeewater en rivierwater veroorzaken, en die wél zonder kunstmatige versterking juist in vertrokken modellen kunnen worden weergegeven. Indien deze verschijnselen in belangrijke mate de zouttoestand beïnvloeden is kunstmatige versterking van de menging minder belangrijk. Ook hierop wordt in appendix II nader ingegaan.

5.3. Uitgevoerde proeven

5.3.1. Afmetingen fictief prototype

Het schaalonderzoek is uitgevoerd uitgaande van een fictief prototype met de volgende afmetingen en omstandigheden:

lengte van de rivier	-	114,660 km
waterdiepte	-	13,8 m
Chézy-coëfficiënt van de rivier	-	60 m ^{1/2} /sec.
bovenafvoer	-	593, 949 en 2848 m ³ /sec.
vertikaal getij op zee ¹⁾	-	1,60 m
dichtheid zeewater	-	1022 kg/m ³

5.3.2. Modelschalen bij het schaalonderzoek

Bij het schaalonderzoek is het bovenomschreven fictieve prototype op verschillende modelschalen in de goot gereproduceerd, met het doel na te gaan in hoeverre de bij verschillende schalen verkregen meetresultaten met elkaar overeenstemden.

1) Verschil in zeeniveau bij H.W. en L.W.

Hierbij zijn de volgende schalen gebruikt:

a. verticale schaal 1/64

horizontale schalen respectievelijk 1/320, 1/640, 1/1280

vertrekking respectievelijk 5, 10 en 20

weerstandsstafjes respectievelijk vergrote bodemruwheid

al dan niet versterken van de menging door inblazen van lucht

b. verticale schaal 1/40

horizontale schaal 1/640

vertrekking 16

weerstandsstafjes

menging niet versterkt door inblazen van lucht.

De schalen waren zo gekozen dat het mogelijk was de invloed van de vertrekking te bestuderen bij gelijkblijvende verticale schaal (vertikale schaal 1/64 met vertrekkingen respectievelijk 5, 10 en 20) en bij gelijkblijvende horizontale schaal (horizontale schaal 1/640, vertrekkingen respectievelijk 10 en 16).

5.3.3. Meetresultaten

Er zijn verschillende series proeven uitgevoerd, ieder bestaande uit drie proeven met vertrekking respectievelijk 5, 10 en 20. Per proevenserie werden dezelfde maatgevende omstandigheden (diepte, getij, bovenafvoer etc.) ingesteld en werd hetzelfde middel ter vergroting van de stromingsweerstand (weerstandsstafjes met gegeven afmetingen of bodemruwheid van gegeven afmetingen) toegepast. Indien lucht werd ingeblazen ter versterking van de menging via loodrecht op de as van de goot aangebrachte injectiebuisjes was het luchtdebiet per buisje gelijk bij de verschillende vertrekkingen, terwijl de onderlinge afstand tussen de buisjes omgekeerd evenredig was met de vertrekking. Op deze wijze is de door het lucht-inblazen veroorzaakte menging recht-evenredig met de vertrekking. Daardoor wordt bij het lucht-inblazen aan de in par. 2.2.1. van appendix II afgeleide schaalvoorwaarde voldaan.

De meetresultaten van bovemomschreven proevenseries met verschillende vertrekking bleken samen te vallen na tot dezelfde schaal te zijn omgerekend. Enige voorbeelden van de meetresultaten, die zijn ontleend aan verslag M 896-13 zijn weergegeven in fig. 5.1. t/m 5.3. (proeven met weerstandsstafjes) en in fig. 5.4. t/m 5.6. (proeven met dezelfde maatgevende omstandigheden met bodemruwheid).

Bij gelijke maatgevende omstandigheden doch verschillende middelen ter beïnvloeding van de stromingsweerstand en bij het al dan niet inblazen van lucht werden verschillen in de snelheidsverdeling en in de concentratieverdeling gevonden. Als afgeleid in appendix I was de zoutindringing bij proeven zonder lucht-inblazen bij gebruik van bodemruwheid groter dan bij gebruik van weerstandsstaafjes. Bij proeven met bodemruwheid bleek de verdeling van de snelheid over de vertikaal door het inblazen van lucht te kunnen worden beïnvloed onder gelijktijdige beïnvloeding van de gelaagdheid.

Dat bij de proeven uit de verschillende proevenseries op schaal overeenkomende resultaten werden verkregen kan voor de proeven met weerstandsstaafjes als volgt worden verklaard. De stromingsweerstand wordt door de staafjes op de juiste wijze vergroot, als bij proeven met dezelfde verticale schaal, doch met verschillende vertrekking het aantal staafjes per eenheid van horizontaal goetoppervlak recht-evenredig met de vertrekking is (zie appendix II bij verslag M 896-19). Bij proeven met gelijke verticale schaal is ook de snelheidschaal gelijk, waardoor bij de verschillende proevenseries de snelheid rond overeenkomstig geplaatste staafjes gelijk was. Dit impliceert dat de door de staafjes opgewekte menging eveneens gelijk was per staafje gerekend. Omdat het aantal staafjes in verband met de weerstand rechtevenredig met de vertrekking diende te zijn, was de menging eveneens recht-evenredig met de vertrekking, waardoor aan de voor onderlinge reproductie van de zouttoestand bij de verschillende proeven van een serie vereiste voorwaarde was voldaan.

Bij dezelfde lengteschaal, doch bij verschillende verticale schalen diende voor juiste versterking van de stromingsweerstand hetzelfde aantal weerstandsstaafjes te worden aangebracht, ongeacht het verschil in vertrekking. Dit hield in dat bij dezelfde maatgevende condities de menging bij de proeven met de grootste waterdiepte in de goot relatief het zwakst was. Dit had tot gevolg dat bij de proeven met verticale schaal $1/40$ een grotere zoutindringing werd gevonden dan bij de proeven met verticale schaal $1/64$. De verschillen waren echter van beperkte omvang.

5.4. Conclusies

Uit het schaalonderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

1. Bij gelijke maatgevende omstandigheden en hetzelfde middel ter beïnvloeding van de menging werden op schaal overeenstemmende resultaten verkregen bij

vertrekking 5, 10 en 20. Dit houdt in dat een twee-dimensionale zouttoestand (goot met gladde wanden en constant dwarsprofiel) met grote vertrekking kan worden gereproduceerd.

2. Bij inblazen van lucht ter versterking van de menging dient de per eenheid van gootoppervlak ingebrachte hoeveelheid lucht omgekeerd evenredig met de vertrekking te zijn.
3. Bij gelijke maatgevende omstandigheden is de zoutindringing bij proeven zonder lucht inblazen bij gebruik van bodemruwheid groter dan bij gebruik van weerstandsstaafjes.
4. Als de eis wordt gesteld dat zowel de verdeling van de dichtheid over de vertikaal als ook de verdeling van de snelheid over de vertikaal juist wordt weergegeven in een vertrokken model, dan dienen de elementen, die worden gebruikt ter versterking van de stromingsweerstand te voldoen aan de voorwaarde dat de verdeling van de snelheid over de vertikaal niet mag worden beïnvloed (appendix II, par. 1). Lucht inblazen heeft tot gevolg dat de snelheid over de vertikaal gelijkmatiger verdeeld is dan wanneer geen lucht wordt ingeblazen. Hierdoor mag worden verwacht dat bij gebruik van bodemruwheid en lucht inblazen ter versterking van de menging aan deze eis kan worden voldaan. Verder onderzoek is noodzakelijk om te bepalen hoe aan de in het bovenstaande geformuleerde eis kan worden voldaan.
5. Menging ten gevolge van door bodemwrijving opgewekte turbulentie dient in vertrokken modellen kunstmatig te worden versterkt (appendix II, par. 2.2.1.). Menging ten gevolge van door kribben opgewekte wervels is in verhouding tot het prototype te sterk in vertrokken modellen (appendix II, par. 2.2.1.). Menging ten gevolge van een door een oneffenheid van de bodem veroorzaakte instabiliteit van een gelaagde stroming wordt in een vertrokken model juist weergegeven mits de afmeting van de oneffenheid voldoende groot is in het model. In verband hiermee dient de bijdrage van deze mengingsmechanismen tot de menging in de Rotterdamse Waterweg te worden bepaald bij voortzetting van het schaalonderzoek.

6. Fundamenteel onderzoek

6.1. Theoretische grondslagen

In het verslag M 896-3 "Theoretische grondslagen" wordt een overzicht gegeven van de verschillende stelsels vergelijkingen, die voor de beschrijving van de zouttoestand in de Rotterdamse Waterweg en in de getijgoot kunnen worden gebruikt. De belangrijkste van de in dit verslag gegeven stelsels zijn de tweedimensionale en de één-dimensionale vergelijkingen.

6.1.1. Twee-dimensionale beschrijving

In de getijgoot mag de variatie over de breedte van de goot worden verwaarloosd. Het is daardoor voldoende de stroming twee-dimensionaal te beschrijven door één coördinaat in langsrichting en één coördinaat in verticale richting. Dan zijn vier differentiaal-vergelijkingen nodig voor de beschrijving van het stroombeeld en de daarbij optredende menging tussen zout en zoet water namelijk twee bewegingsvergelijkingen waarbij de druk hydrostatisch kan worden beschouwd en de continuïteitsvergelijkingen voor water en zout.

Behalve dat de bewegingsvergelijkingen gecompliceerd zijn door het feit dat de drukvariatie ook van de dichtheidsverdeling afhangt, betreft de grootste moeilijkheid de vaststelling van het diffusieve zouttransport, waarbij de variatie van het diffusieve zouttransport in de verticale richting overheersend is ten opzichte van de variatie van het diffusieve zouttransport in horizontale richting. Het zouttransport in horizontale richting waarbij ook de verticale uitwisseling van invloed is, kan echter niet verwaarloosd worden als een lange periode wordt beschouwd, bijvoorbeeld meerdere getijden. Een verdere moeilijkheid betreft de bepaling van het verloop van de turbulente schuifspanning over de vertikaal, die gewijzigd wordt door de invloed, die de dichtheidsverschillen op het stroombeeld en op de verticale uitwisseling uitoefenen, waarbij onder andere het getal van Richardson voor de verticale uitwisseling van invloed is. (ref. 1).

Om het twee-dimensionale stelsel te kunnen toepassen is het nodig de randvoorwaarden aan de mond van de rivier te kennen, waarbij onder andere de snelheidsverdeling en de zoutverdeling in verticale richting bekend moeten zijn. Daarnaast is het nodig de grootte van het diffusieve zouttransport en van de turbulente schuifspanning te weten. De waarden van de turbulente diffusie- en

schuifspanningscoëfficiënten dienen bekend te zijn als functie van de voor het stroombeeld dan wel voor de geometrie waarin de stroming plaatsvindt maatgevende grootheden.

Vanaf het begin van het getijgootonderzoek is de aandacht gericht geweest op het vinden van de grootte van de turbulente diffusie- en schuifspanningscoëfficiënten. In verband hiermee zijn computerprogramma's ontwikkeld voor een twee-dimensionale analyse van de meetgegevens (waterdiepte, snelheid, dichtheid). Deze programma's zijn beschreven in verslag M 896-5. Het schema van de twee-dimensionale analyse is gegeven in fig. 6.1., de twee-dimensionale computer- en plotteruitvoer is gegeven in fig. 6.2.

Het onderzoek van de twee-dimensionale beschrijving is van belang voor de praktijk. (Ref. 1, pag. 12 - 14).

6.1.2. Eén-dimensionale beschrijving

De één-dimensionale beschrijving wordt verkregen door middeling van de zoutconcentratie en van de snelheid over de diepte. Wordt deze middeling toegepast op de twee-dimensionale bewegingsvergelijkingen, dan worden de bewegingsvergelijkingen gevonden, die ook bij getijberekeningen worden toegepast. Aan de drukterm is dan een term toegevoegd, die de invloed van de variatie van de dichtheid van het water op het verloop van de gemiddelde druk in langsrichting aangeeft.

Grotere wijzigingen ondergaat echter de vergelijking voor de zoutbalans, doordat bij de middeling van de twee-dimensionale continuïteitsvergelijking voor zout niet alleen de over de vertikaal gemiddelde waarde van het diffusieve zouttransport, doch ook de over de vertikaal gemiddelde waarde van het convectieve zouttransport dient te worden vastgesteld.

Nu is het doel van de middelen over de diepte te voorkomen dat de variatie van de snelheid en de concentratie over de vertikaal in beschouwing moet worden genomen. Hierbij doet zich de moeilijkheid voor dat het convectieve transport op ieder niveau gelijk is aan het product van snelheid (u) en concentratie (c). Bij belangrijke invloed van dichtheidsverschillen variëren de snelheid en de concentratie sterk over de vertikaal, zodat het over de vertikaal gemiddelde convectieve transport ongelijk is aan het product van de over de diepte gemiddelde snelheid (\bar{u}) en de over de diepte gemiddelde zoutconcentratie (\bar{c}).

Het resultaat is dat in de zoutvergelijking drie termen voorkomen, namelijk de

variatie van de concentratie met de tijd, een term, waarin een deel van het convectieve zouttransport is verwerkt als het product van de over de diepte gemiddelde snelheid en de over de diepte gemiddelde zoutconcentratie, en de dispersie term, die, naar is toegelicht in appendix I, het verschil aangeeft tussen de over de vertikaal gemiddelde waarde van het convectieve transport en het deel daarvan dat in de tweede term is verdisconteerd.

In de laatste term komt het geïntegreerde effect van de variatie van de snelheid en concentratie tot uiting.

Dit effect moet bij de één-dimensionale beschrijving bekend zijn, zonder dat men de variatie van de snelheid en de zoutconcentratie kent. Dit leidt ertoe het dispersieve transport uit te drukken met behulp van een dispersiecoëfficiënt, die in het algemeen met de plaats en met de tijd varieert evenals de coëfficiënt van Chézy in de bewegingsvergelijking van het getij.

Het is in het algemeen niet te verwachten, dat de coëfficiënt van Chézy, C , en de dispersiecoëfficiënt, D , gedurende het getij constante waarden hebben. Dit blijkt ook bij berekening van C en D uit uitgebreide waarnemingsreeksen. De dispersiecoëfficiënt kan zelfs negatieve waarden hebben. Hierbij blijken de variaties in D veel groter te zijn dan die in C , doordat bij de berekening blijkt dat de dispersie term het verschil is van twee termen. De term, die bij een bepaalde plaats het convectieve transport langs de rivier bepaalt, heeft meestal een tegengestelde waarde ten opzichte van de term die de variatie met de tijd van het zout ter plaatse bepaalt. Men heeft dus bovendien te maken met een grote invloed van de waarnemingsfouten in de snelheid en de concentratie.

Hoewel de variatie in C gedurende het getij ook belangrijk blijkt te zijn, heeft dit echter veel minder effect op de resultaten van getijberekeningen in een rivierenstelsel, omdat het gebied van belangrijke zoutgradiënten relatief klein is ten opzichte van het totale getijgebied. In het algemeen kan dus gesteld worden, dat het één-dimensionale model, waarin de tijd nog als variabele optreedt, in het algemeen ongeschikt is voor voorspellingen betreffende de zoutgehalten langs de rivier als functie van de tijd, omdat de waarden der coëfficiënten aanzienlijk kunnen wijzigen (ref. 1).

Omdat in de praktijk vaak met de één-dimensionale beschrijvingswijze wordt gewerkt, is ook deze beschrijvingswijze bestudeerd, waarbij in het bijzonder de grootte van de dispersiecoëfficiënt is nagegaan. In verband hiermee zijn computerprogramma's ontwikkeld voor een één-dimensionale analyse van de meetgegevens. Ook deze programma's zijn beschreven in verslag M 896-5. Het schema van

de één-dimensionale analyse is gegeven in fig. 6.3., de één-dimensionale computer- en plotteruitvoer is gegeven in fig. 6.2.

6.2. Twee-dimensionaal onderzoek

Het verrichte twee-dimensionale onderzoek kan als volgt worden onderverdeeld:

- a. onderzoek naar de grootte van de turbulente diffusie- en schuifspanningscoëfficiënten.
- b. onderzoek om na te gaan of het stroombeeld en de daarbij optredende menging volledig met het stelsel twee-dimensionale vergelijkingen kan worden beschreven
- c. onderzoek van de numerieke techniek voor het oplossen van het stelsel twee-dimensionale vergelijkingen.

Deze onderdelen van het twee-dimensionale onderzoek worden in het vervolg kort beschreven.

6.2.1. Grootte van turbulente diffusie- en schuifspanningscoëfficiënten

In het kader van de toegevoegde onderzoeken is nagegaan of het diffusieve zouttransport en de turbulente schuifspanning rechtstreeks met behulp van micro-molens en geleidbaarheidsmeters kan worden bepaald (ref. 3 en 4, rapport M896-16). De resultaten waren negatief. Daarom is bij het onderzoek ter bepaling van de grootte van de turbulente diffusie- en schuifspanningscoëfficiënten een andere methode gevolgd.

In de continuïteitsvergelijking voor zout komen drie soorten termen voor, namelijk de term, die de variatie van de zoutconcentratie met de tijd aangeeft, termen, die de bijdrage tot de verandering van de concentratie veroorzaakt door het convectieve zouttransport beschrijven en tot slot termen, die de bijdrage tot de verandering van de concentratie veroorzaakt door het diffusief transport van zout aangeven. De grootte van de term, die de variatie van de concentratie met de tijd aangeeft, kan uit de bij het onderzoek verzamelde meetgegevens worden afgeleid. Evenzo kan de grootte van de termen waarin het convectieve zouttransport voorkomt uit de meetgegevens worden afgeleid. Substitutie van deze waarden in de continuïteitsvergelijking voor zout levert de grootte van de som van de termen waarin het diffusieve zouttransport voorkomt. Bij be-

schouwing van kortstondige veranderingen van de concentratie -(bijvoorbeeld binnen een getijperiode)- mag de term met de bijdrage van het horizontaal gerichte diffusieve zouttransport worden verwaarloosd ten opzichte van de term met het vertikaal gerichte diffusieve transport. Deze aanname leidt ertoe dat de som van de termen waarin het diffusieve zouttransport voorkomt, gelijk gesteld mag worden aan de term waarin het verticale diffusieve transport voorkomt. Derhalve is deze term als resultaat van de in het voorafgaande genoemde bewerkingen van de meetgegevens bekend en kan de grootte van het verticale diffusieve zouttransport uit de meetgegevens worden afgeleid.

Een overeenkomstige methode wordt gevolgd voor het bepalen van de grootte van de turbulente schuifspanning ten gevolge van de verticale uitwisseling van horizontaal gerichte impuls. Eén en ander is toegelicht in fig. 6.1. en 6.3.

Voor een vijftal proeven met bodemruwheid, uitgevoerd in het kader van het systematisch onderzoek (verslag M 896-10) is gepoogd, uitgaande van de aldus bepaalde waarden van het diffusieve zouttransport en de turbulente schuifspanning, een correlatie te vinden tussen de grootte van de turbulente diffusie- en schuifspanningscoëfficiënten en parameters, die het stroombeeld beschrijven. Aangezien de gebruikte basisgegevens waren ontleend aan het systematisch onderzoek, was de meetmethode niet optimaal. Nochtans konden aanwijzingen worden verkregen over de richting waarin de correlaties gezocht dienden te worden. De belangrijkste conclusies van dit onderzoek, dat is beschreven in verslag M 896-11, luiden:

1. De verticale turbulente uitwisseling van impuls en van zout wordt onderdrukt door variaties van de dichtheid over de diepte. Voor stromingen met over de diepte variërende dichtheid leent de gelijkvormigheidshypothese van von Karman (coëfficiënt van turbulente wrijving en turbulente diffusiecoëfficiënt, uitsluitend afhankelijk van lokale grootheden) zich hierdoor beter voor de beschrijving van de turbulentie dan de gelijkvormigheidshypothese van Prandtl (coëfficiënt van turbulente wrijving en turbulente diffusiecoëfficiënt recht-evenredig met de afstand tot de bodem).
2. Bij gedetailleerde beschouwing van de proefresultaten is een verband gezocht tussen de lokale waarde van het getal van Richardson en de lokale waarde van aan von Karman ontleende coëfficiënten.

De algemene tendens kan als volgt in formule worden uitgedrukt:

$$\kappa_i = 0,40 e^{-4,5 R_i} \quad (6.1.)$$

$$\kappa_m = 0,40 e^{-9 R_i} \quad (6.2.)$$

waarin

$$\kappa_i^2 = \frac{-\overline{u'v'}}{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^4 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)^{-2}}$$

$$\kappa_m^2 = \frac{-\overline{v'\rho'}}{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^3 \left(-\frac{\partial \rho}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)^{-2}}$$

$$R_i = \frac{-g \frac{\partial \rho}{\partial y}}{\rho \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2}$$

$$\tau = -\rho \overline{u'v'}$$

$$T_y = \frac{\overline{v'\rho'}}{\rho \overline{v'}}$$

met

- y : vertikale coördinaat
- u, v : horizontale en verticale snelheidscomponent
- ρ : dichtheid
- τ : turbulente schuifspanning
- T_y : vertikaal diffusief transport

De gevonden tendensen dienen nog verder te worden onderzocht. Een vergelijking met in de literatuur beschikbare gegevens wordt gegeven in fig. 6.4. Voor de meetgegevens verzameld in het kader van het getijgootonderzoek wordt verwezen naar verslag M 896-11.

3. De correlaties, gegeven in conclusie 2, zijn verkregen uit proeven die zijn uitgevoerd in het kader van het systematisch onderzoek. Deze proeven waren niet zodanig opgezet dat de meetomstandigheden optimaal waren voor het bepalen van de correlaties. Hierdoor hebben de in conclusie 2 gegeven correlaties enerzijds een beperkte nauwkeurigheid. Anderzijds mag op grond van de opgedane ervaringen worden verwacht dat bij speciaal op dit doel gerichte proeven de correlaties met grotere nauwkeurigheid kunnen worden bepaald.

6.2.2. Onderzoek naar de geldigheid van het twee-dimensionale stelsel differentiaalvergelijkingen

Bij het onderzoek, dat is beschreven in par. 6.2.1., wordt ervan uitgegaan dat het stroombeeld en de daarbij optredende menging kan worden beschreven met behulp van de in fig. 6.1. weergegeven basisvergelijkingen. Blijkens appendix II geldt dit wel voor de verticale uitwisseling van impuls en zout, die ingeleid wordt door de bodemwrijving. Het geldt daarentegen niet voor de menging veroorzaakt door kribben en ten gevolge van de instabiliteit van de gelaagde stroming, die boven een oneffenheid in de bodem kan optreden (zie par. 2.2.2. en par. 2.2.3. van appendix II). Blijkens onderzoek, uitgevoerd in het kader van het fundamentele onderzoek, is ook de menging tussen het zoute water en het zoete water, die aan het landinwaartse einde van de zoutindringing optreedt, een verschijnsel, dat niet met behulp van de in fig. 6.1. weergegeven differentiaalvergelijkingen kan worden beschreven. Aanwijzingen voor deze conclusie zijn verkregen bij een onderzoek naar de existentie van een oplossing van de probleemformulering van de zoutindringing, waarbij uitsluitend verticale diffusie wordt beschouwd. Hierbij werd gevonden, dat voor een diffusiecoëfficiënt ongelijk aan nul de oplossing aan het landinwaartse einde van de zoutindringing ("zouttong-punt") niet kan bestaan. Daarom dient te worden gezocht naar een fysisch aanvaardbare beschrijving van het verschijnsel ter plaatse. Deze beschrijving kan wellicht worden ontleend aan de beschrijving van het gebeuren bij het front van (twee lagen) uitwisselingsstromen. Het onderzoek, waarvan bovenstaande conclusie is ontleend, is beschreven in verslag "Analytische overwegingen over het stelsel twee-dimensionale differentiaalvergelijkingen" (in voorbereiding). (Rapport M 896-23.)

Het feit dat bij de zouttong-punt een ander verschijnsel dan door bodemwrijving opgewekte turbulentie de menging tussen zout en zoet water zou kunnen veroorzaken, kan van belang zijn voor het in par. 5 en in appendix II beschreven schaalonderzoek.

In het verschijnsel bij het landinwaartse einde van de zone met zoutindringing is de horizontale snelheid de maatgevende snelheid, terwijl de verticale afmetingen de maatgevende lengte-afmetingen zijn. Hierdoor is de hoeveelheid zoet water, die via de menging aan het landinwaartse einde van de zone met zoutindringing in het zoute water wordt opgenomen gelijk in een onvertrokken model en in een vertrokken model met gelijke verticale schalen. De tijdschaal

is zodanig dat de periode waarin deze menging in het vertrokken model optreedt, gelijk is aan $1/n$ maal deze periode in het onvertrokken model (n : mate van vertrekking). Daar staat tegenover dat in het vertrokken model de in de rivier binnengedrongen hoeveelheid zout water $1/n$ maal deze hoeveelheid in het onvertrokken model bedraagt.

Daardoor neemt de dichtheid van het zoute water, dat de rivier is binnengedrongen, in het vertrokken model en in het onvertrokken model op overeenkomstige wijze af ten gevolge van de menging aan het landinwaartse einde van de zone met zoutindringing of met andere woorden deze menging wordt (indien belangrijk) juist in een vertrokken model gereproduceerd.

6.2.3. Numerieke techniek voor het oplossen van de twee-dimensionale vergelijkingen

Het diffusieve zouttransport in verticale richting wordt door dichtheidsverschillen onderdrukt bij verloop van de zoutconcentratie over de diepte. Daardoor zijn de diffusieve coëfficiënten klein ten opzichte van een twee-dimensionale stromingsconditie met variatie van de snelheid en de zoutconcentratie in de horizontale richting zonder variatie van deze grootheden over de diepte. Dit leidt ertoe dat de oplossing van de continuïteitsvergelijking zout voor de in de getijgoot bestudeerde twee-dimensionale zouttoestand een differentieschema met geringe numerieke dispersie vereist. Het differentieschema dient ook geschikt te zijn als de variatie van de zoutconcentratie uitsluitend een gevolg is van convectief zouttransport (diffusiecoëfficiënten gelijk nul). Een differentieschema dat zonder prohibitieve rekentijd aan deze eis voldoet, is toegepast in het kader van het onderzoek S 132, "Diffusie in rivieren". Het differentieschema lijkt een geschikt uitgangspunt te zijn voor een numerieke oplossing van de continuïteitsvergelijking zout voor de onderhavige stromingen. Een korte beschrijving van het differentieschema en de daarmee verkregen resultaten is gegeven in ref. 9. Een uitgebreide beschrijving is in voorbereiding.

Bovenstaande overwegingen gelden voor oplossing van de continuïteitsvergelijking zout bij gegeven snelheidsveld. Voor het berekenen van het snelheidsveld wordt een uitgangspunt verkregen bij het in opdracht van de Waterloopkundige Afdeling van de Deltadienst uitgevoerde onderzoek W 152, waarbij de numerieke oplossing van de Reynoldsvergelijkingen voor homogeen water, in het geval van de getijbeweging op een rivierarm met regelmatig profiel, wordt bestudeerd.

(Ref. 19.)

6.3. Eén-dimensionaal onderzoek

Eén-dimensionale modellen bieden weinig perspectieven als berekeningsmethode voor de zoutindringing, tenzij het mogelijk is de één-dimensionale dispersiecoëfficiënt voldoende te begrijpen om deze coëfficiënt te kunnen correleren aan één-dimensionale parameters (bijvoorbeeld de over de diepte gemiddelde zoutconcentratie, de horizontale gradiënt daarvan, etc.). Nochtans is het gewenst na te gaan hoe groot de reikwijdte van deze methoden is (discussie bij ref. 1). Hiervoor kunnen twee redenen worden aangevoerd. In de eerste plaats is de numerieke techniek beschikbaar.

In de tweede plaats kunnen de randvoorwaarden aan de mond bij één-dimensionale modellen worden geformuleerd (instroming van volledig zout water bij vloed), terwijl dit bij twee-dimensionale modellen veel moeilijker is.

Het verrichte één-dimensionale onderzoek kan als volgt worden onderverdeeld:

- a. toetsing van in de praktijk toegepaste één-dimensionale en verwante modellen
- b. dimensie-analyse
- c. onderzoek van de grootte van de dispersiecoëfficiënt
- d. onderzoek van de numerieke techniek voor het oplossen van het stelsel één-dimensionale vergelijkingen.

6.3.1. Toetsing van één-dimensionale en verwante modellen

Ippen en Harleman (ref. 10) hebben een rekenmodel ontwikkeld ter berekening van de één-dimensionale zoutverdeling in een getijrivier. Dit rekenmodel werd getoetst met proeven in een getijgoot met rechthoekige dwarsdoorsnede. Voor al deze proeven gold dat de getijstrooming een vrij gemengd karakter had (geringe zoutconcentratieverschillen in de vertikale richting). Voor de getijgootproeven, die in het kader van het onderhavige onderzoek zijn uitgevoerd, geldt echter, dat de getijstrooming meer gelaagd is. Bij toepassing van het bovenvermelde rekenmodel bleek uit de W.L. getijgootproeven, dat voor meer gelaagde getijstromen de door Ippen en Harleman gegeven correlatie tussen de parameters, die de zoutverdeling karakteriseren en de parameter, die de mate van gelaagdheid aanduidt via uitsluitend getijgegevens, niet aanwezig was. Een éénduidige bepaling van de parameters van dit rekenmodel met de gemeten zoutverdelingen op diverse tijdstippen was veelal onmogelijk. Als nauwkeurige voorspellingsmethode voor de zoutverdeling bleek dit rekenmodel voor meer gelaagde getijstromen (en dus ook voor de Rotterdamse Waterweg) minder geschikt.

De rekenmethoden van Van der Burgh (ref. 11 en 12) voor de berekening van de één-dimensionale zoutverdeling in de Rotterdamse Waterweg bij ongeveer constante randcondities (rivierafvoer, vertikaal getij in de mond) bleken als voorspellingsmethoden van de zoutverdeling in de getijgoot slechts beperkt bruikbaar.

Slechts voor een beperkte variatie van de rivierafvoer en de waterdiepte was de voorspelling van de zoutverdeling redelijk. Voor grotere variaties echter was een verandering van de parameters van de rekenmodellen noodzakelijk. Aangezien de mate van gelaagdheid in de getijgoot en in de Waterweg overeenkomen (par. 3.3.) zal het bovenvermelde ook voor de Waterweg gelden.

Enkele rekenmodellen ter bepaling van de over de getijperiode gemiddelde snelheids- en concentratieprofielen (twee-dimensionale stationaire modellen) werden eveneens met de getijgootgegevens getest. De methode van Abbott (ref. 13) werd uitgebreid voor gebruik van proeven met staafjesruwheid; aldus was het mogelijk de snelheidsprofielen redelijk goed te berekenen.

De hierboven vermelde resultaten zijn uitvoerig behandeld in verslag M 896-20 (in voorbereiding).

6.3.2. Dimensie-analyse

Zolang met behulp van één-dimensionale modellen geen beschrijving van de zouttoestand in de getijgoot kon worden gegeven, is met behulp van dimensie-analyse getracht de resultaten van het systematische onderzoek zo te ordenen, dat voorspellingen over de zoutindringing bij afwijkende proefomstandigheden door interpolatie kunnen worden gegeven. Bij dit onderzoek, dat is beschreven in verslag M 896-15 "Dimensie-analyse zoutindringing" is een correlatie gevonden tussen de zoutindringingslengte bij laagwaterkentering, maatgevende proefparameters (waterdiepte, dichtheidsverschil tussen rivierwater en zeewater, bovenafvoer) en parameters, die aan getijberekeningen kunnen worden ontleend (maximum ebdebiet). Bij het onderzoek, dat is beschreven in par. 6.2.2. is het mogelijk gebleken de gevonden correlaties te vereenvoudigen tot het in fig. 6.5. aangegeven verband. Het verdient aanbeveling na te gaan of de op de assen van deze figuur aangegeven parameters ook geschikt zijn voor het vinden van verbanden tussen de voor het prototype beschikbare meetgegevens.

6.3.3. Onderzoek van dispersiecoëfficiënt

Een stroming met dichtheidsvariaties over de diepte is in eerste instantie niet goed één-dimensionaal te beschrijven. Via een twee-dimensionale aanpak is te zien wat de mogelijkheden van de één-dimensionale aanpak zijn (discussie bij ref. 1). Ook bij het getijgootonderzoek was dit het uitgangspunt. Hierdoor is een één-dimensionaal onderzoek van gelijke omvang als het in par. 6.2.1. beschreven twee-dimensionale onderzoek tot op heden niet verder uitgevoerd dan het ordenen van het basismateriaal.

In fig. 6.6. is te zien hoe het dispersieve transport (zie appendix I) zich als functie van plaats en tijd gedraagt in de getijgoot. Tijdens het grootste deel van de ebperiode en in het begin van de vloedperiode blijkt er voor alle meetstations, waar zout aanwezig is een positief dispersief transport te zijn dat wil zeggen een transport tegen de stroomrichting in, naar binnen toe gericht. Stroomopwaarts neemt de grootte van het transport af. Tijdens het grootste deel van de vloedperiode is voor alle stations het dispersieve transport gering en bij de top van de zouttong wordt het transport zelfs negatief dat wil zeggen stroomafwaarts gericht.

Voor een station in de mond van de Waterweg is het dispersieve transport eveneens berekend (fig. 6.7.). Het verloop van dit transport in de tijd is analoog aan dat getoond in fig. 6.6. in de getijgoot.

Een splitsing van het dispersieve transport in een bijdrage geleverd door variaties over de vertikaal en een bijdrage geleverd door variaties over de breedte -(zie appendix I)- is gegeven in fig. 6.7. (ref. 14).

6.3.4. Numerieke techniek voor het oplossen van de één-dimensionale vergelijkingen

Reeds bij het begin van het getijgootonderzoek was een numerieke techniek beschikbaar voor het oplossen van het stelsel één-dimensionale vergelijkingen (ref. 6 en 15). De één-dimensionale zoutverdeling werd berekend met een dispersiecoëfficiënt die als functie van de plaats werd gegeven. De randconditie voor de zoutverdeling in de mond van de getijrivier moest gegeven worden.

Thatcher en Harleman (ref. 16) hebben een één-dimensionaal numeriek model gebruikt, waarbij de randconditie voor de zoutverdeling een objectief gegeven is en de dispersiecoëfficiënt gekoppeld is aan de concentratiegradiënt en aan een parameter, welke afhankelijk is van de getijbeweging in de mond.

Het verdient aanbeveling na te gaan of het één-dimensionale numerieke model met de modificaties analoog aan het model van Thatcher in staat blijkt om zoutverdelingen die in de getijgoot gemeten zijn, te reproduceren.

Ter voorbereiding hiervan is de beschikbare numerieke techniek aan deze rekenmethode aangepast.

7. Voorstellen tot verder onderzoek

In dit hoofdstuk worden voorstellen gedaan voor verder onderzoek.

De voorgestelde onderwerpen zijn ontleend aan

- door de Waterloopkundige Afdeling gegeven overwegingen over berekeningsmethoden voor de zoutdoordringing in de benedenrivieren van het Deltagebied (ref. 1)
- het voornemen om in het getijmodel Rijnmond (M 900) onderzoek voor de waterhuishouding te verrichten met als eerste onderdeel een onderzoek naar de geschiktheid van het model voor een dergelijk onderzoek (bewijsproef dan wel ijking)

waardoor de voorstellen gericht zijn op

- toepassing voor de Rotterdamse Waterweg.

Het in het kader van bovenstaande toepassingen voorgestelde onderzoek kan worden onderverdeeld in

- a. fundamenteel onderzoek
- b. onderzoek gericht op modeltechniek.

7.1. Fundamenteel onderzoek

7.1.1. Twee-dimensionaal onderzoek

De doelstelling van het fundamentele onderzoek wordt door de Waterloopkundige Afdeling als volgt gepreciseerd (ref. 1):

Over de afhankelijkheid van de waarden van de diffusie en turbulentiecoëfficiënten van bepaalde parameters moet een diepgaand onderzoek worden ingesteld. Bij dit onderzoek kan men verwachten, dat vrij spoedig schattingen worden verkregen van de waarden van de diffusie en turbulentiecoëfficiënten (zie in verband hiermee par. 6.2.1.). Men zou dan kunnen beginnen met de opstelling van een wiskundig model voor het twee-dimensionale probleem. De wiskundige problemen kunnen dan reeds worden bestudeerd.

Een belangrijk punt betreft dan de bepaling van de invloed van wijzigingen in de coëfficiënten op de resultaten van berekeningen. Indien deze belangrijk zijn, zal het moeilijk zijn om accurate uitkomsten te verkrijgen.

Voor de praktijk worden, indien mogelijk, de verschillen in de resultaten van twee berekeningen beschouwd. De resultaten voor de bestaande toestand worden dan vergeleken met die voor de gewijzigde toestand. Dan worden vaak invloeden als gevolg van schematisaties in randwaarden en coëfficiënten gedeeltelijk geëlimineerd.

De numerieke oplossing van de Reynolds-vergelijkingen voor homogeen water, in het geval van de getijbeweging op een rivierarm met regelmatig verlopende profielen zou hieraan echter vooraf moeten gaan. (Dit onderzoek is inmiddels door de Waterloopkundige Afdeling opgedragen aan het Waterloopkundig Laboratorium; onderzoek W 152, ref. 19.)

Bij deze precisering worden twee onderwerpen voor verder twee-dimensionaal onderzoek gesteld:

- a. metingen in de getijgoot over de grootte van turbulente diffusie- en schuifspanningscoëfficiënten
- b. onderzoek van de numerieke techniek voor het oplossen van het stelsel twee-dimensionale vergelijkingen.

In het stelsel twee-dimensionale vergelijkingen worden verticale turbulente diffusie- en schuifspanningscoëfficiënten gebruikt ter karakterisering van het diffusief transport en van de turbulente schuifspanning. Deze beschrijvingswijze lijkt niet adequaat voor de beschrijving van het mengingsverschijnsel bij het landinwaartse einde van de zone met zoutindringing (zie par. 6.2.2.), voor de menging veroorzaakt door kribben (zie appendix II, par. 2.2.2.) en voor de menging ten gevolge van door oneffenheden van de bodem veroorzaakte instabiliteit van een gelaagde stroming (zie appendix II, par. 2.2.3.). Daarom dienen aan de onderwerpen voor verder twee-dimensionaal onderzoek te worden toegevoegd

- c. onderzoek naar de grootte van de bijdrage van andere mengingsmechanismen dan door bodemwrijving opgewekte turbulentie tot de menging op de Rotterdamse Waterweg, waarbij in beschouwing dienen te worden genomen:
 - de menging bij het landinwaartse einde van de zoutindringing
 - menging onder invloed van kribben
 - menging ten gevolge van door oneffenheden van de bodem veroorzaakte instabiliteit van een gelaagde stroming;

d. onderzoek, gericht op een kwantitatieve beschrijving van die mechanismen, die bij het onder c genoemde onderzoek op de Rotterdamse Waterweg een belangrijke bijdrage tot de menging blijken te leveren.

Het twee-dimensionale onderzoek is voor de Rotterdamse Waterweg in het bijzonder van belang in die gebieden waar de variaties in het stroombeeld en in de zouttoestand in dwarsrichting klein zijn. Als een maat voor de invloed van de variaties in dwarsrichting kan worden gebruikt de grootte van het dispersief transport door variaties in dwarsrichting ten opzichte van de grootte van het dispersief transport door variaties in verticale richting (zie appendix I). Bij het landinwaartse einde van de zone met zoutindringing mag worden verwacht dat het dispersief transport door variaties in dwarsrichting relatief groot kan zijn (zie appendix I). In verband hiermee wordt ter aanvulling van het twee-dimensionale onderzoek voorgesteld:

e. analyse van prototypegegevens ter bepaling van de onderlinge verhouding van het op de Rotterdamse Waterweg optredende dispersief transport door variaties in dwarsrichting dan wel door variaties in verticale richting.

Voor de wijze waarop het onder a genoemde onderzoek kan worden uitgevoerd, wordt verwezen naar conclusie 3 van par. 6.2.1. Daarbij dient te worden overwogen in hoeverre metingen met permanente stromingscondities voor het te bestuderen niet-permanente verschijnsel relevante informatie kunnen geven.

Voor de wijze van uitvoering van het onder b genoemde onderzoek wordt verwezen naar par. 6.2.3. en naar het in opdracht van de Waterloopkundige Afdeling in uitvoering zijnde onderzoek W 152.

Het onder c genoemde onderzoek kan worden uitgevoerd door in de getijgoot kribben dan wel oneffenheden op de bodem aan te brengen, en door vervolgens bij gegeven randcondities (getij, rivierafvoer, etc.) de dan optredende zouttoestand te vergelijken met die zonder kribben en oneffenheden op de bodem.

Of bij de stromingscondities, waarbij een gelaagde stroming over een voldoende lange oneffenheid op de bodem volgens de (lange golf) theorie onstabiel is, inderdaad menging optreedt, kan worden onderzocht door deze stromingscondities als permanente stroming in te stellen. Dit is uiteraard ook mogelijk bij de bestudering van door kribben veroorzaakte menging. Een en ander kan experimenteel het eenvoudigst geschieden door het met constante snelheid slepen van een bodemoneffenheid en/of kribben door een stilstaand gelaagd systeem.

In het vorenstaande zijn impliciet aanwijzingen voor het onder d genoemde onderzoek verwerkt.

Het onder e vermelde onderzoek kan worden uitgevoerd conform referentie 14.

7.1.2. Eén-dimensionaal onderzoek

Als gesteld in par. 6.3. bieden één-dimensionale modellen weinig perspectieven als berekeningsmethode voor de zoutindringing, tenzij het mogelijk is de één-dimensionale dispersiecoëfficiënt te correleren aan één-dimensionale parameters (bijvoorbeeld de over de diepte gemiddelde zoutconcentratie, de horizontale gradiënt daarvan, etc.). Gezien de beschikbaarheid van de numerieke techniek en de eenvoud van de randvoorwaarden aan de mond is het gewenst na te gaan hoe groot de reikwijdte van de één-dimensionale methoden is (discussie bij ref. 1). Dit leidt tot het volgende onderzoek:

- a. onderzoek van de grootte van de één-dimensionale dispersiecoëfficiënt op basis van twee-dimensionaal onderzoek en op basis van het beschikbare materiaal
- b. onderzoek naar de mogelijkheid om met veronderstellingen aangaande de dispersiecoëfficiënt (analoog aan die van Thatcher, ref. 16) de gemeten één-dimensionale zoutverdeling te reproduceren met een gemodificeerd numeriek model
- c. onderzoek naar de toepasbaarheid van de in fig. 6.5. aangegeven parameters voor de zoutindringing op de Rotterdamse Waterweg.

Voor de wijze van uitvoering van het onder a genoemde onderzoek wordt verwezen naar par. 6.3.3. en fig. 6.6. en 6.7. Voor de wijze van uitvoering van het onder b genoemde onderzoek wordt verwezen naar par. 6.3.4. en voor het onder c genoemde onderzoek naar par. 6.3.2.

7.2. Onderzoek gericht op modeltechniek

In vertrokken modellen is het noodzakelijk de menging, die een gevolg is van door bodemwrijving veroorzaakte turbulentie kunstmatig te versterken (zie appendix II, par. 2.2.1.). De menging bij het landinwaartse einde van de zone met zoutindringing en de menging ten gevolge van instabiliteit van een gelaagde stroming over een oneffenheid in de bodem worden naar verwachting juist weergegeven in een vertrokken model (zie par. 6.2.2. en appendix II. par. 2.2.3.). De menging, die door kribben wordt veroorzaakt, kan in een vertrokken model te

sterk zijn (zie appendix II, par. 2.2.2.). Derhalve geldt ook voor het onderzoek, gericht op de modeltechniek, dat het van belang is het volgende onderzoek uit te voeren:

a. het bepalen van de grootte van de bijdrage van de verschillende mengmechanismen tot de menging in de Rotterdamse Waterweg.

Indien gestreefd wordt naar juiste reproductie van zowel de snelheidsverdeling als de concentratieverdeling over de diepte is het nodig te beschikken over een middel tot kunstmatige versterking van de stromingsweerstand, dat de snelheidsverdeling niet ongunstig beïnvloedt (zie appendix II, par. 1). Een dergelijk middel is niet beschikbaar, waardoor het verdere onderzoek gericht dient te zijn op:

b. het vinden van een middel tot vergroting van de stromingsweerstand, dat de snelheidsverdeling over de diepte niet beïnvloedt.

In het getijmodel Rijnmond M 900 met een vertrekking 10 is de breedte in verhouding tot de diepte 10 maal kleiner dan in de Rotterdamse Waterweg. Hierdoor kan de invloed van dwarsvariatiën in de snelheids- en dichtheidsverdeling in het model te groot zijn. Dit dient te worden onderzocht door:

c. het bepalen van de grootte van het in het getijmodel Rijnmond optredende dispersief transport door variatiën in dwarsrichting in vergelijking met de grootte van het dispersief transport door variatiën in verticale richting.

Voor de wijze van uitvoering van het onder a genoemde onderzoek wordt verwezen naar par. 7.2.1. onder c en d.

Het onder b genoemde onderzoek kan worden begonnen door het uitvoeren van proeven bij permanente homogene stromingscondities.

Het onder c genoemde onderzoek kan worden uitgevoerd conform referentie 14.

A P P E N D I X I: CONVECTIEF, DIFFUSIEF EN DISPERSIEF ZOUTTRANSPORT

Indien het water stroomt, wordt in het water aanwezig zout in de stroomrichting verplaatst. Het hiermee gepaard gaande zouttransport wordt aangeduid als convectief zouttransport. De richting ervan valt samen met de stroomrichting. De grootte van het convectief zouttransport per eenheid van een loodrecht op de stroomrichting staand oppervlak is gelijk aan het product van de snelheid en de zoutconcentratie op de beschouwde plaats.

Turbulente wervels zijn er de oorzaak van dat ook in andere richtingen zout wordt getransporteerd. Een transport loodrecht op de stroomrichting komt onder meer voor bij continue lozing van een kleurstof in een rivier met permanente stroming. Het transport loodrecht op de stroomrichting komt in dit geval tot uiting in de toename van de breedte van de kleurstofwolk bij toenemende afstand tot het lozingspunt.

Het zouttransport door wervels wordt aangeduid als diffusief zouttransport. Het kan in principe in iedere richting optreden mits de zoutconcentratie in die richting varieert. De grootte van het diffusief zouttransport is evenredig met de grootte van de gradiënt van de zoutconcentratie in de beschouwde richting.

De stroomsnelheid, de sterkte van de wervels en de zoutconcentratie variëren in een doorsnede van een estuarium (of van de getijgoot). De grootte van het convectief zouttransport en de grootte van het diffusief zouttransport variëren daardoor over de doorsnede.

Het totale convectieve zouttransport door een doorsnede van een estuarium kan worden verkregen door sommatie van het convectieve zouttransport in de verschillende punten van de doorsnede. In formule mag dit worden geschreven als

$$F_z = A \overline{u \cdot c} \quad (I.1.)$$

waarin

F_z : totale convectieve zouttransport door beschouwde (vertikale) doorsnede

A : oppervlak van de beschouwde doorsnede

u : (horizontale) snelheid

c : zoutconcentratie

en waarin een streep boven een grootheid duidt op de over de doorsnede gemiddelde waarde van die grootheid.

Nu is de gemiddelde waarde van het product $u \cdot c$ ongelijk aan het product van de gemiddelde snelheid \bar{u} en de gemiddelde concentratie \bar{c} . in formule

$$\overline{u \cdot c} \neq \bar{u} \cdot \bar{c} \quad (I.2.)$$

Derhalve mag het totale convectieve transport als volgt worden gesplitst

$$F_z = A \bar{u} \bar{c} + A (\overline{u \cdot c} - \bar{u} \bar{c}) \quad (I.3.)$$

De door vergelijking I.3. gegeven splitsing van het totale convectieve transport door een doorsnede wordt in de literatuur vaak gemaakt. De tweede bijdrage tot het totale convectieve transport -(de term met de haakjes achter het is gelijkteken)- wordt daarbij aangeduid als het dispersief zouttransport door de beschouwde doorsnede. Het is gelijk aan het totale convectieve zouttransport, waargenomen door een met een snelheid gelijk aan de gemiddelde snelheid \bar{u} zich verplaatsende waarnemer.

Op grond van formele wiskundige overwegingen mag vergelijking I.3. ook worden geschreven als

$$F_z = A \bar{u} \bar{c} + A \overline{(u - \bar{u}) \cdot (c - \bar{c})} \quad (I.4.)$$

Het dispersief transport mag derhalve worden geschreven als

$$F_D = A \overline{(u - \bar{u}) \cdot (c - \bar{c})} \quad (I.5.)$$

waarin

F_D : dispersief zouttransport door de beschouwde doorsnede.

In vergelijking I.5. komt duidelijk tot uiting dat het dispersief transport een gevolg is van de variatie van de snelheid en de concentratie in de beschouwde doorsnede.

Het is mogelijk dat de snelheid en de concentratie in de beschouwde doorsnede zowel over de vertikaal als in dwarsrichting variëren. Er kan dan onderscheid worden gemaakt tussen het dispersief zouttransport ten gevolge van variaties in verticale richting en dat ten gevolge van variaties in dwarsrichting.

Het teken van $(u - \bar{u})$ is in het grootste deel van de doorsnede gelijk aan dat van $(c - \bar{c})$, als de snelheid u in de landinwaartse richting positief wordt gerekend. Hierdoor is in de meeste gevallen het dispersief transport een positieve landinwaarts gerichte grootheid. Bij de hierna volgende beschouwingen wordt hiervan uitgegaan.

Voor een goede reproductie van de zoutindringing in een model is het van essentieel belang dat het totale convectieve zouttransport door iedere verticale doorsnede van het estuarium juist wordt weergegeven. Te grote waarden van het totale convectieve zouttransport gaan gepaard met een te grote zoutindringing. Dit heeft onder meer tot gevolg dat de over de doorsnede gemiddelde waarden van de concentratie in het model te groot zijn.

Er zal nu worden nagegaan hoe de verschillende grootheden rechts van het is gelijkteken van vergelijking I.4. in vertrokken modellen worden weergegeven. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen modellen met bodemweerstand en modellen met weerstandsstaafjes. Het verschil in de snelheidsverdeling over de vertikaal bij gebruik van bodemweerstand en weerstandsstaafjes wordt geïllustreerd door figuren I.1. t/m I.4.

Bij gebruik van bodemruwheid geldt

- \bar{u} : deze grootheid wordt goed weergegeven in het model bij juiste reproductie van het horizontale en verticale getij
- $(u-\bar{u})$: deze grootheid is in vertrokken modellen te groot bij gebruik van bodemruwheid, omdat de snelheid over de vertikaal te sterk varieert (zie fig. I.4.)
- $(c-\bar{c})$: voor goede reproductie van \bar{c} is het nodig dat bij juiste waarden van \bar{u} en te grote waarden van $(u-\bar{u})$ de waarden van de grootheid $(c-\bar{c})$ in het model te klein zijn. Immers, alleen als aan deze voorwaarde is voldaan is het blijkens vergelijking I.4. mogelijk een juiste reproductie van het totale convectieve zouttransport te verkrijgen, terwijl een juiste reproductie van \bar{c} vereist dat het totale convectieve zouttransport juist wordt weergegeven.

De voorwaarde dat $(c-\bar{c})$ in het model te klein dient te zijn, houdt in dat de gelaagdheid in vertrokken modellen met bodemweerstand kleiner dient te zijn dan in het prototype. Zonder kunstmatige versterking van de menging kan aan deze voorwaarde niet worden voldaan.

Bij gebruik van weerstandsstaafjes geldt

- \bar{u} : deze grootheid wordt wederom goed weergegeven bij juiste reproductie van het horizontale en verticale getij

- ($u-\bar{u}$) : deze grootheid is in vertrokken modellen te klein bij gebruik van weerstandsstaafjes, omdat de staafjes er de oorzaak van zijn dat de snelheid te weinig over de vertikaal varieert (zie fig. I.2.)
- ($c-\bar{c}$) : voor goede reproductie van \bar{c} is het nu nodig dat bij juiste waarden van \bar{u} en te kleine waarden van ($u-\bar{u}$) de waarden van de grootheid ($c-\bar{c}$) in het model te groot zijn. Immers alleen dan kan blijkens vergelijking I.4. een juiste reproductie van het totale convectieve zouttransport worden verkregen.

De voorwaarde dat ($c-\bar{c}$) in het model te groot dient te zijn, houdt in dat de gelaagdheid in vertrokken modellen met weerstandsstaafjes groter dient te zijn dan in het prototype. Indien de menging niet kunstmatig wordt versterkt, wordt in het algemeen aan deze voorwaarde voldaan.

Op grond van het voorafgaande mag worden verwacht dat de waarden van \bar{c} in vertrokken modellen met weerstandsstaafjes beter in overeenstemming zijn met de waarden van \bar{c} in het prototype dan de waarden van \bar{c} in vertrokken modellen met bodemruwheid. Deze conclusie geldt als de menging niet kunstmatig wordt versterkt.

A P P E N D I X II: KANTTEKENINGEN BIJ HET SCHAAALONDERZOEK

1. Keuze van middelen tot vergroting van stromingsweerstand

Uit appendix I bij dit verslag volgt dat goede reproductie van de verdeling van de dichtheid over de vertikaal alleen kan worden verkregen bij een goede reproductie van de verdeling van de snelheid over de vertikaal. Immers alleen dan kan bij juiste reproductie van het verticale getij het totale convectieve transport juist worden gereproduceerd.

Dit volgt uit vergelijking I.4. Derhalve dienen aan de elementen, die worden gebruikt ter kunstmatige versterking van de stromingsweerstand de volgende eisen te worden gesteld:

- a. de stromingsweerstand dient in de juiste mate te worden vergroot
- b. de verdeling van de snelheid over de vertikaal mag niet worden beïnvloed.

In modellen met homogene stroming is het gebruikelijk de extra weerstand aan te brengen door middel van over de gehele diepte aangebrachte weerstandsstaafjes, dan wel door vergroting van de bodemruwheid. In modellen met dichtheidsstromen is de invloed van deze middelen op de verdeling van de snelheid over

de vertikaal in strijd met de onder b geformuleerde eis. Bij gebruik van weerstandsstaafjes is de snelheid te gelijkmatig verdeeld over de vertikaal, terwijl bij vergroting van de bodemruwheid de snelheid te sterk over de vertikaal varieert (zie figuren I.2. en I.4.). De gevolgen hiervan zijn besproken in appendix I.

In overeenstemming met het bovenstaande zouden slechts in aanmerking kunnen komen als middel ter vergroting van de stromingsweerstand:

- a. over de gehele diepte aangebrachte weerstandsstaafjes in combinatie met vergroting van de bodemruwheid
- b. vergroting van de bodemruwheid in combinatie met kunstmatige versterking van de menging.

Bij oplossing a is het denkbaar dat de staafjes (met te gelijkmatige verdeling van de snelheid over de vertikaal) en de vergrote bodemruwheid (met te ongelijkmatige verdeling van de snelheid) elkaar zodanig tegenwerken dat de juiste verdeling van de snelheid over de vertikaal wordt verkregen. Deze verwachting is gerechtvaardigd voor homogene stroming. Het lijkt twijfelachtig of het gewenste gunstige effect bij inhomogene stroming kan worden verkregen, indien in dit verband bijvoorbeeld aan uitwisselingsstromen bij een schutsluis wordt gedacht.

Versterking van de menging tussen relatief zout water nabij de bodem en relatief zoet water is nodig ter reproductie van de zouttoestand (zie par. 5.1.). De menging kan niet versterkt worden zonder tevens de vertikale uitwisseling van impuls te versterken. Derhalve nivelleert een kunstmatige versterking van de menging snelheidsverschillen over de vertikaal, in principe althans. Het is daardoor denkbaar dat bij vergroting van de bodemruwheid in combinatie met kunstmatige versterking van de menging aan eis b kan worden voldaan.

In verband met bovenstaande overwegingen is het effect van weerstandsstaafjes in combinatie met vergroting van de bodemruwheid niet onderzocht in de getijgoot. Het onderzoek is beperkt gebleven tot nagaan van het effect van weerstandsstaafjes of vergrote bodemruwheid afzonderlijk, al dan niet in combinatie met kunstmatige versterking van de menging door het inblazen van lucht.

2. Niet in de getijgoot bestudeerde effecten

2.1. Dispersief transport door dwarsvariatië in vergelijking met dispersief transport door verticale variatië

Het schaalonderzoek dat is beschreven in hoofdstuk 5 is uitgevoerd in een goot met rechthoekig dwarsprofiel en gladde wanden. De geometrie van de goot wijkt af van die van de Rotterdamse Waterweg. Belangrijke verschillen zijn de kribben, het niet-rechthoekige dwarsprofiel van de rivier, het feit dat het profiel van de rivier niet over de gehele lengte constant is en oneffenheden van de bodem. Al deze factoren zijn wel, zij het met verschillende verticale en horizontale schaal, afgebeeld in het getijmodel Rijnmond M 900. Zij kunnen daardoor in dit model zowel de snelheidsverdeling over de vertikaal en over de breedte als ook de menging beïnvloeden, terwijl dit in de getijgoot niet het geval is. De resultaten van het schaalonderzoek in de getijgoot met gladde wanden gelden daardoor niet bij voorbaat voor M 900.

De fictieve rivier, waarvan de getijgoot met gladde wanden een afbeelding vormt, is in eerste benadering oneindig breed. De verhouding tussen de breedte, b , en de diepte, h , van de fictieve rivier is groter dan deze verhouding voor de Rotterdamse Waterweg. De verticale schaal van M 900 is $1/64$, de horizontale schaal is $1/640$. Daardoor is de verhouding tussen de breedte en de diepte van de rivier in M 900 op modelmaat 10 maal kleiner dan voor de Rotterdamse Waterweg. In getallen uitgedrukt geldt:

getijgoot met gladde wanden	b/h	∞
Rotterdamse Waterweg	b/h	25
Getijmodel Rijnmond M 900	b/h	2,5.

Het in appendix I omschreven dispersieve transport kan een gevolg zijn van variatië van de snelheid en de dichtheid over de vertikaal. Dit dispersieve transport wordt in het vervolg aangeduid als dispersief transport door verticale variatië. Daarnaast kan het dispersieve transport een gevolg zijn van variatië van de snelheid en de dichtheid in dwarsrichting. Dit dispersieve transport wordt in vervolg aangeduid als dispersief transport door dwarsvariatië.

In de Rotterdamse Waterweg varieert de dichtheid van het water in verticale richting en in langsrichting. De variatië van de dichtheid in langsrichting

veroorzaken dichtheidsstromen, die een ongelijkmatige verdeling van de snelheid over de vertikaal tot gevolg hebben. Het dispersieve transport door verticale variaties is daardoor belangrijker in vergelijking tot het dispersieve transport door dwarsvariaties naarmate de dichtheid in langsrichting sterker varieert. In het gebied aan het bovenstroomse einde van de zoutintringing met zeer geringe zoutconcentraties van in de orde enige malen 100 mgr/l is daardoor het dispersieve transport door verticale variaties minder sterk dan in het gebied met zoutconcentraties in de orde van zeg 50% van de zoutconcentratie van zeewater. Aan het bovenstroomse einde van het gebied met zoutpenetratie is daardoor naar verwachting de bijdrage van het dispersieve transport door dwarsvariaties tot het totale convectieve transport groter dan halverwege het gebied met zoutpenetratie. Naar verwachting is halverwege het gebied met zoutpenetratie de bijdrage van het dispersieve transport door verticale variaties belangrijk groter dan de bijdrage van het dispersieve transport door dwarsvariaties. Dit volgt uit het feit dat de zoutintringing in de Rotterdamse Waterweg met zekere mate van overeenstemming in de getijgoot kon worden gereproduceerd, blijkens het in par. 3.3. beschreven onderzoek "Reproductie Rotterdamse Waterweg in de getijgoot". Hierbij dient te worden bedacht dat in de getijgoot, waarvan de wanden glad zijn het dispersieve transport door dwarsvariaties nagenoeg ontbreekt. Afgewacht moet worden of het bovenstaande ook opgaat in het getijmodel Rijnmond, M 900. In dit model is immers de breedte van de rivier in verhouding tot de diepte kleiner dan in de Rotterdamse Waterweg. De variaties van de snelheid en de dichtheid in dwarsrichting zouden hierdoor in verhouding tot het prototype te groot kunnen zijn, waardoor ook de bijdrage van het dispersief transport door dwarsvariaties in het model te groot zou kunnen zijn.

Ter afsluiting van bovenstaande overwegingen wordt voorgesteld om op basis van voor de Rotterdamse Waterweg en voor het getijmodel Rijnmond M 900 beschikbare meetgegevens na te gaan:

- a. de onderlinge verhouding tussen het dispersieve transport door verticale variaties en het dispersieve transport door dwarsvariaties in verschillende raaien van de Rotterdamse Waterweg
- b. de onderlinge verhouding tussen deze beide typen dispersief transport in verschillende raaien van het getijmodel Rijnmond M 900.

2.2. Niet in de getijgoot gereproduceerde mengmechanismen

De wervels die worden opgewekt bij de koppen van kribben, kunnen menging veroorzaken. Oneffenheden van de bodem zouden aanleiding kunnen geven tot menging door onstabiele van een gelaagde stroming. Deze mechanismen kunnen optreden in de Rotterdamse Waterweg, zij kunnen niet optreden in de getijgoot vanwege de gladde wanden en het constante dwarsprofiel van de goot. In de volgende paragrafen is aangegeven welke gevolgen het ontbreken van deze mengmechanismen in de getijgoot heeft.

2.2.1. Schaalregel voor menging

Bij reproductie van het stroombeeld in de mond van een getijrivier en de daarbij optredende menging tussen rivierwater en zeewater dient het verticale diffusieve transport op dezelfde schaal te worden gereproduceerd als het verticale advectieve transport. Derhalve dient te gelden

$$n_{T_y} = n_v n_c \quad (\text{II.1.})$$

waarin

- n : schaal van met index aangegeven grootheid (deze grootheid in het model gedeeld door deze grootheid in het prototype)
- T_y : vertikaal diffusief transport
- v : verticale snelheid
- c : concentratie van zout

De schaal van de verticale snelheid en de schaal van de concentratie zijn bekend volgens de schaalregels van Froude. Daardoor kan met behulp van vergelijking II.1. de schaal van het verticale diffusieve transport worden afgeleid.

Volgens de schaalregels van Froude geldt

$$n_v = \left(\frac{n_h}{n_l} \right) \cdot n_h^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.2.})$$

$$\text{en } n_c = 1 \quad (\text{II.3.})$$

- waarin n_h : verticale schaal
- h : diepte
- n_l : horizontale schaal.

De verhouding n_h/n_l is per definitie de mate van vertrekking of kortweg de vertrekking n . Omdat in vertrokken modellen de horizontale afmetingen sterker worden verkleind dan de verticale geldt $n > 1$.
Uit vergelijkingen II.1., II.2. en II.3. volgt

$$n_{T_y} = n \cdot n_h^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.4.})$$

waarin

n : (mate van) vertrekking.

Blijkens vergelijking II.4. dient het verticale diffusieve transport in een vertrokken model n maal groter te zijn dan in een onvertrokken model met dezelfde verticale schaal. Deze versterking dient evenals de in vertrokken modellen noodzakelijke vergroting van de stromingsweerstand kunstmatig tot stand te worden gebracht, voor zover het verticale diffusieve transport een gevolg is van turbulentie, die door bodemwrijving is opgewekt.

De menging veroorzaakt door kribben en door instabiliteit van een gelaagde stroming dient op dezelfde schaal in modellen te worden gereproduceerd als het verticale diffusieve transport.

De hoeveelheid relatief zout water, die door deze mechanismen per eenheid van horizontaal oppervlak omhoog wordt gebracht, dan wel de hoeveelheid relatief zoet water, die door deze mechanismen per eenheid van horizontaal oppervlak omlaag wordt gebracht, wordt gelijk T'_y gesteld.

Deze grootte dient aan dezelfde schaalvoorwaarde te voldoen als het verticale diffusieve transport. Derhalve geldt

$$n_{T'_y} = n \cdot n_h^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.5.})$$

waarin

T'_y : door andere mechanismen dan door bodemwrijving ingeleid diffusief transport per eenheid van horizontaal oppervlak omhoog gebrachte hoeveelheid relatief zout water dan wel omlaag gebrachte hoeveelheid relatief zoet water.

2.2.2. Reproductie van menging veroorzaakt door kribben

Uit proeven uitgevoerd in de Waal en in een vertrokken model van de rivier is gebleken dat de diffusie in dwarsrichting in een vertrokken model te sterk is

in vergelijking met het prototype (Holley, E.R. and Karelse, M., Model-prototype comparison for transverse mixing in rivers, paper submitted for XVth I.A.H.R. Congress, Istanbul, 1973, ref. 17). Daarnaast bleek dat de invloed van de kribben in het model over een in verhouding te groot deel van de breedte merkbaar is. Bovenstaande effecten spelen geen rol bij proeven in de getijgoot met gladde wanden. Zij treden daarentegen in zekere mate op in het getijmodel Rijnmond M 900.

Dat de invloed van de kribben in vertrokken modellen over een in verhouding te groot deel van de breedte merkbaar is kan als volgt aannemelijk worden gemaakt. Bij een onderlinge afstand tussen twee kribben in de lengterichting van de rivier, groot L en bij een breedte van de rivier gelijk B bedraagt het aantal kribben per eenheid van horizontaal rivier-oppervlak $2/BL$, wanneer beide oevers van kribben zijn voorzien. In een onvertrokken model met verticale schaal (en horizontale schaal) gelijk n_h bedraagt dit aantal $2/n_h^2 \cdot BL$.

In een vertrokken model met verticale schaal gelijk n_h en een vertrekking n bedraagt het aantal kribben per eenheid van horizontaal rivier-oppervlak $2n^2/n_h^2 \cdot BL$.

Indien de lengte van de kribben zowel in het onvertrokken model als in het vertrokken model een zekere lengte overschrijdt is het aannemelijk dat de verticale menging, die door de krib wordt opgewekt, dezelfde grootte heeft in een onvertrokken model en in een vertrokken model met gelijke diepteschaal. Immers bij de kop van de kribben hebben in beide modellen de horizontale snelheid ($n_u = n_h^{1/2}$) en de laagdikten dezelfde waarden. Als deze veronderstelling juist is, is de door de kribben veroorzaakte verticale menging in een vertrokken model n^2 maal sterker dan in een onvertrokken model met dezelfde diepteschaal, terwijl voor een goede reproductie van de verticale menging deze factor n dient te zijn (zie vergelijking II.5.). Dit betekent dat de door kribben veroorzaakte menging tot n maal te sterk kan zijn in een vertrokken model.

2.2.3. Reproductie van menging ten gevolge van instabiliteit van gelaagde stroming

Uit lange golftheorie is het mogelijk een criterium af te leiden waarbij een gelaagde stroming over een voldoende lange oneffenheid in de bodem onstabiel is (zie appendix III). Bij homogene stroming gaat de instabiliteit gepaard met een

watersprong ter plaatse van de oneffenheid. Bij gelaagde stroming zou in overeenstemming hiermee de instabiliteit met een interne watersprong en dus met menging gepaard kunnen gaan. Dit zou zich in het getijmodel M 900 kunnen voordoen.

In de theorie van de watersprong is de waterdiepte de karakteristieke lengtemaat, terwijl de horizontale snelheid de karakteristieke snelheidsmaat is. Dit houdt in dat de door een interne watersprong veroorzaakte menging gelijk is in een vertrokken model en in een onvertrokken model met dezelfde diepteschaal, omdat in beide modellen de laagdikten en de horizontale snelheden gelijk zijn. Voorwaarde hiertoe is dat in beide modellen de lengte van de bodemoneffenheid voldoende groot is.

Het deel van de breedte van een rivier dat wordt ingenomen door een oneffenheid in de bodem is als percentage van de rivierbreedte gelijk in een vertrokken model en in een onvertrokken model. Bij gelijke diepteschaal is daarentegen in lengterichting de onderlinge afstand tussen de oneffenheden in een vertrokken model n maal kleiner dan in een onvertrokken model. Dit houdt in dat de door de instabiliteiten veroorzaakte menging in vertrokken modellen per eenheid van horizontaal rivieroppervlak gemeten n maal groter is dan in een onvertrokken model met gelijke diepteschaal. Dit houdt in dat deze menging juist in vertrokken modellen wordt weergegeven (zie vergelijking II.5.).

2.2.4. Samenvatting

In het voorafgaande zijn een aantal mengmechanismen beschreven die in de Rotterdamse Waterweg en dus ook in het getijmodel Rijnmond M 900 zouden kunnen optreden. Daarbij is onbekend hoe belangrijk deze mengmechanismen op de Rotterdamse Waterweg zijn. Dit te onderzoeken lijkt van belang omdat de door deze mechanismen veroorzaakte menging juist tot te sterk in een vertrokken model wordt weergegeven. Indien ze een belangrijke bijdrage tot de menging leveren is reproductie van deze verschijnselen in de getijgoot noodzakelijk bij het schaalonderzoek. In verband hiermee wordt voorgesteld experimenteel na te gaan of de in par. 2.2.3. van deze appendix genoemde instabiliteiten inderdaad met een belangrijke menging gepaard gaan.

A P P E N D I X III: LANGE GOLFTHEORIE TOEGEPAST VOOR TWEEDIMENSIONALE
STORING IN ATMOSPHERISCHE DRUK BOVEN TWEELAGENSTROMING

1. Probleemstelling

Als uitgangspunt dient een tweelagenstroming, die wordt gekenmerkt door:

- verwaarloosbare bodem- en grensvlakwrijving,
- dikte, snelheid en dichtheid van bovenlaag A_1 , U_1 en ρ_1 ,
- dikte, snelheid en dichtheid van onderlaag A_2 , U_2 en ρ_2 ,
- constante atmosferische druk ($p=0$) boven waterspiegel.

Neem aan dat op gegeven ogenblik, $t=0$, de atmosferische druk, p , plotseling verandert tot $p=p(x)$, waarbij x de coördinaat in de stroomrichting is.

Gevraagd wordt de bijbehorende veranderingen in de tweelagenstroming, die als uitgangspunt dient, te bepalen.

Het gestelde probleem kan in eerste benadering worden opgelost met behulp van de lange golftheorie. Daarbij kan worden uitgegaan van een methode, die reeds is toegepast voor een oplossing van dit probleem bij homogene stroming (ref. 18).

2. Oplossing

Voor $t > 0$ worden de laagdikten en snelheden gegeven door respectievelijk $(A_1 + a_1)$, $(A_2 + a_2)$, $(U_1 + u_1)$ en $(U_2 + u_2)$.

Aangenomen wordt:

- verwaarloosbare verticale snelheden en verticale versnellingen
- variaties van de laagdikten, a_1 en a_2 , klein ten opzichte van de laagdikten zelf ($a_1 \ll A_1$, $a_2 \ll A_2$),
- variaties van de snelheden, u_1 en u_2 , klein ten opzichte van de snelheden zelf ($u_1 \ll U_1$, $u_2 \ll U_2$),
- gelijkmatige snelheidsverdeling.

Op grond van bovenstaande aannamen kunnen de volgende benaderingen worden gegeven voor de continuïteitsvergelijkingen en de bewegingsvergelijkingen van de boven- en onderlaag.

continuïteitsvergelijking bovenlaag

$$\frac{\partial a_1}{\partial t} + A_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + U_1 \frac{\partial a_1}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.1.})$$

bewegingsvergelijking bovenlaag

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + U_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + g \frac{\partial(a_1+a_2)}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (\text{III.2.})$$

waarin p: atmosferische druk (overdruk wordt positief gerekend)

continuïteitsvergelijking onderlaag

$$\frac{\partial a_2}{\partial t} + A_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + U_2 \frac{\partial a_2}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.3.})$$

bewegingsvergelijking onderlaag

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + U_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + g \frac{\partial(a_1+a_2)}{\partial x} - \frac{\Delta p}{\rho_2} g \frac{\partial a_1}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (\text{III.4.})$$

waarin

$$\Delta p = p_2 - p_1 \quad (\text{III.5.})$$

Met het doel u_1 en u_2 te elimineren, worden vergelijkingen III.1. t/m III.4. als volgt herleid

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} = -\frac{1}{A_1} \left[\frac{\partial a_1}{\partial t} + U_1 \frac{\partial a_1}{\partial x} \right] \quad (\text{III.6.})$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = -g \frac{\partial(a_1+a_2)}{\partial x} - \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{U_1}{A_1} \left[\frac{\partial a_1}{\partial t} + U_1 \frac{\partial a_1}{\partial x} \right] \quad (\text{III.7.})$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial x} = -\frac{1}{A_2} \left[\frac{\partial a_2}{\partial t} + U_2 \frac{\partial a_2}{\partial x} \right] \quad (\text{III.8.})$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = -g \frac{\partial(a_1+a_2)}{\partial x} + \frac{\Delta p}{\rho_2} g \frac{\partial a_2}{\partial x} - \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{U_2}{A_2} \left[\frac{\partial a_2}{\partial t} + U_2 \frac{\partial a_2}{\partial x} \right] \quad (\text{III.9.})$$

Differentieer vergelijking III.6. naar t, differentieer vergelijking III.7. naar x en trek de aldus verkregen vergelijkingen van elkaar af.

Dit geeft

$$\begin{aligned} & \frac{1}{A_1} \left[g A_1 - U_1^2 \right] \frac{\partial^2 a_1}{\partial x^2} - 2 \frac{U_1}{A_1} \frac{\partial^2 a_1}{\partial x \partial t} - \frac{1}{A_1} \frac{\partial^2 a_1}{\partial t^2} = \\ & = -\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - g \frac{\partial^2 a_2}{\partial x^2} \end{aligned} \quad (\text{III.10.})$$

Op overeenkomstige wijze volgt uit vergelijkingen III.8. en III.9.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{A_2} \left[g A_2 - U_2^2 \right] \frac{\partial^2 a_2}{\partial x^2} - 2 \frac{U_2}{A_2} \frac{\partial^2 a_2}{\partial x \partial t} - \frac{1}{A_2} \frac{\partial^2 a_2}{\partial t^2} = \\ & = - \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - g \frac{\partial^2 a_1}{\partial x^2} + \frac{\Delta \rho}{\rho_2} g \frac{\partial^2 a_1}{\partial x^2} \end{aligned} \quad (\text{III.11.})$$

Vergelijkingen III.10. en III.11. dienen te worden opgelost voor het bepalen van a_1 en a_2 met als begincondities:

$$t=0, a_1=0, \frac{\partial a_1}{\partial t} = 0, a_2 = 0, \frac{\partial a_2}{\partial t} = 0 \quad (\text{III.12.})$$

Blijkens de resultaten verkregen voor homogene stroming (ref. 18) geeft oplossing van de complementaire functies de golfverschijnselen gepaard gaand met de aanzet, terwijl de eindtoestand kan worden verkregen als de particuliere oplossing met $\partial/\partial t = 0$. Op grond hiervan kan de eindtoestand worden bepaald als particuliere oplossing van vergelijkingen III.10 en III.11 met verwaarlozing van de afgeleiden naar t . Uit de vergelijkingen, die dan worden verkregen, is het mogelijk a_2 te elimineren. Dit levert indien $\rho_1 \approx \rho_2 \approx \rho$:

$$\frac{1}{A_1 U_2^2} \left[(g A_1 - U_1^2) (g A_2 - U_2^2) - \left(1 - \frac{\Delta \rho}{\rho}\right) g^2 A_1 A_2 \right] \frac{\partial^2 a_1}{\partial x^2} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (\text{III.13})$$

De oplossing van vergelijking III.13, die geldt voor de eindtoestand ($\partial/\partial t = 0$) luidt

$$a_1(x) = \frac{- A_1 U_2^2}{(g A_1 - U_1^2) (g A_2 - U_2^2) - \left(1 - \frac{\Delta \rho}{\rho}\right) g^2 A_1 A_2} \frac{1}{\rho} p(x) \quad (\text{III.14})$$

waaruit volgt dat resonantie optreedt als

$$(g A_1 - U_1^2) (g A_2 - U_2^2) - \left(1 - \frac{\Delta \rho}{\rho}\right) g^2 A_1 A_2 = 0 \quad (\text{III.15})$$

Bij resonantie geldt volgens vergelijkingen III.14 en III.15 dat $a_1 \rightarrow \infty$. Dan wordt niet meer voldaan aan de in het begin van par. 2. gestelde aannamen. Nochtans is het blijkens ref. 18 aannemelijk dat vergelijking III.15 de voorwaarde voor resonantie is. Vergelijking III.15 is identiek aan de resonantievoorwaarde bij stroming van een wrijvingsloze tweelagenstroming over een gegolfde bodem (ref. 18).

Bij de tweelagenstroming zijn de complementaire functies gelijk aan die voor de homogene stroming. Het is hierdoor mogelijk het stelsel vergelijkingen van

de hier beschouwde tweelagenstroming volledig op te lossen uitgaande van de voor de homogene stroming gevonden oplossingen (ref. 18).

Dit is mogelijk, ongeacht of aan de resonantievoorwaarde gegeven door vergelijking III.15., wordt voldaan.

Referenties:

1. Dronkers, J.J. - "Discussie over de berekening van de zoutdoordringing in de benedenrivieren van het Deltagebied"
Waterloopkundige Afdeling Deltadienst, mei 1972.
2. Rijkswaterstaat, Gemeentewerken Rotterdam, Waterloopkundig Laboratorium -
"Water-, zout- en sedimentbeweging in het Noordelijke Bekken van het
Deltagebied, richtlijnen voor onderzoek"
augustus 1967.
3. Waterloopkundig Laboratorium - "Turbulentie-onderzoek (S 73)", september
1971, intern rapport Waterloopkundig Laboratorium, Delft.
4. Tumbuan, E.H. - "Turbulentiemetingen in water, verslag praktisch werken",
intern rapport M 896/K 73, Waterloopkundig Laboratorium, Delft,
september 1969.
5. Vreugdenhil, C.B. - "Computation of gravity currents in estuaries", publi-
cation no. 86, Delft Hydraulics Laboratory, December 1970.
6. Stigter, C. and Siemons, J. - "Calculations of longitudinal salt distribu-
tion in estuaries as a function of time", publication no. 52, Delft
Hydraulics Laboratory, October 1967.
7. Waterloopkundig Laboratorium - "Stabiliteit van drielagenstroming",
verslag S 57, juli 1972.
8. Waterloopkundig Laboratorium - "Stabiliteitsonderzoek gelaagde stroming
over gegolfde bodem",
verslag S 57, maart 1973.
9. Verboom, G. - "Transverse mixing in rivers; a numerical approach" paper
submitted for XVth IAHR Congress, Istanbul, 1973.
10. Ippen, A.T. and Harleman, D.R.F. - "One-dimensional analysis of salinity
intrusion in estuaries",

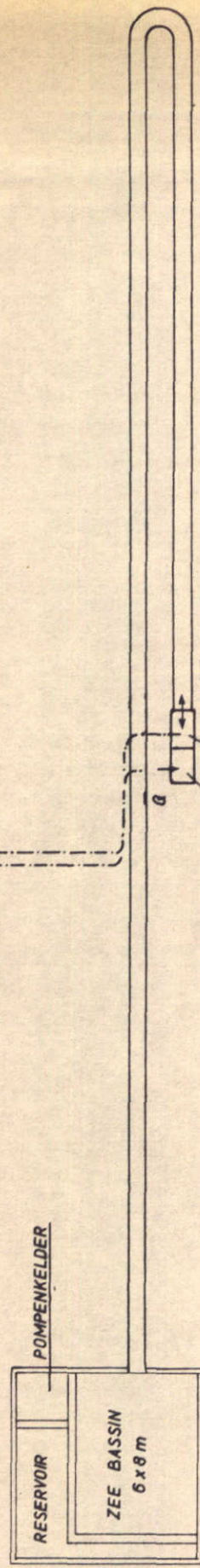
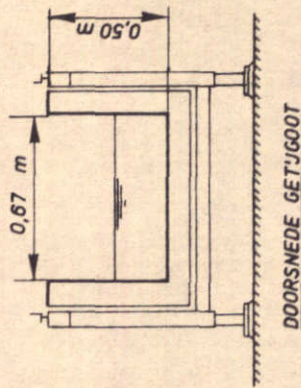
Technical Bulletin 165, Committee on Tidal Hydraulics, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1961.

11. Van der Burgh, P. - "Prediction of the extent of salt water intrusion into estuaries and seas",
Journal of Hydraulic Research, Vol. 6, 1968, No. 4.
12. Van der Burgh, P. - "Ontwikkeling van een methode voor het voorspellen van zoutverdelingen in estuaria, kanalen en zeeën",
intern rapport Rijkswaterstaat, Deltadienst, Afd. Waterhuishouding c.a. januari 1972.
13. Abbott, M.R. - "Salinity effects in estuaries",
Journal of Mar. Research 18, 1960.
14. Waterloopkundig Laboratorium - "Splittings dispersief transport in dwars- en vertikale bijdrage, Rotterdamse Waterweg 1956",
interne nota, november 1972.
15. Siemons, J. - "Numerical methods for the solution of diffusion-advection equations",
Delft Hydraulics Laboratory, publication no. 88, December 1970.
16. Thatcher, M.L. and Harleman, D.R.F. - "A mathematical model for the prediction of unsteady salinity intrusion in estuaries",
Cambridge, M.I.T., Dept. of Civil Engng, Ralph. M. Parsons Lab., 1972, no. 144, Feb.
17. Holley, E.R. and Karelse, M. - "Model-prototype comparison for transverse mixing in rivers",
paper submitted for XVth IAHR Congress, Istanbul, 1973.
18. Abraham, G. - "Model study of water gravity waves generated by moving circular low pressure area",
Wave Research Laboratory, University of California, Berkeley, Technical Report, series 99, issue 5, May 1969, pp. 74-83.

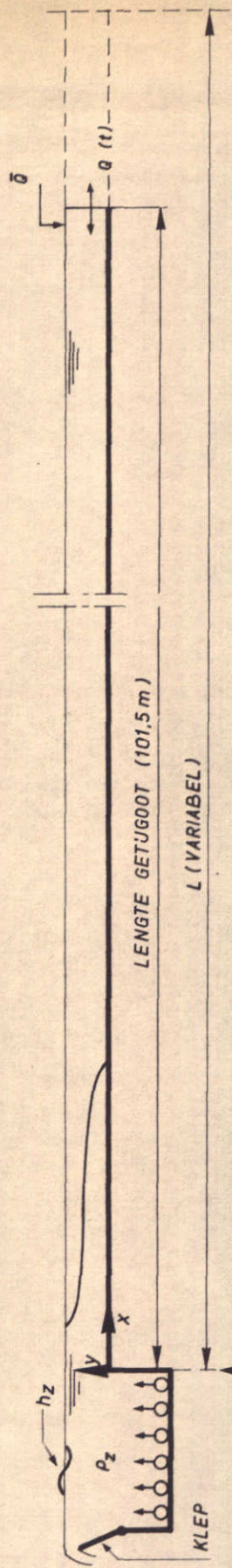
19. Waterloopkundig Laboratorium, - "Computational methods for the vertical distribution of flow in shallow water", Literature study, report W 152, May 1973 (in voorbereiding).

20. Vreugdenhil, C.B. - "Turbulente viscositeit en diffusiecoëfficiënt bij variabele dichtheid", oktober 1967, niet gepubliceerd rapport.

RANDINSTELLING	
ZEE	: h_z, p_z
RIVIER	: $Q(t), \bar{Q}$



a. PLATTEGROND GETJUGOOT



b. ZJAANZICHT GETJUGOOT

MEETOPSTELLING GETJUGOOTPROEVEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

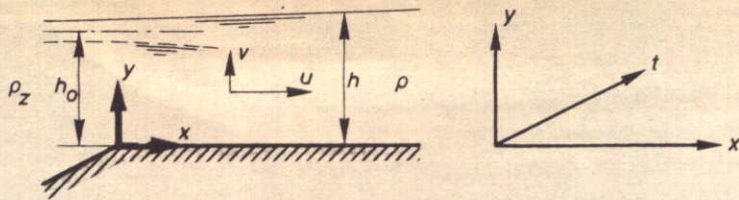
M.896- 1837

FIG.2.1

W_K

A4

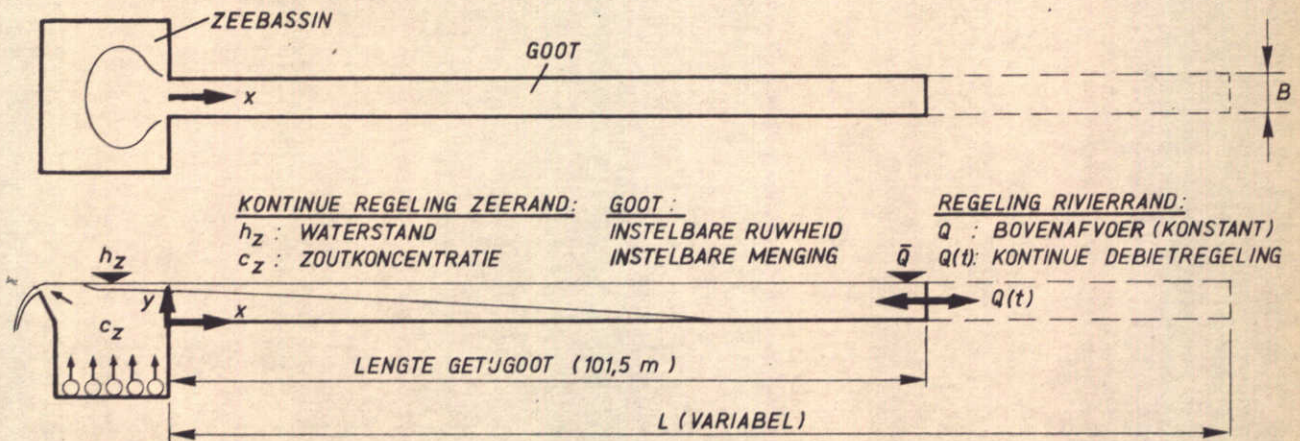
SCHEMATISATIE PROTOTYPEPROBLEEM



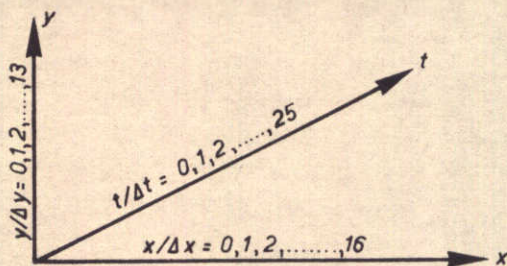
SCHEMATISATIE TOT TWEEDIMENSIONALE NIET-HOMOGEËNE GETJEBEWEGING

$$\begin{aligned}
 h &= f(x, t) \\
 u &= f(x, y, t) \\
 v &= f(x, y, t) \\
 \rho &= f(x, y, t)
 \end{aligned}$$

GETJMODEL GESCHEMATISEERD ESTUARIUM

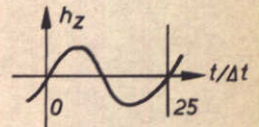


SCHEMA BEMONSTERING



METEN VAN :

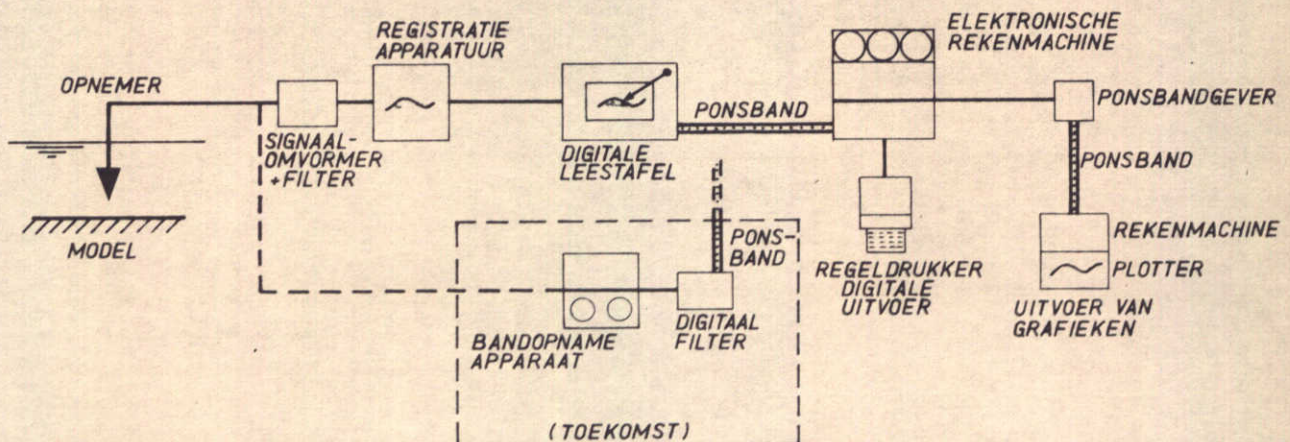
- $h f(x, t)$ WATERHOOGTE
- $u f(x, y, t)$ HOR. SNELHEID
- $\rho f(x, y, t)$ DICHTHEID



GEKOZEN MEETAFASTANDEN :

- $\Delta x = 3,65 \text{ m}$ (2340m PROTOTYPE)
- $\Delta y = 0,077 h_0$ (ORDE 1m PROTOTYPE)
- $\Delta t = 0,04 T$ (ORDE 1/2 uur PROTOTYPE)

SCHEMA VERWERKING MEET- EN REKENRESULTATEN



OPZET GETJEGOOTONDERZOEK

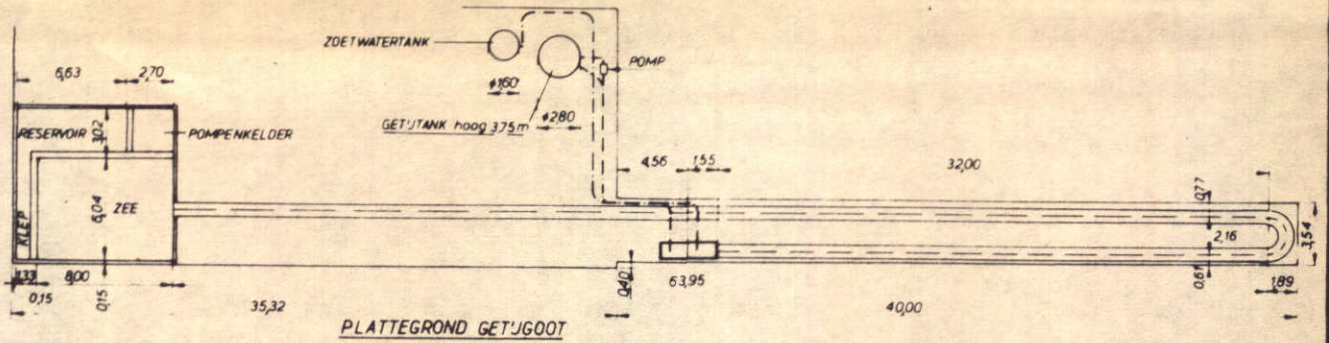
j.w.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

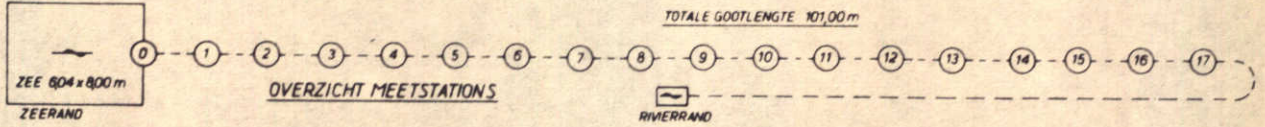
M. 896 - 1838

FIG.2.2



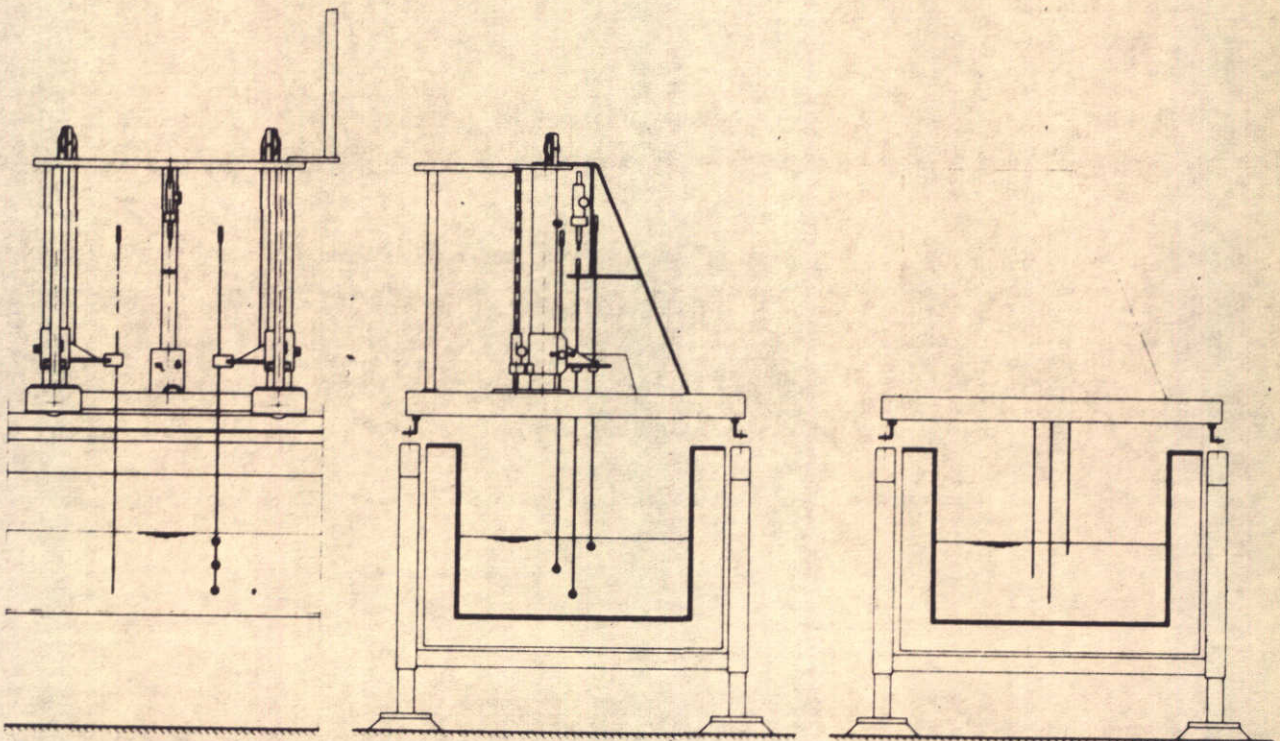
PLATTEGROND GETJGOOT

TOTALE GOOTLENGTE 101,00m



OVERZICHT MEETSTATIONS

OVERZICHT GETJGOOT



AANZICHT MEETWAGEN MET MEETAPPARAATUUR

DOORSNEDE GOOT i.p.v. SNELHEIDSMOLENS

DOORSNEDE GOOT i.p.v. ZOUTOPMEIERS

OPSTELLING MEETAPPARAATUUR

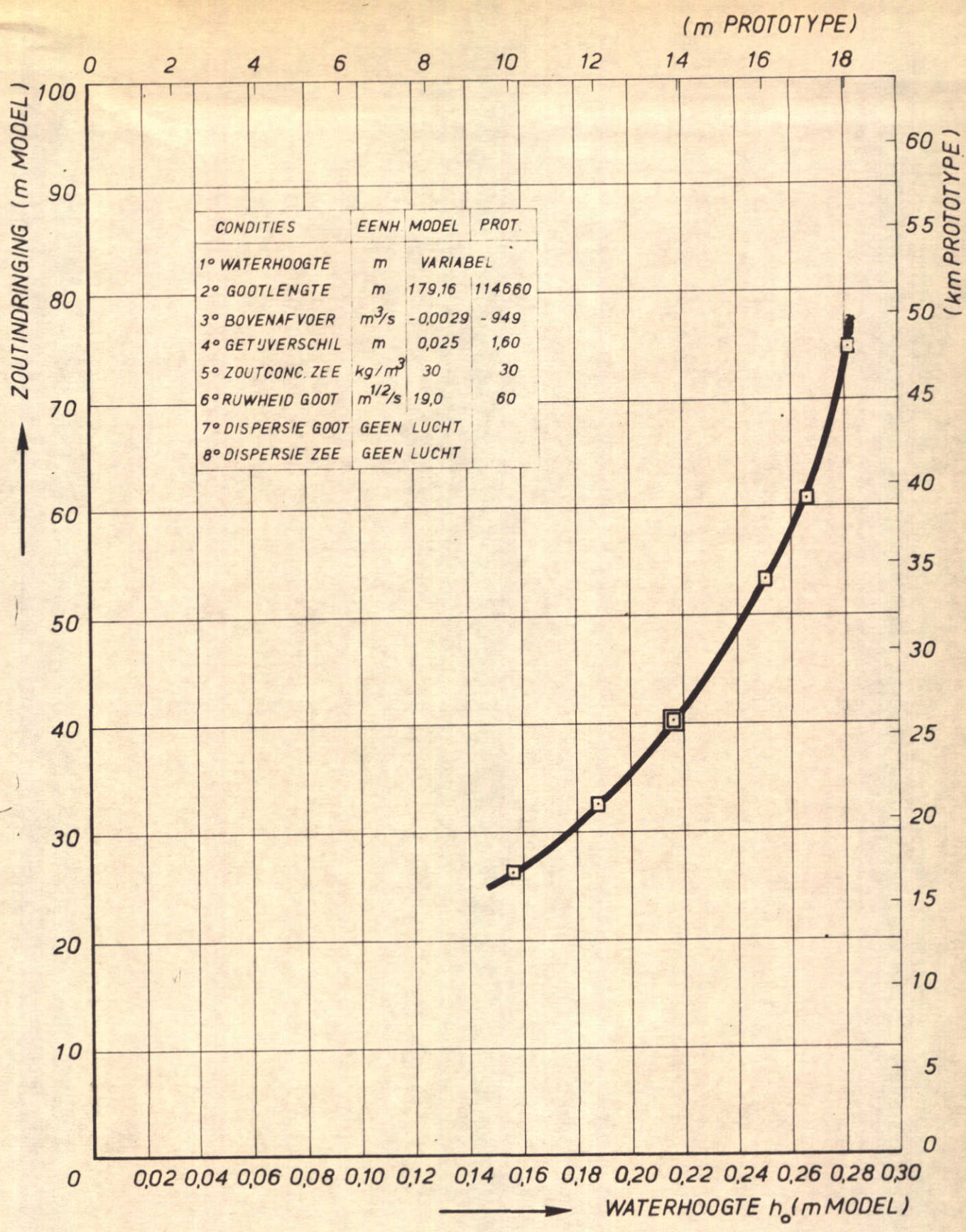
SCHEMA MEETOPSTELLING

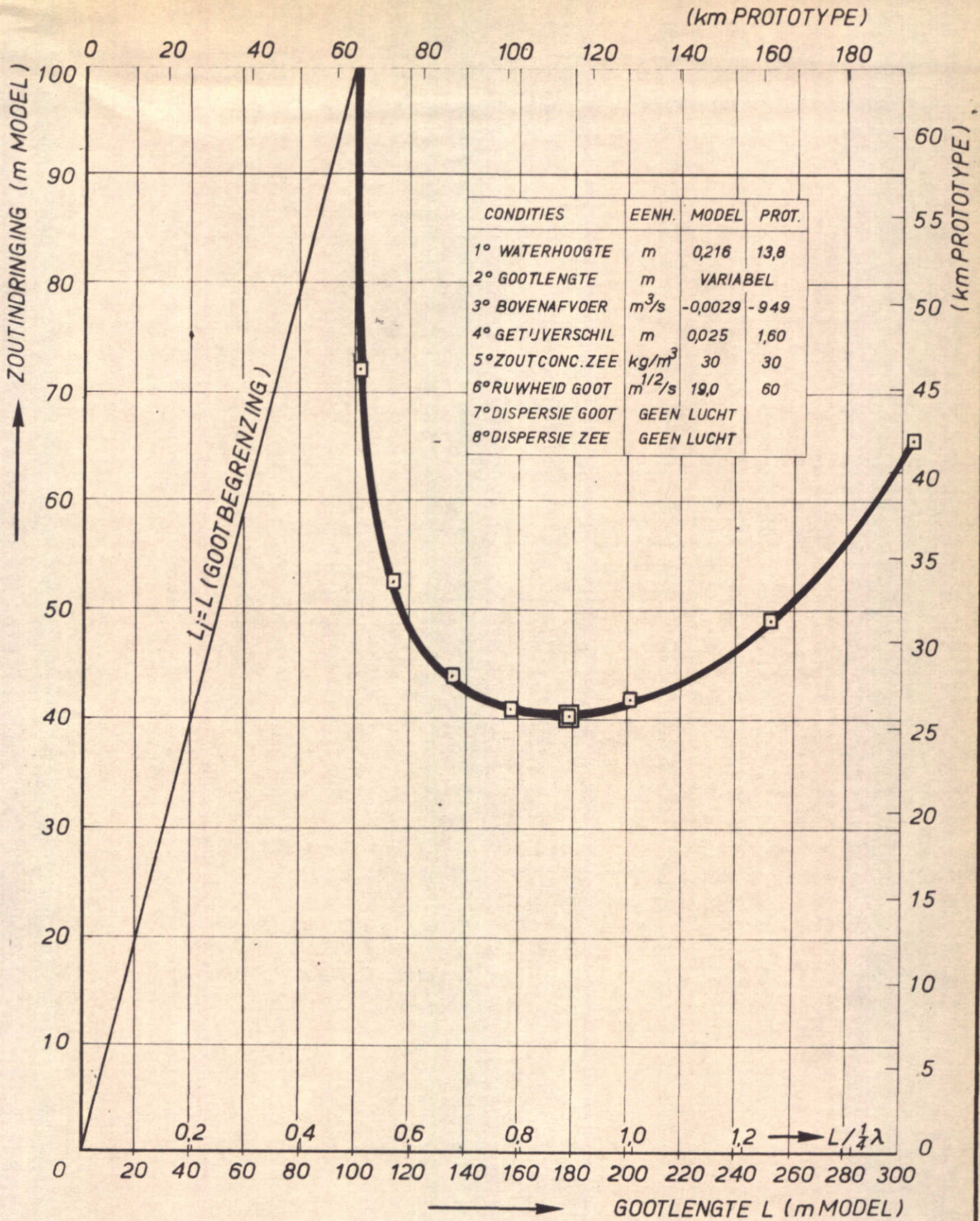
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 1839

FIG.2.3

A4





ONDERZ. VAR. RANDVOORWAARDEN EN STROMINGSCONDITIES

ZOUTINDRINGING BIJ VARIATIE GOOTLENGTE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

☐ MEETRESULTATEN

☐ REFERENTIE PROEF
ROTTERD. WATERWEG

M.896-1841

FIG. 3.2

P

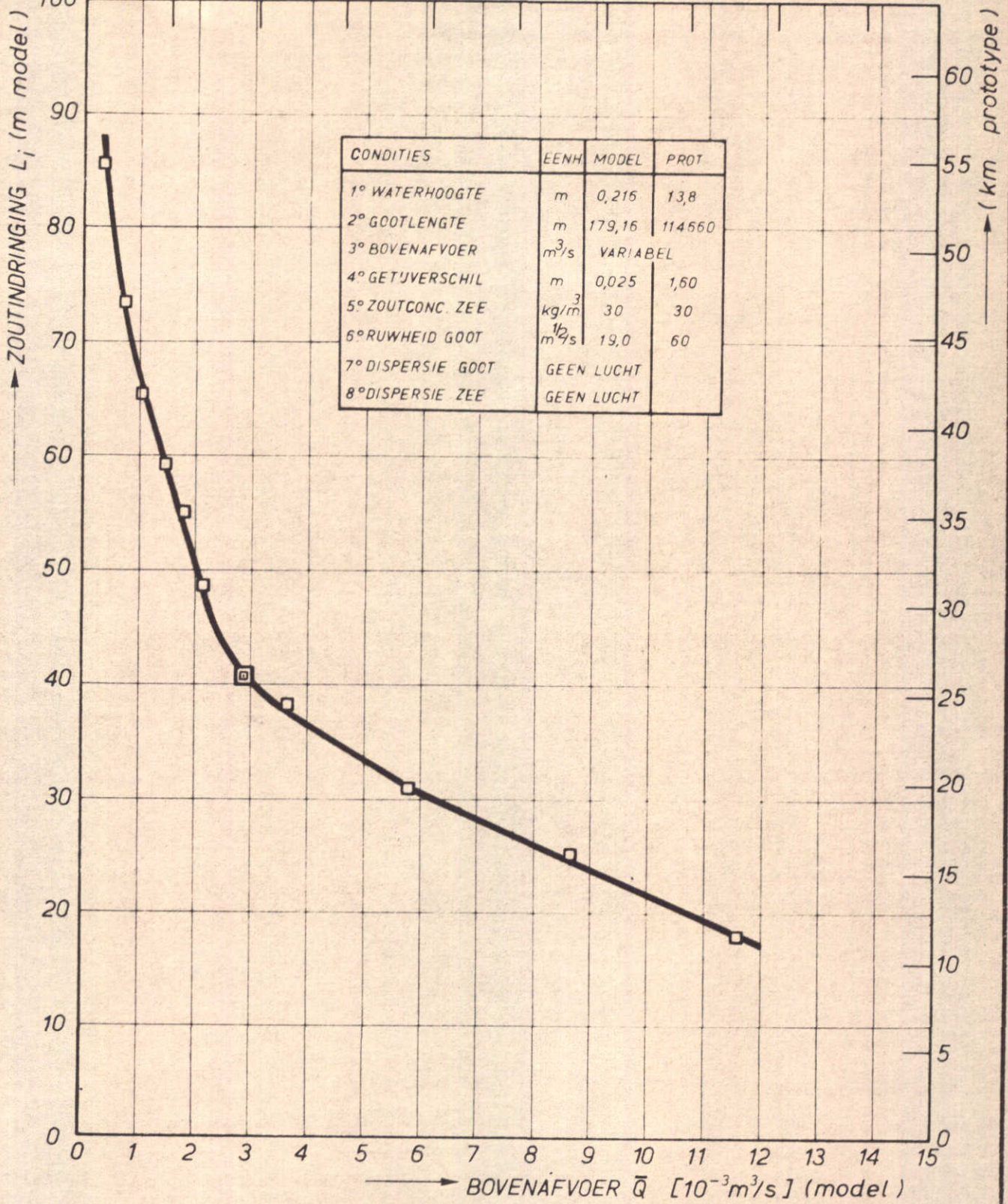
A4

AFVOER BOVEN RIJN $\rightarrow Q_{BR} [m^3/s]$

0 1000 2000 3000 4000 5000 6000 7000 8000 9000 10000 11000 12000

$\rightarrow [m^3/s] (prototype)$

0 500 1000 1500 2000 2500 3000 3500 4000 4500



ONDERZ. VAR. RANDVOORWAARDEN EN STROMINGSCONDITIES
ZOUTINDRINGING BIJ VARIATIE BOVENAFVOER

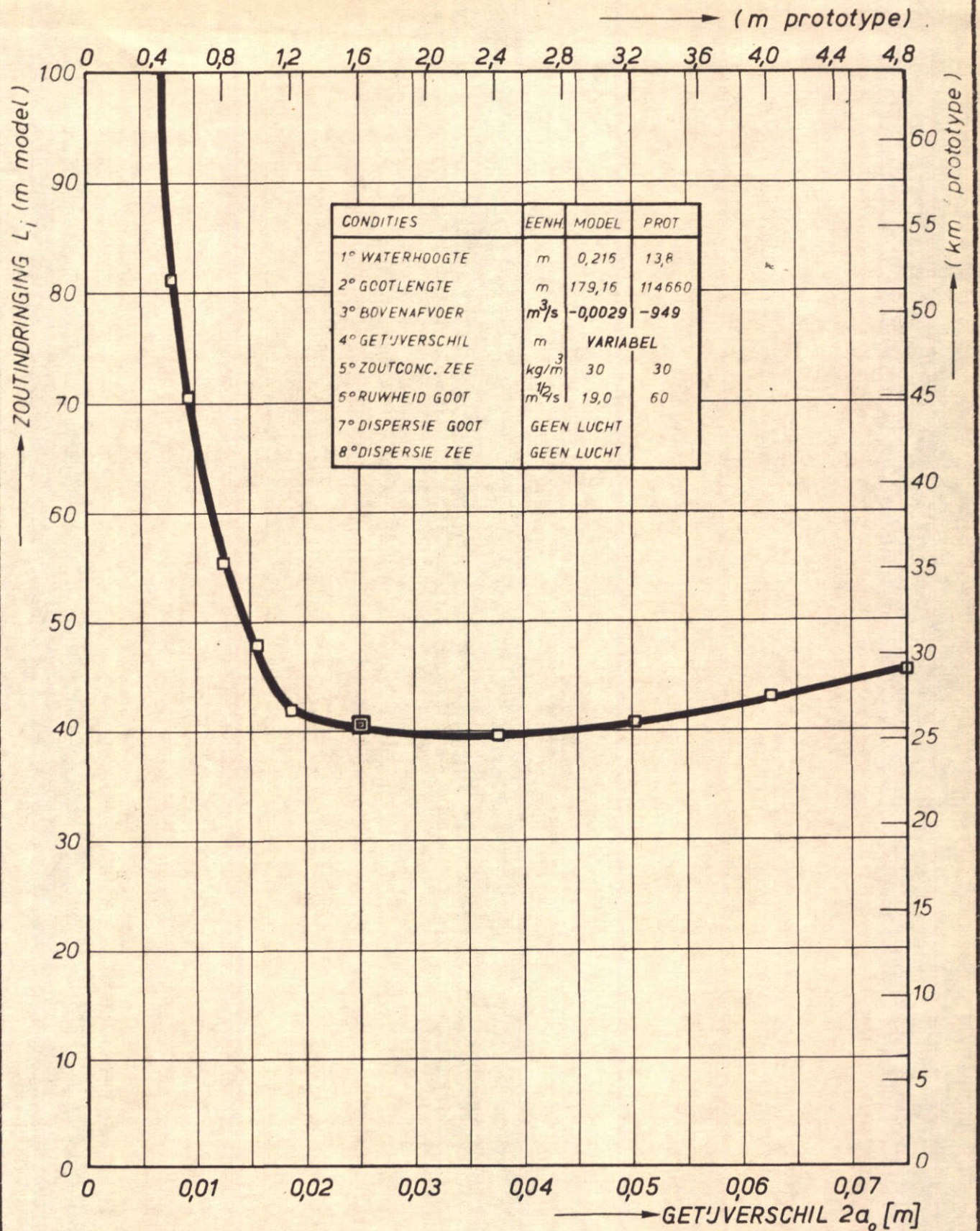
MEETRESULTATEN
 REFERENTIEPROEF
ROTTERD. WATERWEG

L²
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896-1842

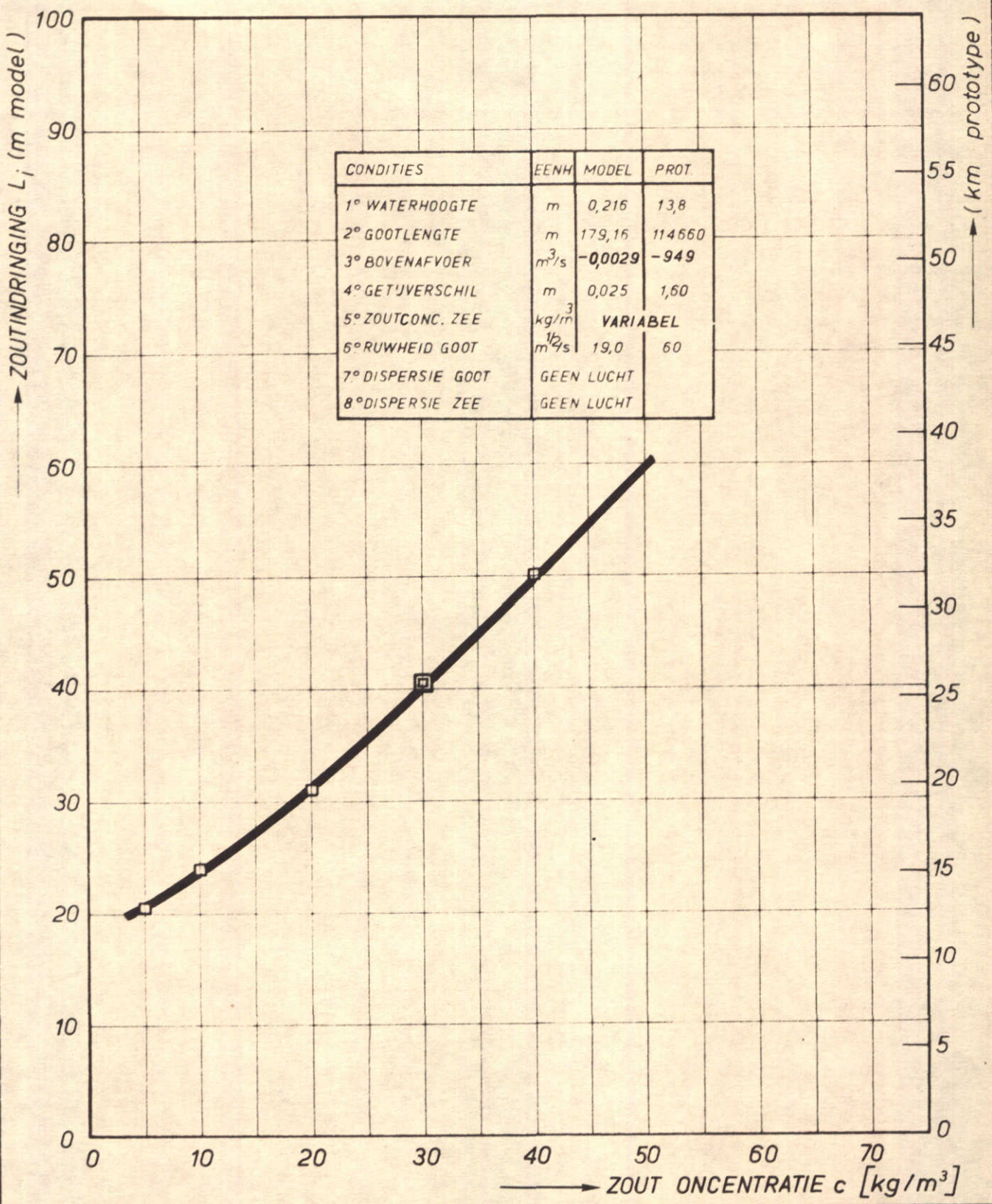
FIG. 3.3



ONDERZ. VAR. RANDVOORWAARDEN EN STROMINGSCONDITIES
 ZOUTINDRINGING BIJ VARIATIE GETJVERSCHIL

□ MEETRESULTATEN
 ⊠ REFERENTIEPROEF
 ROTTERD. WATERWEG

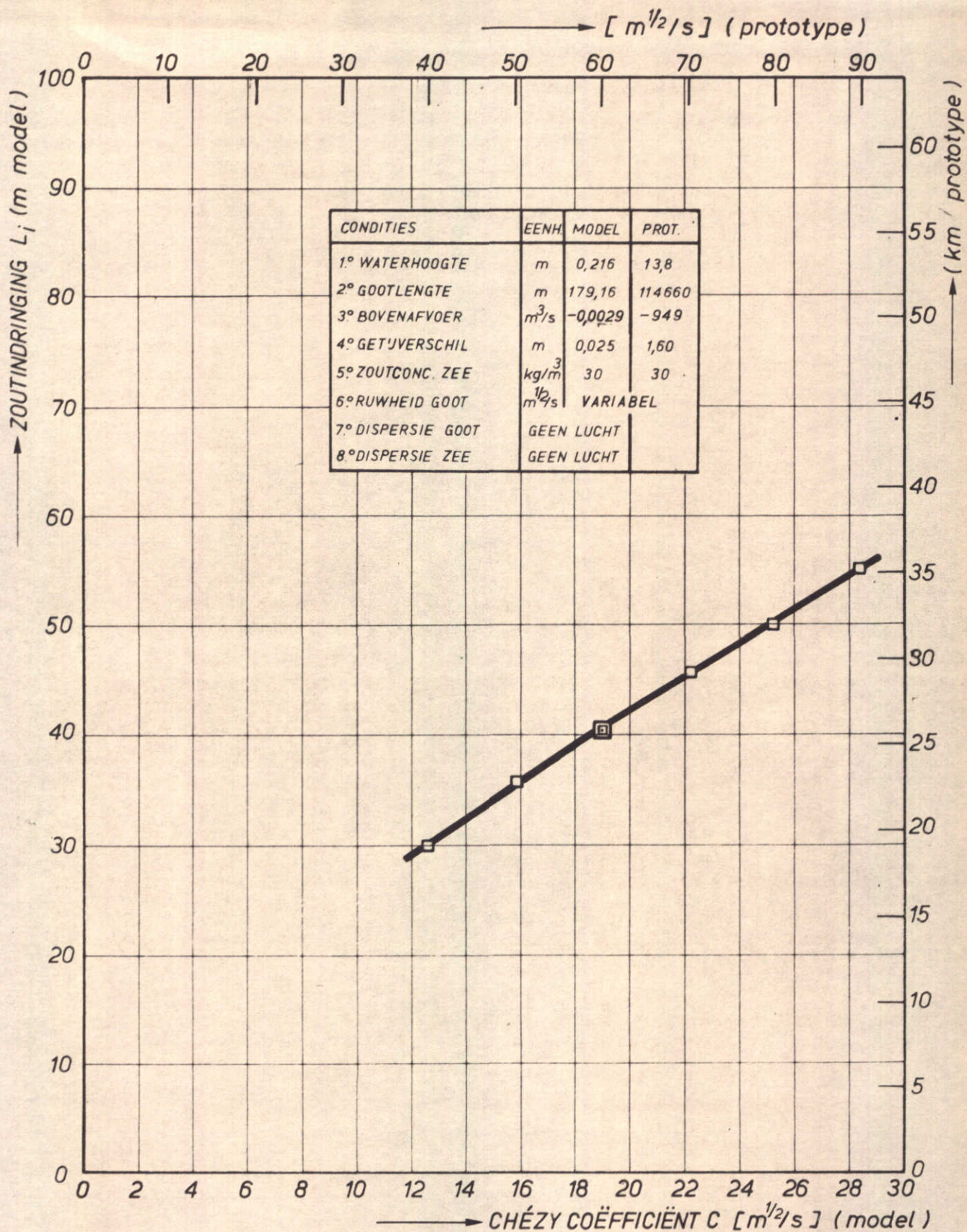
L²
 A4



ONDERZ. VAR. RANDVOORWAARDEN EN STROMINGSCONDITIES
 ZOUTINDRINGING BIJ VARIATIE ZOUTCONCENTRATIE ZEE

MEETRESULTATEN
 REFERENTIEPROEF
 ROTTERD. WATERWEG

L?
 A4



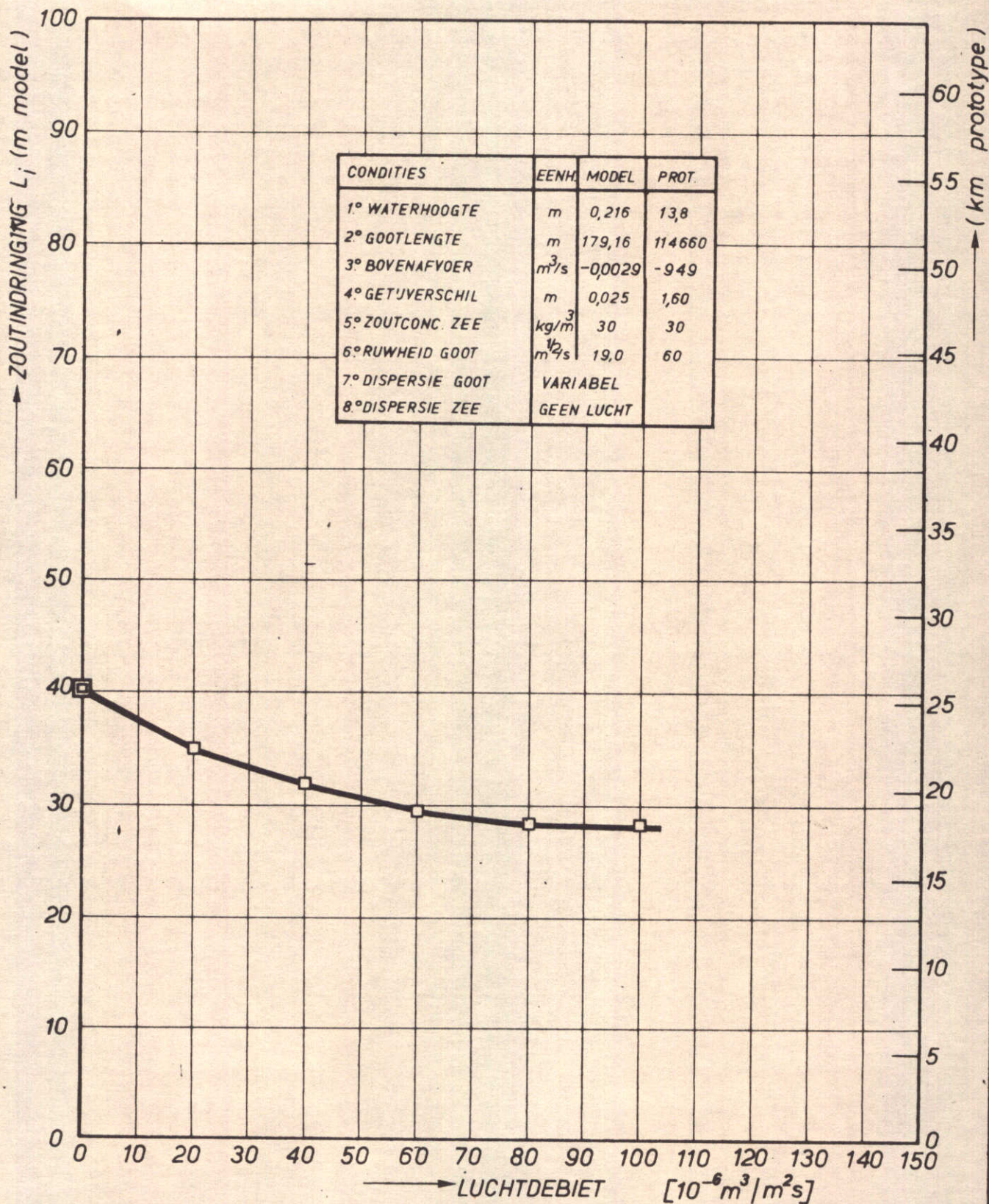
ONDERZ. VAR. RANDVOORWAARDEN EN STROMINGSCONDITIES
ZOUTINDRINGING BIJ VARIATIE CHÉZY-COËFFICIËNT

□ MEETRESULTATEN

▣ REFERENTIEPROEF
ROTTERD. WATERWEG

L²

A4



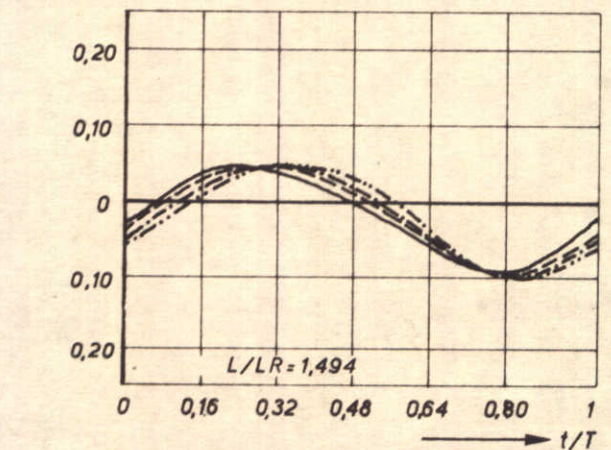
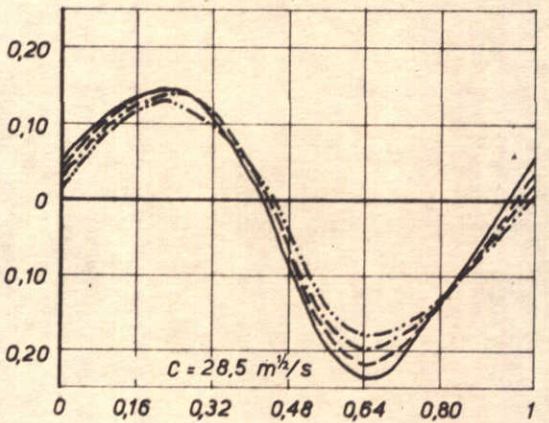
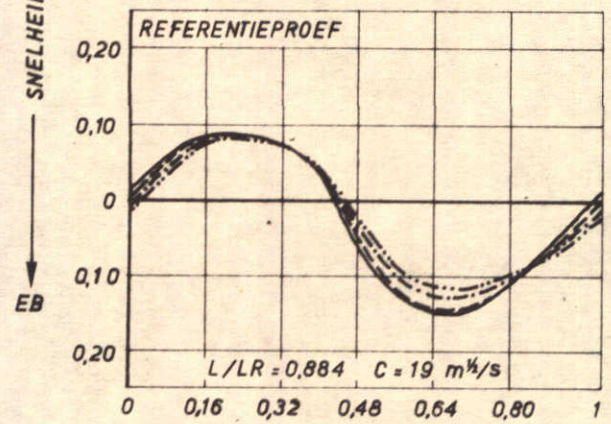
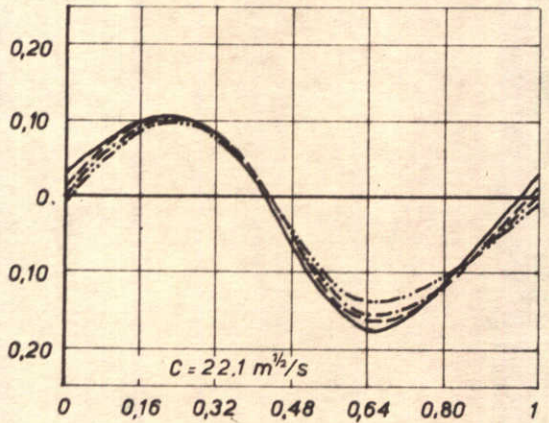
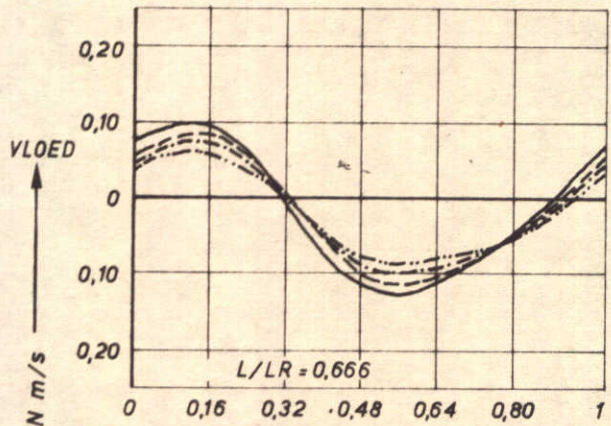
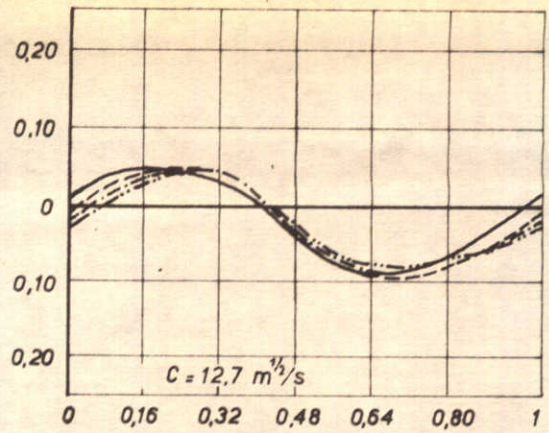
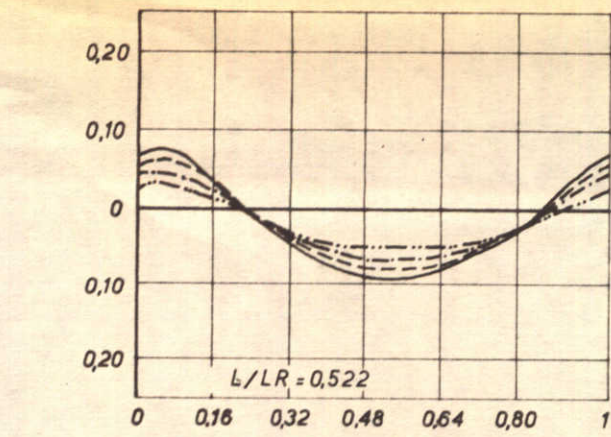
ONDERZ. VAR. RANDVOORWAARDEN EN STROMINGSCONDITIES
 ZOUTINDRINGING BIJ VARIATIE LUCHTINJECTIE GOOT

□ MEETRESULTATEN

■ REFERENTIE PROEF
 ROTTERD. WATERWEG

G.P.

A4



———— $X = 3,66 \text{ m}$
 - - - - $X = 21,93 \text{ m}$
 - · - · $X = 40,22 \text{ m}$
 - - - - $X = 58,50 \text{ m}$

GEMETEN VANAF
MOND GOOT
(ZIE FIG. 2.1)

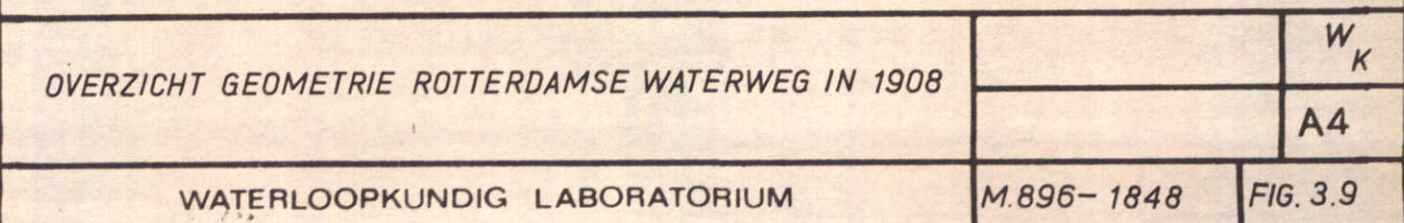
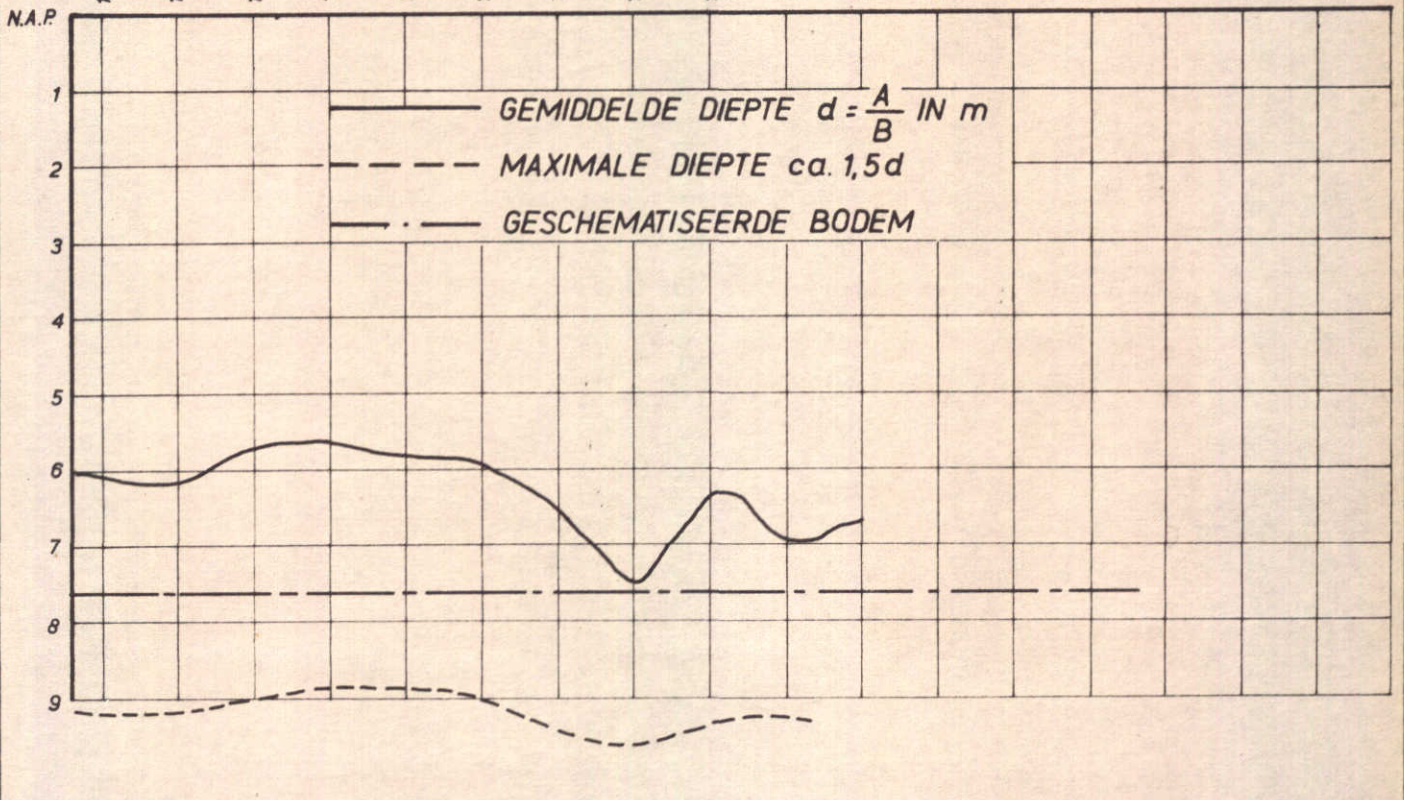
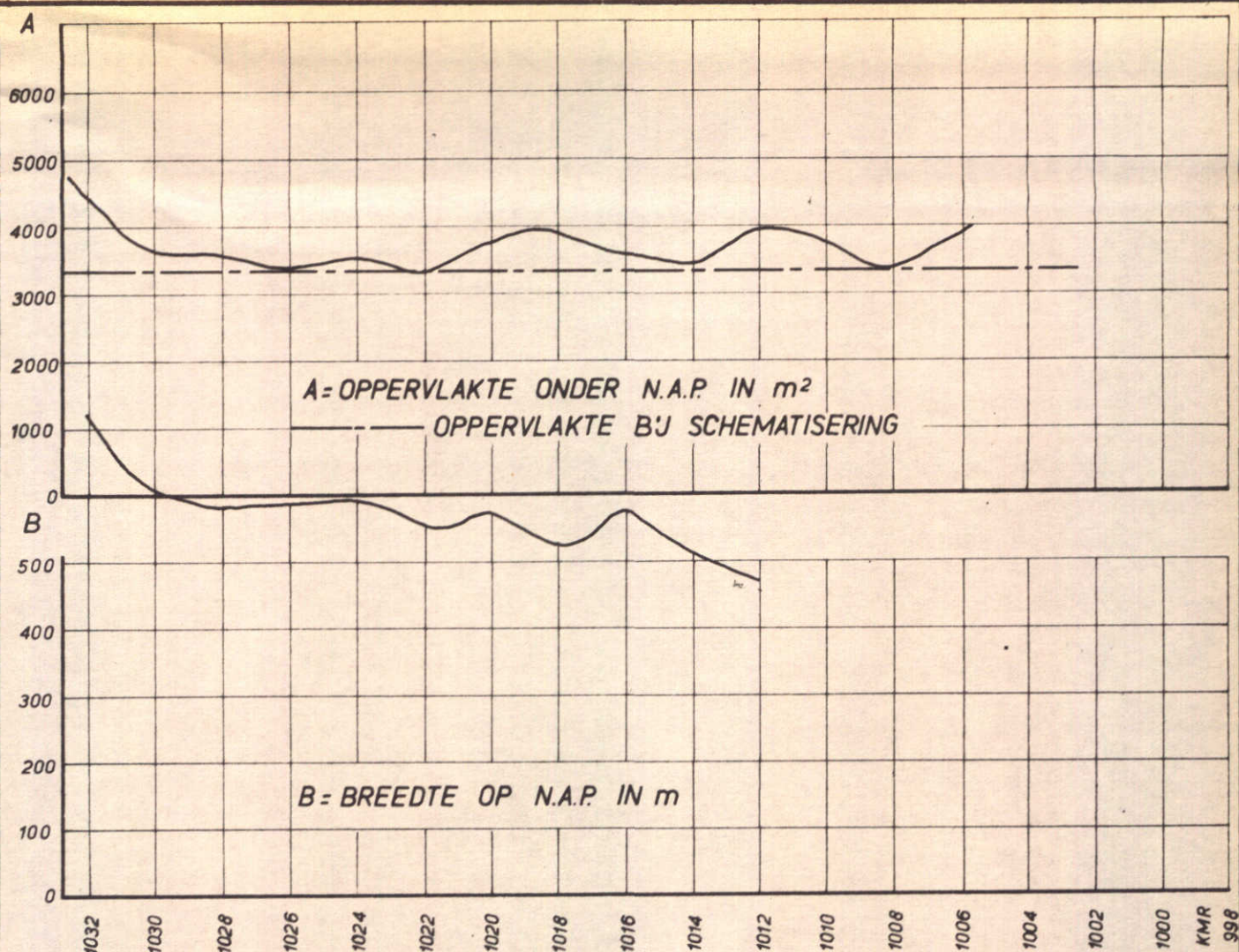
SNELHEDEN, GEMETEN IN GETUÛGROOT EN
GEMIDDELD OVER DE WATERDIEPTE.

C = CHÉZY-COËFFICIËNT GETUÛGROOT
 L = LENGTE GOOT (FIG. 2.1)
 L_R = RESONANTIE LENGTE (VGL. 3.1)
 T = GETUPERIODE

GEMIDDELDE SNELHEDEN - INVLOED
LENGTE EN CHEZY - COËFFICIËNT

j.z.

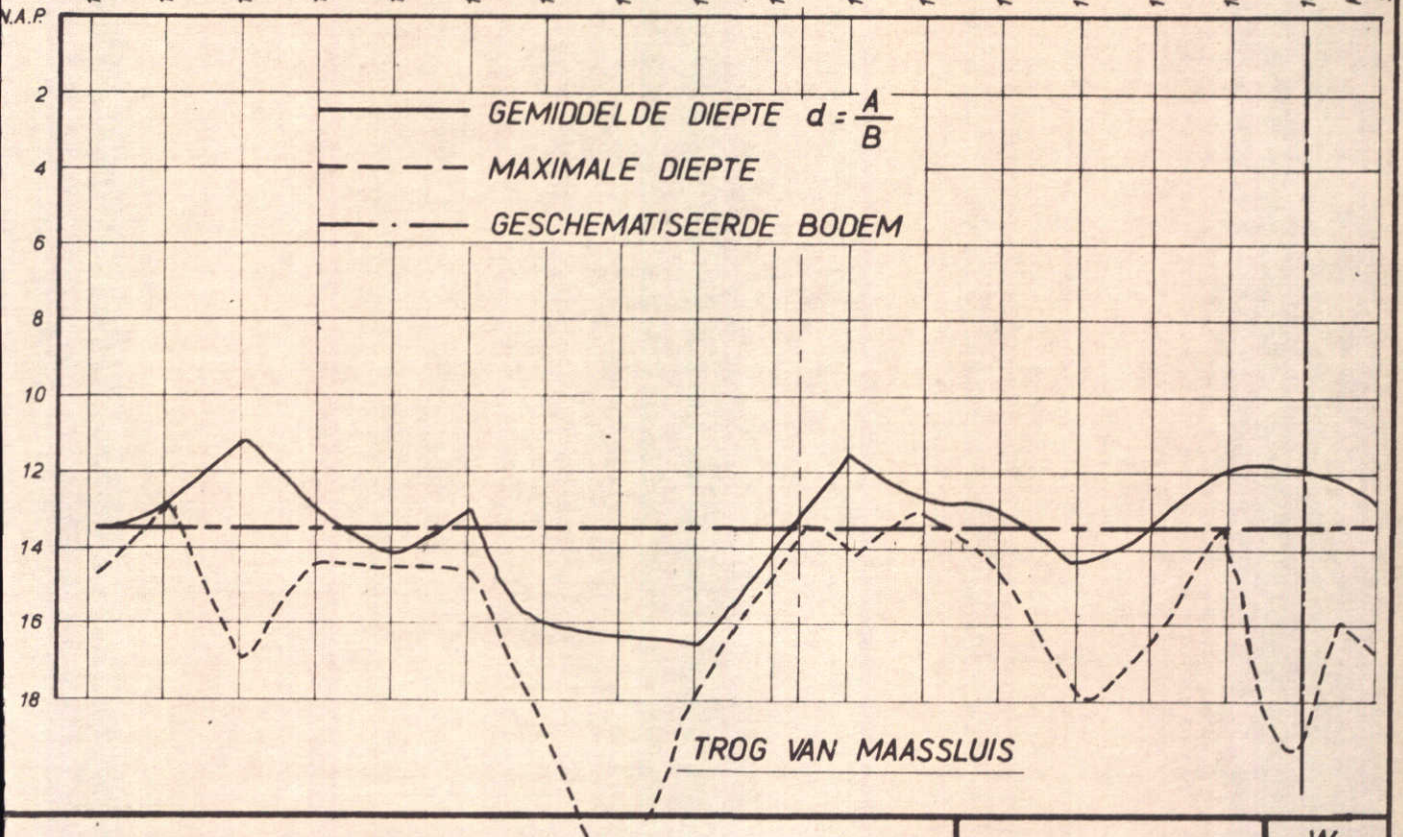
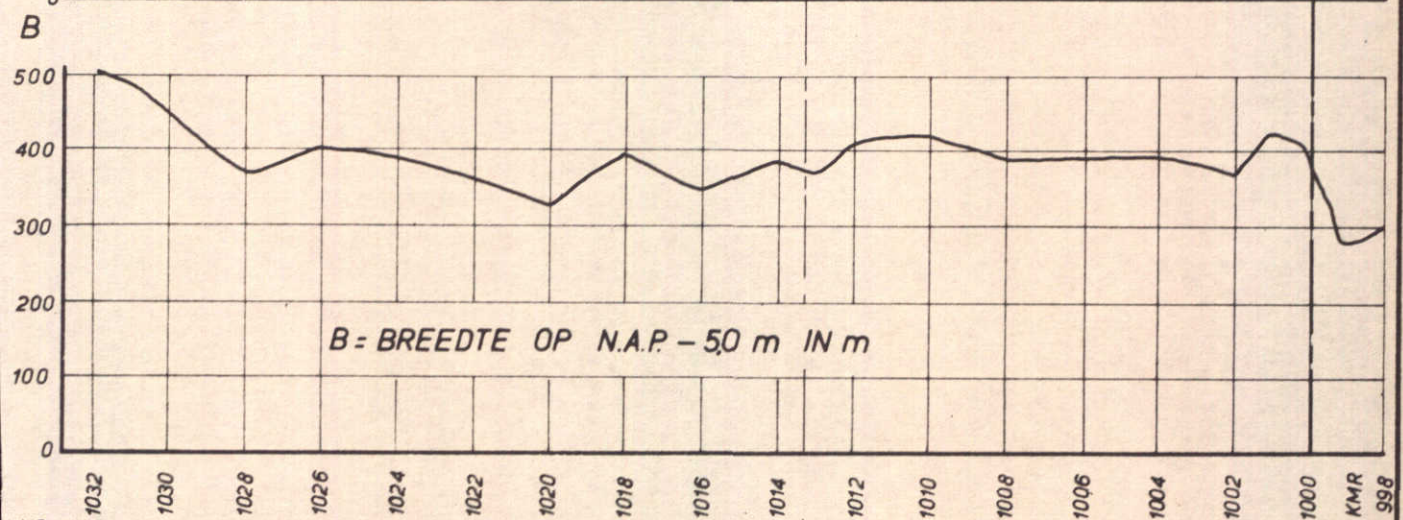
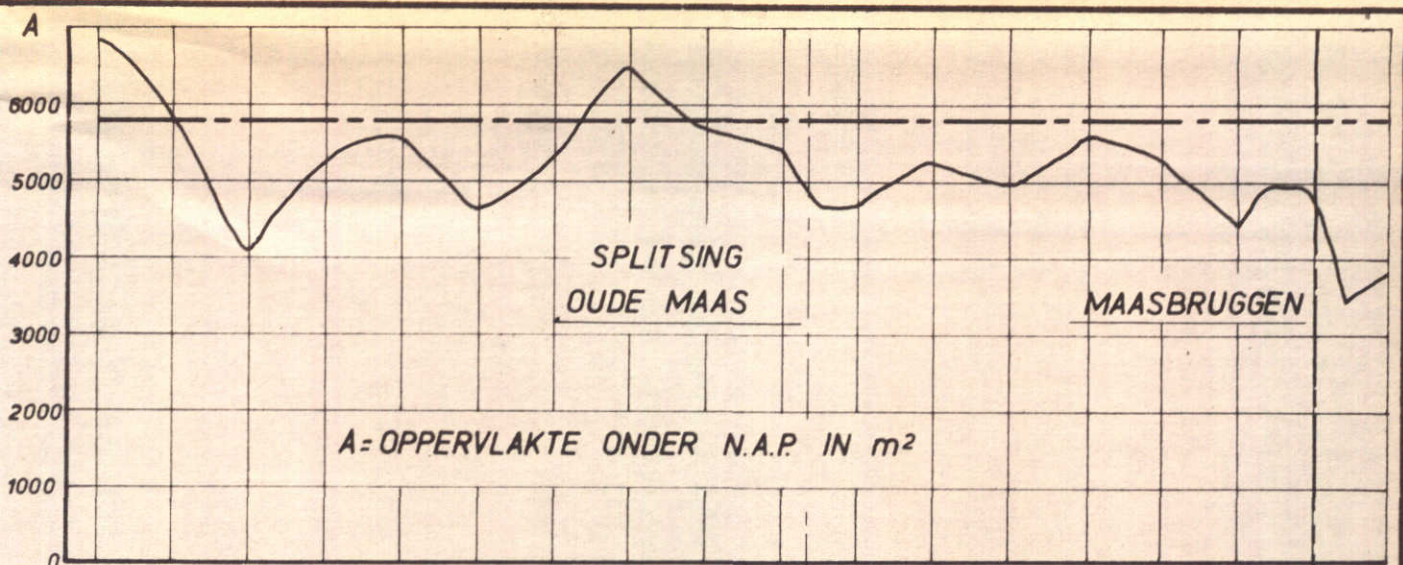
A4



OVERZICHT GEOMETRIE ROTTERDAMSE WATERWEG IN 1908

W_K

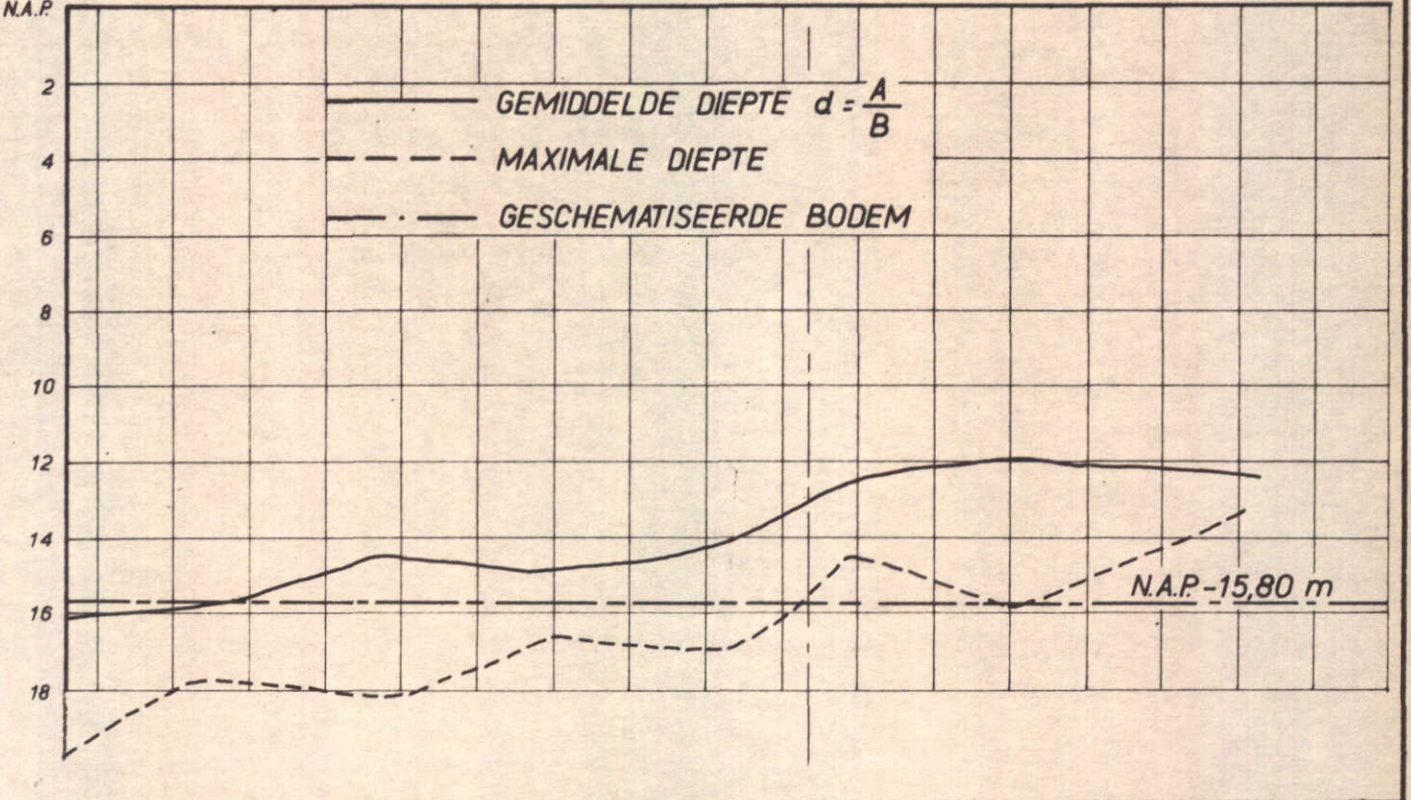
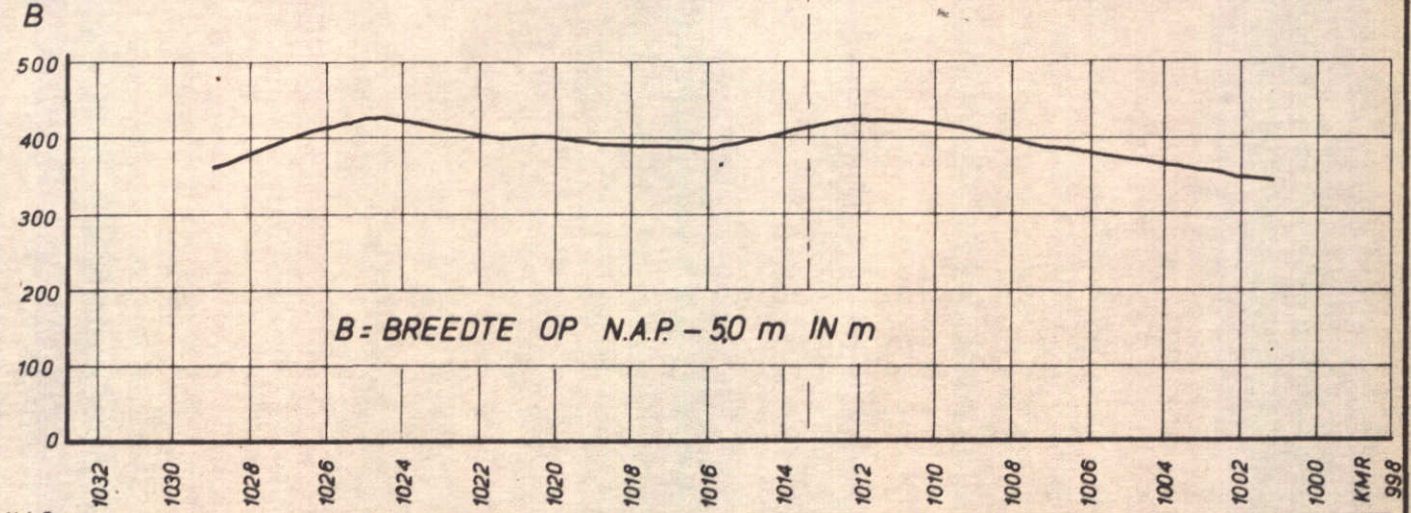
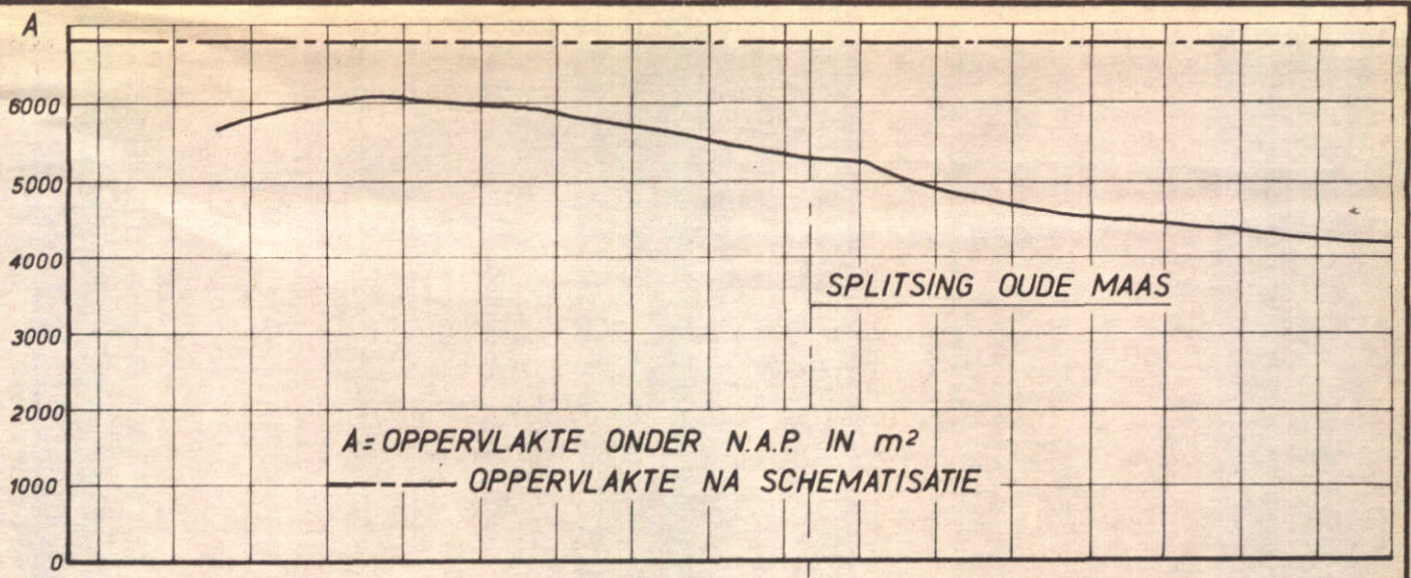
A4



OVERZICHT GEOMETRIE ROTTERDAMSE WATERWEG IN 1956

W_K

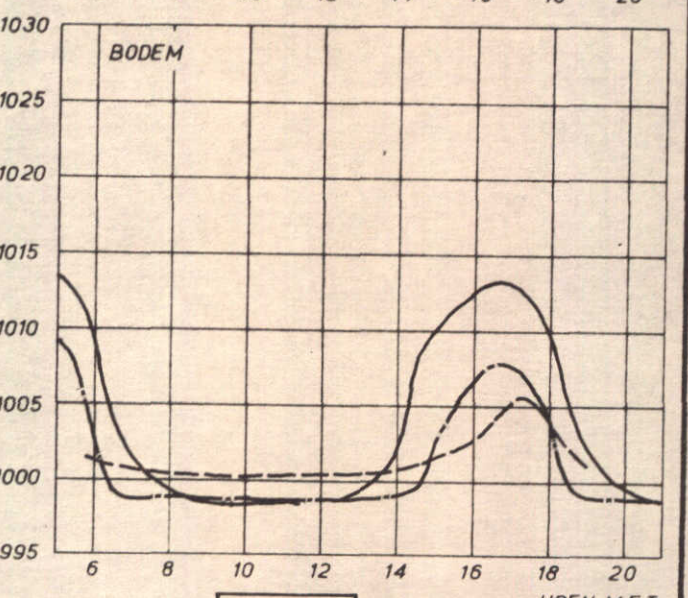
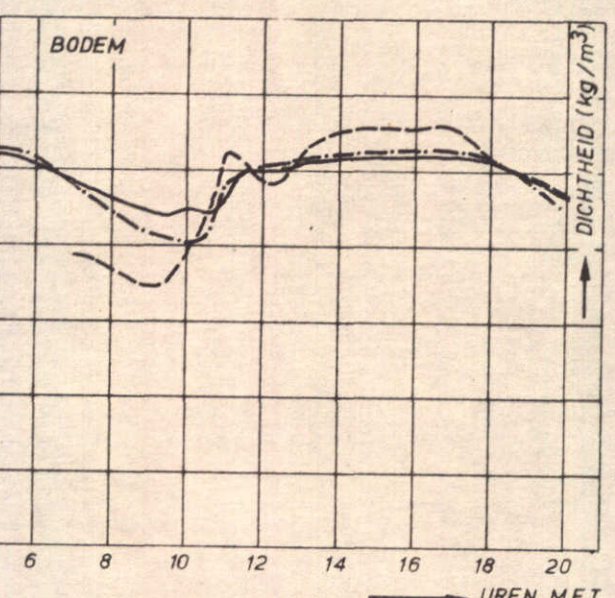
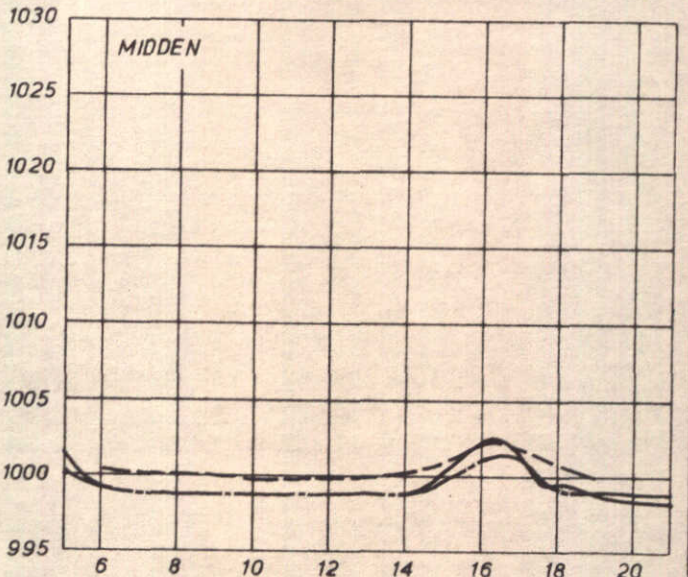
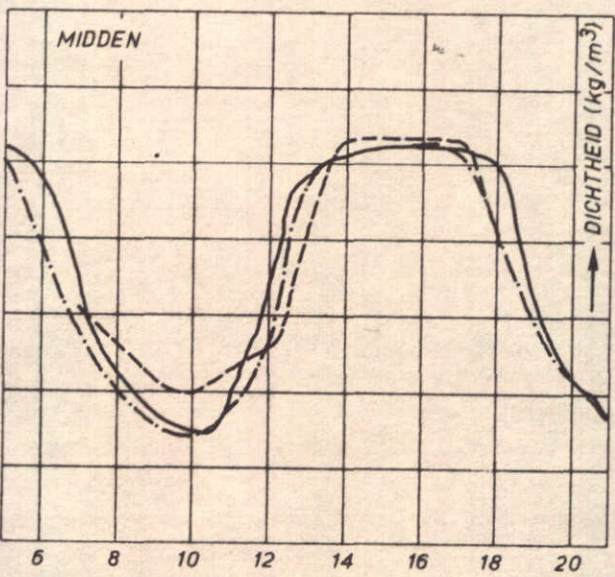
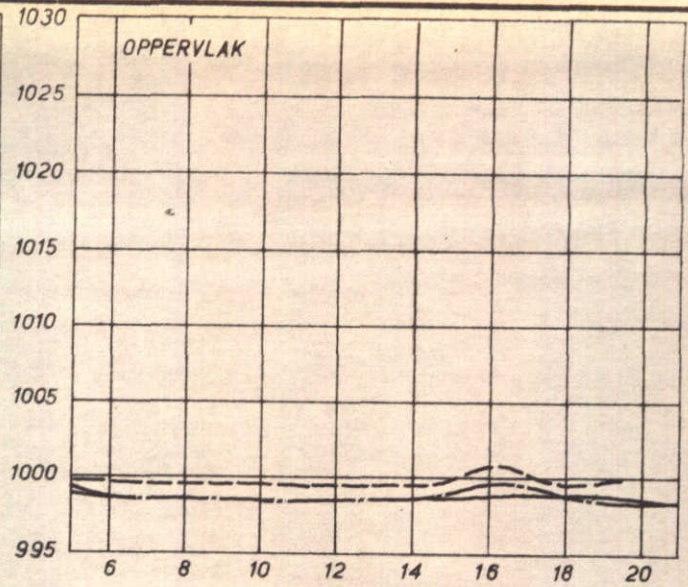
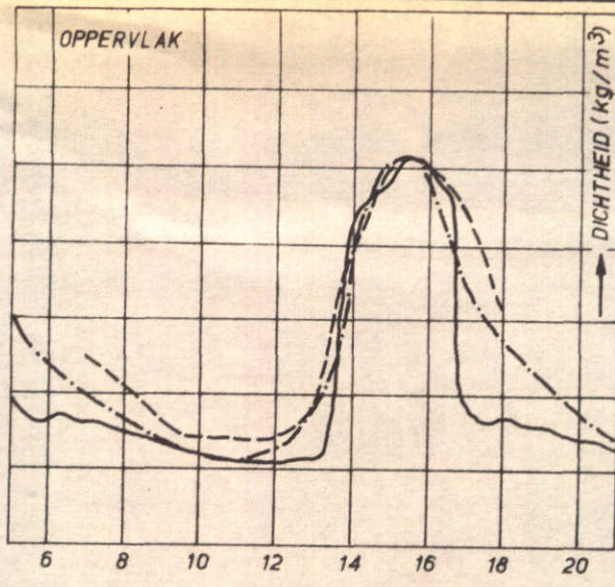
A4



OVERZICHT GEOMETRIE ROTTERDAMSE WATERWEG IN 1966

W_K

A4



KMR 1030 → UREN M.E.T.
 - - - - - PROTOTYPE

KMR 1013 → UREN M.E.T.
 ——— MODEL (ZONDER LUCHT)
 - - - - - MODEL (MET LUCHT)

JKING DICHTHEDEN ROTTERDAMSE WATERWEG
 21 JUNI 1956

CB

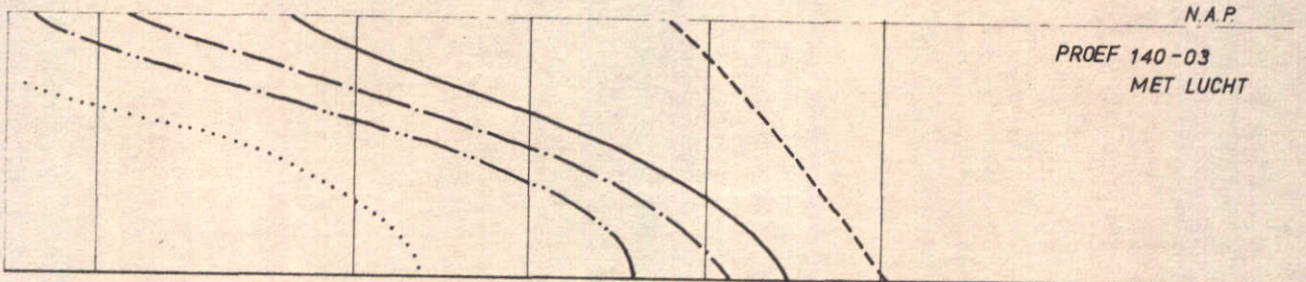
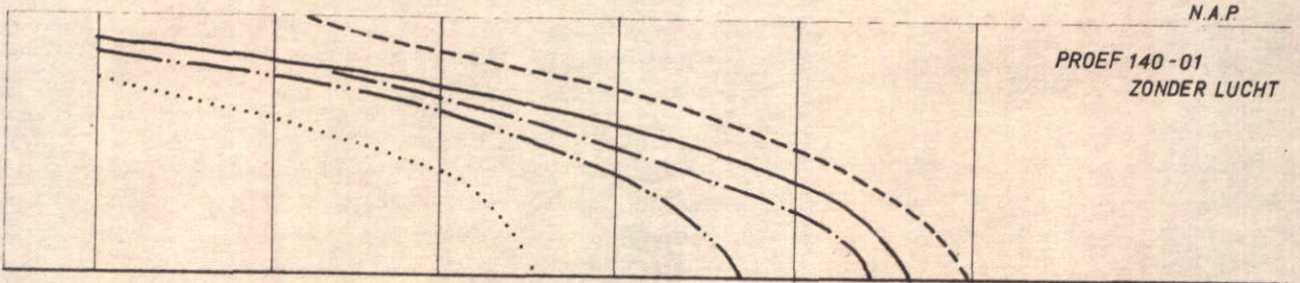
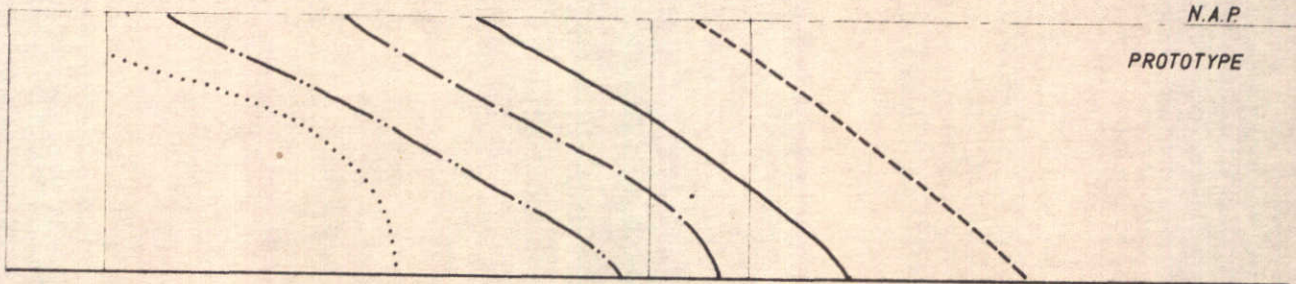
PROEF 140-01

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896-1851

FIG. 3.12

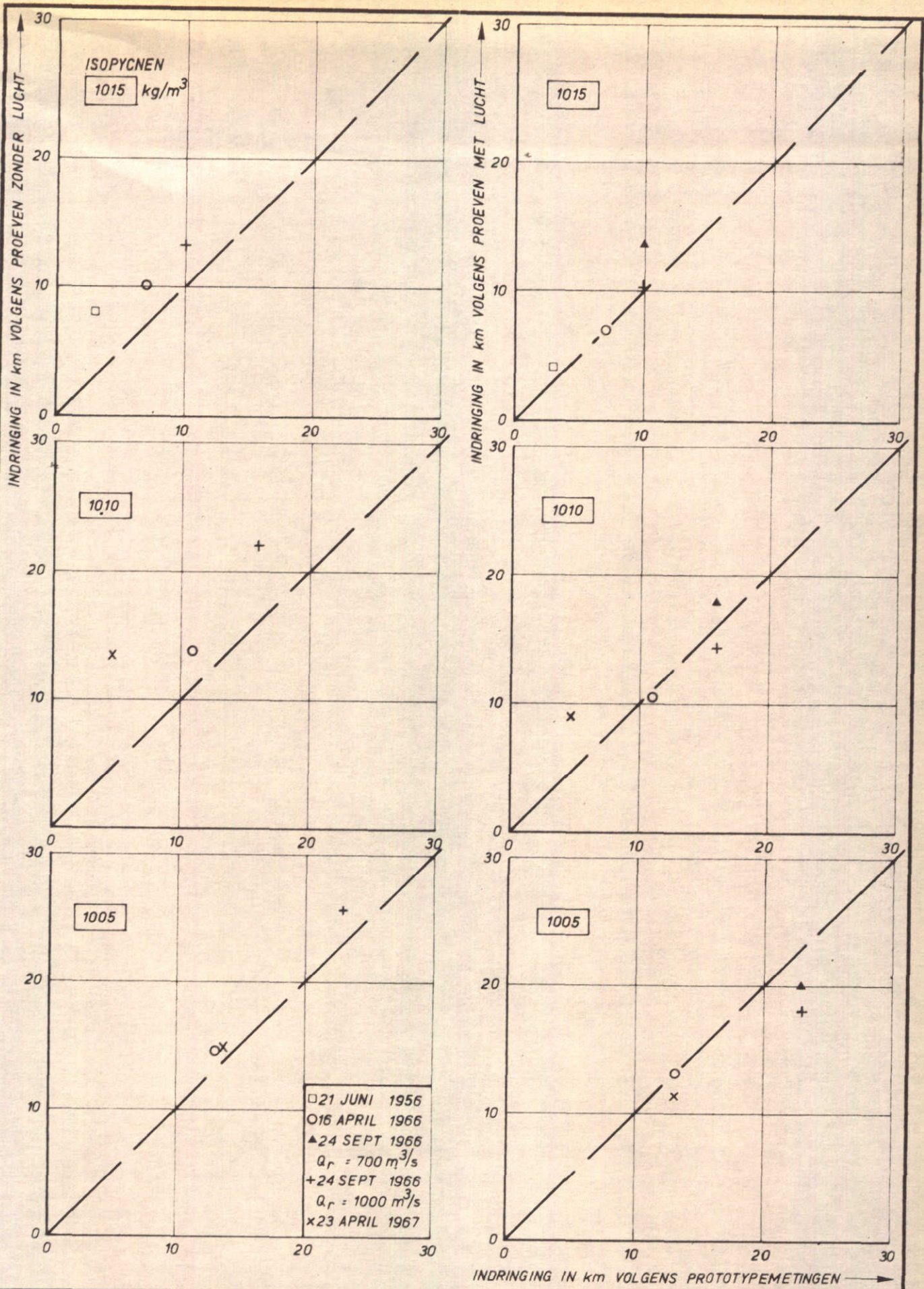


1030 1025 1020 1015 1010 1005 1000 kmr.

- - - - - $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ - - - - - $\rho = 1015 \text{ kg/m}^3$
 ———— " = 1005 " - - - - - " = 1020 "
 - · - · - " = 1010 "

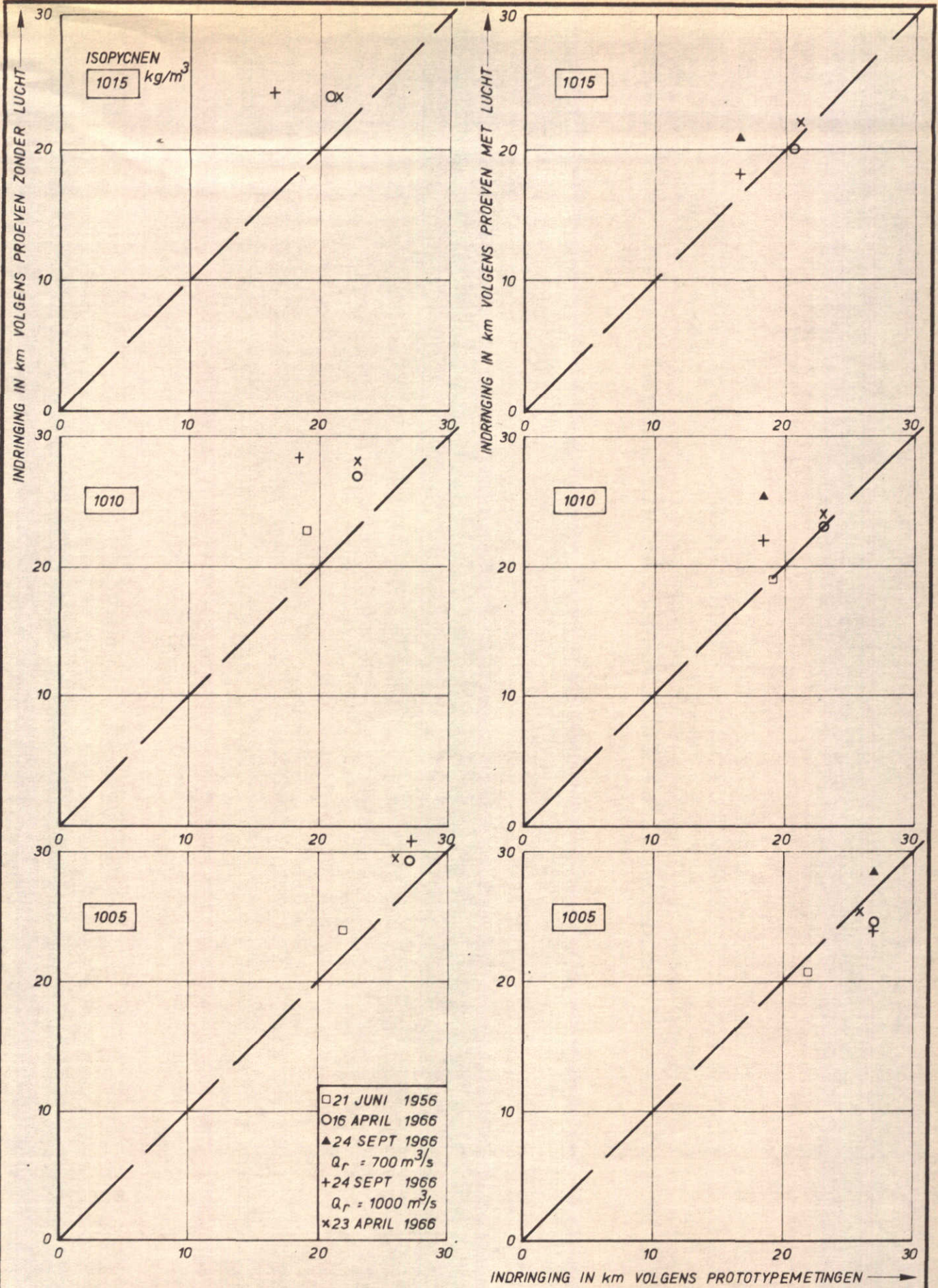
MAXIMALE ZOUTINDRINGING ROTTERDAMSE WATERWEG,
21 JUNI 1956, 17.00 M.E.T.; VERGELJKING MODEL-PROTOTYPE

		cb
VERT. SCHAAL 1:400		A4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 896-1852	FIG. 3.13



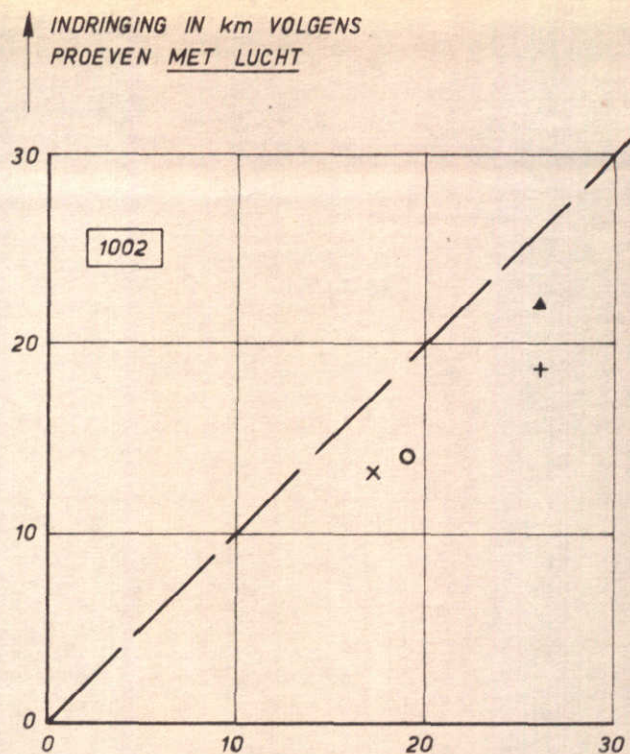
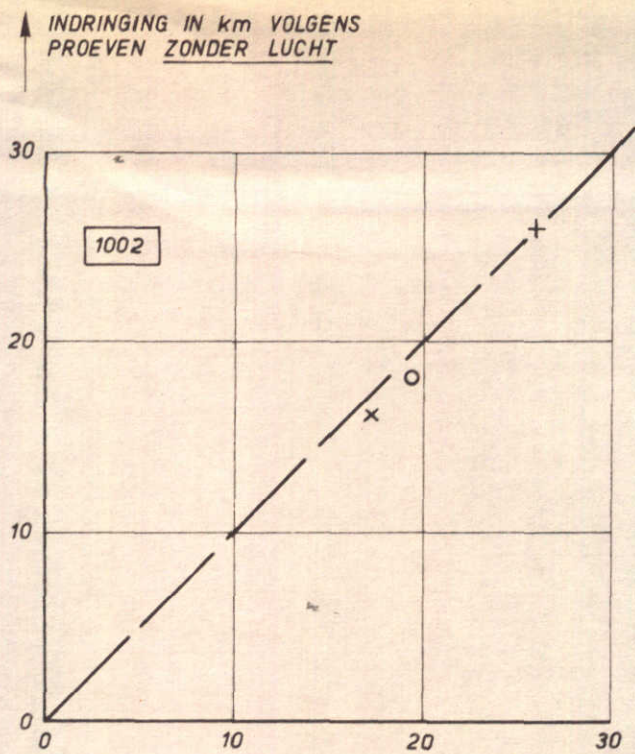
MINIMUM INDRINGINGSLENGTE ISOPYCNETEN
VERG. GETUIGOOT (MODEL) - ROTTERDAMSE WATERWEG
(PROTOTYPE)

JB
A4

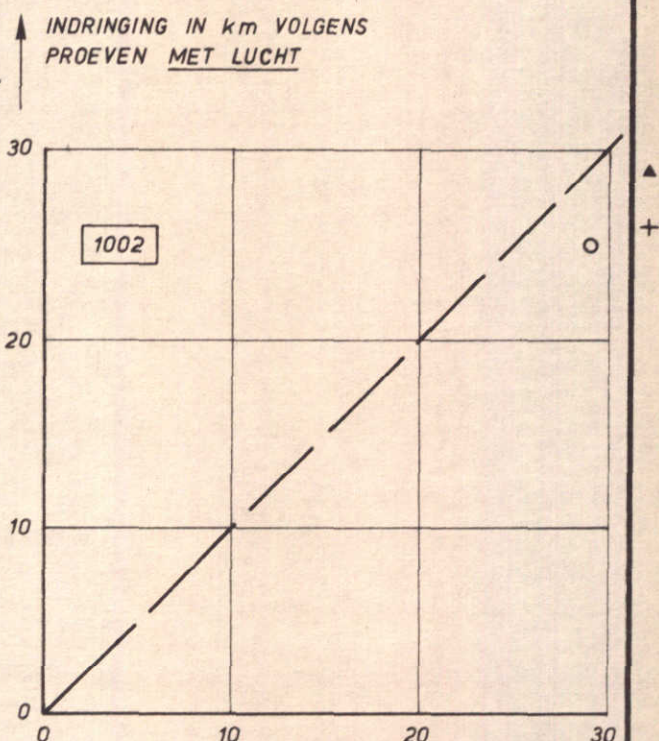
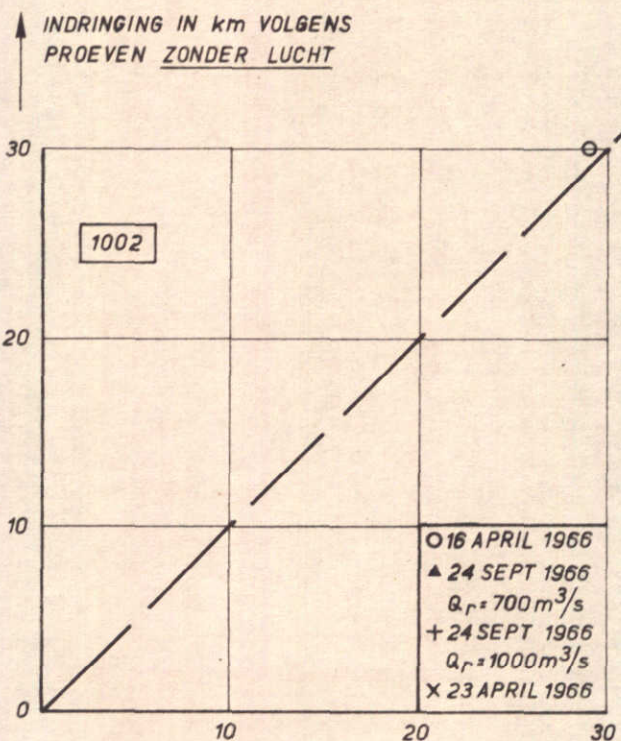


MAXIMUM INDRINGINGSLONGTEN ISOPYCNETEN
VERG. GETUIGOOT (MODEL)-ROTTERDAMSE WATERWEG
(PROTOTYPE)

JB
A4



MINIMUM INDRINGING IN km VOLGENS PROTOTYPEMETINGEN →



MAXIMUM INDRINGING IN km VOLGENS PROTOTYPEMETINGEN →

○ 16 APRIL 1966
 ▲ 24 SEPT 1966
 $Q_r = 700 \text{ m}^3/\text{s}$
 + 24 SEPT 1966
 $Q_r = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$
 x 23 APRIL 1966

INDRINGING ISOPYCNEEN 1002 kg/m^3
 VERG. GETUIGOOT (MODEL) - ROTTERDAMSE WATERWEG
 (PROTOTYPE)

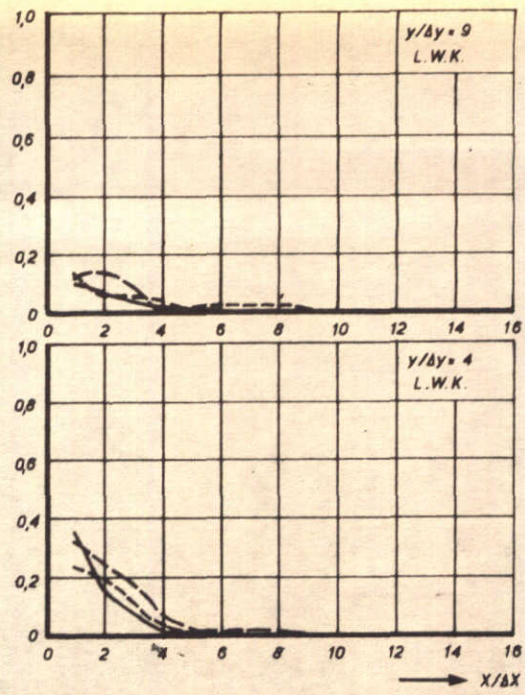
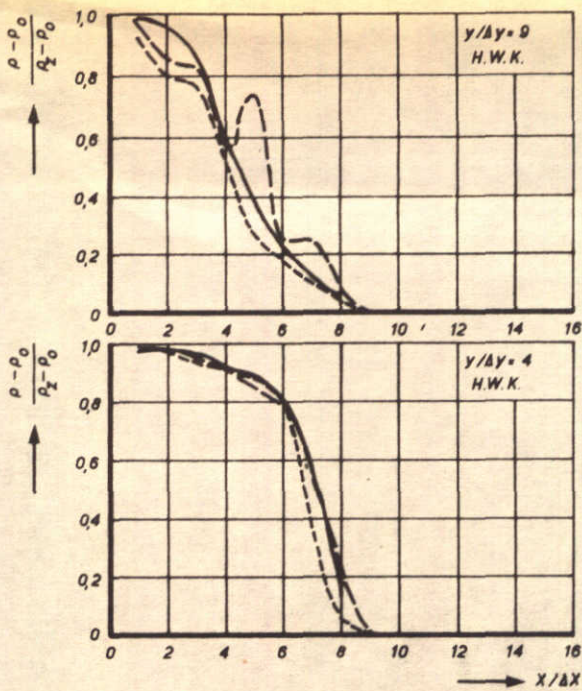
JB

A4

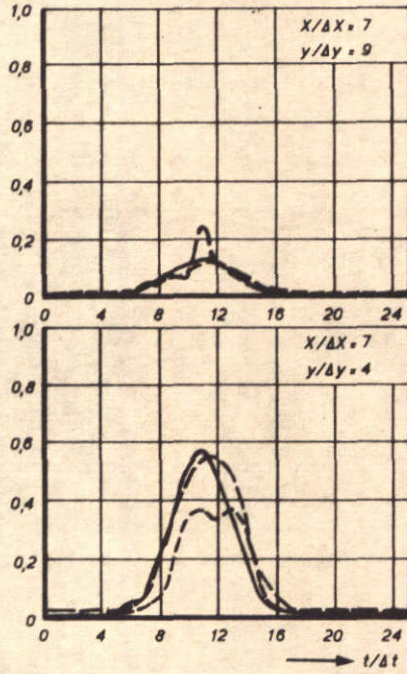
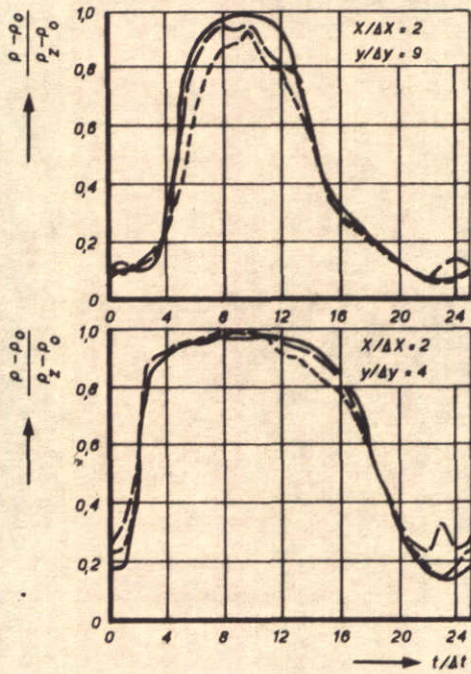
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 896-1855

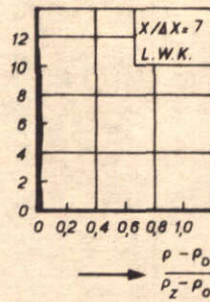
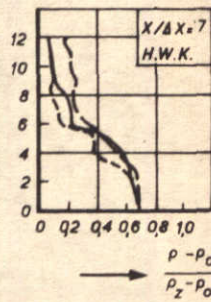
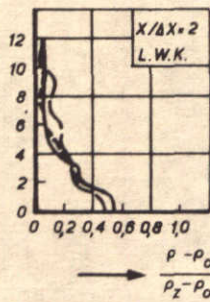
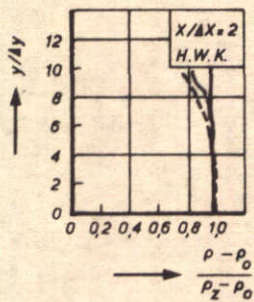
FIG. 3.16



LONGITUDINALE DICHTHEIDSVERDELING



DICHTHEIDSVERLOOP



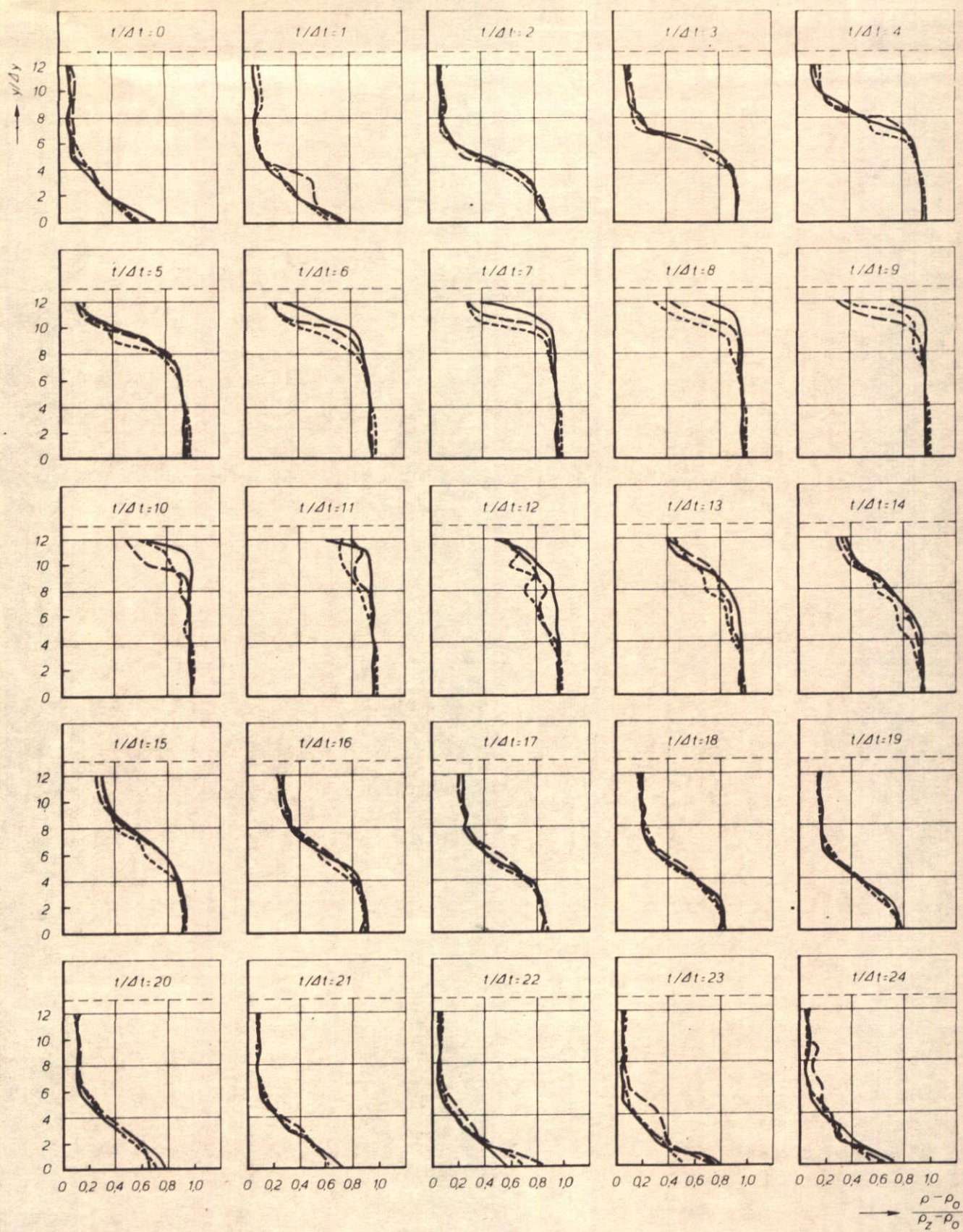
DICHTHEIDSVERTIKALEN

VERGELIJKING ZOUTMETINGEN IN GETJGROOT BIJ VERTREKKING
5,10 EN 20, REL. DICHTHEDEN ALS FUNCTIE VAN x, y EN t
(STAAFJESRUWHEID)

— $\delta = 5$
- - - $\delta = 10$
- - - - $\delta = 20$

W_K

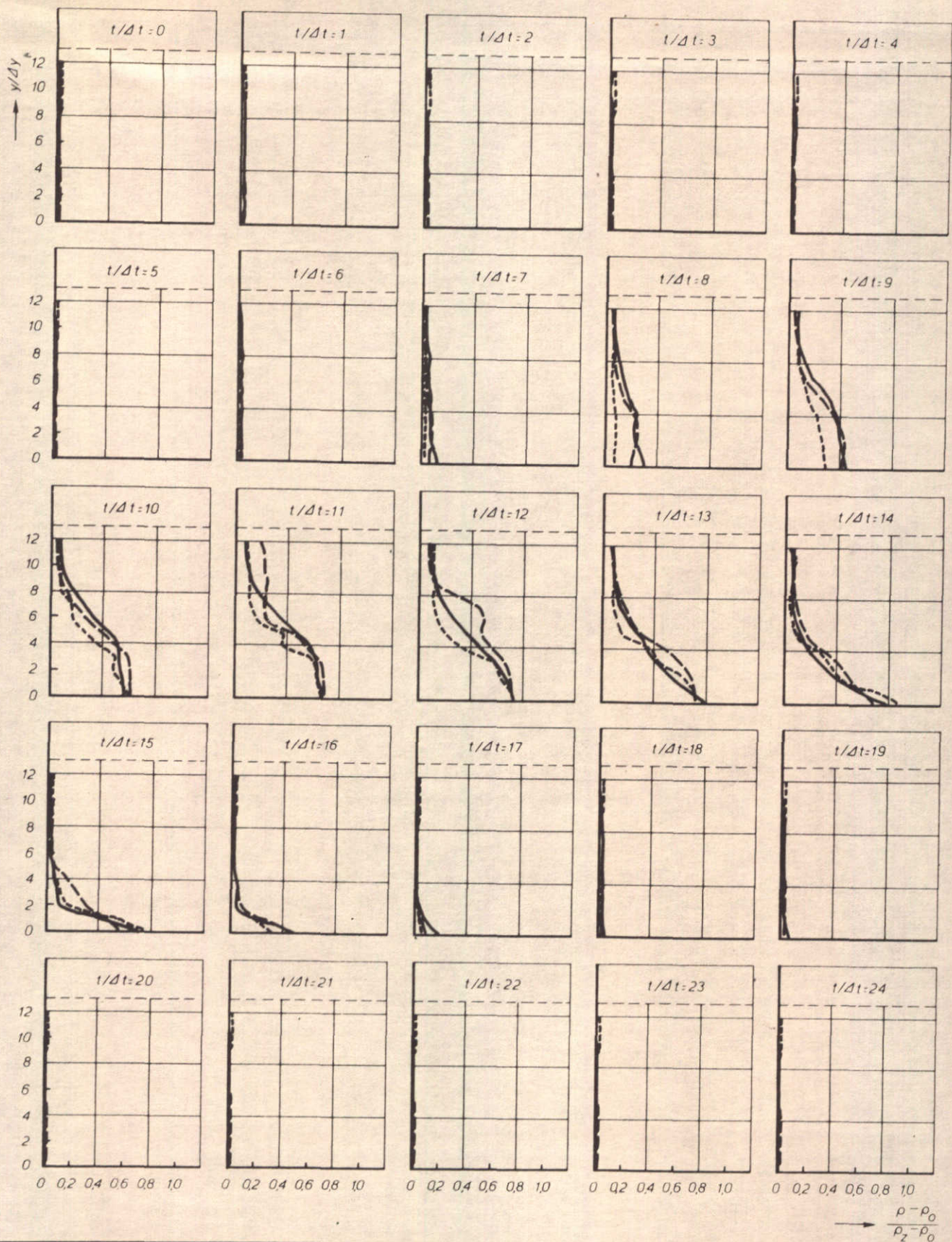
A4



VERGELIJKING ZOUTMETINGEN IN GETUIGOOT BIJ VERTREKING
 5, 10 EN 20, REL. DICHTHEID $\frac{\rho - \rho_0}{\rho_z - \rho_0}$ ALS $f(y)$ VOOR $X/\Delta X = 2$
 (STAUFJESRUWHEID)

— $\delta = 5$
 - - - $\delta = 10$
 - · - $\delta = 20$

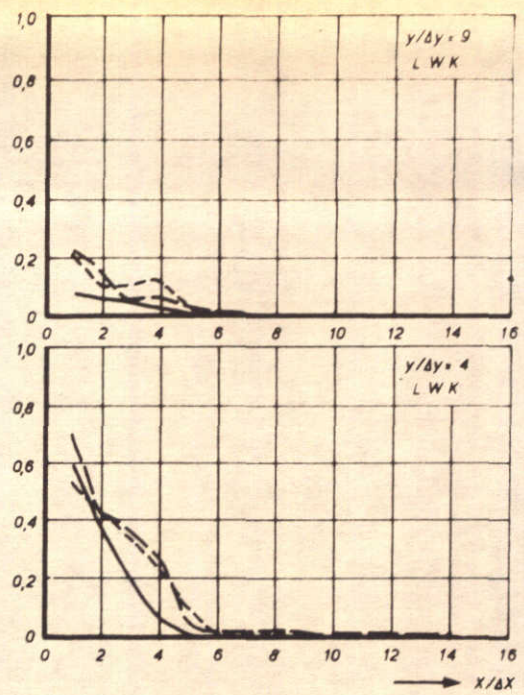
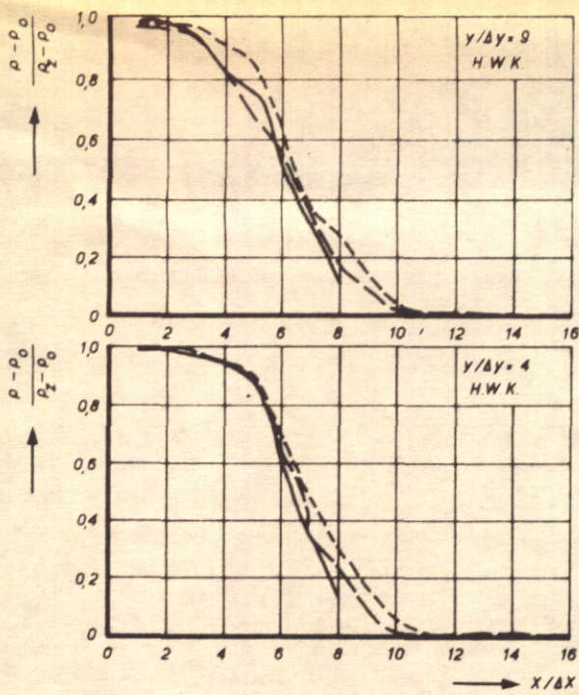
W
K
A 4



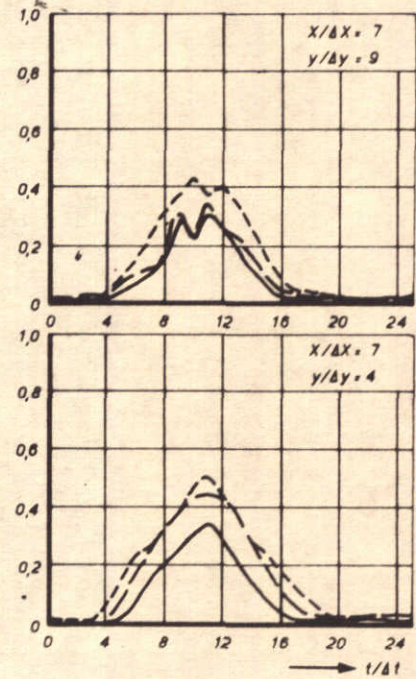
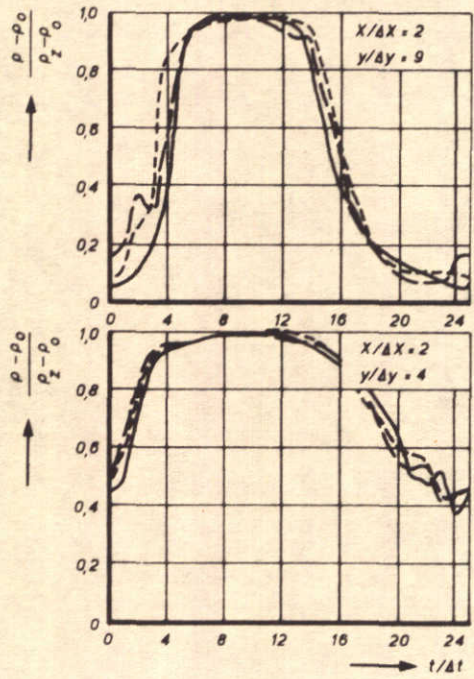
VERGELIJKING ZOUTMETINGEN IN GETJGOOT BIJ VERTREKKING
 5, 10 EN 20, REL. DICHTHEID $\frac{\rho - \rho_0}{\rho_2 - \rho_0}$ ALS $f(y)$ VOOR $X/\Delta X = 7$
 (STAAFJESRUWHEID)

— $\delta = 5$
 - - - $\delta = 10$
 . . . $\delta = 20$

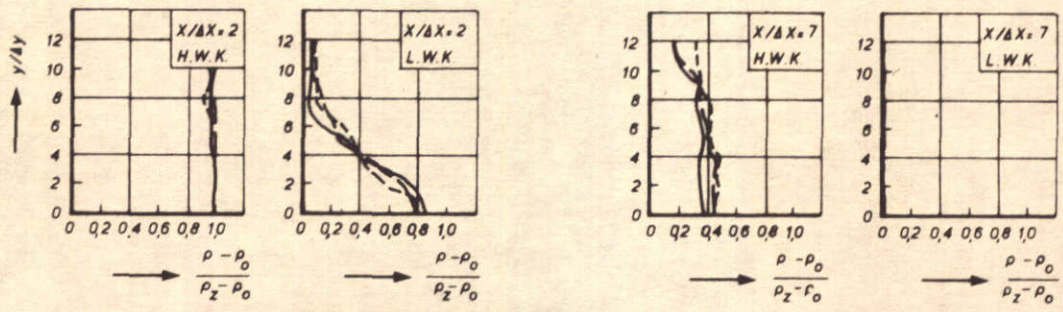
W
 K
 A 4



LONGITUDINALE DICHTHEIDSVERDELING



DICHTHEIDSVERLOOP



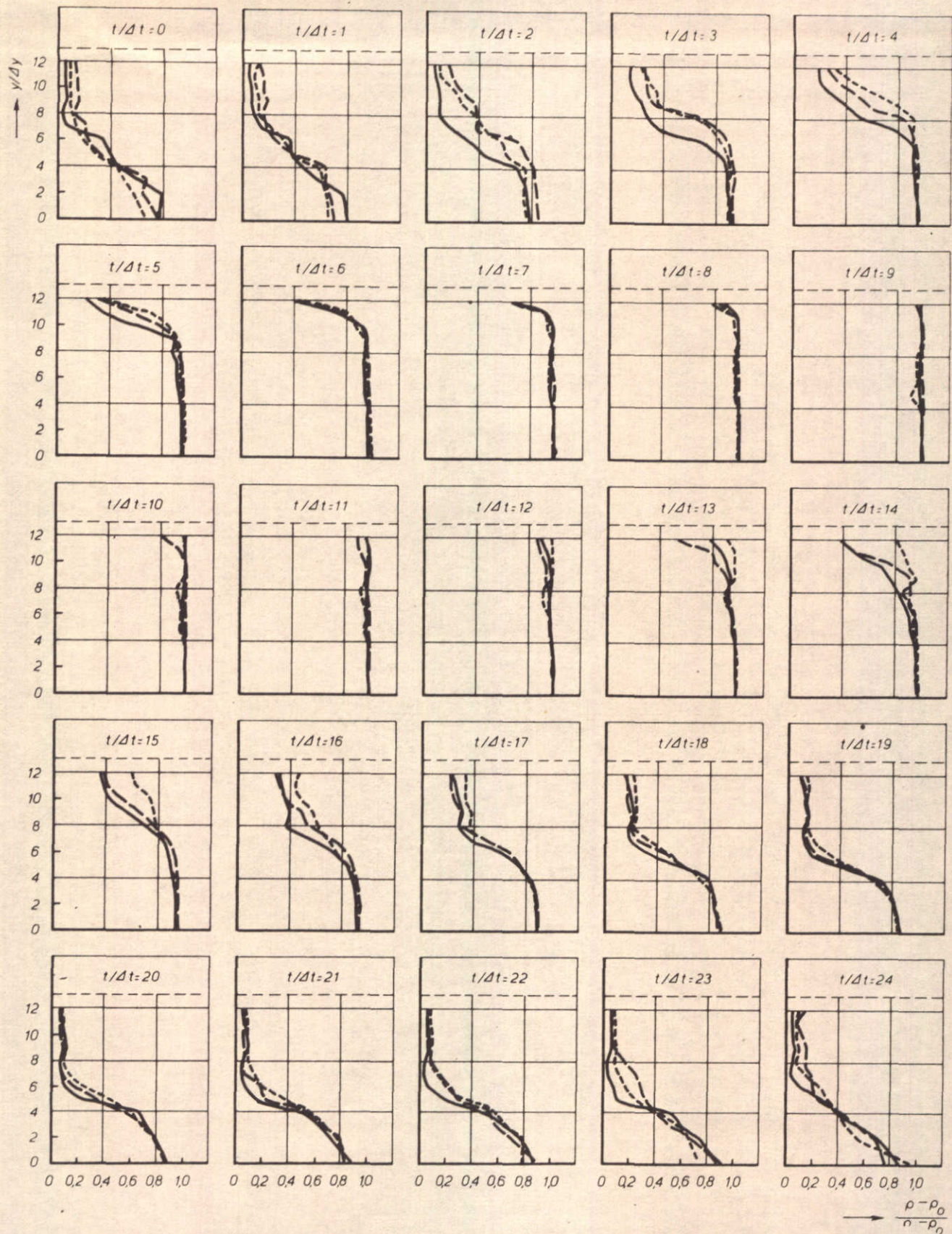
DICHTHEIDSVERTIKALEN

VERGELIJKING ZOUTMETINGEN IN GETUIGOOT BIJ VERTREKKING
5,10 EN 20, REL. DICHTHEDEN ALS FUNCTIE VAN x, y EN t
(BODEMRUWHEID)

— $\delta = 5$
- - - $\delta = 10$
- - - - $\delta = 20$

W_K

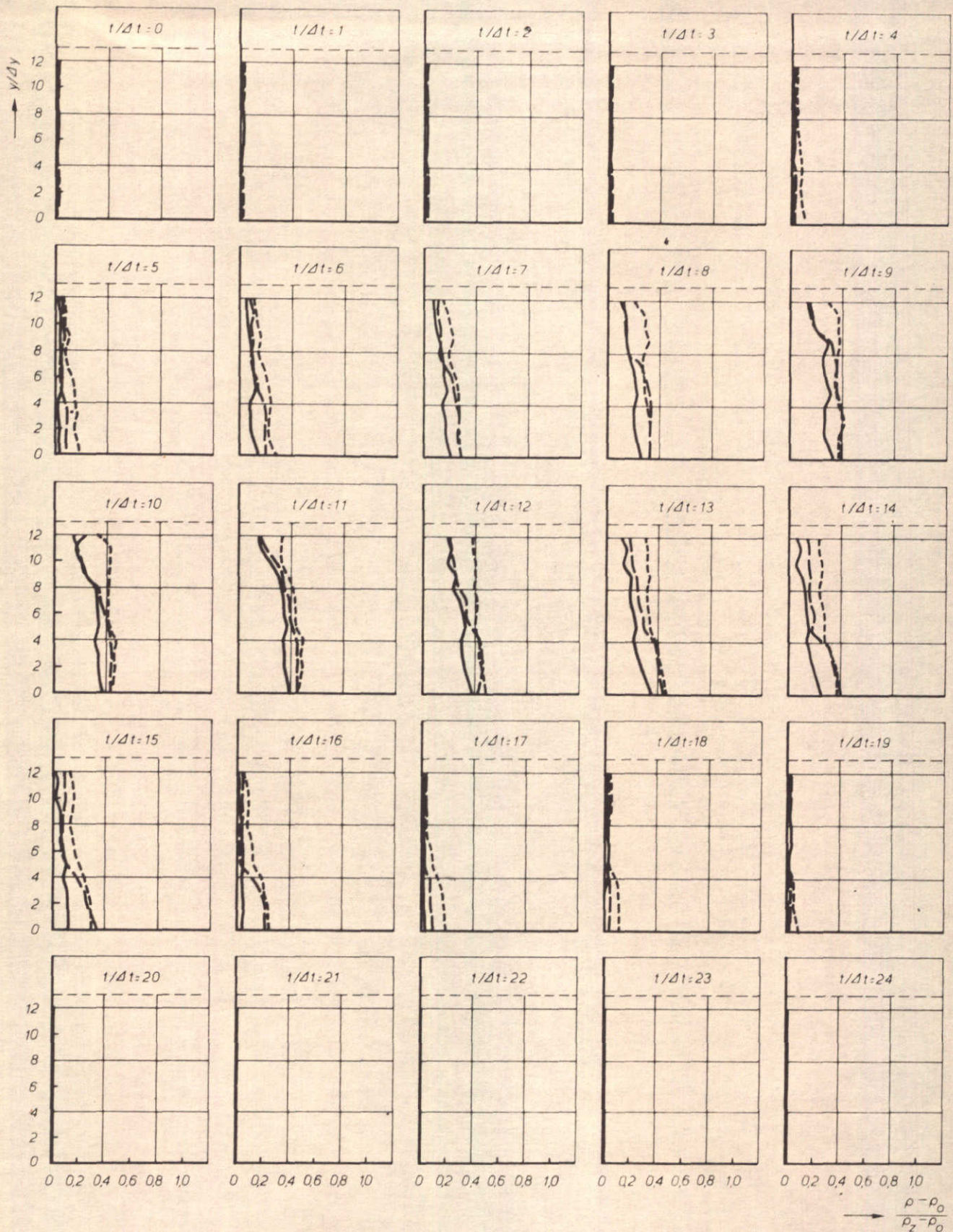
A 4



VERGELIJKING ZOUTMETINGEN IN GETUGGOT BIJ VERTREKKING
 5, 10 EN 20, REL. DICHTHEID $\frac{\rho - \rho_0}{\rho_s - \rho_0}$ ALS $f(y)$ VOOR $X/\Delta X = 2$
 (BODEMRUWHEID)

— $\delta = 5$
 - - - $\delta = 10$
 ···· $\delta = 20$

W
 K
 A 4



VERGELIJKING ZOUTMETINGEN IN GETJGOOT BIJ VERTREKING
 5,10 EN 20, REL. DICHTHEID $\frac{\rho - \rho_0}{\rho_z - \rho_0}$ ALS $f(y)$ VOOR $X/\Delta X = 7$
 (BODEMRUWHEID)

— $\delta = 5$
 - - - $\delta = 10$
 - · - $\delta = 20$

W
 K
 A 4

Basisvergelijkingen:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} = 0$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial \tau}{\partial x} + \rho g = 0$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \tau}{\partial y} = 0$$

Invoergegevens:

- $h = f(x, t)$: waterhoogte
 $u = f(x, y, t)$: horizontale snelheid
 $\rho = f(x, y, t)$: dichtheid

Veronderstellingen:

$$1^{\circ} \cdot \frac{\partial T_x}{\partial x} \ll \frac{\partial T_y}{\partial y} \quad \text{en} \quad \frac{\partial \tau}{\partial x} \ll \rho g$$

$$2^{\circ} \cdot T_y = -D_y \frac{\partial c}{\partial y} \quad \text{en} \quad \frac{\partial \tau}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho K_y \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

Randvoorwaarden:

voor $y = 0$: $v = 0$, $T_y = 0$, voor $y = h$: $p = 0$, $\tau = 0$

Uitgevoerde analyse:

$$v = - \int_0^y \frac{\partial u}{\partial x} dy$$

$$D_y = \frac{- \int_0^y \left\{ \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} \right\} dy}{-\frac{\partial c}{\partial y}}, \quad \text{immers } D_y = \frac{T_y}{-\frac{\partial c}{\partial y}}$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = - \int_y^h \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) dy - \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) \frac{\partial h}{\partial x}, \quad \text{waarin}$$

$$K_y = \frac{- \int_y^h \left\{ \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} \right\} dy}{\rho \frac{\partial u}{\partial y}}, \quad \text{immers } K_y = \frac{\tau}{\rho \frac{\partial u}{\partial y}}$$

Meeberekende parameters:

$$R_i = \frac{-g \frac{\partial \rho}{\partial y}}{\rho \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2} \quad (\text{getal van Richardson}), \quad u_* = \frac{\tau}{|\tau|} \sqrt{\frac{|\tau|}{\rho}} \quad (\text{schuifspannings-snelheid})$$

UITVOER TWEEDIMENSIONAAL ONDERZOEK								
rekenuitvoer		plotteruitv.	rekenuitvoer		plotteruitv.	rekenuitvoer		plotteruitv.
tabel	grootheid	codering	tabel	grootheid	codering	tabel	grootheid	codering
1	h	H	14	$\frac{\partial h}{\partial t} u (y-h) \frac{\partial h}{\partial x}$		27	$\frac{\rho}{g} \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2$	
2	u	U	15	v	V	28	Ri	RI
3	ρ	RHO	16	$\rho g - 10000$		29	$\frac{\partial u}{\partial t}$	R DU/DT
4	c	C	17	$\frac{\partial p}{\partial y} - 10000$		30	$\rho u \frac{\partial u}{\partial x}$	RUDU/DX
5	$\frac{\partial h}{\partial t}$		18	$\frac{\partial c}{\partial t}$	DC/DT	31	$\rho v \frac{\partial u}{\partial y}$	RVDU/DY
6	$\frac{\partial h}{\partial x}$		19	$\frac{\partial c}{\partial x}$		32	$\int \frac{h}{y} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right) dy$	I (DP/DY)
7	$\frac{\partial u}{\partial t}$		20	$\frac{\partial c}{\partial y}$	DC/DY	33	$-\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right) (y-h) \frac{\partial h}{\partial x}$	
8	$\frac{\partial u}{\partial x}$		21	$u \frac{\partial c}{\partial x}$	U DC/DX	34	$\frac{\partial p}{\partial x}$	DP/DX
9	$\frac{\partial u}{\partial y}$	DU/DY	22	$v \frac{\partial c}{\partial y}$	V DC/DY	35	$\frac{\partial \tau}{\partial y}$	DTAU/DY
10	$\frac{\partial \rho}{\partial x}$		23	$\frac{\partial T}{\partial y}$	DTY/DY	36	τ	TAU
11	$\frac{\partial \rho}{\partial y}$		24	$T_y (y-h)$		37	$u_{\#}$	
12	$\frac{1}{\rho} \frac{\partial (\rho u)}{\partial y}$		25	T_y	TY	38	K_y	KY
13	$v (y-h)$		26	D_y	DY			

UITVOER EENDIMENSIONAAL ONDERZOEK								
rekenuitvoer		plotteruitv.	rekenuitvoer		plotteruitv.	rekenuitvoer		plotteruitv.
tabel	grootheid	codering	tabel	grootheid	codering	tabel	grootheid	codering
1	h-ho	H-HO	13	$\bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x}$	U DC/DX	25	$\bar{\rho} \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$	RUDU/DX
2	\bar{u}	U	14	$\frac{1}{h} \frac{\partial (T' h)}{\partial x}$	1/RmD(TXH)/DX	26	$\frac{1}{2gh} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x}$	GHDR/DX
3	$\bar{\rho} - 1000$	RHO-1000	15	T'_x	TX	27	$\bar{\rho} \frac{\partial h}{\partial x}$	
4	\bar{c}	C	16	D'_x	DX	28	$\frac{\partial \bar{p}}{\partial x}$	DP/DX
5	q		17	$\bar{u}' c'$		29	$\frac{\tau}{R}$	TAU/R
6	$\frac{\partial h}{\partial t}$		18	$\bar{u}' c' / \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial x}\right)$		30	τ_b	TAU
7	$\frac{\partial h}{\partial x}$		19	R_p^{-1}	RP	31	$u_{\#b}$	
8	$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t}$		20	Re		32	$\bar{\rho} \bar{u} \bar{u} $	R UU
9	$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$		21	Fr		33	λ	
10	$\frac{\partial \bar{p}}{\partial x}$		22	Fr'		34	C	CH
11	$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t}$	DC/DT	23	Ke				
12	$\frac{\partial \bar{c}}{\partial x}$	DC/DX	24	$\bar{\rho} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t}$	RDU/DT			

OVERZICHT UITGEVOERDE GROOTHEDEN

W
K

A4

Basisvergelijkingen:

$$\frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial(T'_x h)}{\partial x} = 0$$

$$\bar{\rho} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\tau_b}{R} = 0$$

Invoergegevens:

$h = f(x,t)$: waterhoogte

$\bar{u} = f(x,t)$: horizontale snelheid

$\bar{\rho} = f(x,t)$: dichtheid

Veronderstellingen:

$$T'_x = -D'_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \quad \text{en} \quad \tau'_b = \frac{E}{C^2} \cdot \bar{\rho} \bar{u} |\bar{u}|$$

Randvoorwaarden:

Voor $x = x_*$ (zoete gebied) : $T'_x = 0$

Drukgradiënt:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = \frac{1}{2} gh \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x} + \bar{\rho} g \frac{\partial h}{\partial x}$$

Uitgevoerde analyse:

$$D'_x = \frac{\frac{1}{h} \int_x^{x_*} h \left\{ \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right\} dx}{-\frac{\partial \bar{c}}{\partial x}}, \quad \text{immers } D'_x = \frac{T'_x}{-\frac{\partial \bar{c}}{\partial x}}$$

$$\frac{E}{C^2} = \frac{-R \left\{ \bar{\rho} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right\}}{\bar{\rho} \bar{u} |\bar{u}|}, \quad \text{immers } \frac{E}{C^2} = \frac{\tau_b}{\bar{\rho} \bar{u} |\bar{u}|}$$

Meeberekende parameters:

$$Re = \frac{\bar{u}h}{\nu} \quad (\text{getal van Reynolds}), \quad Ke = \frac{\bar{u}^3}{\frac{\Delta \bar{p}}{\bar{\rho}} g \nu} \quad (\text{getal van Keulegan})$$

$$F_r = \frac{\bar{u}}{gh} \quad (\text{getal van Froude}), \quad F'_r = \frac{\bar{u}^2}{\frac{\Delta \bar{p}}{\bar{\rho}} gh} \quad (\text{intern Froudegetal})$$

$$R_p^{-1} = \frac{\bar{\rho} \left| \frac{\partial h}{\partial x} \right|}{-h \frac{\partial \bar{p}}{\partial x}} \quad (\text{verhoudings-})$$

$$u_{*b} = \frac{\tau_b}{|\tau_b|} \sqrt{\frac{|\tau_b|}{\bar{\rho}}} \quad (\text{schuif (spannings-) snelheid})$$

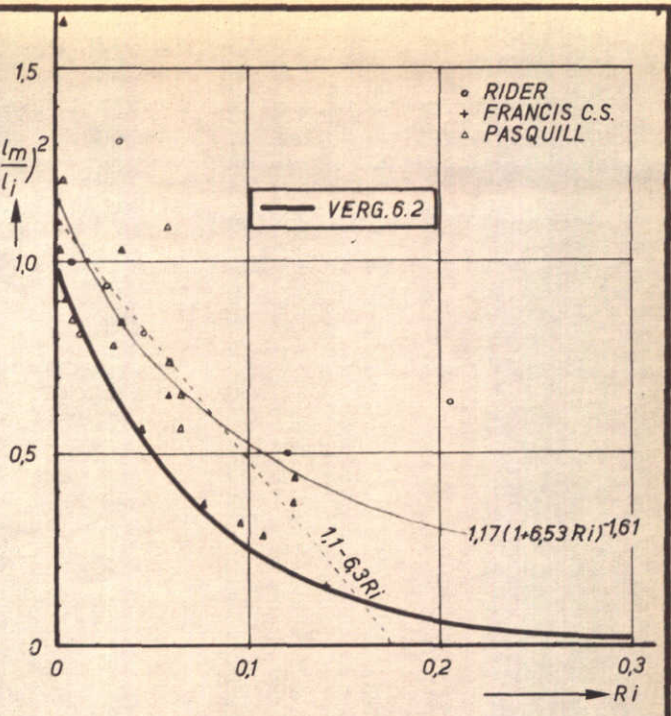
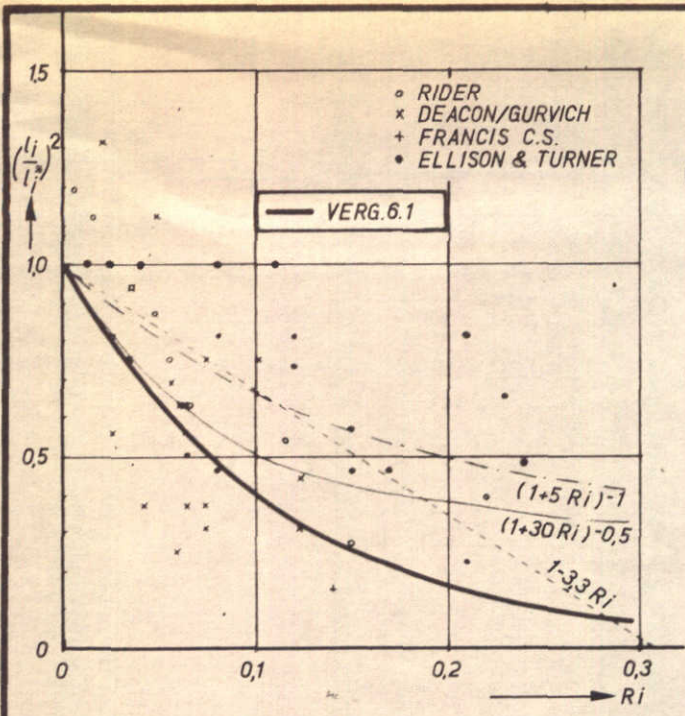
SCHEMA EENDIMENSIONAAL ONDERZOEK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

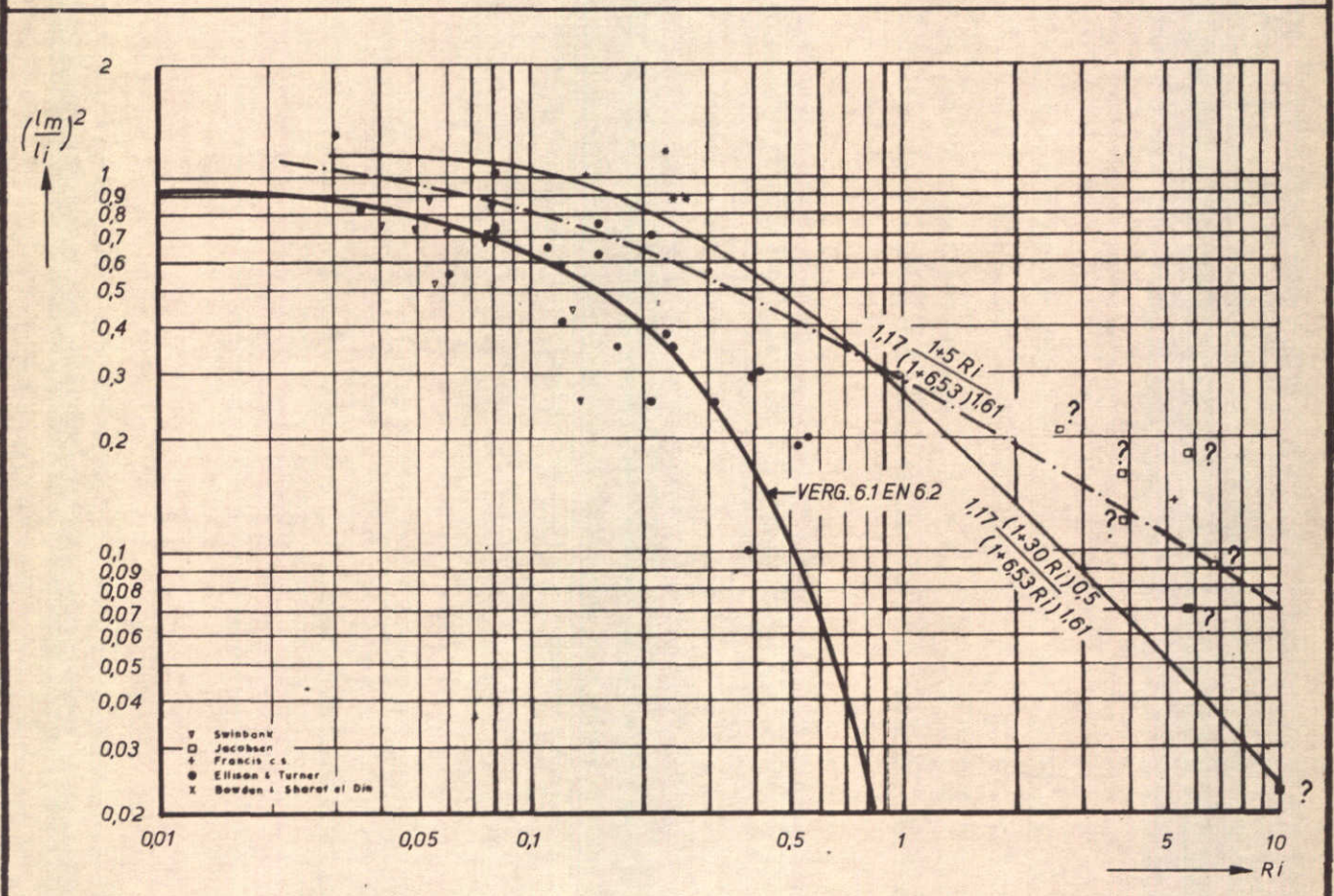
M.896-1864

FIG.6.3



VERBAND TUSSEN TURBULENTE VISCOSITEIT EN GETAL VAN RICHARDSON

VERBAND TUSSEN DE TURBULENTE DIFFUSIECOËFFICIËNT EN HET GETAL VAN RICHARDSON

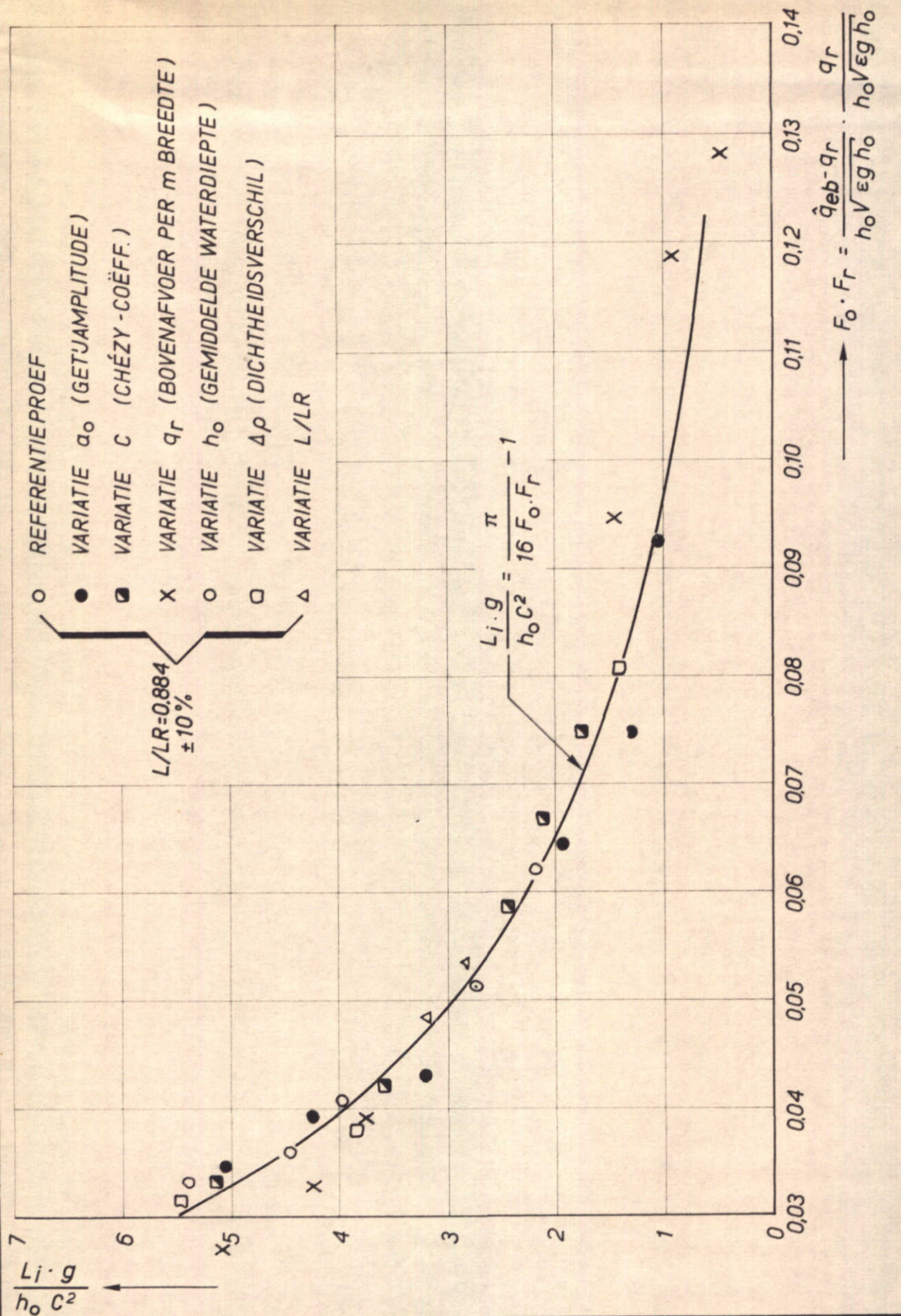


l_i : MENGWEG IMPULSTRANSORT
 l_m : MENGWEG MASSATransPORT
 l_i^* : NEUTRALE WAARDE (l_i VOOR $Ri=0$)

UITWISSELINGSCOËFFICIËNTEN VOLGENS LITERATUURONDERZOEK VREUGDENHIL (1967)(REF. 20)

DE VERGELUKINGEN 6.1 EN 6.2 ZUN GERESULTEERD UIT GETUGGOOT ONDERZOEK

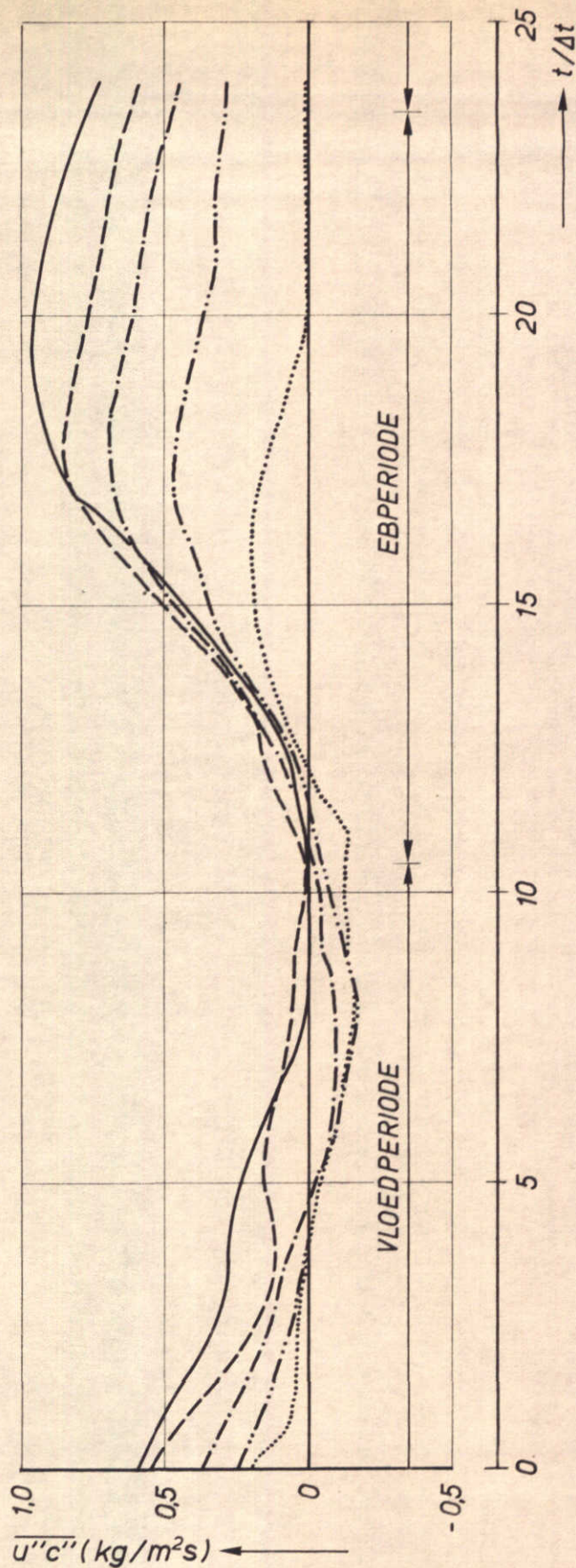
j.z.
A4



L_j = ZOUTINDRINGING BU L.W.K.

DIMENSIE - ANALYSE ZOUTINDRINGING

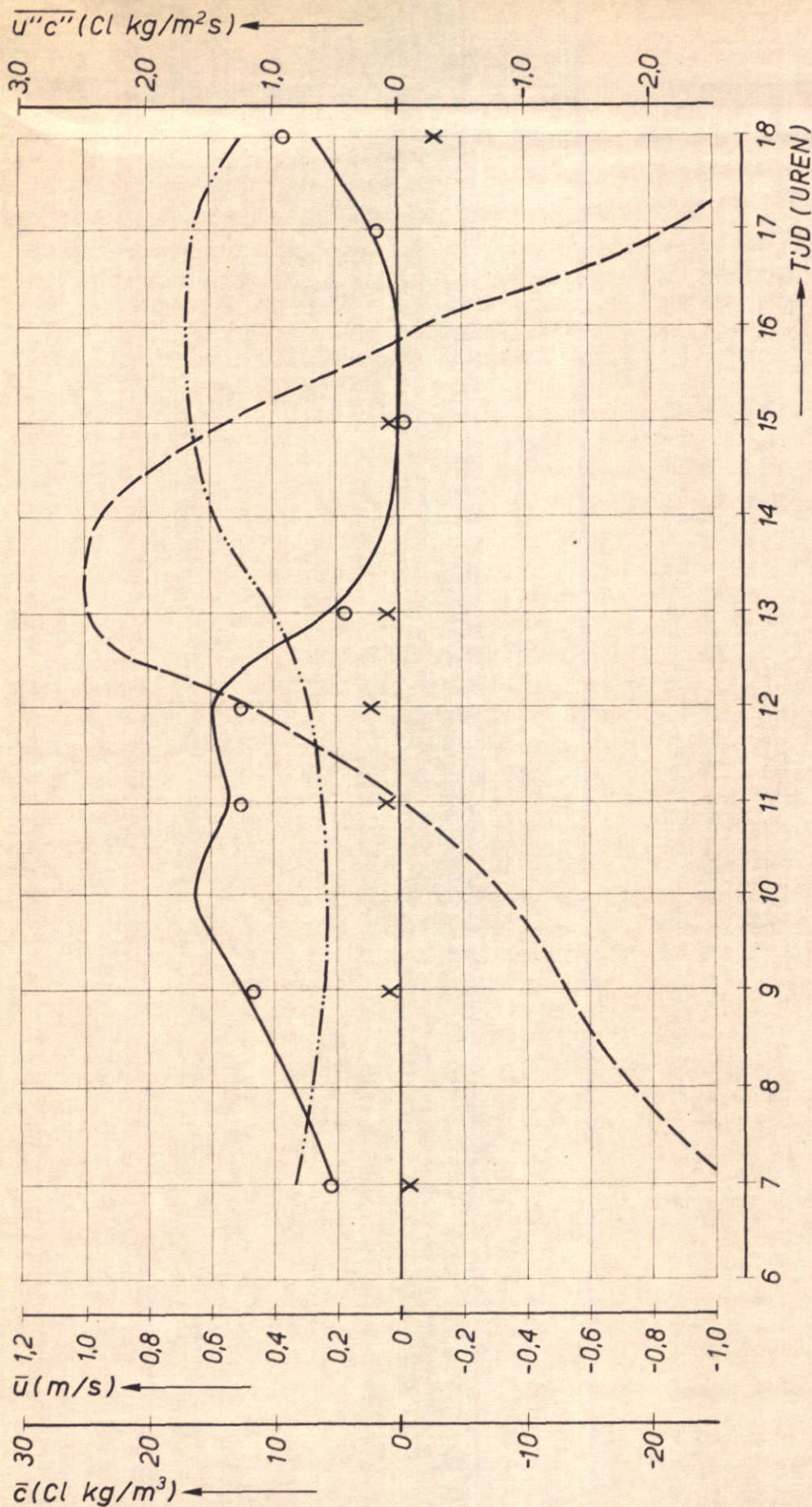
- $x/\Delta x = 2$
- - - $x/\Delta x = 4$
- · - · $x/\Delta x = 6$
- · - · - $x/\Delta x = 8$
- $x/\Delta x = 10$



DISPERSIEF TRANSPORT $\overline{u''c''}$ ALS $f(x,t)$ VOOR
 PROEF T 145 IN DE GETUIGOOT MET BODEMRUWHEID

j.z.

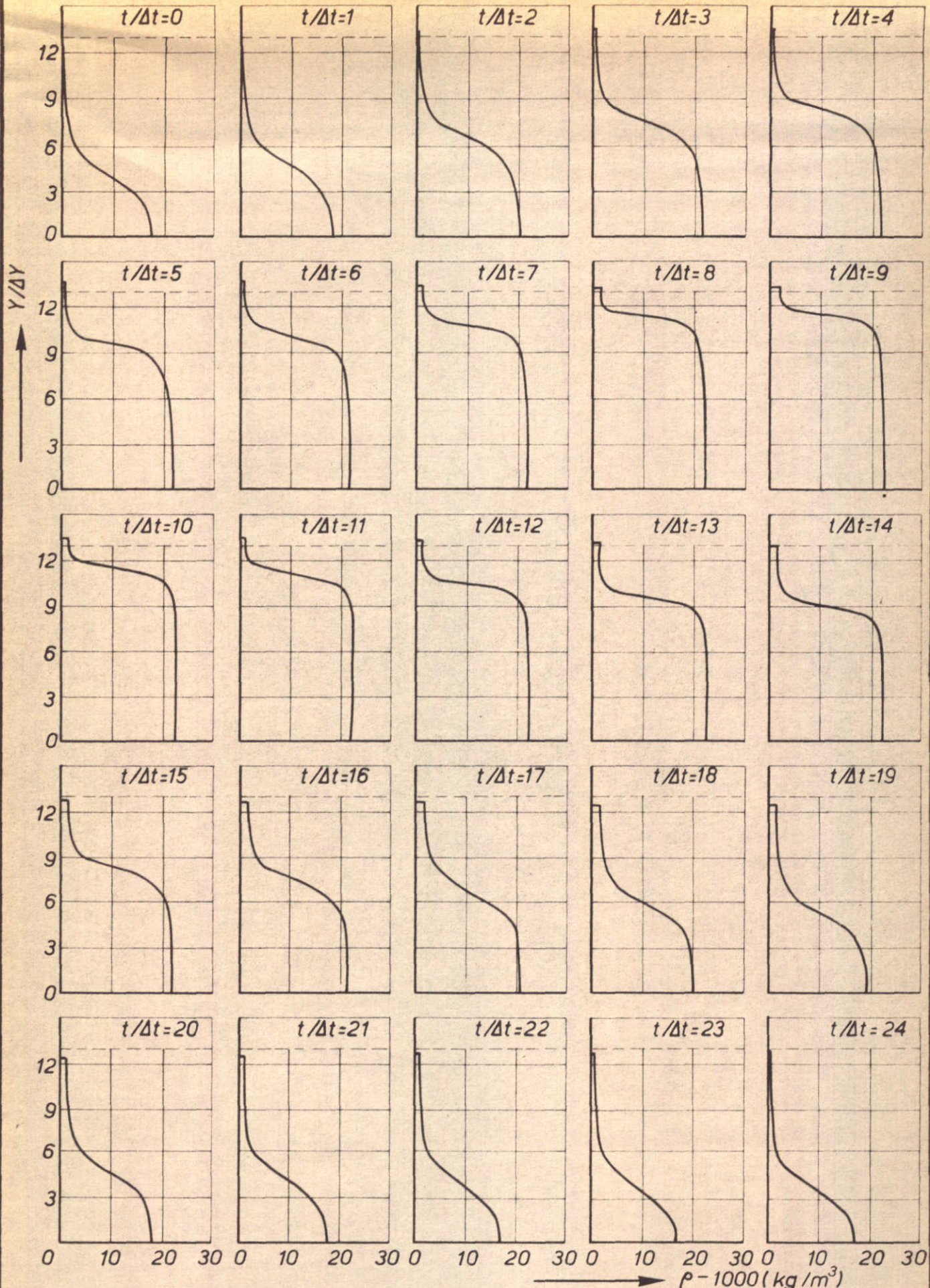
A4



DISPERSIEF TRANSPORT $\overline{u''c''}$ IN ROTTERDAMSE WATERWEG
 kmr. 1030, DATUM 21-6-1956
 SPLITSING IN VERTIKALE - (T_V) EN DWARSBUDRAGEN (T_T)

j.z.

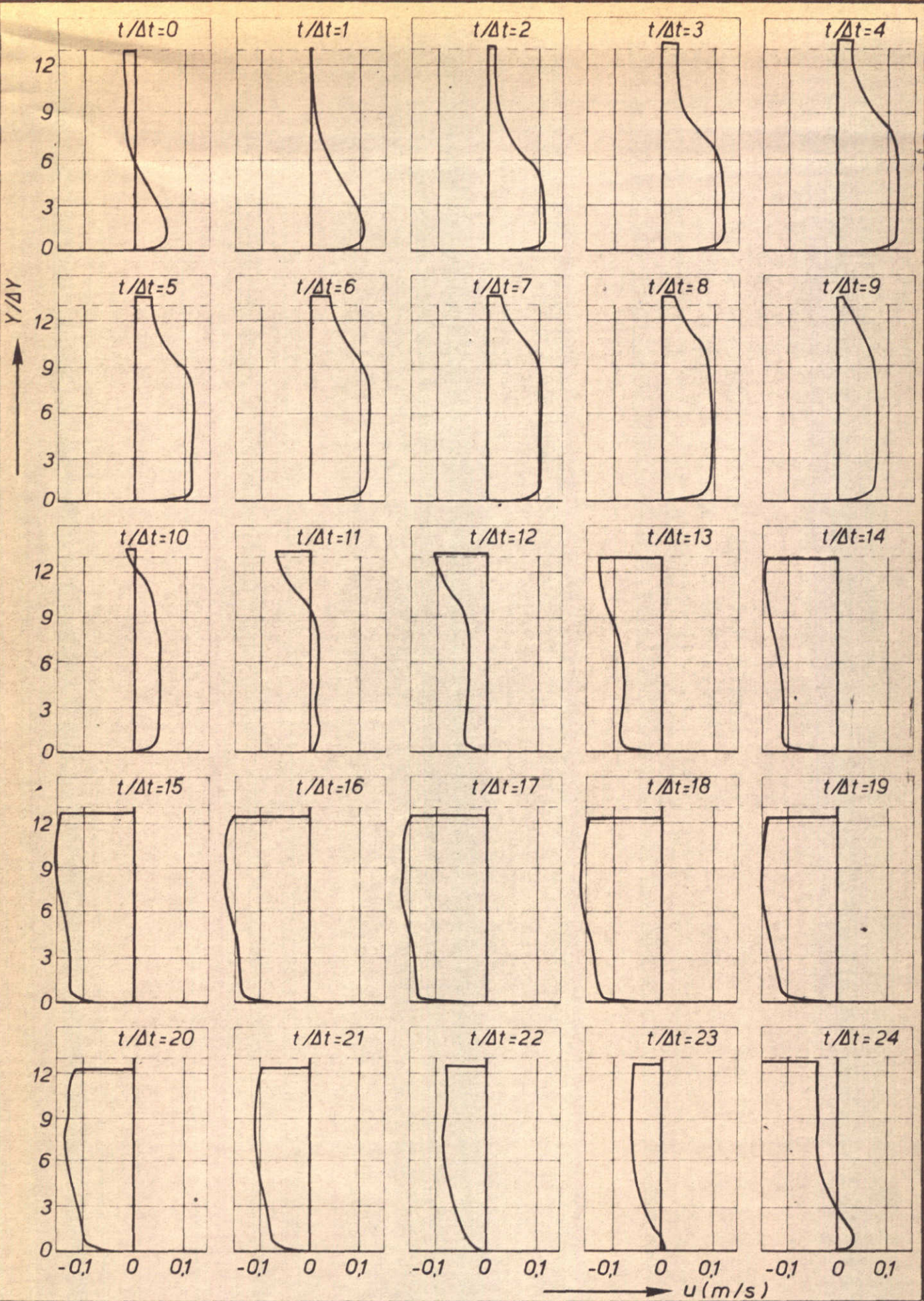
A4



DICHTHEID $\rho - 1000$ ALS $f(y)$ BIJ STAAFJESRUWHEID

j.z.

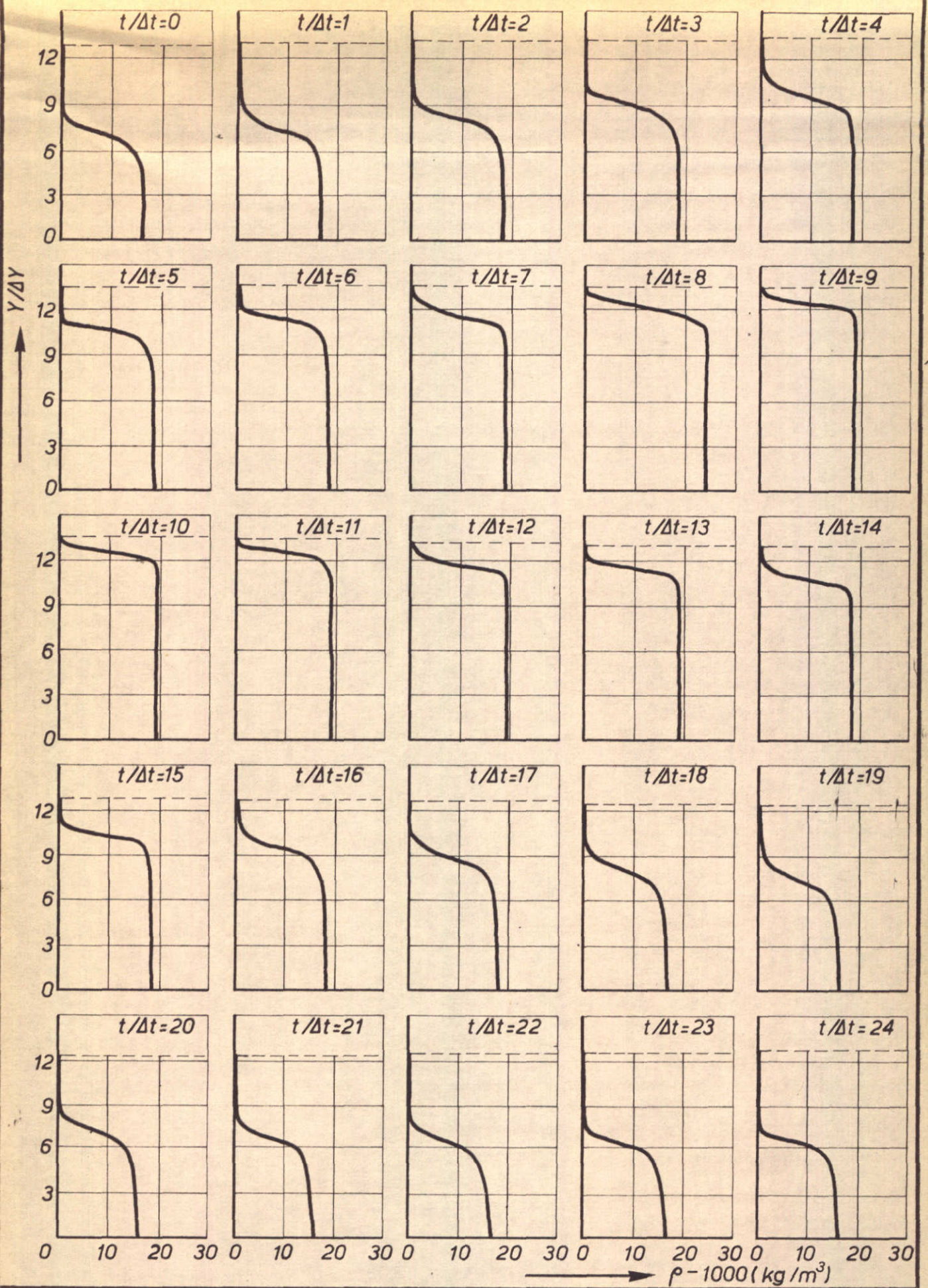
A 4



SNELHEID u ALS $f(y)$ BIJ STAAFJESRUWHEID

j.z.

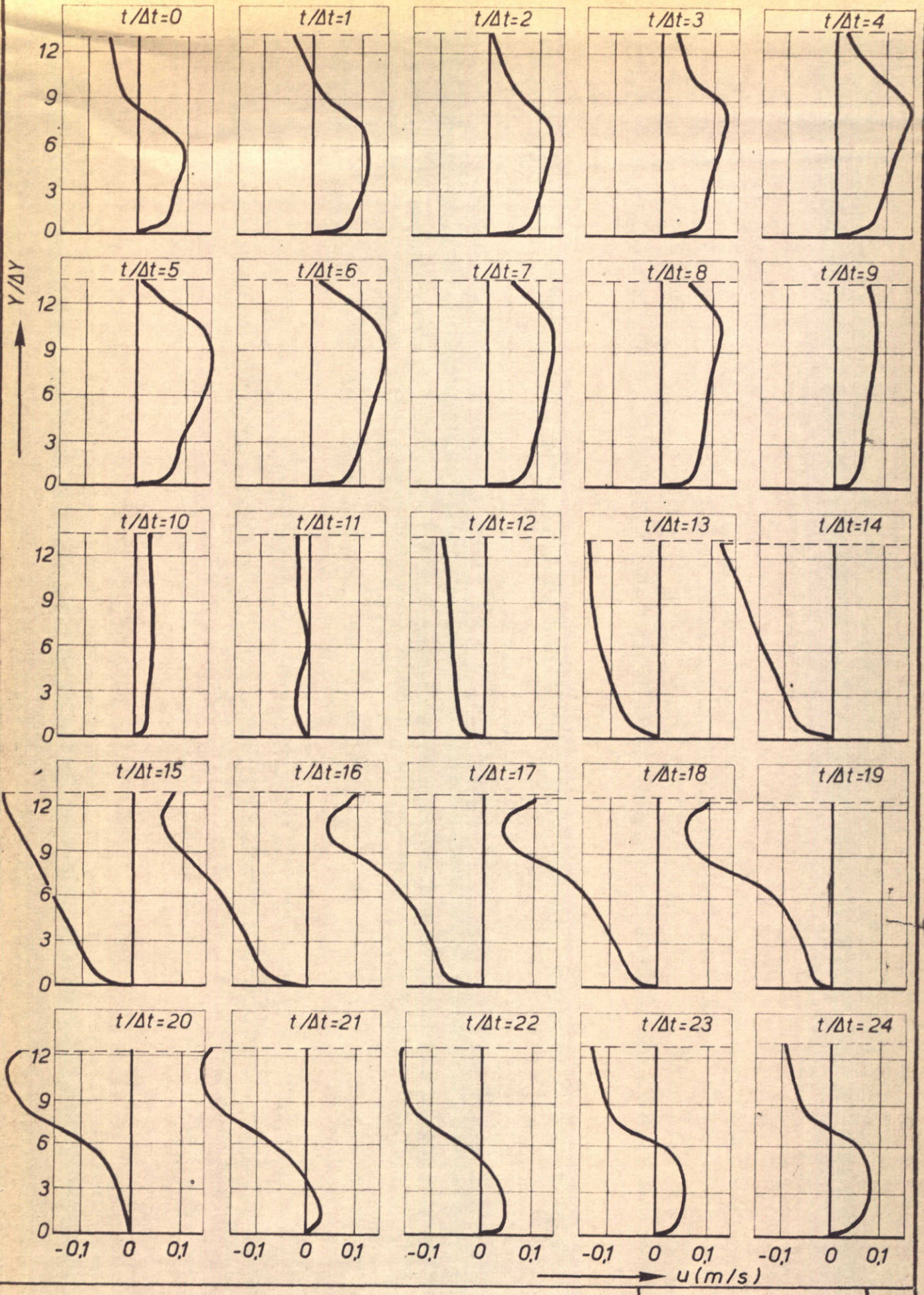
A4



DICHTHEID $\rho-1000$ ALS $f(y)$ BIJ BODEMRUWHEID

j.z.

A4



SNELHEID u ALS $f(y)$ BIJ BODEMRUWHEID

j.z.

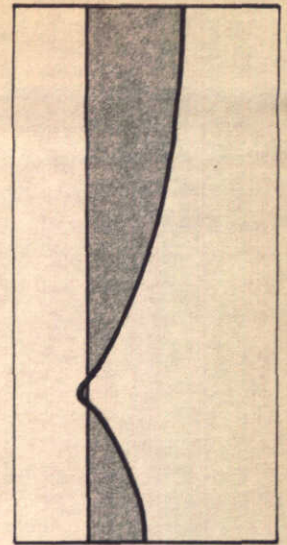
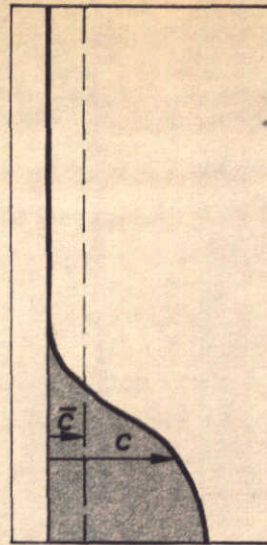
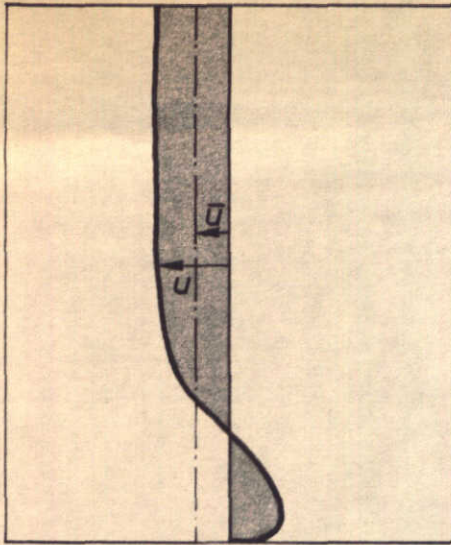
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

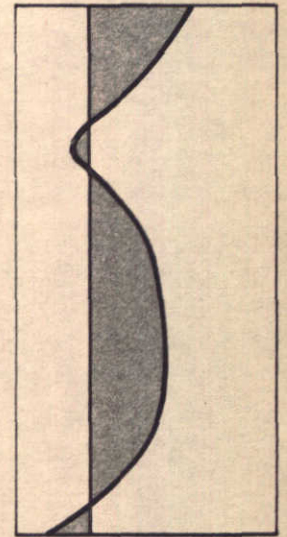
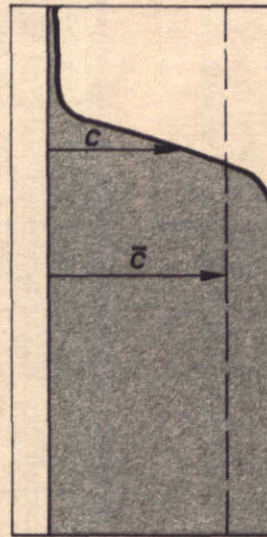
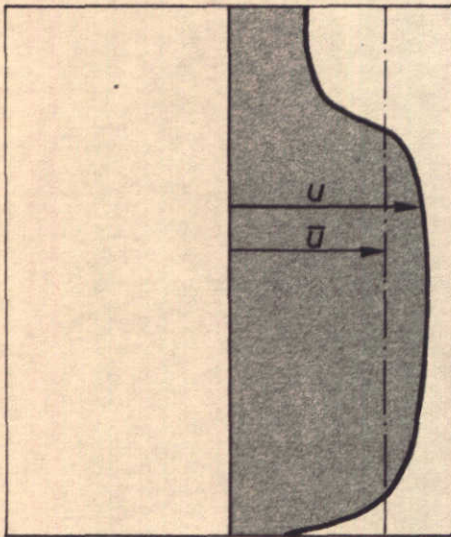
M.896-1835

FIG. I.4

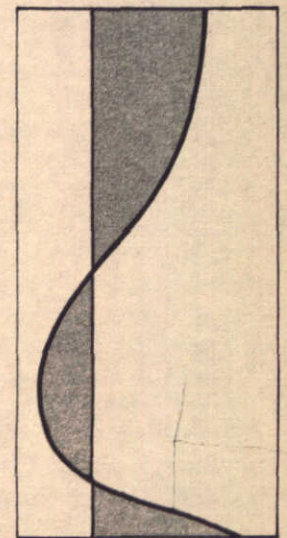
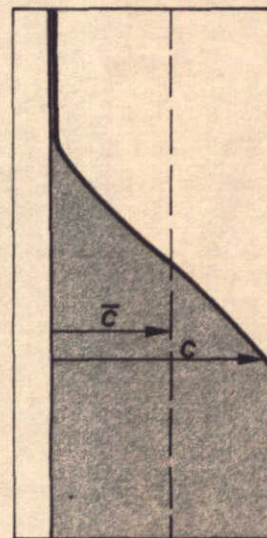
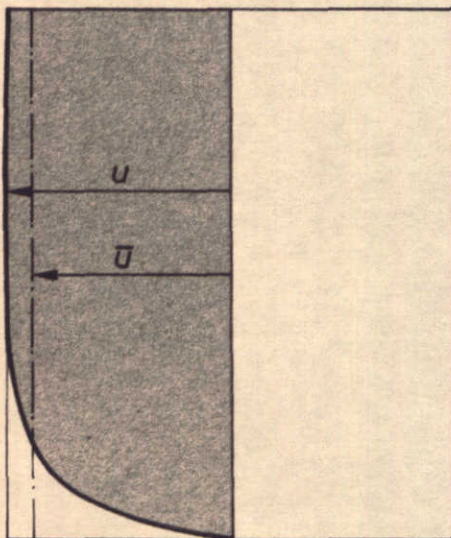
L.W.K.



M.V.S.



M.E.S.



$u \rightarrow$

$c \rightarrow$

$$\overline{(u-\bar{u})(c-\bar{c})} = u''c''$$

STRUCTUUR DISPERSIEF TRANSPORT
 BIJ STAAFJES RUWHEID

j.z.

A4

