

REPRODUCTIE ZOUTTOESTAND
GETIJRIVIEREN
XVIII

VERANDERING IN ZOUTPENETRATIE BIJ
MIDDENSTANDSVERHOGING EN
VERANDERING VAN VERTIKAAL GETIJ OP ZEE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
DELFT

M896-XVIII

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

REPRODUCTIE ZOUTTOESTAND GETIJRIVIEREN

XVIII

VERANDERING IN ZOUTPENETRATIE BIJ

MIDDENSTANDSVERHOOGING EN VERANDERING

VAN VERTIKAAL GETIJ OP ZEE

februari 1973

M 896 - XVIII

ERRATUM behorende bij

Verslag M896 - XVIII : Reproductie zouttoestand getijrivieren.

Verandering in zoutpenetratie bij midden-
standsverhoging en verandering van
vertikaal getij op zee.

pag. 15, tweede alinea, 4e regel.

"dat er een invloed is" wordt "dat er geen invloed is".

NOTATIES

LIJST VAN FIGUREN

LIJST VAN TABELLEN

REFERENTIES

Eerder uitgebrachte verslagen onderzoek "Reproductie zout-toestand getijrivieren" (M 896)

<u>1. Inleiding</u>	1
<u>2. Voorstel voor te onderzoeken, in opeenvolgende getijden</u> <u>veranderende grootheden</u>	1
<u>3. Meetopstelling</u>	3
<u>4. Gekozen schalen</u>	3
<u>5. Instelling getijgoot</u>	4
5.1. Zeerand	4
5.1.1. Algemeen	4
5.1.2. Proeven met opwaaiing (middenstandsverhoging)	5
5.1.3. Proeven met variatie getij-amplitude	7
5.2. Rivierrand (bovenstroomse rand)	7
5.3. Ruwheid	8
<u>6. Proevenprogramma, verrichte proeven</u>	9
<u>7. Gemeten grootheden en meetmethode</u>	10
<u>8. Resultaten/Interpretatie</u>	11
8.1. Proeven met opwaaiing (middenstandsverhoging)	11
8.1.1. Zoutindringingslengte	11
8.1.2. Longitudinale zoutverdeling	14
8.2. Proeven variatie verticale getij-amplitude	15
<u>9. Samenvatting</u>	16
9.1. Verandering in zoutpenetratie bij middenstands- verhoging	16
9.2. Verandering in zoutpenetratie bij verandering van vertikaal getij op zee	18

FIGUREN: 1 tot en met 29.

NOTATIES

- B : breedte getijgoot
- C : Chézy-coëfficiënt
- $H(t)$: $H(t) = H_0 + w(t) + h_0(t)$, momentane waterdiepte ter plaatse van de zeerand c.q. mond getijgoot
- H_0 : referentie waterdiepte
- L : lengte fictieve prototypegoot
- L_s : stoffelijke lengte getijgoot
- L_i : zoutindringingslengte
- $Q^*(t)$: momentane debiet, $Q^*(t) = Q(t) + \bar{Q}$
- $Q(t)$: instelbaar variabele bijdrage tot het momentane debiet
- $\bar{Q}$: instelbaar constant gehouden bijdrage tot het momentane debiet
- $Q_z^*(t)$: momentane debiet ter plaatse van de mond getijgoot (zeerand)
- T : duur getijperiode
-
- a_0, a_0' : getij-amplitude momentane vertikale getij ($2a_0$ resp. $2a_0'$ is getijverschil; is verschil tussen hoog- en laagwater)
- $h_0(t)$: momentane vertikale getij, gemeten ten opzichte van de momentane middenstand ($= H_0 + w(t)$)
- m : aantal getijden met periode T, gedurende welke de middenstand verlaagd wordt van de verhoogde situatie terug naar de uitgangssituatie
- n : aantal getijden met periode T, gedurende welke de middenstandsverhoging tot stand komt
- n_C : schaal voor de Chézy-coëfficiënt
- n_h : vertikale schaal
- n_l : lengteschaal (horizontale schaal)
- t : tijd
- $w(t)$: momentane middenstandsverhoging, gemeten ten opzichte van de referentie waterdiepte H_0
- x : horizontale coördinaat (lengterichting)
- y : vertikale coördinaat
-
- ρ : momentane dichtheid
- ρ_0 : dichtheid zoete rivierwater
- ρ_z : dichtheid zoute zeewater
- $\Delta\rho$: $\Delta\rho = \rho_z - \rho_0$, dichtheidsverschil
- $\bar{\rho}$: gemiddelde momentane dichtheid over de vertikaal

LIJST VAN FIGUREN

- Fig. 1 Meetopstelling getijgootproeven
Fig. 2 Getijbeweging zeerand bij proeven met middenstandsverhoging
Fig. 3 Getijbeweging zeerand bij proeven met variabele getij-amplitude
Fig. 4 Doorgemeten stations bij de diverse proeven
Fig. 5 Verloop toename maximale zoutindringingslengte ΔL_1 (max.) - Proeven met middenstandsverhoging
Fig. 6 Verloop verandering maximale zoutindringingslengte ΔL_1 (max.) - Proeven met middenstandsverhoging
Fig. 7 Bepaling aantal getijden, waarbij aanpassingstijd aan verhoogde middenstand nul is.

Verloop maximale relatieve dichtheid bij opeenvolgende tijdstippen van H.W.K. bij een middenstandsverhoging

- Fig. 8 Proeven 184.03, 188.00, 184.01
Fig. 9 Proef 189.00
Fig. 10 Proef 191.00
Fig. 11 Proef 185.00
Fig. 12 Proef 193.01

Longitudinale zoutverdeling (relatieve dichtheid) bij maximale zoutindringing (H.W.K.) bij een middenstandsverhoging

- Fig. 13 Proef 184.03
Fig. 14 Proef 188.00
Fig. 15 Proef 189.00
Fig. 16 Proef 191.00
Fig. 17 Proef 193.01

Zoutverdeling als functie van x en y (relatieve dichtheid) bij maximale zoutindringing (H.W.K.) met een geschetste aanduiding van de overgang van zout naar zoet water bij een middenstandsverhoging

- Fig. 18 Proef 184.03
Fig. 19 Proef 188.00
Fig. 20 Proef 189.00
Fig. 21 Proef 191.00
Fig. 22 Proef 193.01

LIJST VAN FIGUREN (vervolg)

Gemiddelde relatieve dichtheid over de vertikaal als $f(x)$
bij maximale zoutindringing in opeenvolgende getijperioden
bij een middenstandsverhoging

Fig. 23 Proeven 184.03 en 188.00

Fig. 24 Proef 189.00

Fig. 25 Proef 191.00

Fig. 26 Proef 193.01

Fig. 27 Proef 186.00 : variatie getij-amplitude

a. Maximale zoutindringing bij opeenvolgende tijdstippen van
H.W.K.

b. Maximale relatieve dichtheid bij opeenvolgende tijdstippen
van H.W.K.

Fig. 28 Proef 187.00 : variatie getij-amplitude

a. Maximale zoutindringing bij opeenvolgende tijdstippen van
H.W.K.

b. Maximale relatieve dichtheid bij opeenvolgende tijdstippen
van H.W.K.

Fig. 29 Zoutindringing bij variatie getijverschil (overgenomen uit
rapport M 896 - X)

Tabel I : Proeven met opwaaiing (proevenprogramma)	9
Tabel II : Proeven variatie verticale getij-amplitude (proeven- programma)	9

REFERENTIES

- 1 Rijkswaterstaat : Tienjarig Overzicht der Waterhoogten en Afvoeren, 1951 - 1960, Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage 1964.
- 2 Waterloopkundig Laboratorium, Reproductie zouttoestand Getijrivieren, "Systematisch onderzoek variatie randvoorwaarden en stromingscondities", rapport M 896 - X, Waterloopkundig Laboratorium, Delft 1970.
- 3 Waterloopkundig Laboratorium, Reproductie zouttoestand Getijrivieren, "Reproductie Rotterdamse Waterweg in getijgoot", rapport M 896 - VI, Waterloopkundig Laboratorium, Delft 1970.
4. Waterloopkundig Laboratorium, Reproductie zouttoestand Getijrivieren, "Invloed getijbeweging en bodemverhoging op zouttoestand", rapport M 896 - VII, Waterloopkundig Laboratorium, Delft 1971.
- 5 Waterloopkundig Laboratorium, Reproductie zouttoestand Getijrivieren, "Schaalonderzoek", rapport M 896 - XIII, Waterloopkundig Laboratorium, Delft 1972.

Eerder uitgebrachte verslagen onderzoek "Reproductie zouttoestand getij-
rivieren" (M 896)

- M 896 - 3 : Theoretische grondslagen (september 1971)
- M 896 - 5 : Numerieke aspecten gegevensverwerking (februari 1972)
- M 896 - 6 : Reproductie Rotterdamse Waterweg in getijgoot (juli 1970)
- M 896 - 7 : Invloed getijbeweging en bodemverhoging op zouttoestand
(maart 1971)
- M 896 - 8 : Invloed luchtbellengordijn op zoutpenetratie (juli 1971)
- M 896 - 9 : Onderzoek bodemruwheid (november 1970)
- M 896 - 10 : Systematisch onderzoek variatie randvoorwaarden en stro-
mingscondities (november 1970)
- M 896 - 13 : Schaalonderzoek (februari 1972)
- M 896 - 14 : Invloed luchtbellengordijn op zoutpenetratie. Aanvullend
onderzoek omrekeningsfactor luchtdebiet (juni 1972)
- M 896 - 15 : Dimensie analyse zoutindringing, systematisch onderzoek
(juli 1971)
- M 896 - 16 : Turbulentie metingen (december 1971)
- M 896 - 17 : Systematisch onderzoek variatie randvoorwaarden en stro-
mingscondities met bodemruwheid (december 1972)
- M 896 - 19 : Schaalonderzoek, variatie verticale schaal (september 1972)
- M 896 - 21 : Invloed afsluiting Oosterschelde op zoutbezwaar bij
Volkeraksluizen (januari 1973)
- M 896 - 22 : Samenvatting onderzoek 1967 - 1972 (mei 1973)

1. Inleiding

In een getijrivier worden achtereenvolgende getijden gekenmerkt door verschillende waarden van opperwaterafvoer, middenstand (= gemiddelde waterdiepte) en/of amplitude van de vertikale getijbeweging in de mond van de rivier. Een verandering van de waarde van deze grootheden heeft tot gevolg:

- een ogenblikkelijke verandering van de vloedweg en een daarmee gepaard gaande verandering in de zouttoestand, veroorzaakt door het convectieve transport van zout ¹⁾
- een langzame verandering in de longitudinale zoutverdeling veroorzaakt door veranderingen in het dispersief zouttransport ¹⁾.

De tijd, nodig voor veranderingen in de longitudinale zoutverdeling als gevolg van veranderingen in opperwaterafvoer, middenstand en/of getij-amplitude, kan vooralsnog uitsluitend door middel van proeven worden bepaald. Om meer inzicht te verkrijgen in de snelheid waarmee en in de wijze waarop de longitudinale zoutverdeling in getijrivieren zich aan veranderde omstandigheden aanpast, heeft op de maandelijkse bespreking, d.d. 18 juni 1971, aangaande het getijgootonderzoek de Waterloopkundige Afdeling van de Deltadienst, Rijkswaterstaat, het Waterloopkundig Laboratorium opdracht gegeven tot uitvoeren van een beperkt aantal proeven met verschillende omstandigheden bij achtereenvolgende getijden.

Deze proeven worden in het vervolg aangeduid met "duurproeven". Het onderzoek is uitgevoerd aan het eind van 1971 en het begin van 1972 door ir. A. van Mazijk, die tevens dit rapport samenstelde.

2. Voorstel voor te onderzoeken, in opeenvolgende getijden veranderende grootheden

In het vervolg worden de overwegingen weergegeven, die geleid hebben tot de keuze van de te onderzoeken, in opeenvolgende getijden veranderende grootheden.

¹⁾ Voor een toelichting van de begrippen "convectief" en "dispersief" wordt verwezen naar rapport M 896 - 22, Samenvatting Onderzoek 1967-1972, appendix I.

- opperwaterafvoer. Daar voor de praktijk perioden met toenemende afvoer minder interessant zijn, dan perioden met afnemende afvoer, en daar de perioden met lage afvoer als regel voldoende lang zijn (circa 1 maand, zie fig. 27 uit [1]²⁾), om de zouttoestand zich volledig aan de lage afvoeren te doen aanpassen, zijn proeven met een variërende bovenafvoer bij het onderhavige onderzoek buiten beschouwing gelaten. Een inzicht over de invloed van de bovenafvoer op de evenwichtssituatie wordt gegeven in rapport M 896 - 10: Systematisch onderzoek randvoorwaarden en stromingscondities [2].
- middenstand (gemiddelde waterdiepte). Opwaaiing geeft een ogenblikkelijke landinwaartse verschuiving van de watermassa in de rivier. Deze verschuiving kan worden bepaald door middel van getijberekeningen. De toename van de zoutpenetratie ten opzichte van de toestand vóór de middenstandsverhoging zal in eerste benadering gelijk zijn aan de afstand, waarover de watermassa in de rivier zich landinwaarts verplaatst. Afhankelijk van de gevoeligheid van de zoutverdeling voor veranderingen in de randcondities, kan een middenstandsverhoging een toename van de zoutindringing tot gevolg hebben, die groter is, dan de afstand waarover de watermassa zich landinwaarts verplaatst.
Om een inzicht te verkrijgen over het verloop van de zoutverdeling tijdens een verhoging van de middenstand in vergelijking met de bij de verhoogde middenstand behorende "evenwichtssituatie"³⁾ zijn proeven, waarbij de middenstand wordt verhoogd, opgenomen in het meetprogramma (par. 6). Daarbij is nagegaan hoe snel de zoutverdeling zich aan de veranderende situatie aanpast.
- maandelijkse variatie en dagelijkse ongelijkheid van het verticale zeegetij. Uit het systematisch onderzoek variatie randvoorwaarden en stromingscondities in de getijgoot [2] blijkt dat de zoutindringing in de Rotterdamse Waterweg (situatie 1956) bij een waterdiepte van 13,80 m weinig gevoelig is voor kleine veranderingen in de getij-amplitude, indien deze groter dan of gelijk aan 0,80 m prototypemaat is (getijverschil is dan 1,60 m) [3]. Op grond hiervan lijkt het redelijk een snelle aanpassing van de zoutindringing aan de getij-omstandigheden te verwachten.

2) De verwijzing naar de literatuur wordt in de tekst aangegeven met [].

3) Onder "evenwichtssituatie" wordt verstaan de zouttoestand, welke op den duur ontstaat, wanneer een getijbeweging zich periodiek herhaalt.

Indien de getij-amplitude kleiner is dan 0,80 m, is de zoutindringing wel gevoelig voor kleine veranderingen in de amplitude en wel gevoeliger naarmate de getij-amplitude kleiner wordt.

Voor de situatie nà deltaplan (= afgesloten Haringvliet en regulatie van de Rijn) en een waterdiepte van 15,80 m is de zoutpenetratie voor veranderingen in de randcondities eveneens gevoelig [2], [4].

Bovenstaande punten gaven aanleiding tot het opnemen van proeven, waarbij de getij-amplitude (vertikaal zeegetij) varieert gedurende opeenvolgende getijden, in het meetprogramma (zie par. 6).

3. Meetopstelling (Fig. 1)

De getijgoot, waarin de proeven zijn uitgevoerd, is een 101,5 m lange goot met een rechthoekig profiel, waarvan de afmetingen zijn 0,67 m (breed) en 0,50 m (diep). De bodem van de goot 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 vertikale getijbeweging verkregen worden. In het bassin bevindt zich zout water (zeewater), waarvan de dichtheid op een gewenste waarde door middel van injectie van pekelwater kan worden ingesteld.

Met behulp van een op dichtheid controlerend regelmechanisme wordt de hoeveelheid geïnjecteerd pekelwater zodanig geregeld, dat de dichtheid van het zeewater in het zeebassin 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. Het horizontale getij (debieten) aan het bovenstroomse einde wordt geregeld met behulp van een getijtank.

Onafhankelijk van het horizontale getij kan aan het bovenstroomse einde van de goot een constant in te stellen debiet (bovenafvoer) worden toegevoerd.

Om de benodigde ruwheid, overeenkomend met een Chézy-coëfficiënt groot $60 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$ prototypeschaal (zie ook par. 5.3.) te verkrijgen, zijn in de goot vierkante messing staafjes ($5 \times 5 \text{ mm}^2$) aangebracht. De staafjes reiken tot boven de waterspiegel.

4. Gekozen schalen

Daar de uit te voeren proeven informatie moeten verschaffen over het zoutgedrag in de Rotterdamse Waterweg onder invloed van veranderende rand-

condities, zijn in eerste instantie dezelfde schalen gekozen als voor het onderzoek "Reproductie Rotterdamse Waterweg in getijgoot" [3].

Deze schalen zijn: verticale schaal 64 en horizontale schaal 640⁴⁾.

Om te voorkomen dat de zoutverdeling door de bocht in de getijgoot (par. 3) zou worden beïnvloed, is bij de proeven waarbij een zoutindringing tot voorbij de bocht mocht worden verwacht, een lengteschaal van 1280 in plaats van 640 toegepast.

Invloeden van de gekozen schalen op de proefresultaten zijn op grond van rapport M 896 - 13: "Schaalonderzoek"[5] gering te achten. Evenwel zij opgemerkt, dat het schaalonderzoek beschreven in rapport M 896 - 13, betrekking had op een zich periodiek herhalend verschijnsel (periode = getijperiode).

De metingen werden bij het schaalonderzoek pas verricht nadat het zich periodiek herhalend verschijnsel als "evenwichtssituatie" had ingesteld.

Daarom zijn ter controle een aantal proeven zowel met een lengteschaal van 640 als met een lengteschaal van 1280 uitgevoerd.

De dichtheidsschaal is bij alle proeven gelijk aan één.

5. Instelling getijgoot

5.1. Zeerand

5.1.1. Algemeen

Met de regelklep van het zeebassin (zie fig. 1) wordt de waterstand in het zeebassin geregeld. Deze klepregeling is zodanig dat een willekeurige verticale getijbeweging gesuperponeerd op een willekeurig te kiezen al dan niet variabel in de tijd, gemiddelde waterstand kan worden ingesteld. (In het vervolg wordt gemiddelde waterstand of waterdiepte over de getijperiode kortweg middenstand genoemd.)

De waterstand in het zeebassin en daarmee de waterdiepte in de mond van de getijgoot (= zeerand getijgoot) kan als functie van de tijd dus als volgt geschreven worden:

$$H(t) = H_0 + w(t) + h_0(t) \quad (1)$$

⁴⁾ Onder schaal wordt in dit rapport verstaan: prototypemaat gedeeld door modelmaat.

waarin:

- $H(t)$: momentane waterdiepte ter plaatse van de zeerand c.q. mond getijgoot (overgang tussen de goot en het zeebassin)
 H_0 : referentie waterdiepte; waterdiepte waarvan wordt uitgegaan
 $w(t)$: momentane middenstandsverhoging, gemeten ten opzichte van de referentie waterdiepte
 $h_0(t)$: momentane vertikale getij, gemeten ten opzichte van de momentane middenstand.

Bij de uitgevoerde proeven was $H_0 = 13,80$ m prototypemaat, terwijl voor $h_0(t)$ voor alle proeven een sinusvormig getij is genomen met amplitude a_0 (getijverschil is dan $2a_0$). Voor $h_0(t)$ kan dus geschreven worden:

$$h_0(t) = a_0 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (2)$$

waarin:

- t : tijd in sec.
 T : duur van een getijperiode in sec.
 a_0 : amplitude van het momentane vertikale getij

De saliniteit van het water in het zeebassin is bij alle proeven op een waarde van ca. 30 ‰ ingesteld, waardoor het dichtheidsverschil $\Delta\rho$ tussen zout en zoet water ca. 21 kg/m^3 bedraagt. De hierin optredende afwijkingen zijn een gevolg van temperatuurschommelingen.

5.1.2. Proeven met opwaaiing (middenstandsverhoging, zie fig. 2)

Bij de uitgangssituatie van alle proeven geldt $w(t) = 0$. De getij-amplitude $a_0 = 0,80$ m prototypemaat (getijverschil 1,60 m). De middenstandsverhoging bedraagt voor alle proeven 2 m. Het verloop van de momentane middenstandsverhoging $w(t)$ van de uitgangssituatie $w(t) = 0$ naar de eindsituatie $w(t) = 2$ m is volgens een cosinus, waarbij het aantal getijden n (getijperiode T), waarin de middenstand met 2 m toeneemt, variabel is. Voor de periode, waarover de momentane middenstandsverhoging $w(t)$ loopt van 0 tot 2 m prototypemaat, kan geschreven worden:

$$w(t)/(\frac{1}{2}\Delta w) = (1 - \cos \frac{\pi(t - T)}{nT}) \text{ voor } T \leq t \leq (n + 1)T \quad (3)$$

waarin:

- $w(t)$: momentane middenstandsverhoging ten opzichte van referentie waterdiepte
 Δw : verschil in middenstand tussen eind en begin van beschouwde periode

- t : tijd, gemeten vanaf één getijperiode T vóór verhoging (zie fig. 2)
n : aantal getijden met periode T, gedurende welke de middenstandsverhoging van 2 m tot stand komt (zie fig. 2)
T : duur getijperiode

Op de proeven 185.00, 193.00 en 193.01 na, bleef de verhoogde middenstand ($H_0 + 2$ m) na verhoging gehandhaafd, waarbij de aanpassing van de zoutverdeling bij de verhoogde middenstand werd gemeten. Vergelijking 1 wordt dan voor deze proeven (zie fig. 2):

- bij uitgangssituatie:

$$H(t) = 13,80 + 0,80 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad \text{voor } t < T$$

- gedurende de verhoging:

$$H(t) = 13,80 + \left(1 - \cos \frac{\pi(t - T)}{nT}\right) + 0,80 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad \text{voor } T \leq t \leq (n + 1)T$$

- bij verhoogde middenstand:

$$H(t) = 15,80 + 0,80 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad \text{voor } (n + 1)T < t$$

Bij de proeven 185.00, 193.00 en 193.01 werd na verhoging van de middenstand weer terugggegaan naar de uitgangssituatie, waarbij het verloop eveneens volgens een cosinus was. De functie $w(t)$ heeft gedurende deze teruggang naar de uitgangssituatie de volgende vorm:

$$w(t)/(\frac{1}{2}\Delta w) = \cos \frac{\pi(t - (n + 1)T)}{mT} + 1 \quad (4)$$

$$\text{voor } (n + 1)T \leq t \leq (n + m + 1)T$$

waarin:

- t : tijd gemeten vanaf één getijperiode T vóór verhoging (zie fig. 2)
m : aantal getijden met periode T, gedurende welke de middenstand verlaagd wordt van de verhoogde situatie terug naar de uitgangssituatie.

Vergelijking (1) wordt dan voor bovengenoemde drie proeven (zie fig. 2):

- bij uitgangssituatie:

$$H(t) = 13,80 + 0,80 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad \text{voor } t < T$$

- gedurende de verhoging:

$$H(t) = 13,80 + \left(1 - \cos \frac{\pi(t - T)}{nT}\right) + 0,80 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad \text{voor } T \leq t \leq (n + 1)T$$

- gedurende de verlaging:

$$H(t) = 13,80 + \left(\cos \frac{\pi(t - (n + 1)T)}{mT} + 1\right) + 0,80 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

$$\text{voor } (n + 1)T \leq t \leq (n + m + 1)T$$

5.1.3. Proeven met variatie getij-amplitude (zie fig. 3)

Bij deze proeven geldt $w(t) = 0$. De getij-amplitude is bij de uitgangssituatie 0,80 m prototypemaat (getijverschil 1,60 m). Bij proef 186.00 verandert de getij-amplitude van 0,80 m naar 0,50 m prototypemaat in één stap. Vervolgens wordt de getijbeweging met deze kleine getij-amplitude gehandhaafd totdat de zouttoestand zich heeft aangepast. Vergelijking (1) wordt dan:

- uitgangssituatie : $H(t) = 13,80 + 0,80 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$ voor $t \leq T$
- veranderde situatie: $H(t) = 13,80 + 0,50 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$ voor $t > T$.

Bij proef 187.00 is de getij-amplitude slechts gedurende één getijperiode 0,50 m in plaats van 0,80 m (zie fig. 3).

5.2. Rivierrend (bovenstroomse rand)

Aan de bovenstroomse rand van de getijgoot, op een afstand van 101,5 m uit de mond van de getijgoot zijn voorzieningen getroffen om onafhankelijk van elkaar te kunnen instellen: een constant debiet en een variabel debiet aan zoet water.

Het instelbare momentane debiet $Q^*(t)$ kan als volgt worden uitgedrukt:

$$Q^*(t) = Q(t) + \bar{Q} \quad (5)$$

waarin:

$Q^*(t)$: momentane debiet

$Q(t)$: instelbaar variabele bijdrage tot het momentane debiet

$\bar{Q}$: instelbaar constant gehouden bijdrage tot het momentane debiet.

Bij de uitgevoerde proeven is het constante debiet $\bar{Q}$, ook wel bovenafvoer genoemd, $949 \text{ m}^3/\text{s}$ prototypemaat.

Bij de proeven wordt uitgegaan van een fictieve prototypegoot (zie fig. 1) met een lengte $L = 114.660 \text{ m}$ prototypemaat, waarbij de horizontale getijbeweging vergelijkbaar is met de situatie op de Rotterdamse Waterweg in 1956. Bij proef 191.00 evenwel is de lengte $L = 161.460 \text{ m}$ prototypemaat, waarbij de horizontale getijbeweging vergelijkbaar is met de situatie nà deltaplan (afgesloten Haringvliet en regulatie van de Rijn). De bovenstroomse rand van de fictieve prototypegoot is gesloten. Aan deze gesloten rand wordt alleen $\bar{Q}$ toegevoerd.

Bij een lengteschaal van 640 is de lengte L op modelschaal groter dan L_s , de lengte van de getijgoot ($L_s = 101,5 \text{ m}$). Een getijberekening op basis

van de lange golftheorie met verwaarlozing van de invloed van dichtheidsverschillen voor de fictieve prototypegoot met lengte $L = 114.660$ m en 161.460 m levert voor proeven met een lengteschaal van 640 het bijbehorende variabele debiet $Q(t)$, in te stellen op een afstand L_s vanuit de mond van de goot gemeten (= bovenstroomse rand getijgoot), naast $\bar{Q}$ (zie fig. 1).

Voor de bij genoemde getijberekening gehanteerde randinstelling zeerand van de fictieve prototypegoot kan verwezen worden naar par. 5.1. Bij de lengteschaal van 1280 wordt L op modelschaal kleiner dan L_s , zodat in dit geval in de goot op een afstand van $L/1280$ (L prototypemaat) vanaf de zeerand een schot in de goot wordt geplaatst, waarover $\bar{Q}$ wordt ingelaten (fig. 4). Dit geldt evenwel niet voor proef 191.00. Bij deze proef blijft voor $n_1 = 1280$ $L/1280 > L_s$, zodat ook in dit geval de bijbehorende $Q(t)$ met behulp van de getijberekening moet worden bepaald.

5.3. Ruwheid

De bij de proeven ingestelde ruwheid komt overeen met een Chézy-waarde van $60 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ gemeten in het prototype. De daarbij behorende Chézy-waarde in de getijgoot is bepaald via de schaalregel (zie ook rapport M 896 - 6, blz. 9, "Reproductie Rotterdamse Waterweg in getijgoot", [3]).

$$n_C = \sqrt{n_1/n_h} \quad (6)$$

waarin:

- n_C : schaal voor Chézy-waarde
- n_1 : horizontale schaal (lengteschaal)
- n_h : vertikale schaal

Uitgaande van de aldus berekende Chézy-waarde voor de getijgoot is het daartoe benodigde aantal weerstandsstaafjes bij alle proeven bepaald voor een waterdiepte van $13,80$ m prototypemaat. Daar de staafjes boven de waterspiegel uitreiken, betekent een middenstandsverhoging een toename van de ruwheid. Bij een middenstandsverhoging van 2 m prototypemaat (= $3,1$ cm modelmaat) en bij schalen $n_h = 64$ en $n_1 = 640$ treedt ten gevolge van de middenstandsverhoging een toename van de ruwheid op, die overeenkomt met een verlaging van de Chézy-waarde van $19 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ bij een middenstand van $0,216$ m model (= $13,80$ m prototypemaat) naar circa $18 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ bij een middenstand van $0,247$ m model (= $15,80$ m prototypemaat).

6. Proevenprogramma, verrichte proeven

Tabel I : Proeven met opwaaiing

proefnr.	aantal getijden van verhoging (n)	aantal getijden van verlaging (m)	lengteschaal (n_L)	gootlengte (L) [m] prototype
184.01 5)	1	-	640	114.660
185.00 5)	1	1	640	114.660
184.00 6)	1	-	640	114.660
192.00 B 6)	2	-	1280	114.660
194.00 B 6)	4	-	1280	114.660
194.00 C 6)	6	-	1280	114.660
193.00 6)	2	4	1280	114.660
184.03	1	-	640	114.660
188.00	1	-	1280	114.660
189.00	2	-	1280	114.660
193.01	2	4	1280	114.660
191.00	2	-	1280	161.460

- 5) Bij deze proeven is slechts in een aantal punten nabij de bodem van de getijgoot de zoutconcentratie bepaald gedurende opeenvolgende getijden. Tevens is het verloop van de maximale zoutindringing bepaald.
- 6) Bij deze proeven is alleen het verloop van de maximale zoutindringing bepaald gedurende opeenvolgende getijden.

Tabel II : Proeven variatie vert. getij-amplituden

proefnr.	uitgangs-amplitude zeegetij a_0 [m] (prototype)	gewijzigde amplitude zeegetij a_0' [m] (prototype)	aantal getijperioden met gewijzigde amplituden
186.00 7)	0,80	0,50	tot zoutverdeling is aangepast aan gewijzigde getijbeweging
187.00 7)	0,80	0,50	1

- 7) Bij deze proeven is slechts in een aantal punten nabij de bodem van de getijgoot de zoutconcentratie bepaald gedurende opeenvolgende getijden, evenals het verloop van de maximale zoutindringing.

7. Gemeten grootheden en meetmethode

Bij een aantal proeven is de dichtheid slechts gemeten in een aantal punten in de lengterichting (meetstations) op 1,66 cm boven de bodem van de getijgoot als functie van de tijd. De meetstations in de getijgoot worden aangeduid met de dimensieloze grootheid $x/\Delta x$, waarin x de plaats in lengterichting aangeeft ten opzichte van de mond van de goot, terwijl Δx de afstand is tussen twee opeenvolgende meetstations (zie fig. 4).

De grootheid Δx is bij $n_1 = 640 : 3,66$ m (modelmaat) en bij $n_1 = 1280 : 1,83$ m (modelmaat).

Bij de proeven 184.03, 188.00, 189.00, 193.01 en 191.00 is de dichtheid gemeten als functie van plaats en tijd en wel in 8 of 10 meetstations en in 6 punten in de vertikaal in de getijgoot (zie fig. 4). De plaats in vertikale zin wordt aangeduid met de dimensieloze grootheid $y/\Delta y$, waarin Δy is circa 3,5 cm modelmaat, wat overeenkomt met $1/7$ van de gemiddelde waterdiepte bij verhoogde middenstand (= 15,80 m prototypen).

De positie in vertikale zin van de meetpunten worden bepaald ten opzichte van de bodem, waarvoor geldt $y = 0$.

De tijdsaanduiding wordt gegeven in de dimensieloze grootheid t/T , waarbij t de tijd is, gemeten vanaf het begin van de getijperiode, waarbij de uitgangssituatie optreedt, terwijl T de duur van de getijperiode voorstelt ($T = 12$ uur 25 minuten prototypemaat) (zie fig. 2 en 3).

Bij alle proeven is de maximale zoutindringingslengte bepaald in de opeenvolgende getijperiodes. Onder de zoutindringingslengte wordt verstaan de afstand, gemeten vanuit de mond van de goot, waarover het zout nabij de bodem de goot binnendringt. Deze zoutindringingslengten zijn visueel bepaald. Dit is mogelijk doordat aan het zoute water methyleen blauw als kleurstof is toegevoegd (zie ook rapport M896-7: "Invloed getijbeweging en bodemverhoging op zouttoestand", par. 6 [4]).

Bij de presentatie van de dichtheidsmetingen wordt de relatieve dichtheid gehanteerd (par. 8), waaronder wordt verstaan het verschil tussen een gemeten momentane dichtheid ρ en de dichtheid van het zoete rivierwater ρ_0 ten opzichte van het verschil in dichtheid tussen het zoute zeewater ρ_z en het zoete rivierwater ρ_0 : $(\rho - \rho_0)/(\rho_z - \rho_0)$.

De dichtheden zijn gemeten met geleidbaarheidsmeetapparatuur. De fout, welke kan optreden in de gemeten dichtheid bedraagt gemiddeld $\pm 0,5$ kg/m³, in-

clusief de fout gemaakt bij de verwerking van het meetsignaal naar een dichtheid. Dit komt overeen met een fout in de relatieve dichtheid van $\pm 0,05$ bij een dichtheidsverschil $\rho_z - \rho_o$ van 20 kg/m^3 . (Zie ook rapport M 896 - 13, Schaalonderzoek, [5].)

8. Resultaten/Interpretatie

8.1. Proeven met opwaaiing (middenstandsverhoging)

8.1.1. Zoutindringingslengte

Verandering van de middenstand heeft tot gevolg:

- een ogenblikkelijke landinwaartse verschuiving van de watermassa in de rivier (verandering van de vloedweg)
- een langzame verandering in de longitudinale zoutverdeling.

Voor een eerste eenvoudige aanduiding van het zoutgedrag als gevolg van een verandering van de middenstand gedurende opeenvolgende getijden, kan als parameter de maximale zoutindringingslengte worden genomen ($L_1(\text{max.})$).

De toename van de zoutindringing ten opzichte van de toestand vóór de middenstandsverhoging zal in eerste benadering gelijk zijn aan de afstand, waarover de watermassa in de goot zich naar binnen verplaatst.

De ogenblikkelijke binnendringing van de watermassa de goot in ten gevolge van de middenstandsverhoging, kan bepaald worden door middel van getijberekeningen, uitgevoerd voor de prototypegoot (zie ook par. 5.2.) en wel als volgt:

Beschouw de periode tussen twee opeenvolgende tijdstippen van H.W.K. (hoogwaterkentering) in de mond van de goot (d.i. het tijdstip waarop het momentane debiet nul is en waarbij het debiet van vloedrichting in ebrichting verandert). De hoeveelheid water die gedurende deze periode via de mond van de goot de goot in gaat is V_{in} en de hoeveelheid die eruit gaat via de mond is V_{uit} . Hierbij wordt het assenkruis zodanig aangenomen, dat een debiet, dat de goot instroomt vanuit zee positief wordt gerekend en een debiet, dat de goot uitstroomt negatief. (fig. 1.) Dienovereenkomstig is V_{in} positief en V_{uit} negatief, evenals de bovenafvoer $\bar{Q}$. Als de opeenvolgende tijdstippen van H.W.K. worden aangeduid met t_1 resp. t_2 , dan geldt bij een evenwichtssituatie (= uitgangssituatie van de uitgevoerde proeven):

$$V_{\text{in}} + V_{\text{uit}} = \bar{Q}(t_2 - t_1) \quad (7)$$

en

$$t_2 - t_1 = T \quad (t_2 > t_1) \quad (8)$$

Definiëren we nu ΔV als volgt:

$$\Delta V = V_{\text{in}} + V_{\text{uit}} - \bar{Q}(t_2 - t_1) = \int_{t_1}^{t_2} Q_z^*(t) dt - \bar{Q}(t_2 - t_1) \quad (9)$$

dan is bij evenwicht $\Delta V = 0$.

In vgl. (9) is $Q_z^*(t)$: momentane debiet mond getijgoot (zeerland)

$\bar{Q}$: bovenafvoer

$t_2 - t_1$: duur periode lopende van HWK tot HWK.

Gedurende de middenstandsverhoging kan voor de opeenvolgende perioden tussen HWK de ΔV berekend worden (ΔV is dan nl. niet gelijk aan nul) met behulp van de genoemde getijberekening. De tijd t , waarover geïntegreerd moet worden kan daarbij ongelijk aan de getijperiode T worden.

Met de aldus berekende grootheid ΔV wordt een eerste benadering gegeven van de toename van de zoutindringingslengte ten opzichte van de toestand vóór de middenstandsverhoging, en wel als volgt:

$$\Delta V = \Delta L_1 \cdot H(t_2) \cdot B \quad (10)$$

waarin:

ΔL_1 : toename zoutindringingslengte

$H(t_2)$: momentane waterdiepte ter plaatse van de mond van de goot (zeerland) op tijdstip t_2

B : breedte goot

Op dezelfde manier kan ook de afname van de maximale zoutindringing worden benaderd bij het teruggaan van de middenstandsverhoging naar de uitgangssituatie.

De resultaten van de berekeningen zijn voor de proeven weergegeven in de fig. 5 en 6, waarin tevens de gemeten toename van de zoutindringingslengten zijn weergegeven.

In fig. 7 is verder aangegeven de tijdsduur nodig om de zoutverdeling, weergegeven door de zoutindringingslengte, te laten aanpassen aan de verhoogde middenstand, indien deze na het bereiken ervan, wordt gehandhaafd. Naarmate de periode langer wordt, gedurende welke de middenstandsverhoging tot stand komt, wordt de aanpassingstijd (de in fig. 7 als aangeduide periode) korter. Door middel van extrapolatie is een indruk te verkrijgen van het aantal getijperioden, gedurende welke een middenstandsverhoging van 2 m prototype ($L = 114.660$ m prototypemaat) tot stand wordt gebracht, zonder dat het zout zgn. doorschiet. (De aanpassingstijd aan de verhoogde middenstand is dan gelijk nul.)

Onder doorschieten wordt in het vervolg verstaan het verder doordringen van het zout dan bij de evenwichtssituatie optreedt (zie noot 3 op blz. 2).

In overeenstemming met het bovenstaande neemt het verschil tussen de berekende en de gemeten zoutindringing, direct nadat de middenstandsverhoging is bereikt, toe, naarmate de periode langer wordt, gedurende welke de middenstandsverhoging tot stand komt. Dit maakt het eveneens mogelijk om het aantal getijperioden van verhoging te bepalen, waarbij het zout niet doorschiet. Hiertoe wordt in figuur 7 het verschil tussen de berekende en gemeten zoutindringing bij de eerste H.W.K. nadat de middenstand is verhoogd: ΔL_1 (top), beschouwd ten opzichte van het verschil tussen de berekende zoutindringing direct na verhoging van de middenstand ten opzichte van de gemeten zoutindringing na aanpassing aan de verhoogde middenstand: ΔL_1 (evenwicht). Het blijkt, dat bij deze beschouwing proef 191.00 met $L = 161.460$ m, prototypemaat, dezelfde uitkomst geeft als de proeven 192.00 B en 189.00 met $L = 114.660$ m, prototypemaat, terwijl de overige omstandigheden gelijk waren. Op grond hiervan mag worden aangenomen, dat het aantal getijperioden gedurende welke de middenstand wordt verhoogd, zonder dat het zout doorschiet (aanpassingstijd is gelijk nul) onafhankelijk is van de waarde van L .

De extrapolaties voor bovenstaande beschouwingen uitgevoerd (fig. 7), duiden erop, dat indien de middenstandsverhoging van 2 m (prototype) gerealiseerd wordt in 12 à 13 getijperioden, de aanpassingstijd gelijk nul verondersteld mag worden, hetgeen overeenkomt met een middenstandsverhoging van gemiddeld 15 à 16 cm per getijperiode ofwel 30 cm per dag.

In de figuren 8 t/m 12 wordt het verloop van de maximale relatieve dichtheid aan oppervlakte en bodem voor opeenvolgende getijperioden gegeven. Het moment waarop de maximale relatieve dichtheid wordt gemeten ligt rond hoogwaterkentering (H.W.K.).

De resultaten van de dichtheidsmeting aldus in de figuren 8 t/m 12 weergegeven, stemmen overeen met het verloop van de maximale zoutindringingslengte, gepresenteerd in de fig. 5 en 6.

De uitgevoerde berekeningen voor de proeven, waarbij de middenstand na verhoging vervolgens weer wordt verlaagd tot de middenstand, behorende bij de uitgangssituatie, benaderen het gemeten verloop van de maximale zoutindringing zeer goed (fig. 6). Gesteld mag worden, dat bij deze omstandigheden de berekeningen als benadering voor de bepaling van de toename van de zoutindringing ten gevolge van de middenstandsverhoging als wel van de afname van de zoutindringing bij het weer teruggaan van de middenstand naar de uitgangssituatie goed voldoen.

De proeven 184.03 en 188.00, welke respectievelijk uitgevoerd zijn met lengteschalen van 640 en 1280, terwijl de overige omstandigheden identiek waren, vertonen geen significante verschillen in de gemeten zoutindringing, zodat gesteld mag worden, dat er geen invloed is van de gekozen lengteschaal (1280 in plaats van 640 bij de meeste proeven) op de proefresultaten (zie fig. 5).

Vergelijk in dit verband ook proef 184.01 met 184.03, welke beide uitgevoerd zijn bij een lengteschaal van 640.

8.1.2. Longitudinale zoutverdeling

Hoe de longitudinale zoutverdeling zich gedurende opeenvolgende getijperiodes bij een middenstandsverhoging wijzigt, wordt voor proeven, waarbij de middenstandsverhoging in 1 à 2 getijperioden wordt gerealiseerd, weergegeven in de figuren 13 tot en met 26, en wel voor het moment van hoogwaterkentering (H.W.K.).

In de figuren 13 tot en met 17 wordt de longitudinale zoutverdeling gegeven door middel van lijnen van gelijke relatieve dichtheid.

In de figuren 18 tot en met 22 zijn zoutvertikalen gegeven voor tijdstippen overeenkomend met hoogwaterkentering in de respectievelijke meetstations. De dichtheid is relatief uitgezet. Door globaal de plaats in verticale zin te bepalen, waar de zoutconcentratie 50% van de zoutconcentratie aan de bodem is, kan het verloop van de overgang van zout naar zoet water in longitudinale zin geschetst worden. In de figuren 23 tot en met 26 wordt de longitudinale zoutverdeling gegeven door middel van gemiddeld over de vertikaal genomen relatieve dichtheid.

Uit de figuren blijkt, dat we onderscheid moeten maken tussen twee verschillende vormen van verandering van de zouttoestand tijdens en direct na de verhoging:

- a. een verschuiving van de longitudinale zoutverdeling met de verandering van de vloedweg de goot in, waarbij de zoutverdeling op zich niet verandert (een met de gemiddelde snelheid meebewegende toeschouwer zou geen wijzigingen in de zoutverdeling waarnemen): convectief zouttransport ⁸⁾.
- b. De zoutverdeling wil zich aanpassen aan de veranderde middenstand c.q. stromingscondities: dispersief zouttransport, waarbij diffusief zouttransport is inbegrepen. ⁸⁾

⁸⁾ Zie noot 1 blz. 1.

Bij een middenstandsverhoging, welke in 1 à 2 getijperioden wordt gerealiseerd, overheerst in eerste instantie het convectief zouttransport. Daarna treedt er verdere aanpassing aan de veranderde stromingscondities op onder invloed van het dispersief zouttransport.

Naarmate de middenstandsverhoging langzamer tot stand komt, zal de aanpassing van de longitudinale zoutindringing zich aan de gewijzigde stromingscondities in steeds grotere mate reeds kunnen voltrekken gedurende de verhoging onder invloed van het genoemde dispersieve transport (zie ook fig. 5 en 6).

Bij een vergelijking van de longitudinale zoutverdelingen van de proeven 184.03 ($n_1 = 640$) en 188.00 ($n_1 = 1280$) blijken over het geheel genomen tussen beide proeven geen verschillen op te treden, op grond waarvan geconcludeerd kan worden, dat er een invloed is van de gekozen lengteschaal op de proefresultaten. (Fig. 8, 13, 14, 18, 19 en 23.)

8.2. Proeven variatie vertikale getij-amplitude

De resultaten van de proeven met variatie getij-amplitude (zeegetij) worden weergegeven in de figuren 27 en 28, zijnde het verloop van de maximale relatieve dichtheid aan de bodem, gemeten in de opeenvolgende getijperioden, naast de maximale zoutindringing.

Het tijdstip, waarop de maximale relatieve dichtheid en maximale zoutindringing optreden, ligt rond hoogwaterkentering (H.W.K.).

Bij de proeven met een variatie in de getij-amplitude ($a_0 = 0,80$ m naar 0,50 m prototypemaat) treedt er een verkleining van de vloedweg op als gevolg van de afname van de getij-amplitude. Hierdoor wordt de maximale zoutindringing in eerste instantie kleiner (convectief transport), hetgeen door de proeven wordt bevestigd (zie ook par. 8.1.1.).

Voor proef 187.00 is een zelfde berekening als in par. 8.1.1. uitgevoerd voor de verandering van de maximale zoutindringing L_1 . Uit het verschil tussen gemeten en berekende zoutindringing (fig. 28 a) blijkt dat het dispersieve zouttransport, dat zorgt voor de aanpassing aan de veranderde stromingscondities c.q. kleinere getij-amplitude waarbij voor de evenwichtssituatie een grotere zoutindringing behoort dan bij de grotere getij-amplitude, reeds tijdens de verandering van de getij-amplitude niet verwaarloosbaar is. Dit kan er mede de oorzaak van zijn dat bij het teruggaan naar de grotere getij-amplitude de maximale zoutindringing beduidend groter is dan bij de evenwichtssituatie (vergelijk de snelheid van aanpassing bij proef 186.00, fig. 27 a).

Volgens fig. 29, waarin de maximale zoutindringing als functie van de getij-amplitude wordt weergegeven, varieert de zoutindringing nauwelijks voor getij-amplituden (a_0) groter dan 0,80 m prototypemaat. Verwacht kan worden, dat bij een vergroten van de getij-amplitude de zoutindringing maximaal zal toenemen (doorschieten) met de waarde waarmee de vloedweg toeneemt, om vervolgens zich aan te passen aan de veranderde getij-omstandigheden.

De tijd nodig om zich aan de kleinere getij-amplitude aan te passen bedraagt bij proef 186.00 vier à zes getijden, waarbij de maximale zoutindringing orde 5 à 6 km prototypemaat toeneemt, hetgeen overeenstemt met de zoutindringingslengte gevonden bij het systematische onderzoek beschreven in rapport M 896-10 [2] (zie ook fig. 29). Er treedt bij de proef geen doorschieten van het zout op, dat wil zeggen de zoutindringing wordt niet groter dan die bij een evenwichtssituatie, zoals gevonden in fig. 29.

9. Samenvatting

9.1. Verandering in zoutpenetratie bij middenstandsverhoging

Bij het onderhavige onderzoek wordt de invloed van een middenstandsverhoging (middenstand = gemiddelde, over het getij genomen waterdiepte) op de zoutindringing in een getijrivier als gevolg van een opwaaiing door storm onderzocht. De proeven hiervoor uitgevoerd in de getijgoot zijn qua stromingscondities en randvoorwaarden kwalitatief vergelijkbaar met de situatie in de Rotterdamse Waterweg 1956. Voor het instellen van de bovenstroomse randcondities in de getijgoot is uitgegaan van een prototype goot (par. 5.2.), waarmee de Rotterdamse Waterweg vergeleken kan worden (zie rapport M 896-6, par. 6 [3]). De uitgevoerde proeven leveren de volgende conclusies.

Bij alle uitgevoerde proeven treedt tijdens de middenstandsverhoging een zoutindringing op, die groter is, dan de bij de verhoogde middenstand behorende "evenwichtssituatie" (zie noot 3 blz. 2). Dit verder dan de evenwichtssituatie doordringen wordt in het vervolg aangeduid met "doorschieten". De mate van het doorschieten van het zout wordt hierbij door twee aspecten bepaald (vgl. fig. 7):

- Als gevolg van de middenstandsverhoging verplaatst de watermassa in een rivier zich over een bepaalde afstand landinwaarts. Deze convectieve verplaatsing, welke onmiddellijk plaatsvindt, resulteert in een convec-

tief zouttransport ⁹⁾. De convectieve verplaatsing is de oorzaak van het doorschieten en kan worden berekend door middel van een homogene getijberekening op basis van de lange golftheorie.

- Het dispersief zouttransport ⁹⁾ zorgt ervoor dat de zoutindringing zich aanpast aan de veranderde middenstand. Het effect van het doorschieten wordt hierbij gecorrigeerd.

Het dispersief transport heeft een andere tijdsschaal, dan het convectieve transport: het dispersieve transport verloopt langzamer.

Afhankelijk van de snelheid, waarmee de middenstand verhoogd wordt, is op grond van het bovenstaande de invloed van het dispersieve transport op de zoutindringing in meer of mindere mate reeds merkbaar tijdens de verhoging. Bij langzaam verhogen van de middenstand is het effect van het doorschieten daardoor minder sterk.

- Indien een middenstandsverhoging van 2 m snel tot stand komt (binnen 1 à 2 getijperiodes van 12 u. 25 min. prototypemaat) stemt de landinwaartse verplaatsing van het zout overeen met de bij de middenstandsverhoging behorende convectieve verplaatsing (fig. 5).
- Indien genoemde middenstandsverhoging in een langere periode dan 1 à 2 getijperiodes 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 tijdens de middenstandsverhoging reeds aanpast aan de gewijzigde randcondities is groter naarmate de periode, waarin de middenstandsverhoging tot stand komt langer is. (Fig. 5.)
- Door het aantal getijperiodes gedurende welke de middenstandsverhoging tot stand komt te variëren, terwijl de middenstand na verhoging gedurende de daarop volgende getijcyclus wordt gehandhaafd, kan bepaald worden hoe snel de zoutverdeling zich aan de gewijzigde middenstand na verhoging aanpast als functie van het aantal getijden gedurende welke de middenstandsverhoging tot stand komt. (Fig. 7.) Bij een middenstandsverhoging van 2 m prototypemaat leveren de proeven via extrapolatie als resultaat, dat wanneer deze verhoging tot stand komt gedurende 12 à 13 getijperiodes van 12 u. 25 min. prototypemaat, de zoutverdeling zich tijdens de middenstandsverhoging reeds volledig aan de gewijzigde omstandigheden aanpast. Met andere woorden, het zout schiet niet door. Ook de proef met grotere gootlengte (zie par. 6.2., lengte fictieve prototypegoot), waarbij de horizontale getijbeweging zwakker is (te vergelijken met de getijbeweging welke

⁹⁾ Zie noot 1 blz. 1.

optreedt in de Rotterdamse Waterweg na afsluiting Haringvliet en regulatie van de Rijn), terwijl de overige omstandigheden ongewijzigd waren, duidt erop, dat het zout niet zal doorschieten, indien een middenstandsverhoging van 2 m prototypemaat in 12 à 13 getijperioden plaatsvindt. Uit het bovenstaande volgt, dat er geen doorschieten van het zout zal optreden, indien de middenstand gemiddeld met circa 15 à 16 cm per getijperiode van 12 u. en 25 min. prototypemaat wordt verhoogd, waarbij een lineair verband wordt verondersteld tussen de grootte van de middenstandsverhoging en de periode gedurende welke deze tot stand komt zonder dat het zout doorschiet.

- Indien de verhoging van de middenstand slechts gedurende één of twee getijperioden optreedt en indien de middenstand in de daarop volgende 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 verplaatsing, eveneens te bepalen met behulp van homogene getijberekeningen op basis van de lange golftheorie. (Fig. 6.) 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 2 m prototypemaat.

9.2. Verandering in zoutpenetratie bij verandering van vertikaal getij op zee

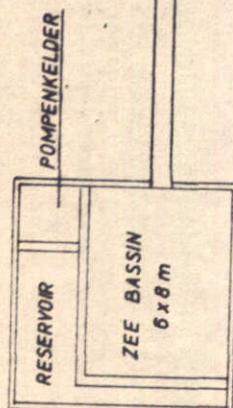
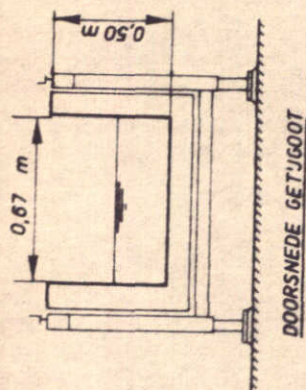
Het onderzoek naar de invloed van variaties in de getij-amplitude van het verticale zeegetij (getijverschil) heeft zich in het onderhavige onderzoek beperkt tot proeven voor de situatie welke kwalitatief vergelijkbaar is met de situatie in de Rotterdamse Waterweg van 1956.

Bij de uitgevoerde proeven (variatie getijverschil van 1,60 m naar 1 m) blijkt naast het convectieve transport als gevolg van de verandering in de vloedweg, het dispersieve transport reeds tijdens de verandering van duidelijke invloed te zijn op de zoutindringing. (Zie fig. 27 en 28; vergelijk berekende en gemeten zoutindringing in fig. 28 a.)

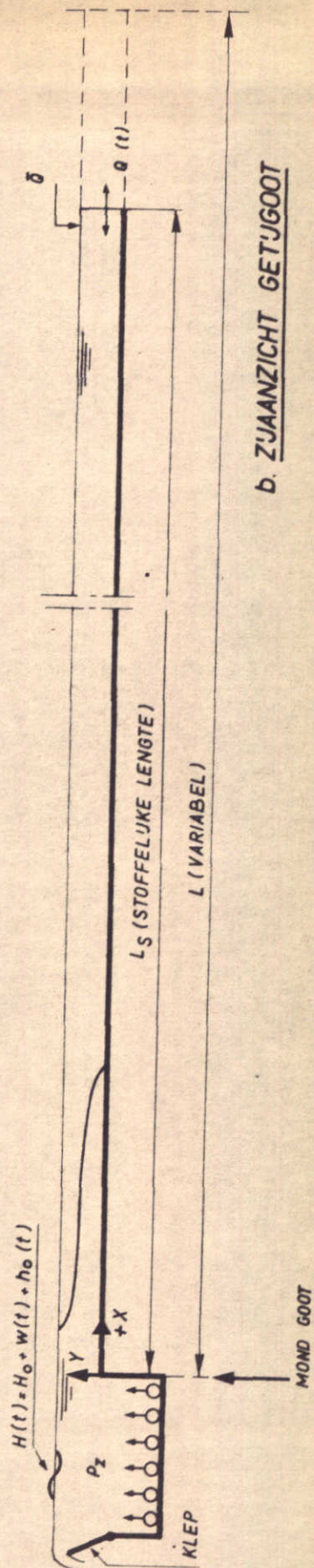
Daar de zoutindringingslengte bij de situatie, zoals die optreedt in de Rotterdamse Waterweg van 1956 weinig varieert bij getijverschillen van 1,20 m tot 3,20 m prototype (zie rapport M 896-10 [2] en fig. 24) mag verwacht worden, dat bij de langzame verandering van de getij-amplitude van dood- naar springtij en omgekeerd, bij genoemde situatie de longitudinale zoutverdeling zich ogenblikkelijk kan aanpassen.

Over de wijze waarop de aanpassing verloopt in de situatie nà afsluiting van het Haringvliet (situatie nà deltaplan, zie par. 2), waarbij de gevoeligheid van de zoutindringing voor veranderingen in de randcondities groter is $[2]$, $[4]$, kan op basis van de gedane proeven geen uitspraak worden gedaan.

RANDINSTELLING	
ZEE	: $H(t); p_z$
RIVIER	: $Q(t); \bar{Q}$



a. PLATTEGROND GETJUGOOT



b. Z'JAANZICHT GETJUGOOT

MEETOPSTELLING GETJUGOOTPROEVEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896-1761

FIG. 1

JB

A4

$$H(t) = H_0 + w(t) + h_0(t)$$

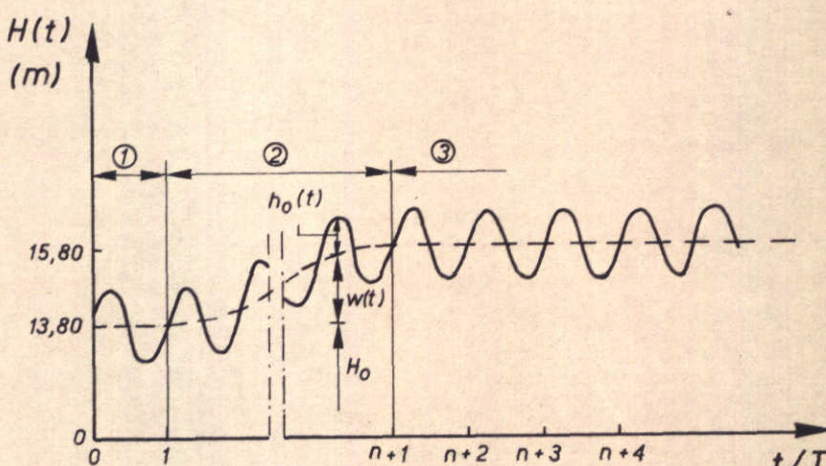
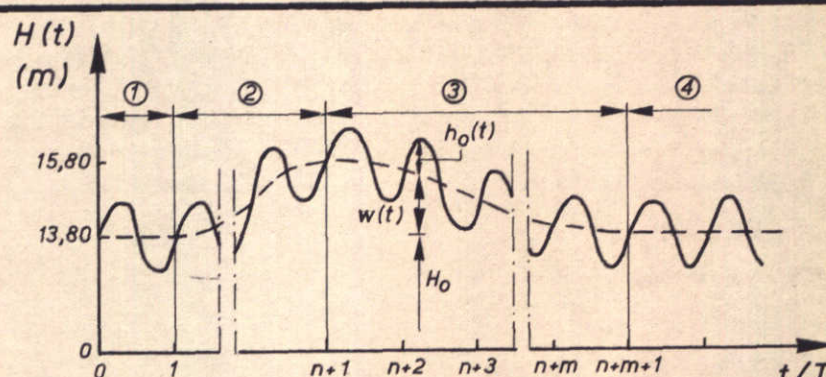
$T = \text{GETJPERIODE}$

$t = \text{TJD}$

$$h_0(t) = 0,80 \sin \left(\frac{2\pi t}{T} \right)$$

ALLE MATEN ZIJN PROTOTYPEMATEN

$$H_0 = 13,80 \text{ m}$$

PROEF- NUMMER	n	m	VERLOOP GETJBEWEGING ZEERAND
184.00	1	0	 ① $w(t) = 0 \dots\dots\dots 0 \leq t/T \leq 1$ ② $w(t) = (1 - \cos \frac{\pi(t-T)}{nT}) \dots\dots\dots 1 \leq t/T \leq n+1$ ③ $w(t) = 2m \dots\dots\dots t/T \geq n+1$ (n GEHEEL)
184.01	1	0	
184.03	1	0	
188.00	1	0	
189.00	2	0	
192.00B	2	0	
194.00B	4	0	
194.00C	6	0	
191.00	2	0	
185.00	1	1	 ① $w(t) = 0 \dots\dots\dots 0 \leq t/T \leq 1$ ② $w(t) = (1 - \cos \frac{\pi(t-T)}{nT}) \dots\dots\dots 1 \leq t/T \leq n+1$ ③ $w(t) = (\cos \frac{\pi(t-(n+1)T)}{mT} + 1) \dots\dots\dots n+1 \leq t/T \leq n+m+1$ ④ $w(t) = 0 \dots\dots\dots t/T \geq n+m+1$ (n en m GEHEEL)
193.00	2	4	
193.01	2	4	
GETJBEWEGING ZEERAND BIJ PROEVEN MET MIDDENSTANDSVERHOOGING			JB A4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM			M.896-1762 FIG.2

$$H(t) = H_0 + w(t) + h_0(t)$$

$T = \text{GETJPERIODE}$

$$w(t) = 0$$

$t = \text{TJD}$

$$H_0 = 13,80 \text{ m}$$

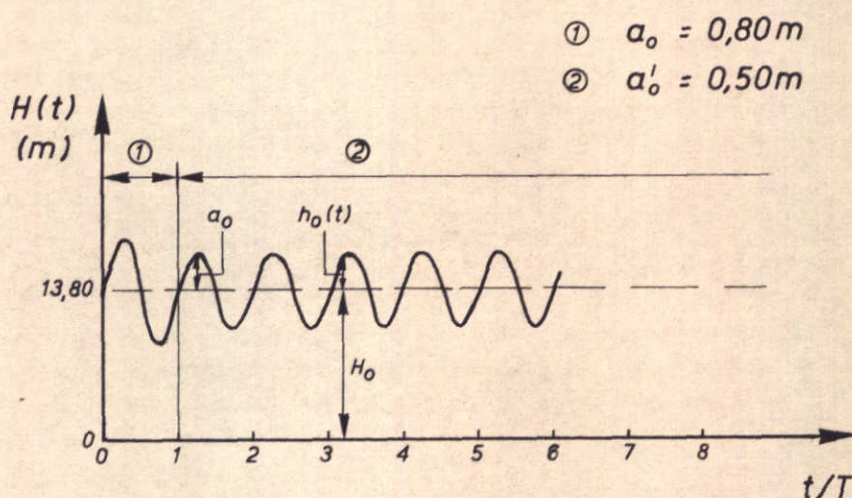
$$h_0(t) = a_0 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

ALLE MATEN ZIJN
PROTOTYPE - MATEN

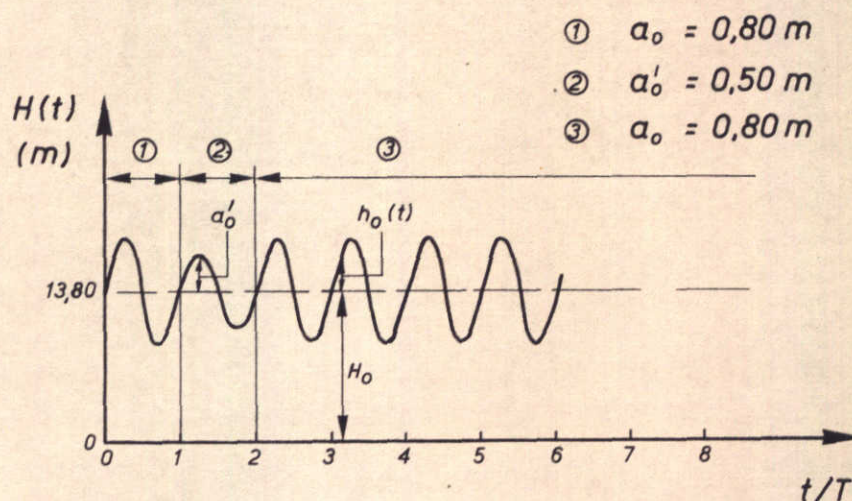
PROEFNUMMER

VERLOOP GETJBEWEGING ZEERAND

186.00



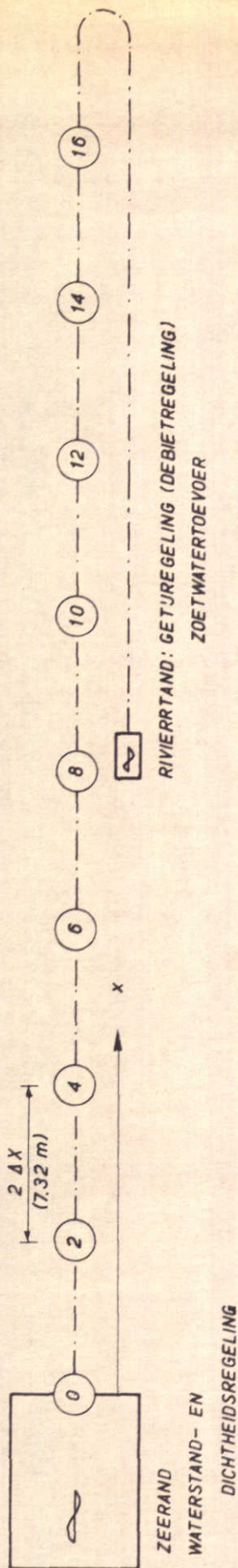
187.00



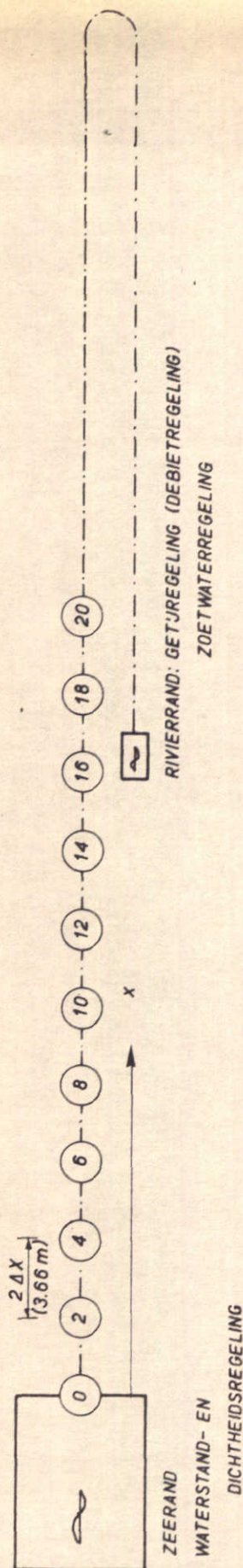
GETJBEWEGING ZEERAND
BIJ PROEVEN MET VARIABLELE GETJAMPLITUDE

JB

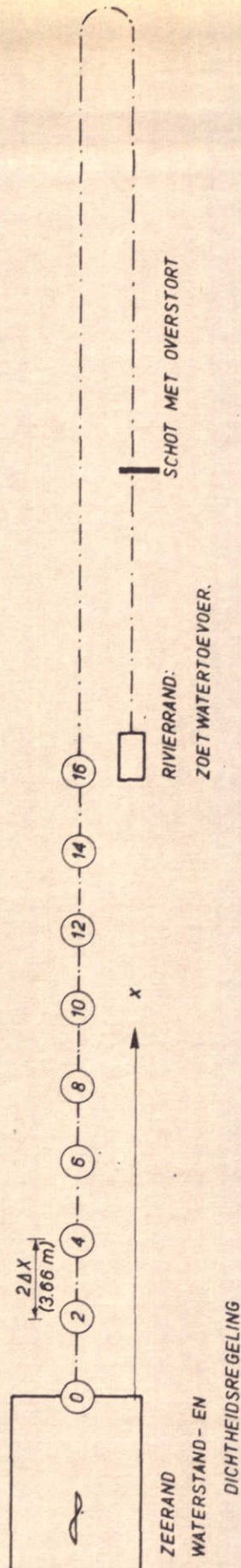
A4



MEETSTATIONS BIJ $n_l/n_h = 640/64$ (PROEF 184.03) $L = 114.660\text{ m}$



MEETSTATIONS BIJ $n_l/n_h = 1280/64$ (PROEF 191.00) $L = 161.460\text{ m}$ (PROTOTYPE)



MEETSTATIONS BIJ $n_l/n_h = 1280/64$ (PROEF : 188.00, 189.00 EN 193.01)
 $L = 114.660\text{ m}$ (PROTOTYPE)

DOORGEMETEN STATIONS BIJ DE DIVERSE PROEVEN
 (STATION-NUMMER UITGEDRUKT IN $x/\Delta x$)

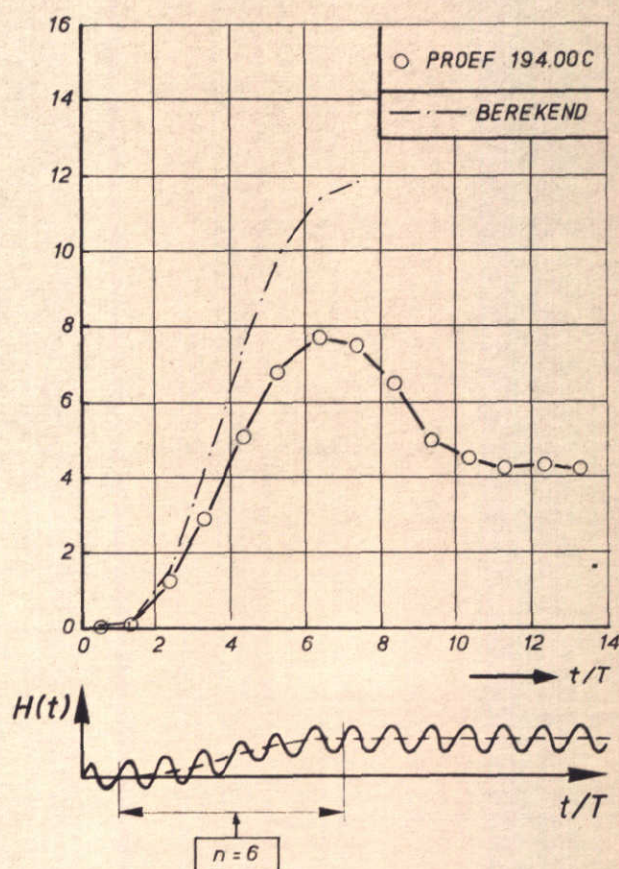
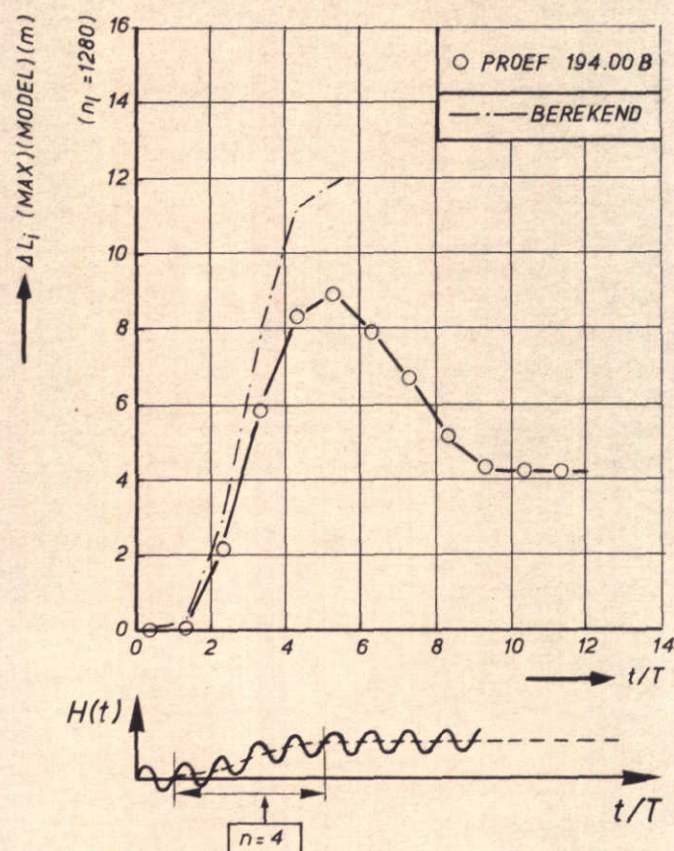
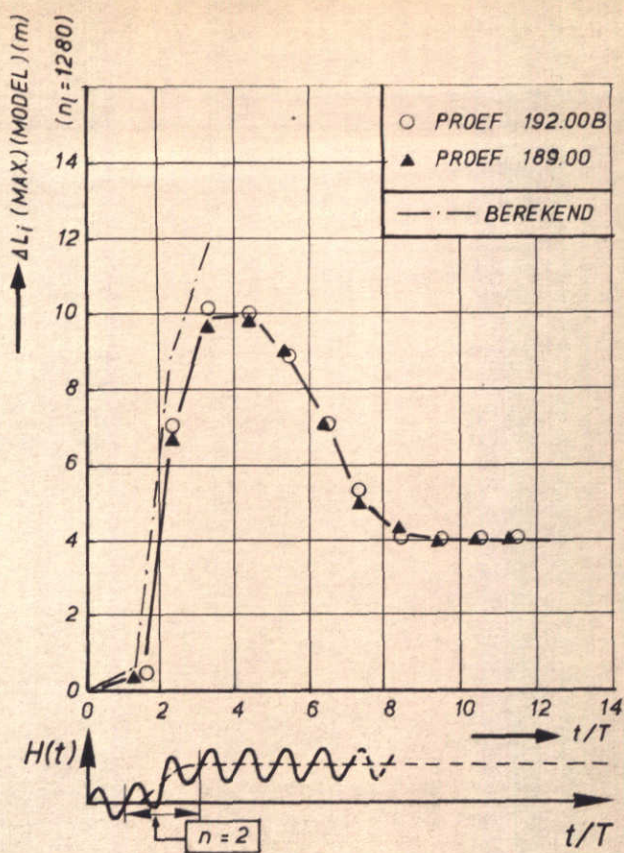
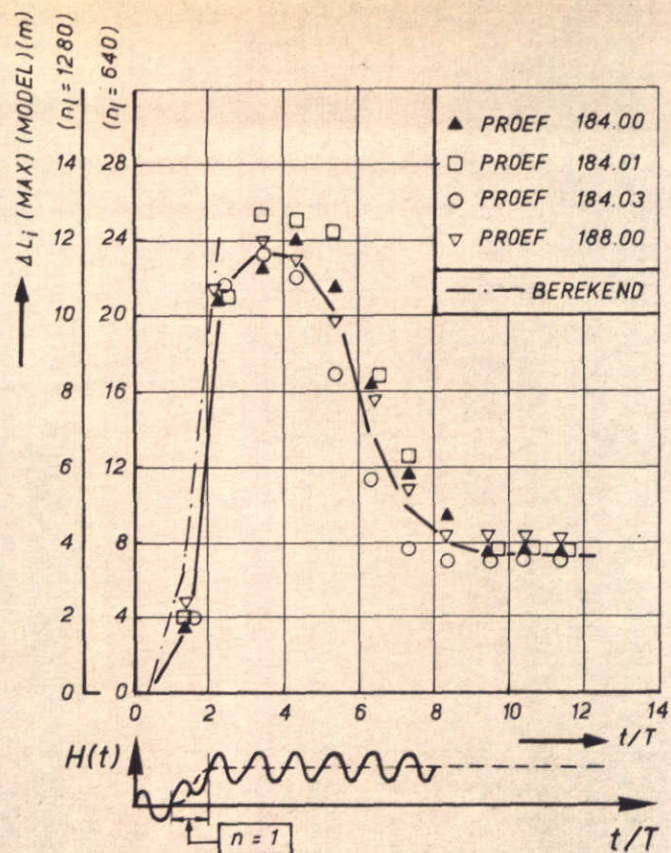
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896-1764

FIG.4

JB

A4



VERLOOP TOENAME MAX. ZOUTINDRINGINGSLENGTE
 $\Delta L_i (\text{MAX})$ - PROEVEN MET MIDDENSTANDSVERHOOGING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

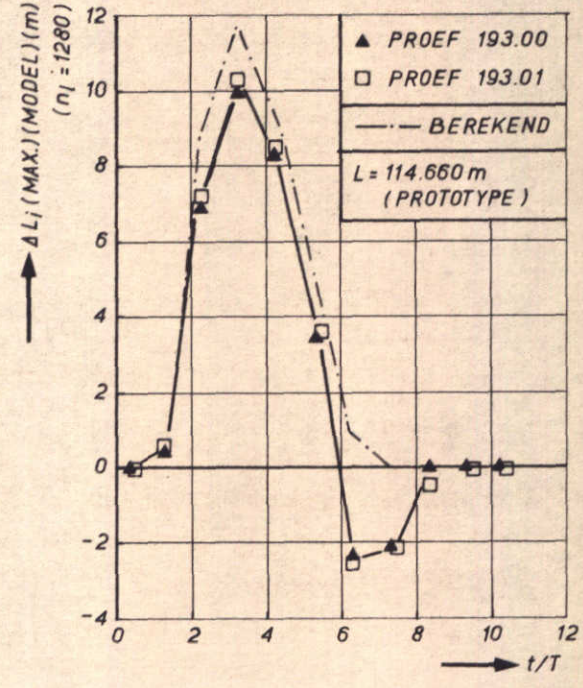
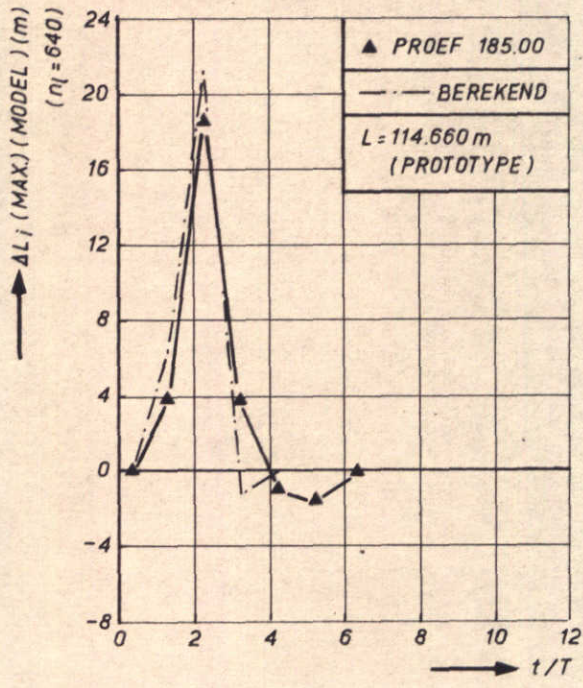
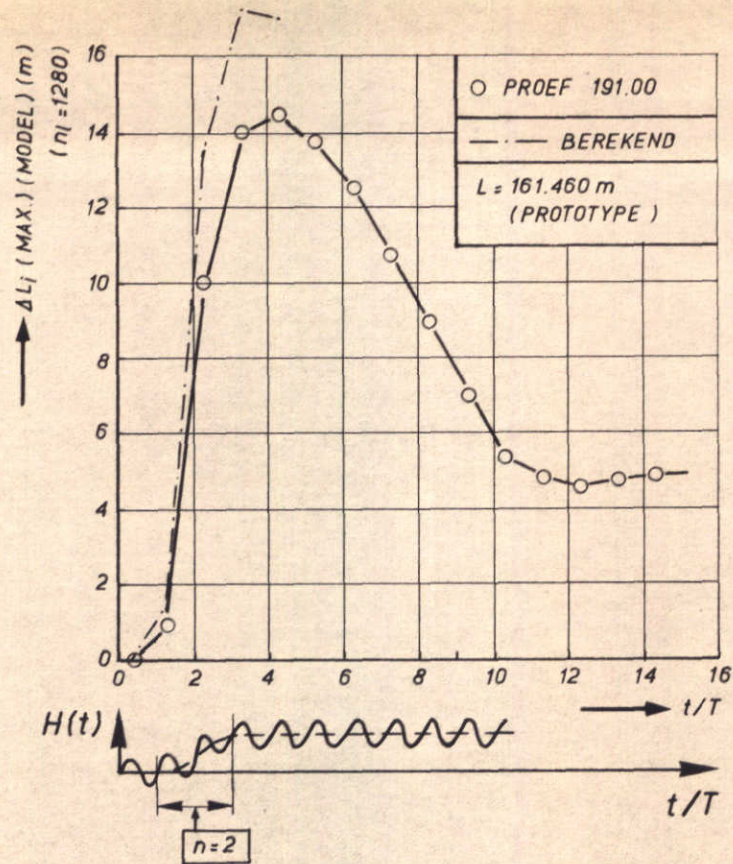
$L = 114.660 \text{ m}$
 (PROTOTYPEMAAT)

M.896-1765

JB

A4

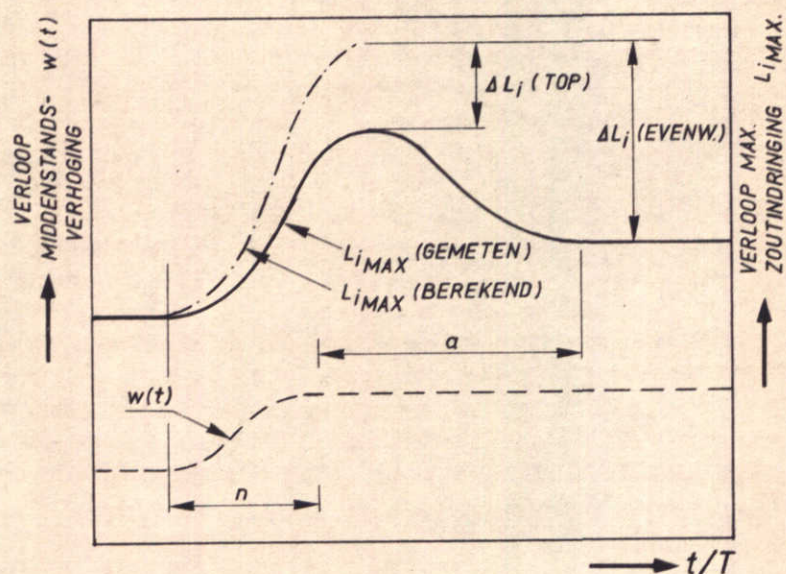
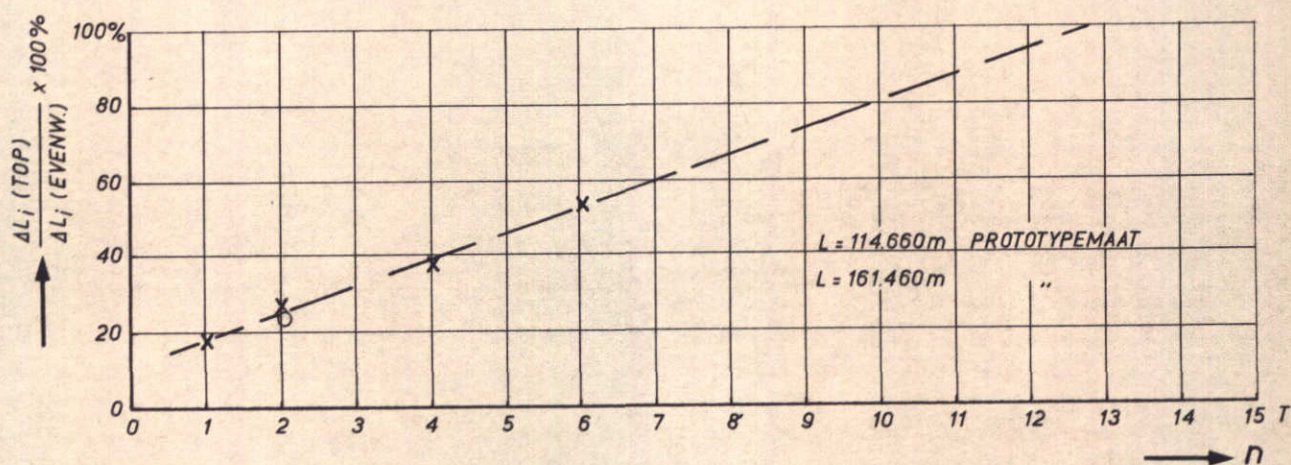
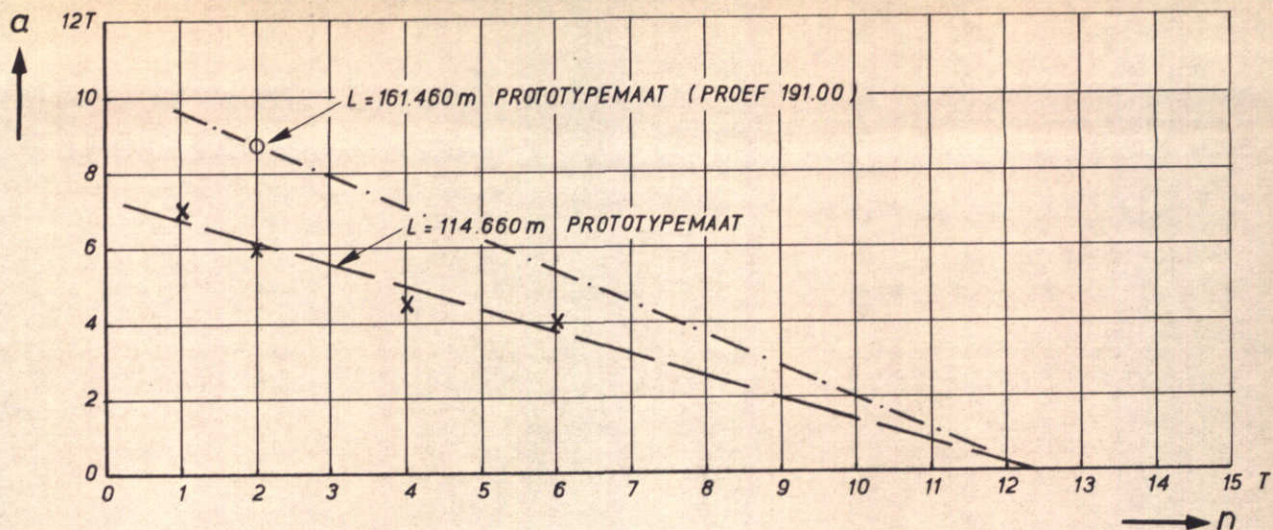
FIG.5



VERLOOP VERANDERING MAX. ZOUTINDRINGINGSLENGTE
 $\Delta L_j (\text{MAX.})$ - PROEVEN MET MIDDENSTANDSVERHOOGING

JB

A4



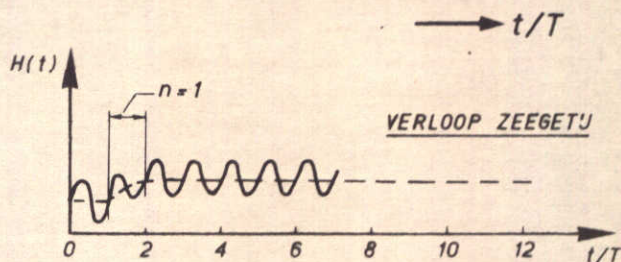
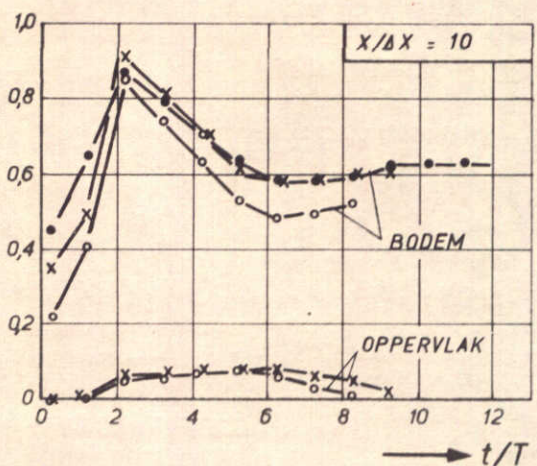
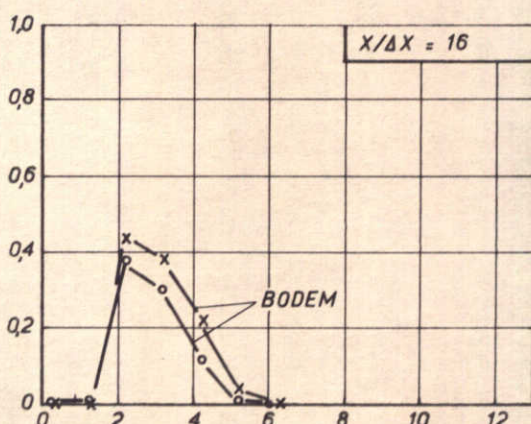
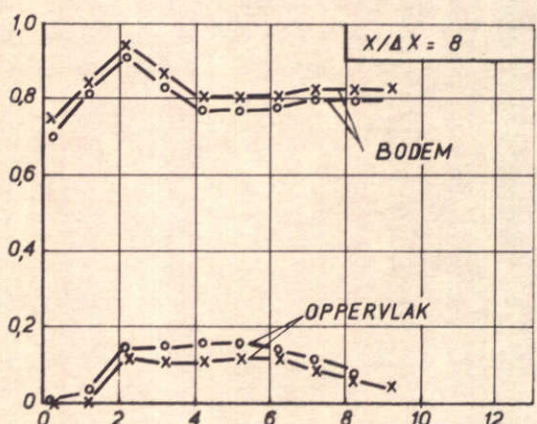
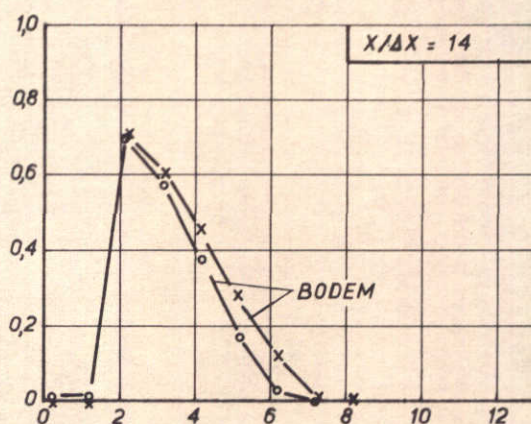
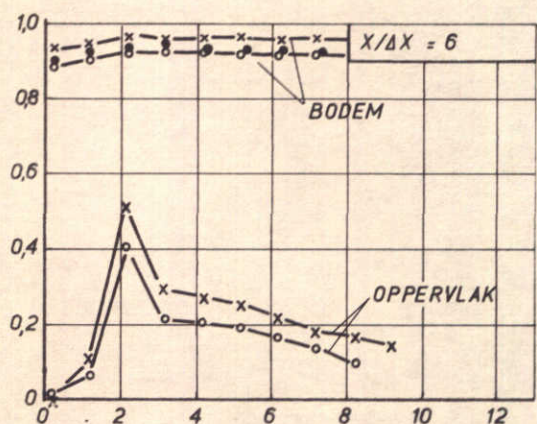
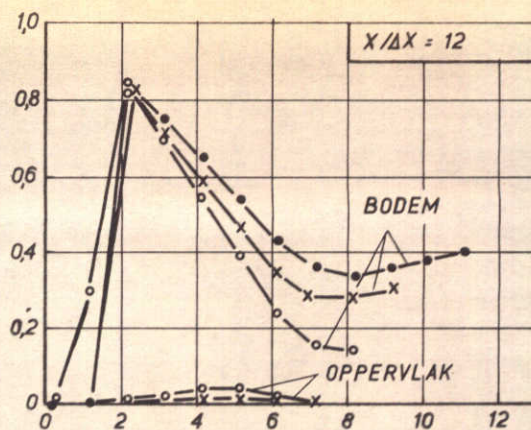
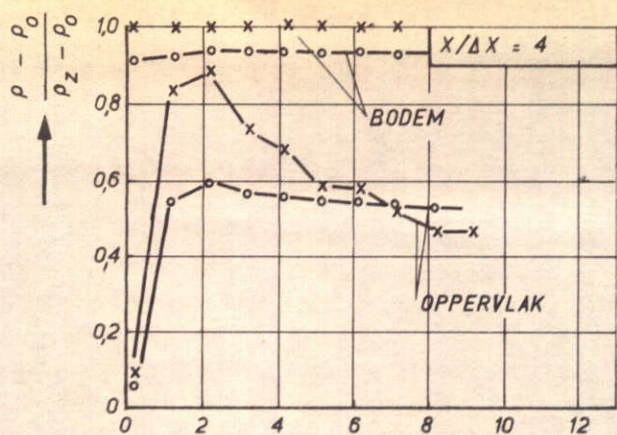
DEFINITIE - SCHETS

n : AANTAL GETJPERIODEN, BINNEN WELKE DE MIDDENSTAND WORDT VERHOOGD.

a : AANPASSINGSTJD VAN DE ZOUTINDRINGING BIJ VERHOOGDE MIDDENSTAND IN AANTAL GETJPERIODEN UITGEDRUKT

$\Delta L_j (TOP)$, $\Delta L_j (EVEN.)$: VERSCHIL MAX. ZOUTINDRINGING TUSSEN BEREK. EN GEM. WAARDE DIREKT NA DE MIDDENSTANDS-VERHOOGING RESP. NA DE AANPASSINGSTJD (BIJ EVENWICHT)

BEPALING AANTAL GETJDEN, WAARBJ AANPASSINGSTJD AAN VERHOOGDE MIDDENSTAND NUL IS.



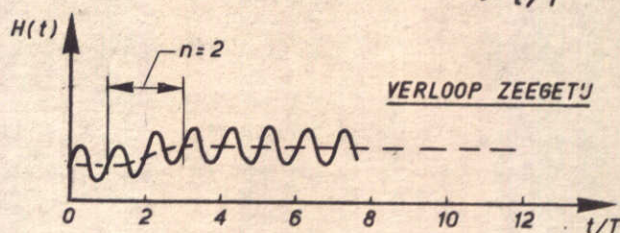
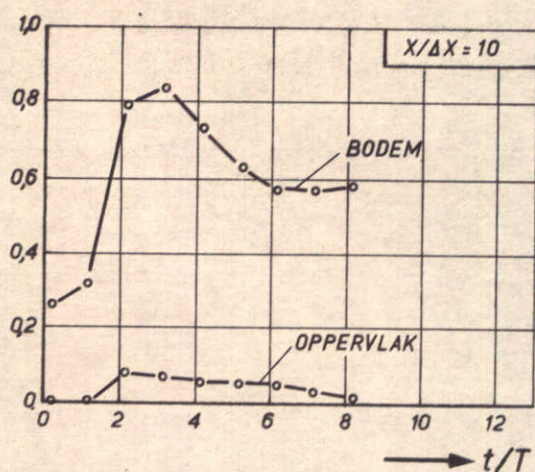
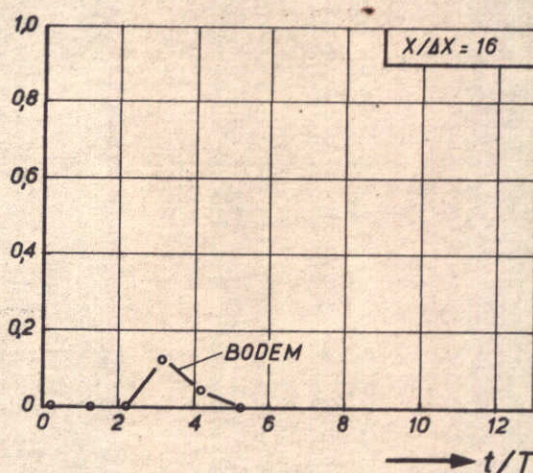
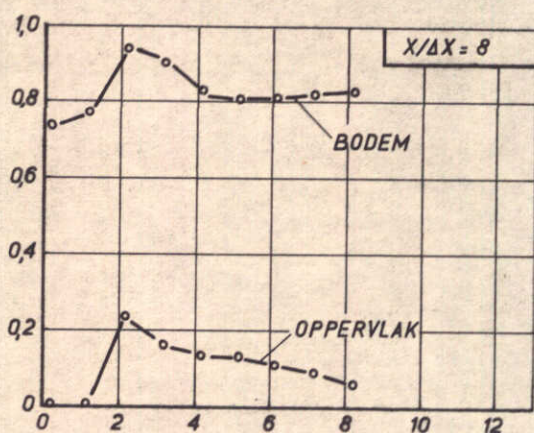
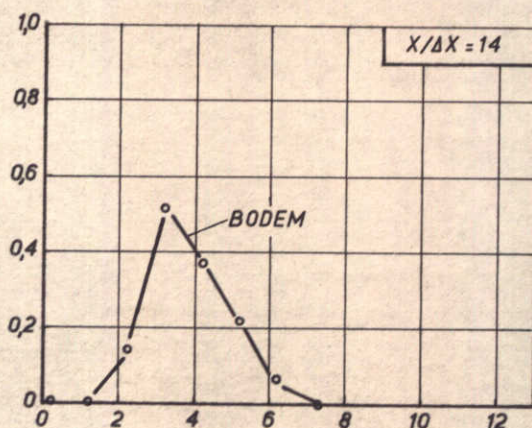
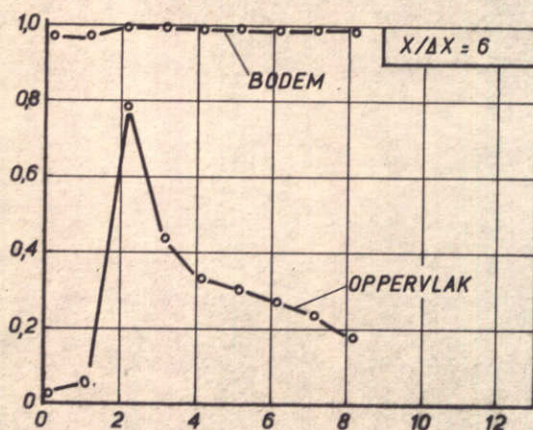
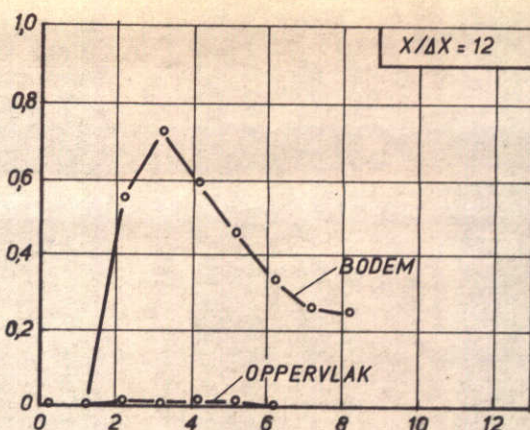
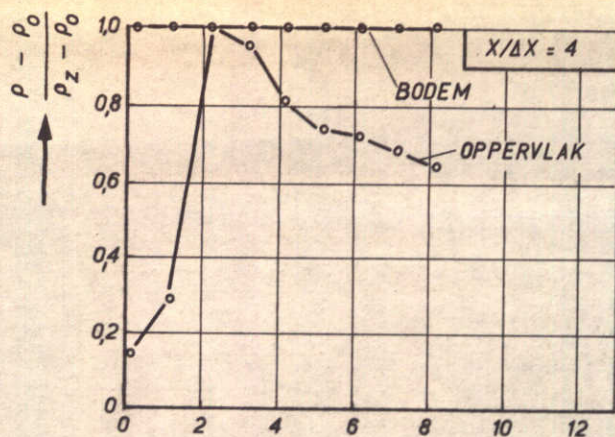
- PROEF 184.03 { BODEM: $Y=3,5\text{cm}$ ($Y/\Delta Y=1$)
OPP: $Y=17,6\text{cm}$ ($Y/\Delta Y=5$)
- X— PROEF 188.00 { BODEM: $Y=3,5\text{cm}$ ($Y/\Delta Y=1$)
OPP: $Y=17,6\text{cm}$ ($Y/\Delta Y=5$)
- PROEF 184.01 BODEM: $Y=1,66\text{cm}$

VERLOOP MAX. REL. DICHTHEID BIJ OPEENVOLGENDE TIJD-STIPPEN VAN H.W.K. BIJ EEN MIDDENSTANDSVERHOOGING.

TIJDSTIP H.W.K.
(HOOGWATERKENTERING)
 $t/T = k + 1/25$ ($k=0,1,2,\dots$)

JB

A4



—○— PROEF 189.00

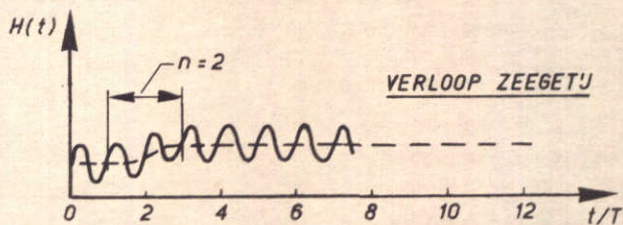
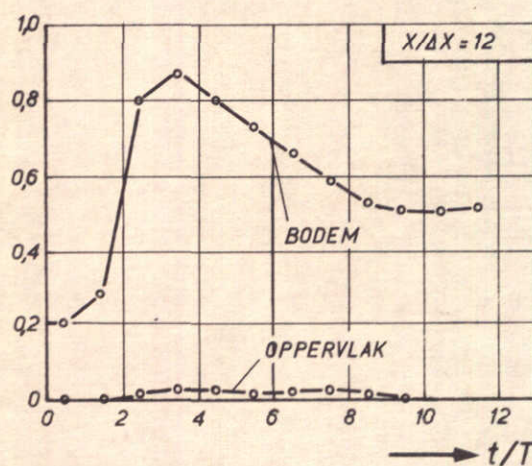
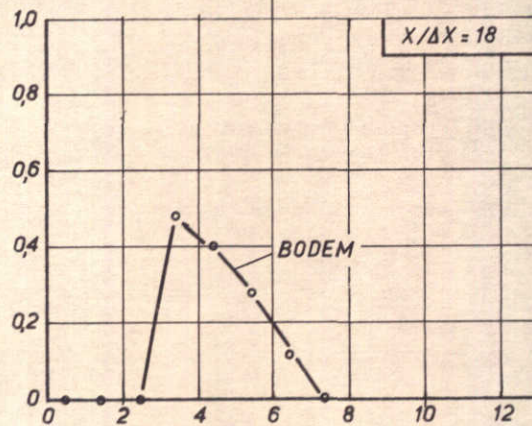
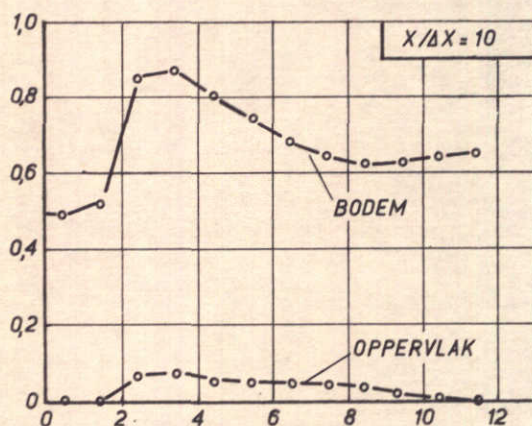
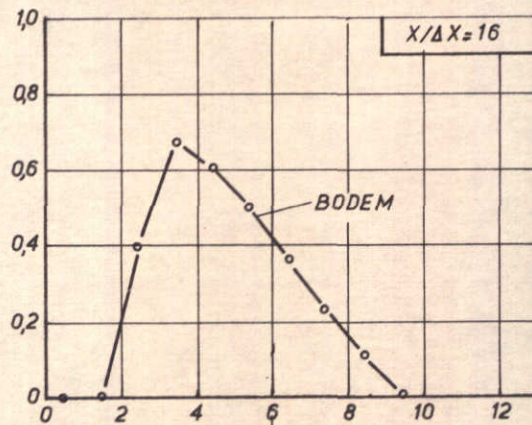
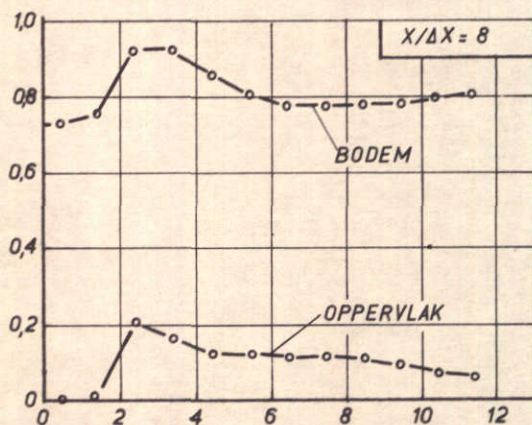
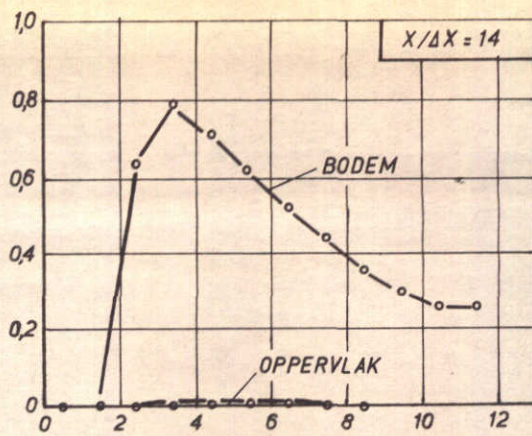
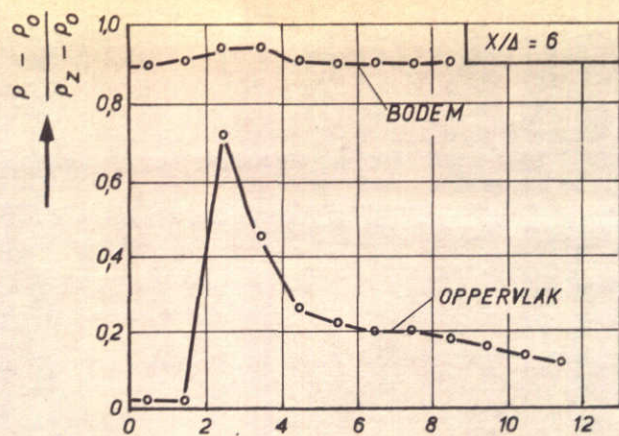
$\left\{ \begin{array}{l} \text{BODEM } Y=3,5\text{cm } (Y/\Delta Y=1) \\ \text{OPP. } Y=17,6\text{cm } (Y/\Delta Y=5) \end{array} \right.$

VERLOOP MAX. REL. DICHTHEID BIJ OPEENVOLGENDE TJD-STIPPEN VAN H.W.K. BIJ EEN MIDDENSTANDSVERHOOGING.

TJDSTIP H.W.K.
(HOOEWATERKENTERING)
 $t/T = k + \frac{11}{25}$ ($k=0,1,2,\dots$)

JB

A4



—○— PROEF 191.00

$\left\{ \begin{array}{l} \text{BODEM } Y = 3,5\text{cm } (Y/\Delta Y = 1) \\ \text{OPP. } Y = 17,6\text{cm } (Y/\Delta Y = 5) \end{array} \right.$

VERLOOP MAX. REL. DICHTHEID BIJ OPEENVOLGENDE TJD-STIPPEN VAN H.W.K. BIJ EEN MIDDENSTANDSVERHOOGING.

TJDS TIP H.W.K.
(HOOGWATERKENTERING)
 $t/T = k + \frac{13}{25}$ ($k = 0, 1, 2, \dots$)

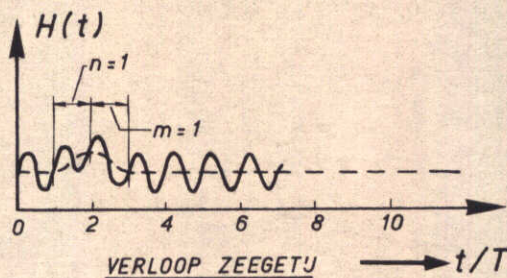
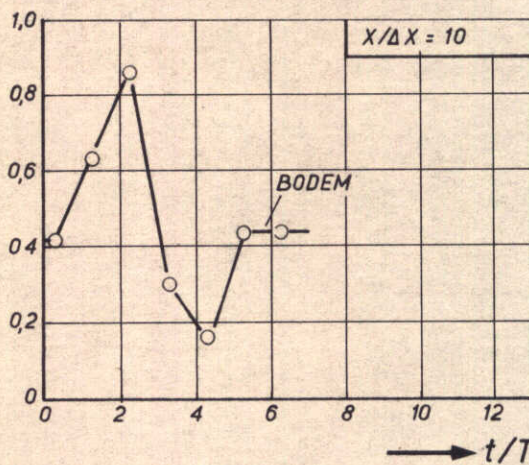
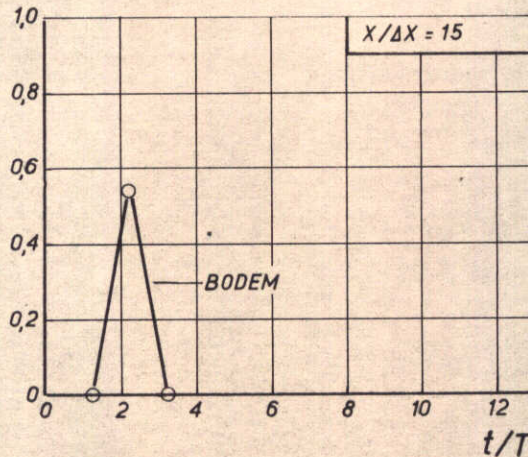
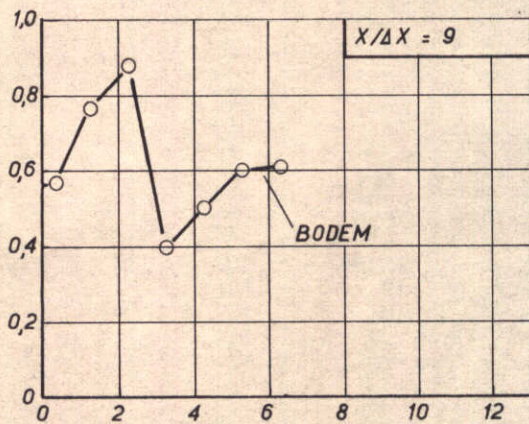
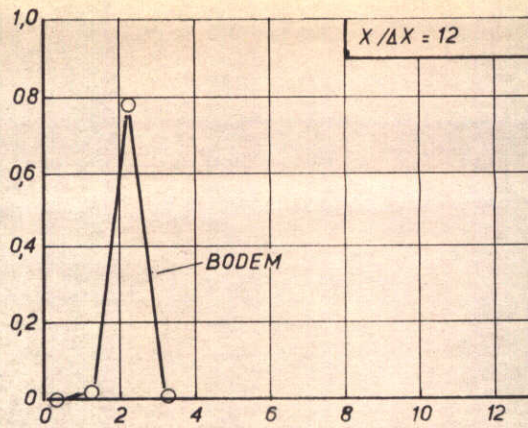
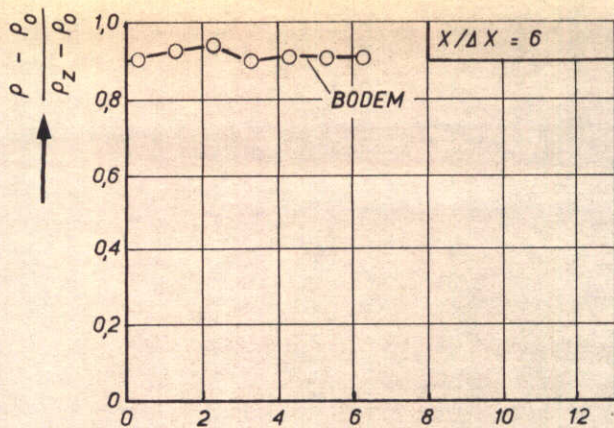
JB

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896-1770

FIG.10



—○— PROEF 185.00

BODEM : $y = 1,66 \text{ cm}$

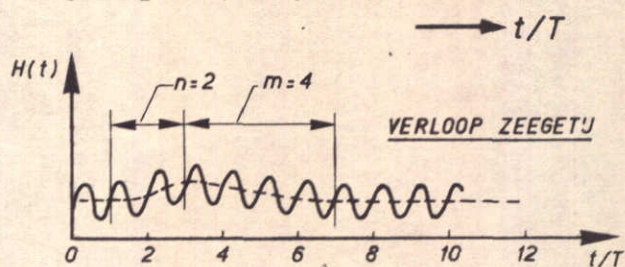
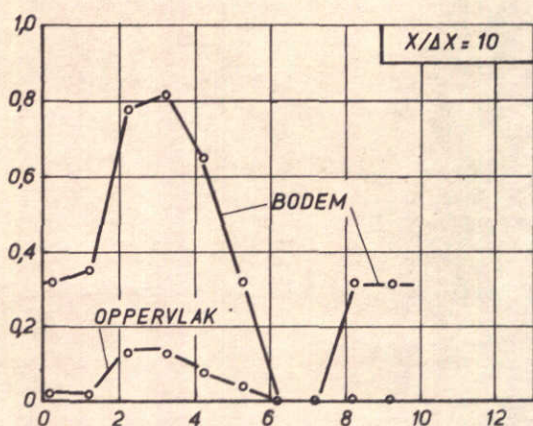
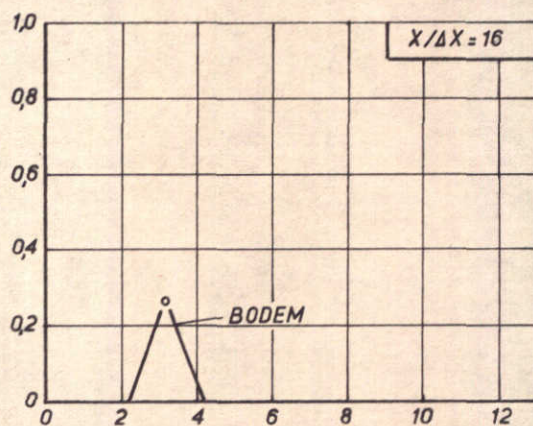
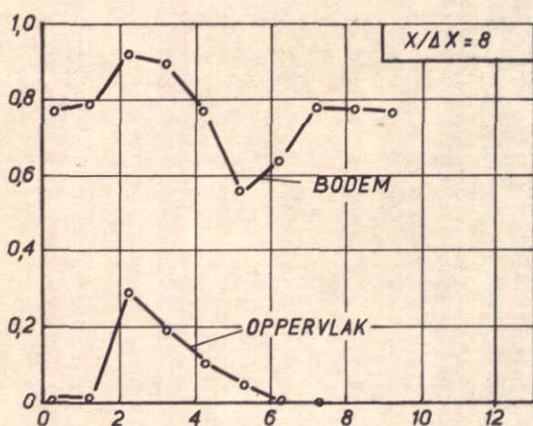
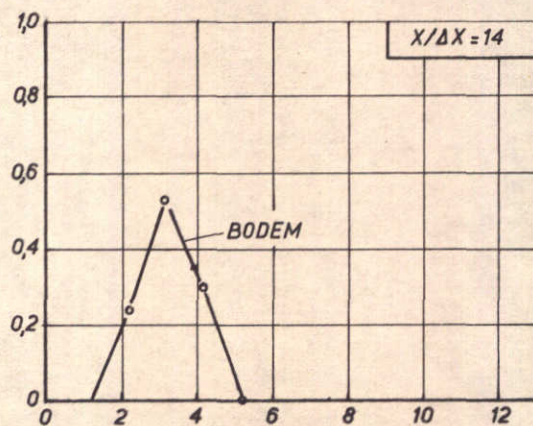
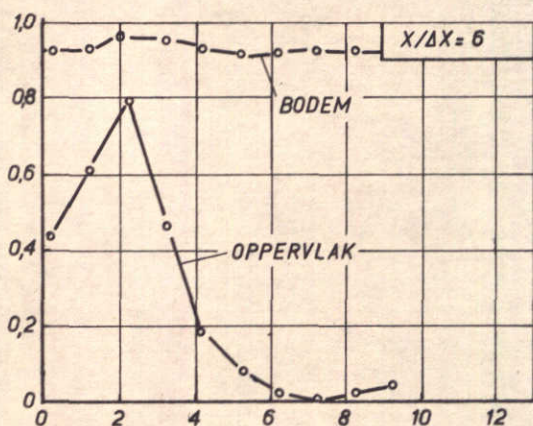
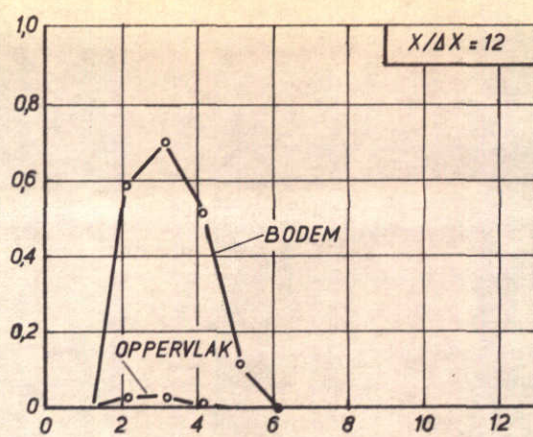
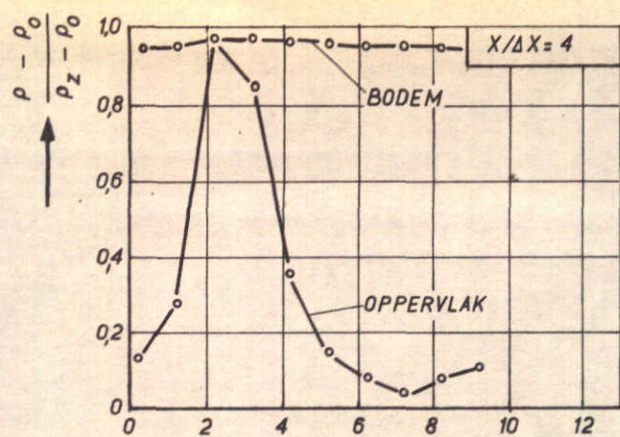
VERLOOP MAX. REL. DICHTHEID BIJ OPEENVOLGENDE TIJD-
STIPPEN VAN H.W.K. BIJ EEN MIDDENSTANDSVERHOOGING.

TIJDSTIP H.W.K.
(HOOGWATERKENTERING)

$t/T = k + \frac{1}{25}$ ($k=0,1,2,\dots$)

JB

A4



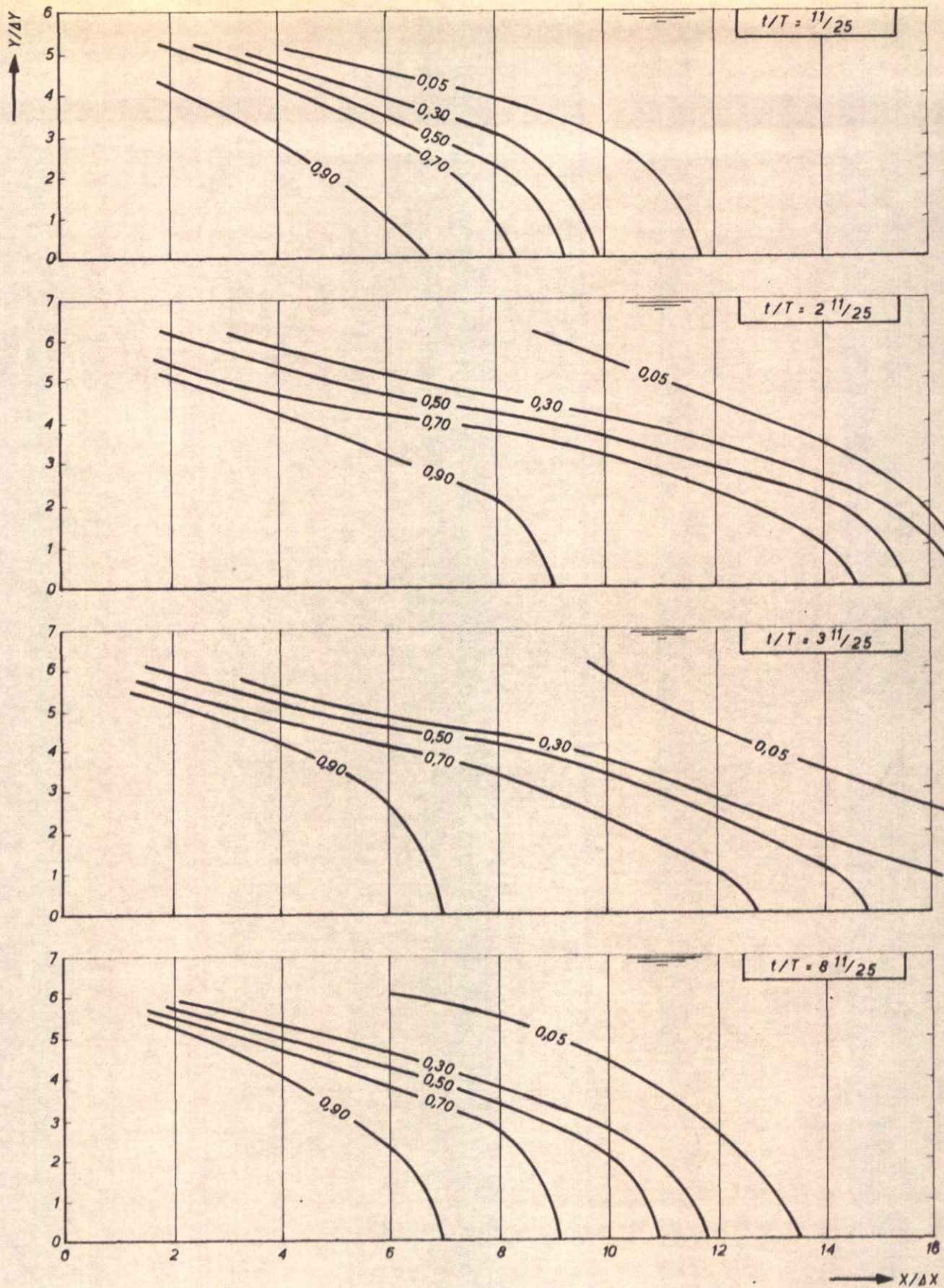
—○— PROEF 19.301

$\left\{ \begin{array}{l} \text{BODEM } Y=3,5\text{cm } (Y/\Delta Y=1) \\ \text{OPR } Y=17,6\text{cm } (Y/\Delta Y=5) \end{array} \right.$

VERLOOP MAX. REL. DICHTHEID BIJ OPEENVOLGENDE TIJDSTIPPEN VAN H.W.K. BIJ EEN MIDDENSTANDSVERHOOGING.

TIJDSTIP H.W.K.
(HOOGWATERKENTERING)
 $t/T = k + \frac{1}{25}$ ($k=0,1,2,\dots$)

JB
A4



LONGITUDINALE ZOUTVERDELING (REL. DICHTHEID)
 BIJ MAXIMALE ZOUTINDRINGING (H.W.K.)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

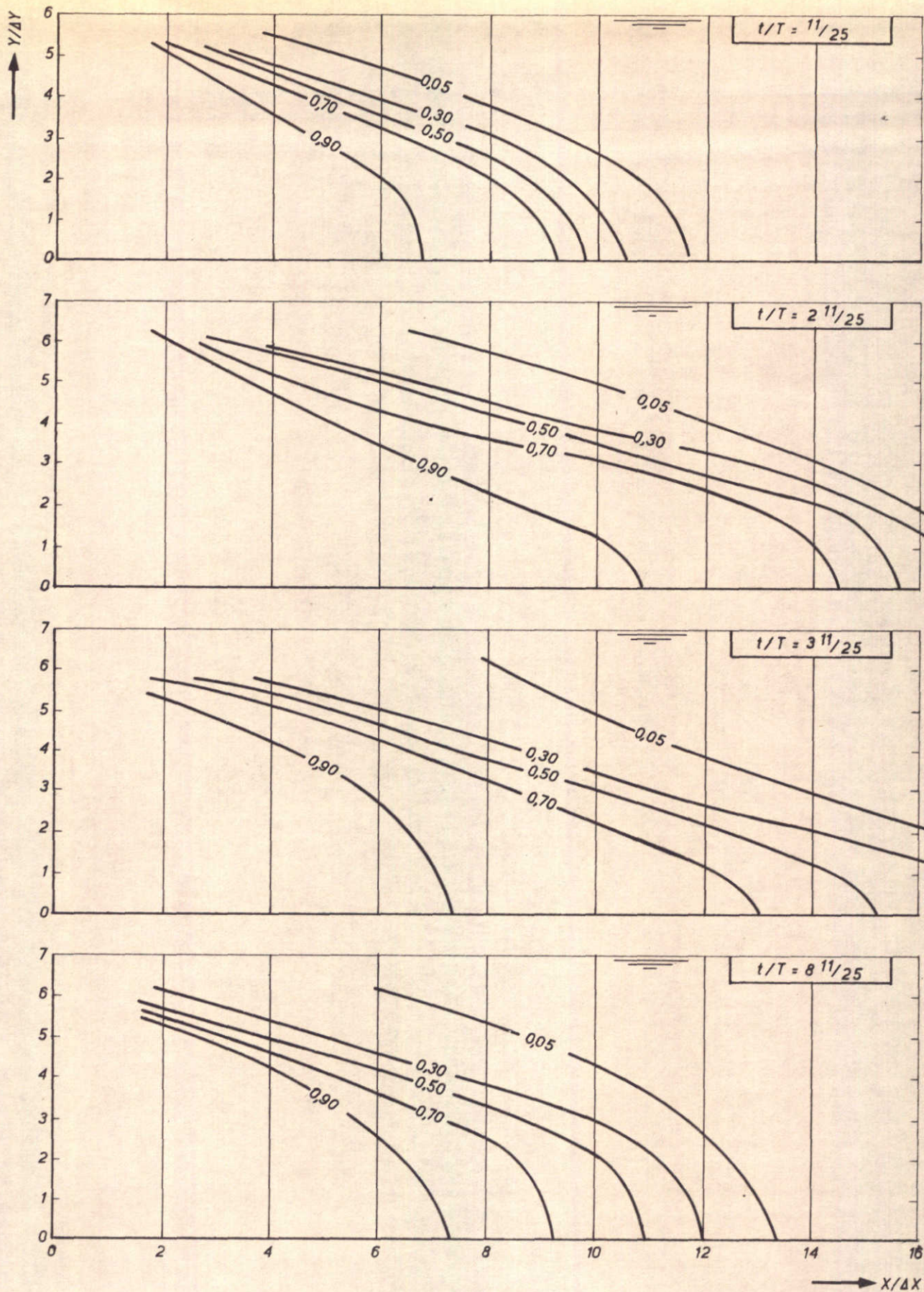
PROEF 184.03

M.896 - 1773

JB

A4

FIG.13



LONGITUDINALE ZOUTVERDELING (REL. DICHTHEID)
 BIJ MAXIMALE ZOUTINDRINGING (H.W.K.)

JB

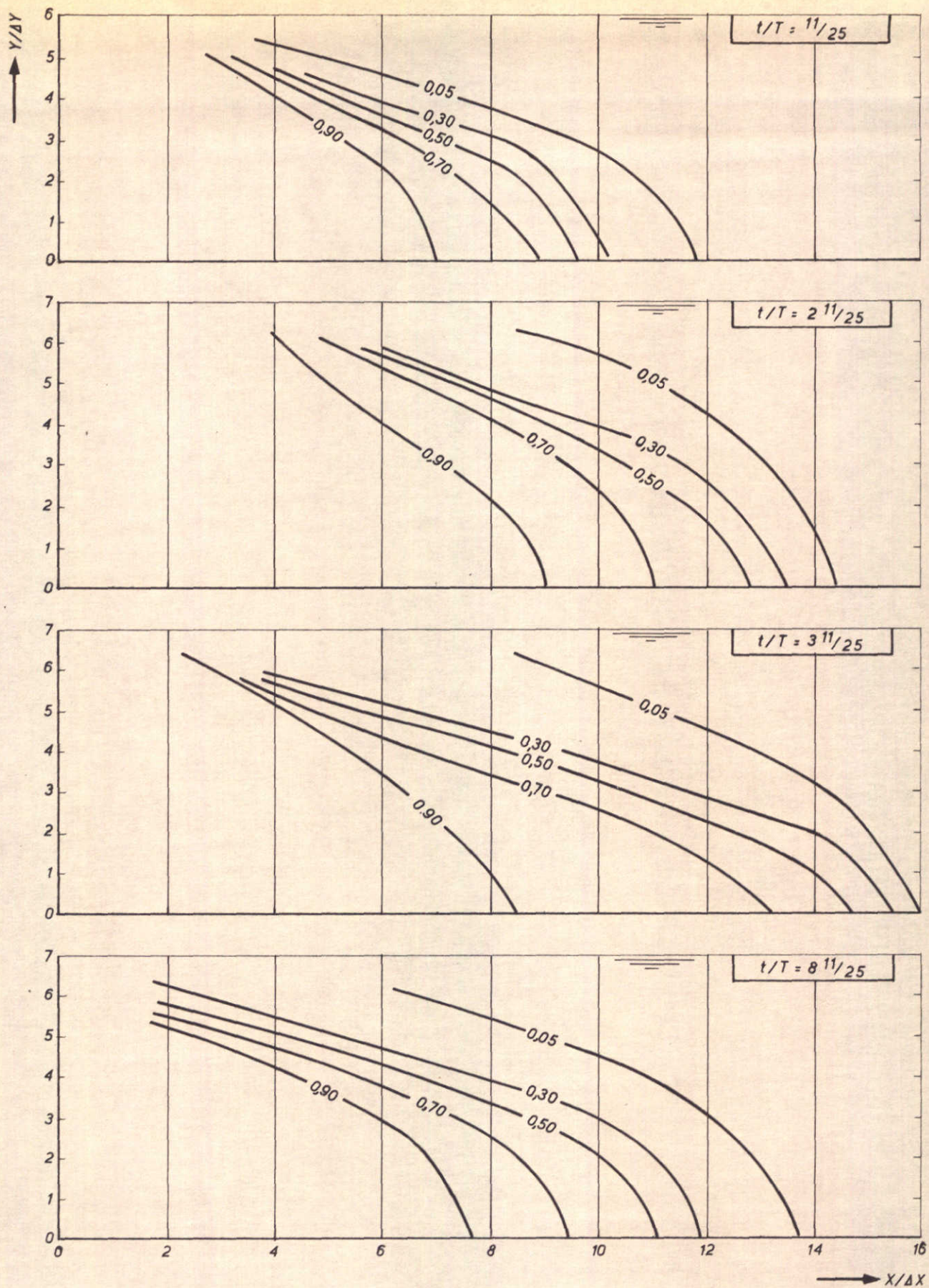
PROEF 188.00

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896-1774

FIG.14



LONGITUDINALE ZOUTVERDELING (REL. DICHTHEID)
 BIJ MAXIMALE ZOUTINDRINGING (H.W.K.)

PROEF 189.00

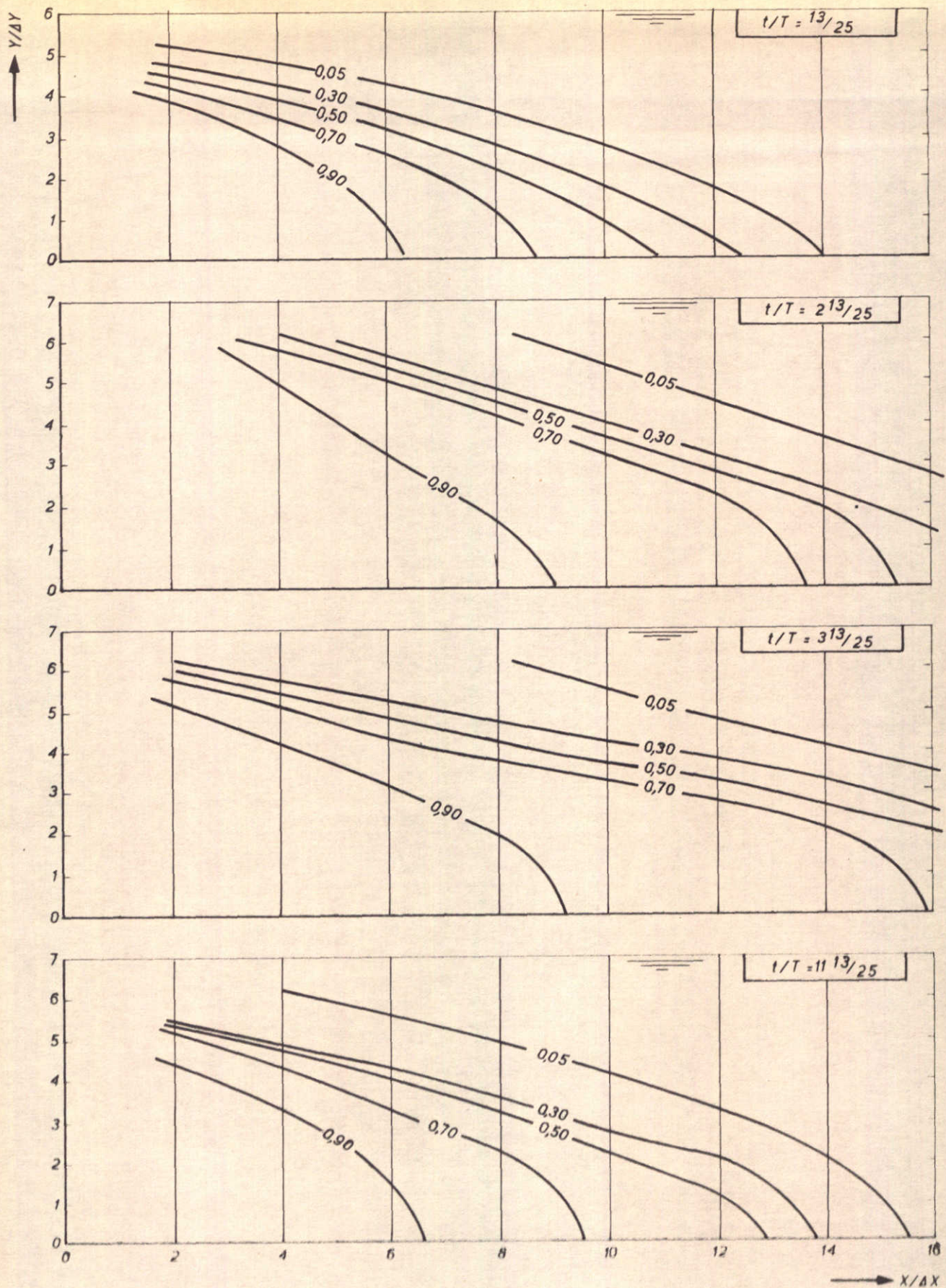
JB

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896-1775

FIG.15



LONGITUDINALE ZOUTVERDELING (REL. DICHTHEID)
 BIJ MAXIMALE ZOUTINDRINGING (H.W.K.)

JB

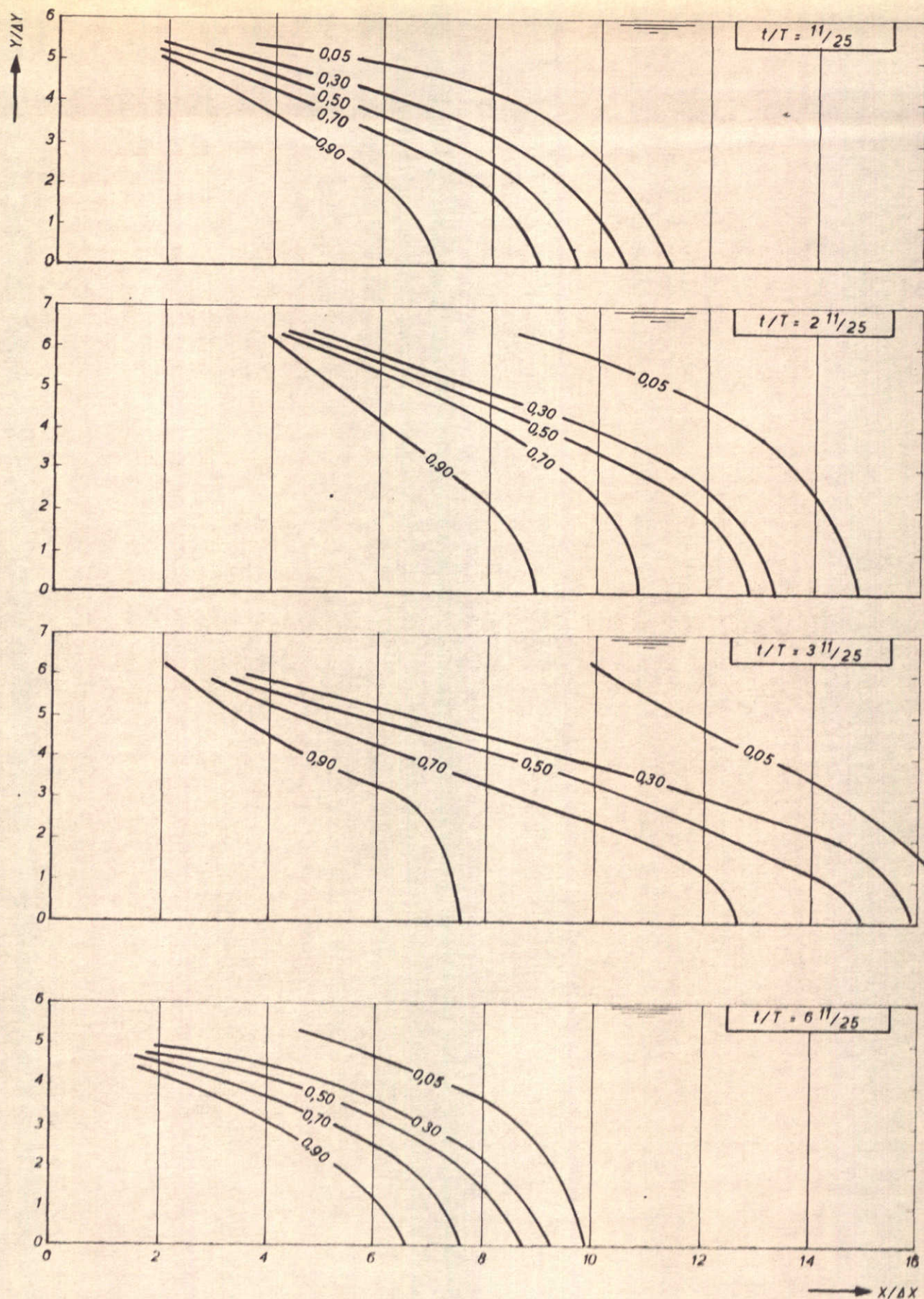
PROEF 191.00

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 896 - 1776

FIG 16



LONGITUDINALE ZOUTVERDELING (REL. DICHTHEID)
 BIJ MAXIMALE ZOUTINDRINGING (H.W.K.)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

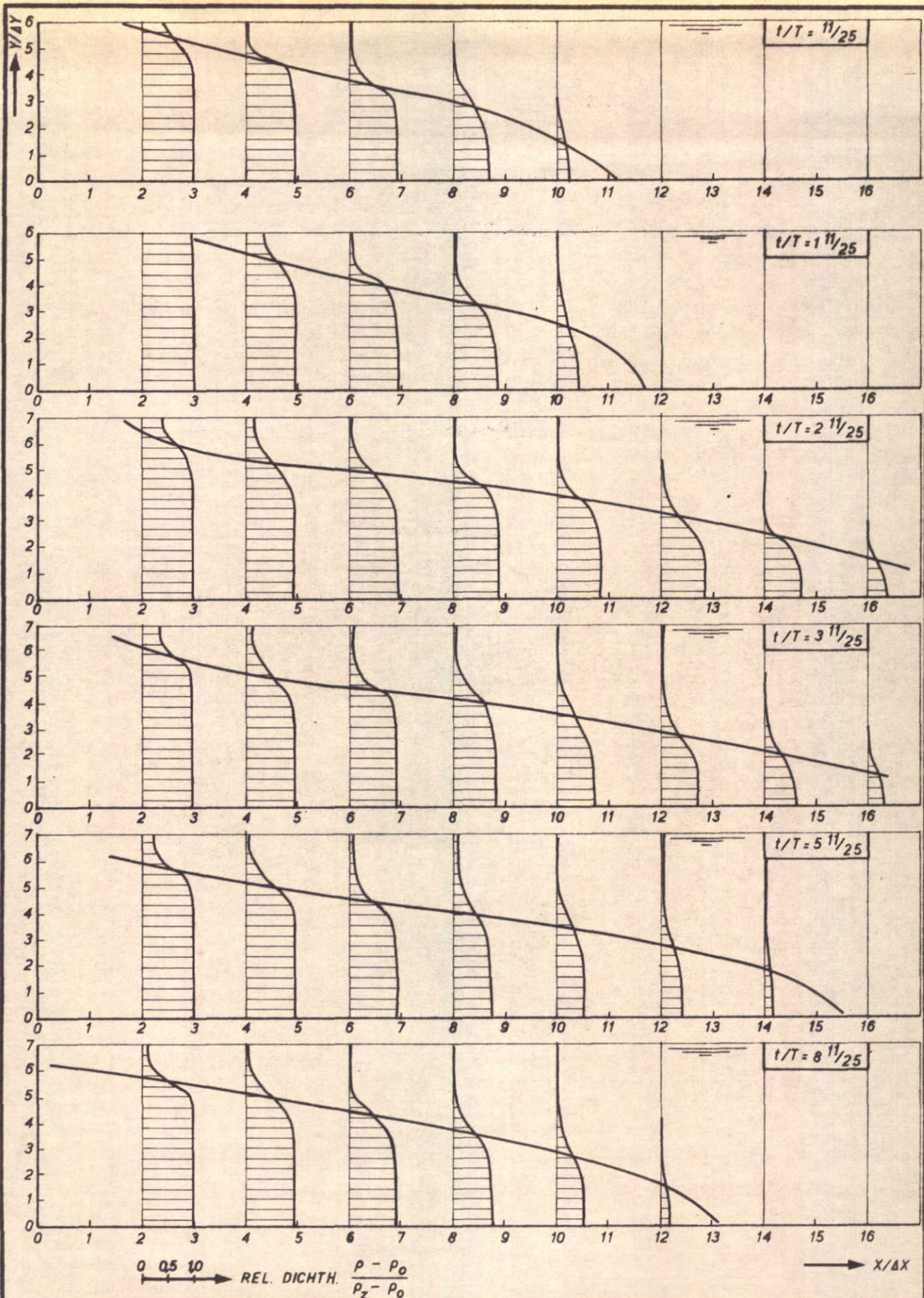
PROEF 193.01

M.896-1777

JB

A4

FIG. 17



ZOUTVERDELING ALS FUNCTIE VAN X EN Y (REL. DICHTH.) BIJ MAXIMALE ZOUTINDRINGING (H.W.K.) MET EEN GESCHETSTE AANDUIDING VAN DE OVERGANG VAN ZOET NAAR ZOUT WATER

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

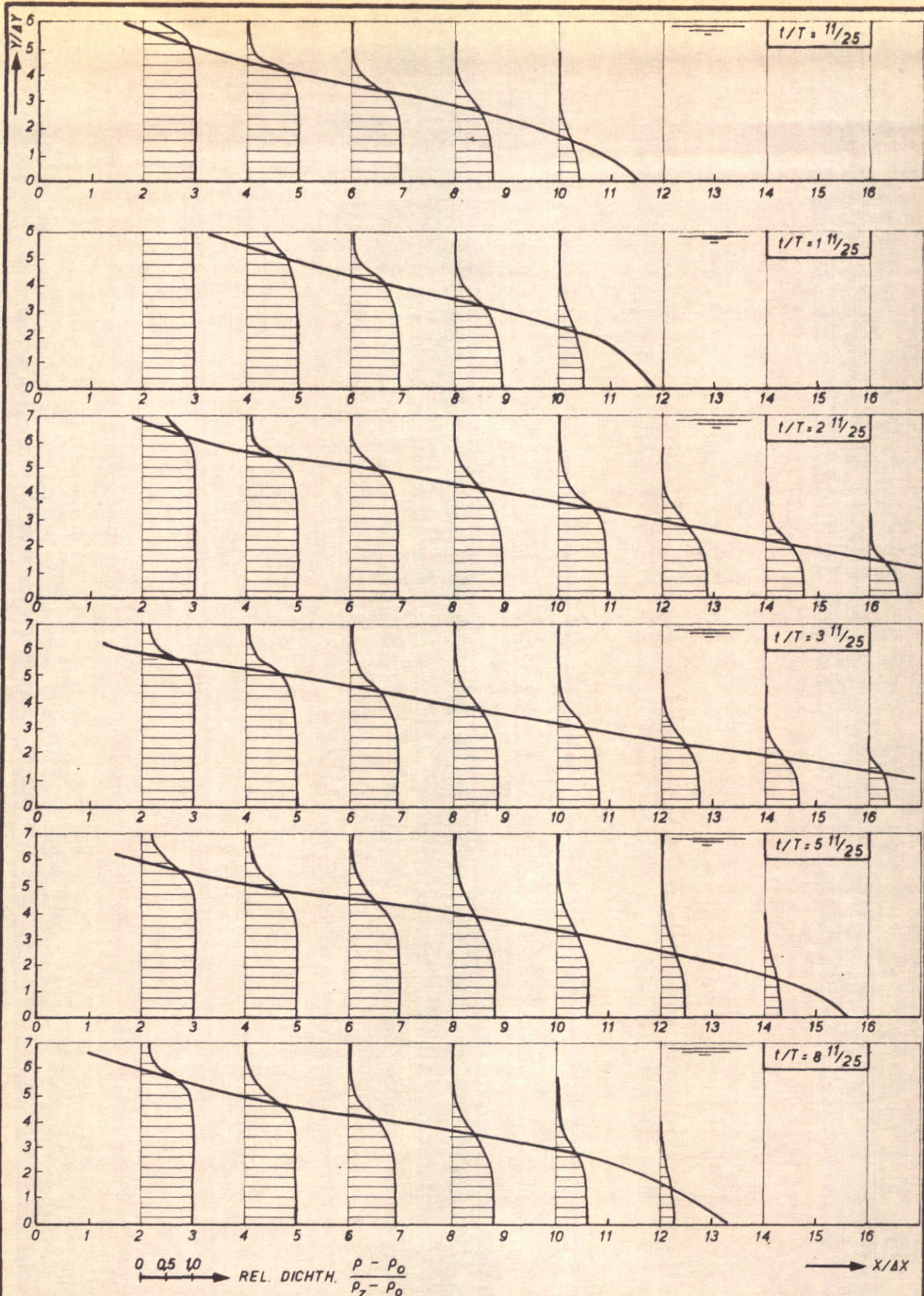
PROEF 184.03

M.896-1778

JB

A4

FIG.18



ZOUTVERDELING ALS FUNCTIE VAN X EN Y (REL. DICHTH.) BIJ MAXIMALE ZOUTINDRINGING (H.W.K.) MET EEN GESCHETSTE AANDUIDING VAN DE OVERGANG VAN ZOET NAAR ZOUT WATER

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

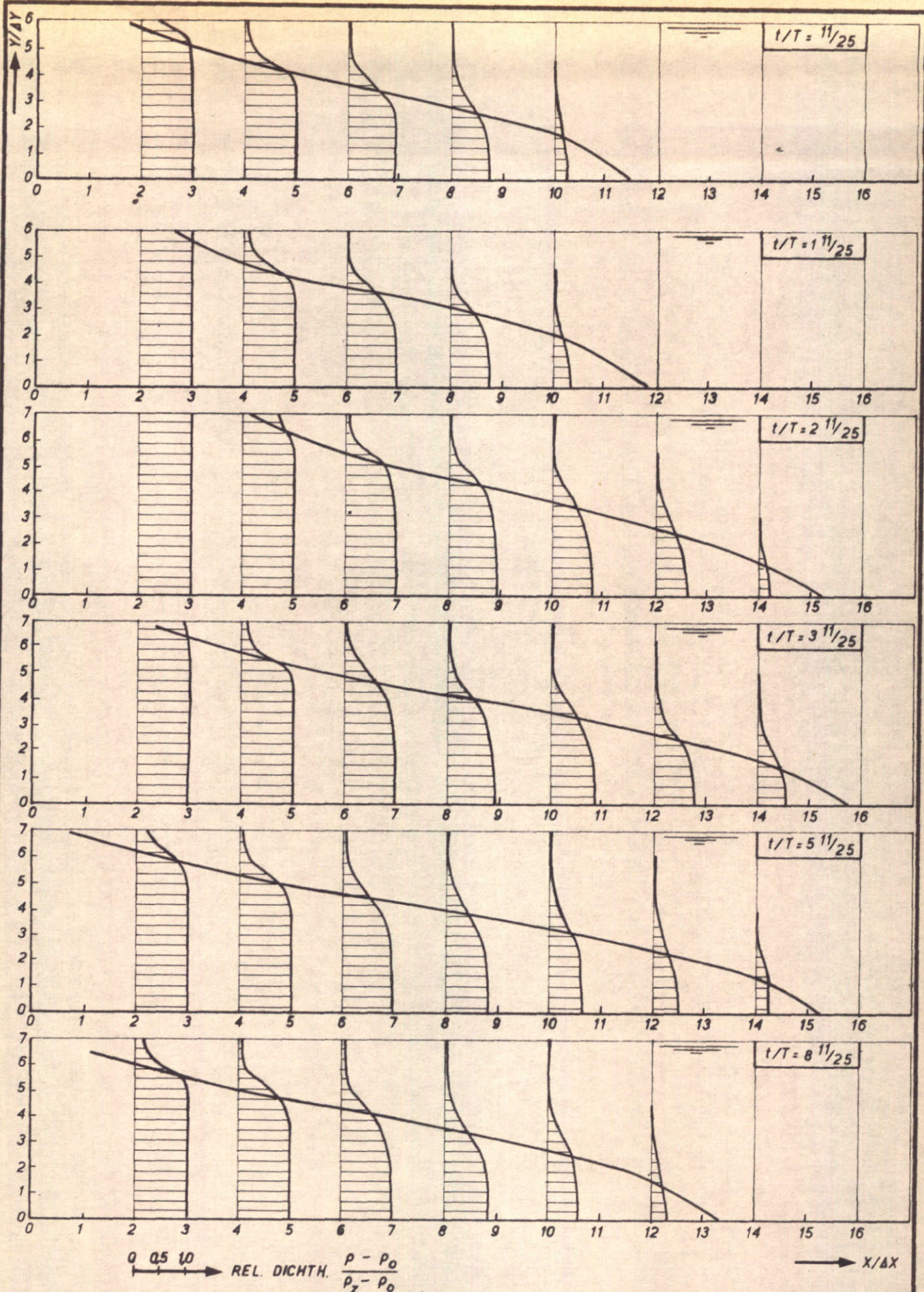
PROEF 188.00

M.896-1779

JB

A4

FIG.19



ZOUTVERDELING ALS FUNCTIE VAN X EN Y (REL. DICHTH.) BIJ MAXIMALE ZOUTINDRINGING (H.W.K.) MET EEN GESCHETSTE AANDUIDING VAN DE OVERGANG VAN ZOET NAAR ZOUT WATER

JB

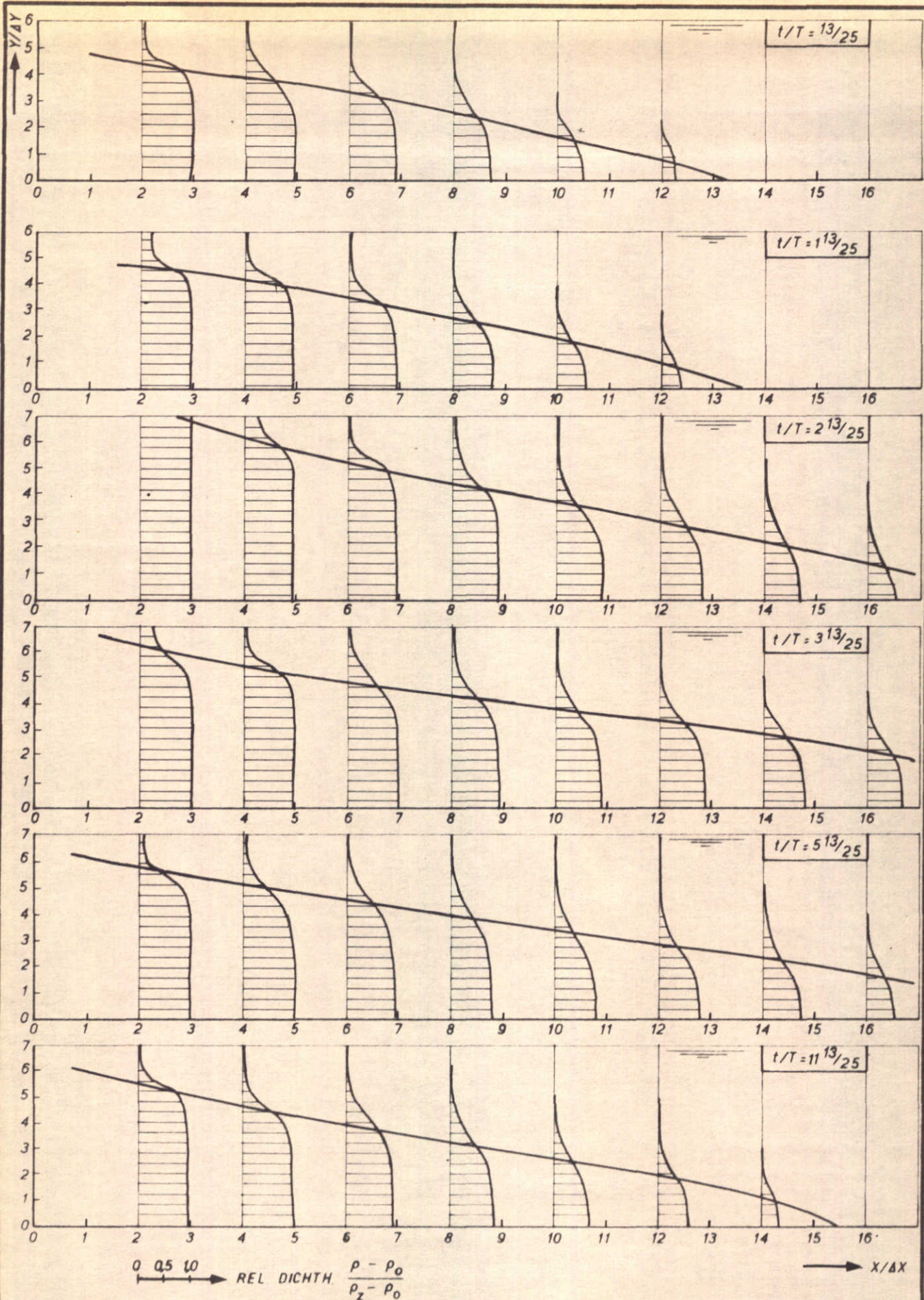
PROEF 189.00

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896-1780

FIG.20



ZOUTVERDELING ALS FUNCTIE VAN X EN Y (REL DICHTH.) BIJ MAXIMALE ZOUTINDRINGING (HWK) MET EEN GESCHETSTE AANDUIDING VAN DE OVERGANG VAN ZOET NAAR ZOUT WATER

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

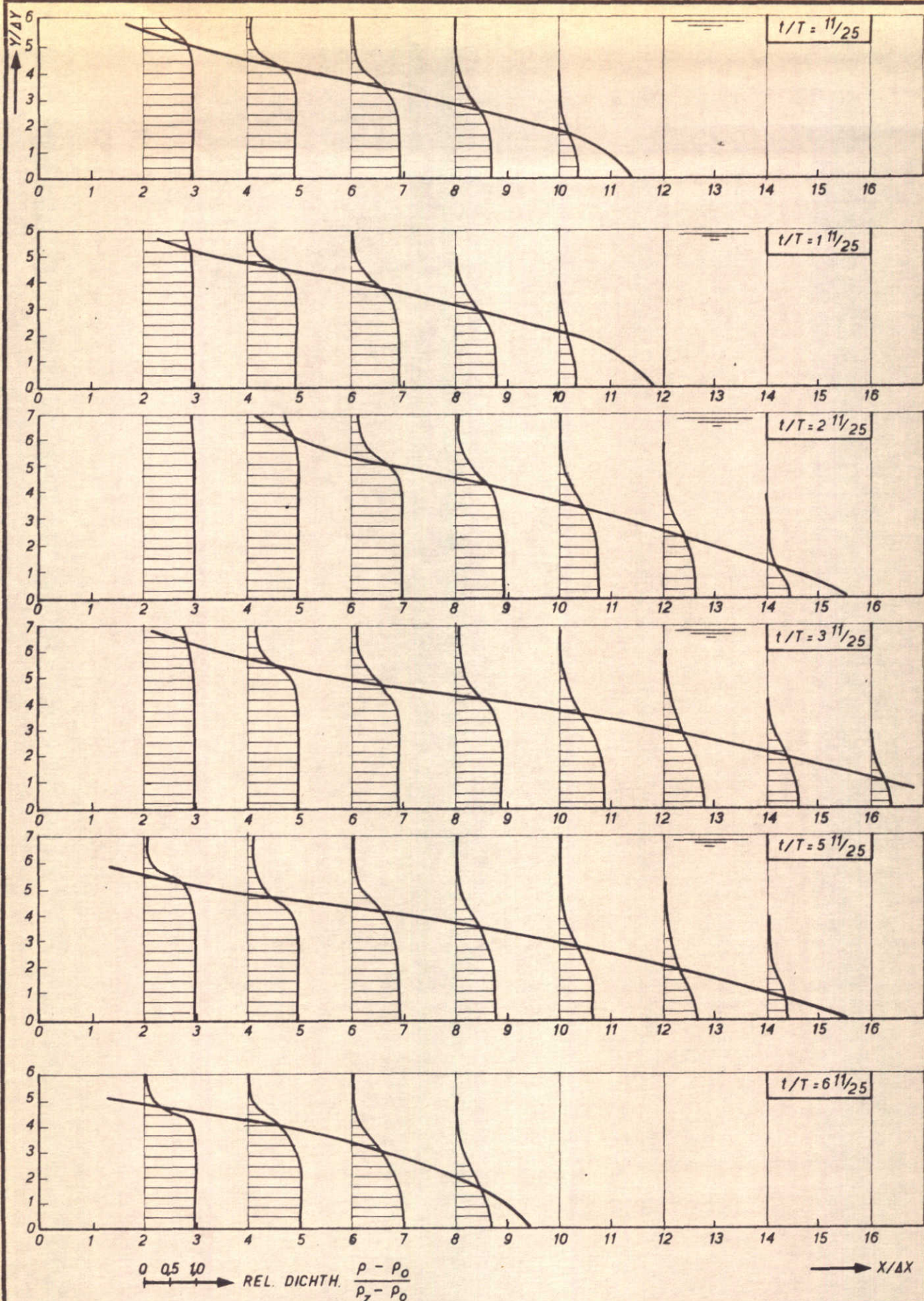
PROEF 191.00

M 896-1781

JB

A4

FIG 21



ZOUTVERDELING ALS FUNCTIE VAN X EN Y (REL. DICHTH.) BIJ MAXIMALE ZOUTINDRINGING (H.W.K.) MET EEN GESCHETSTE AANDUIDING VAN DE OVERGANG VAN ZOET NAAR ZOUT WATER

JB

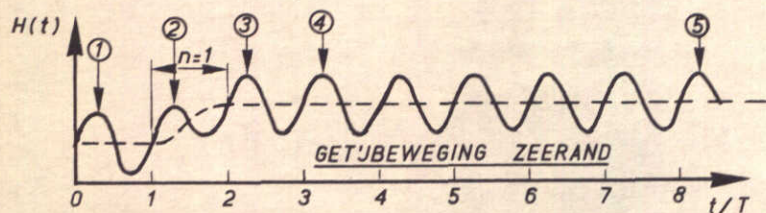
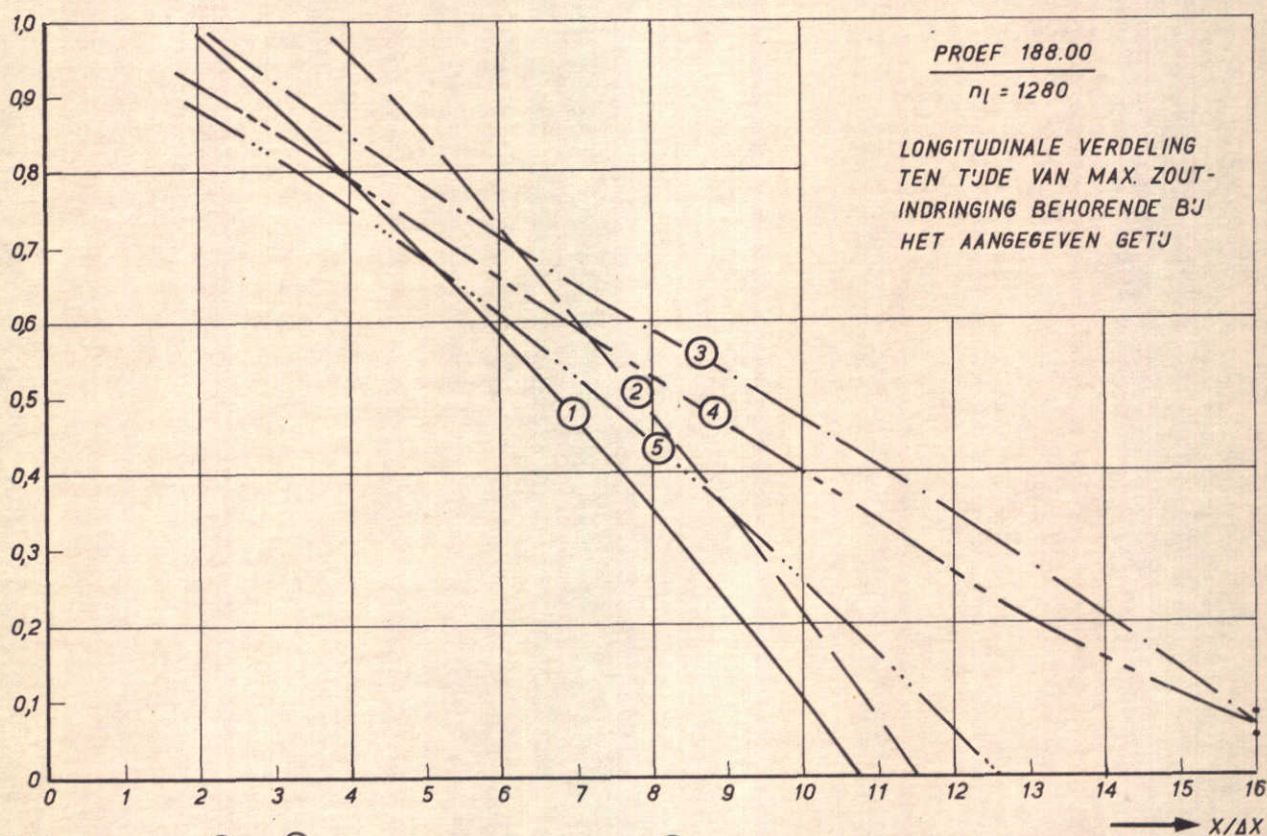
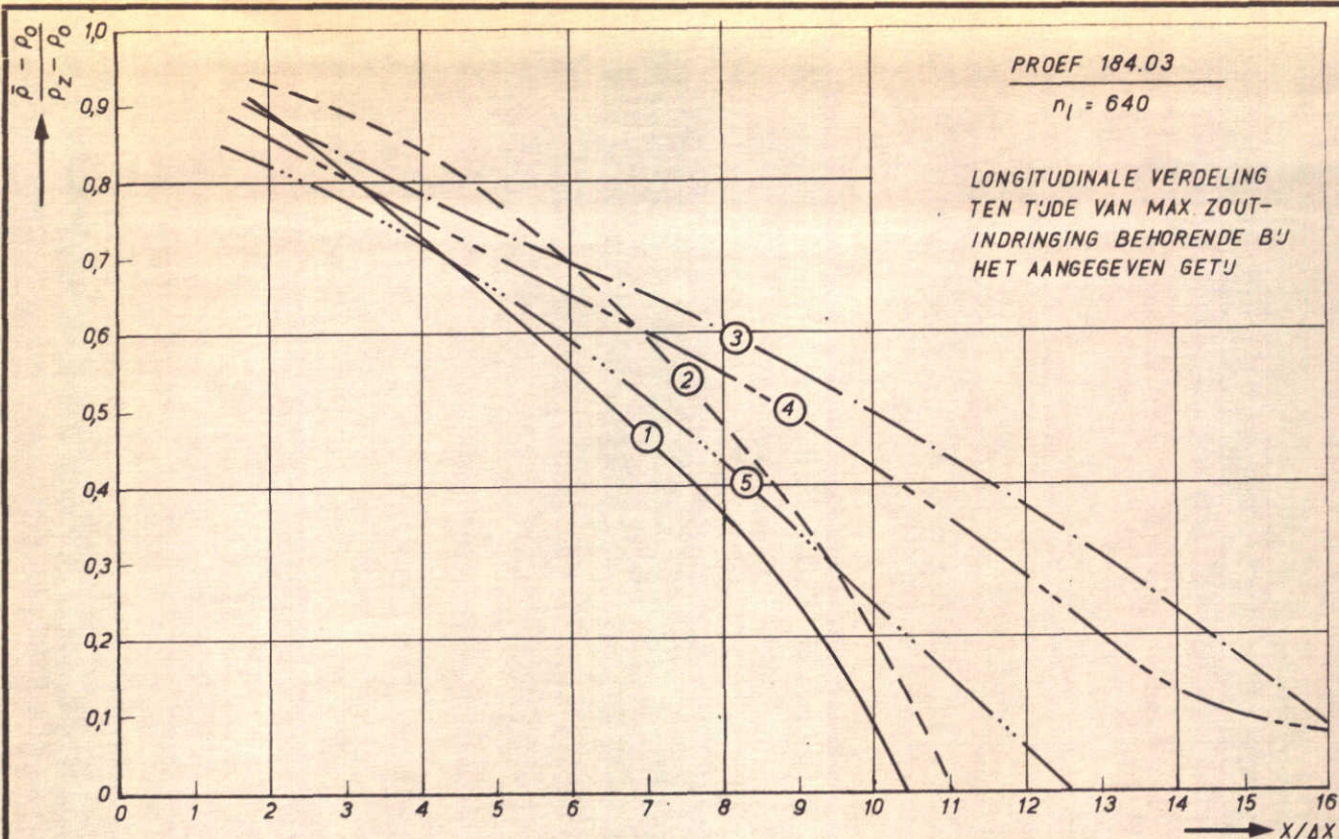
PROEF 193.01

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

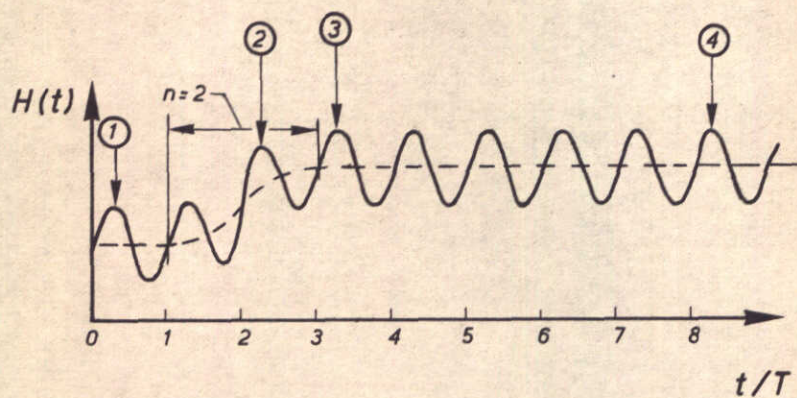
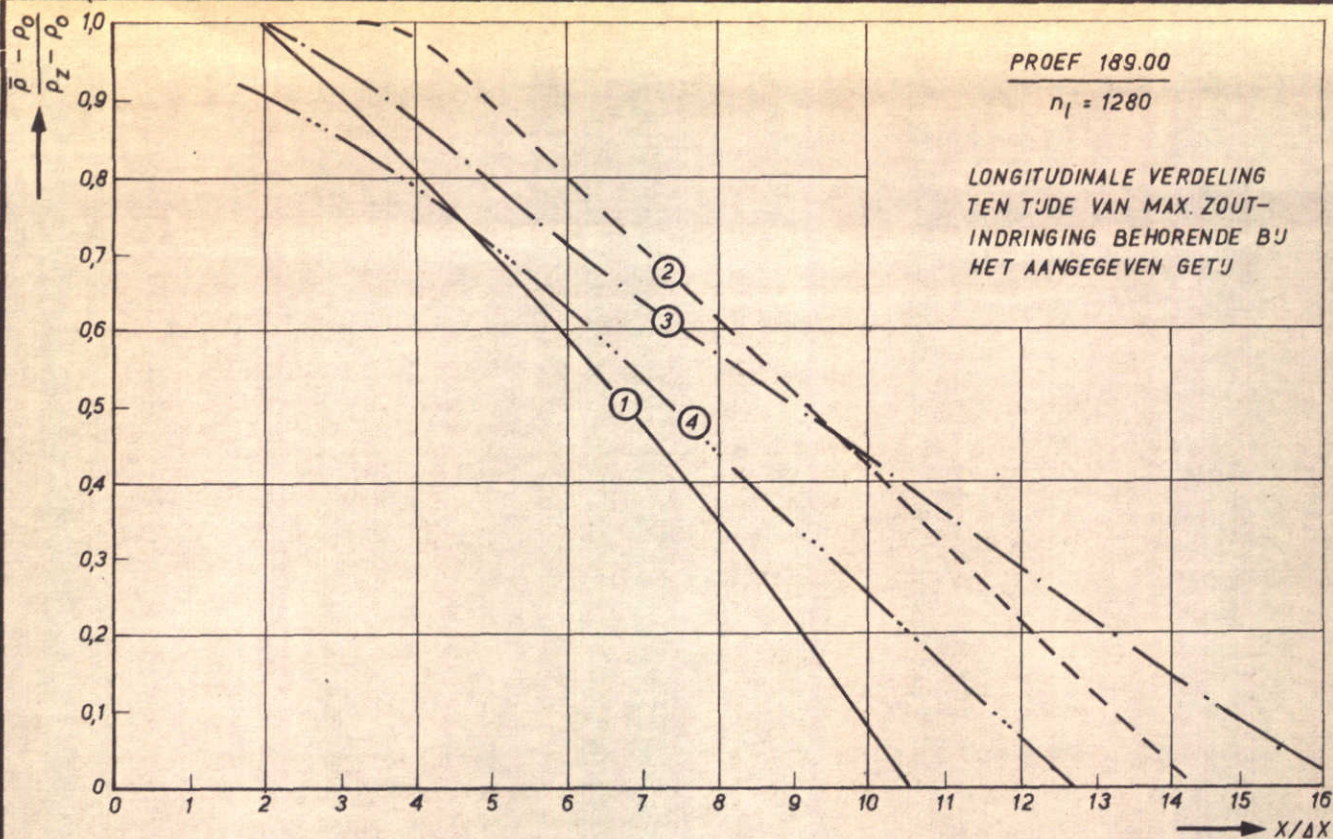
M.896-1782

FIG.22



- ① ——— ④ - - - -
- ② - - - - ⑤ ·····
- ③ - ··· -

GEMIDDELDE REL. DICHTEID OVER DE VERTIKAAL
 ALS $f(X)$ BIJ MAXIMALE ZOUTINDRINGING IN
 OPEENVOLGENDE GETJPERIODEN



GETJBEWEGING ZEERAND

LEGENDA

- | | | |
|---|---|-----------|
| { | ① | _____ |
| { | ② | - - - - - |
| { | ③ | - . - . - |
| { | ④ | - |

GEMIDDELDE REL. DICHTHEID OVER DE VERTIKAAL
ALS $\bar{\rho}(X)$ BIJ MAXIMALE ZOUTINDRINGING IN
OPEENVOLGENDE GETJPERIODEN

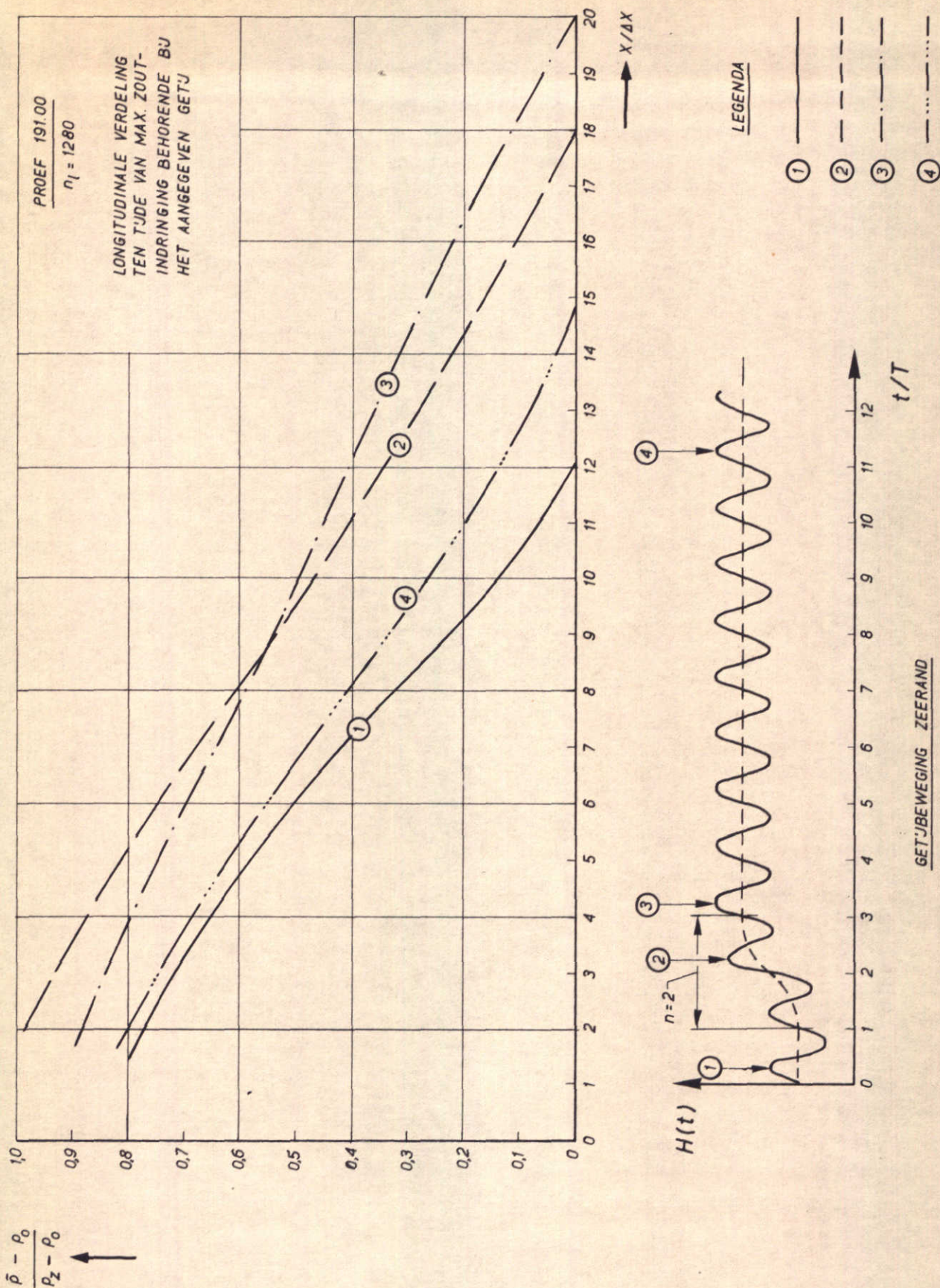
JB

A4

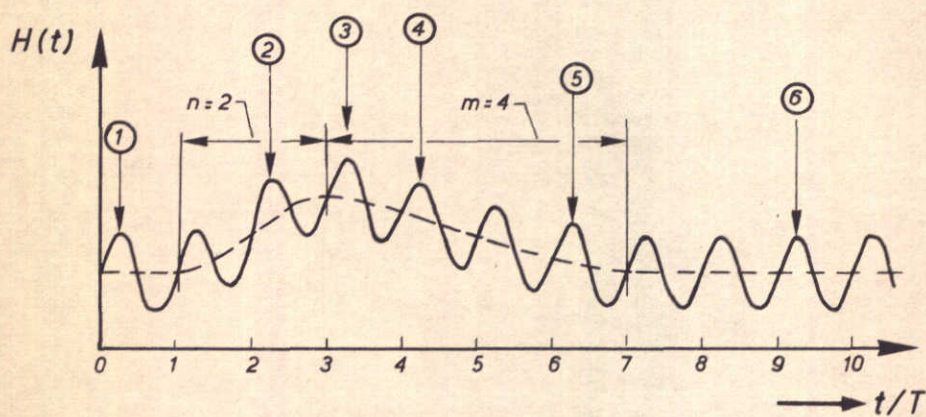
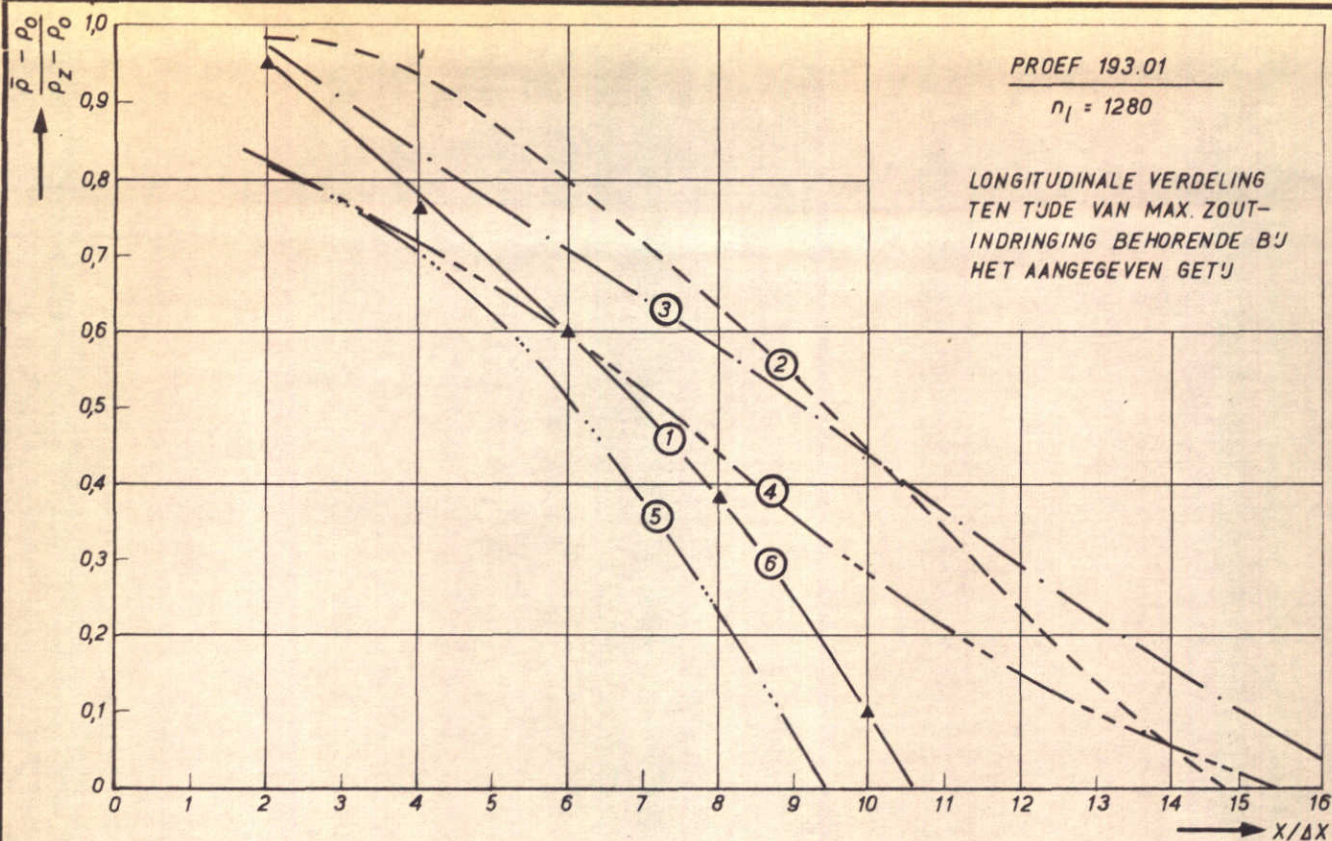
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896-1784

FIG.24



GEMIDDELDE REL. DICHTHEID OVER DE VERTIKAAL
ALS $f(x)$ BIJ MAXIMALE ZOUTINDRINGING IN
OPEENVOLGENDE GETUPERIODEN



GETJBEWEGING ZEERAND

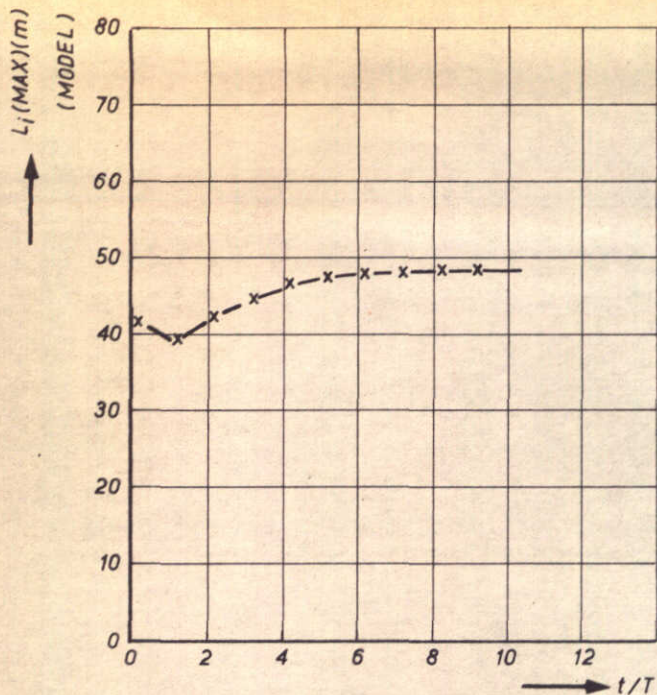
LEGENDA

- ① —————
- ② - - - - -
- ③ - . - . -
- ④ ————
- ⑤ —……—
- ⑥ ———▲——

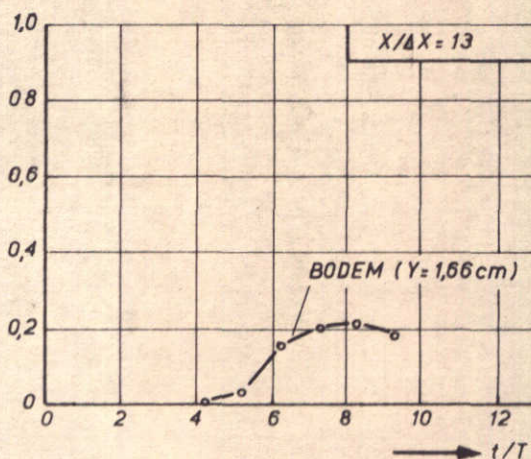
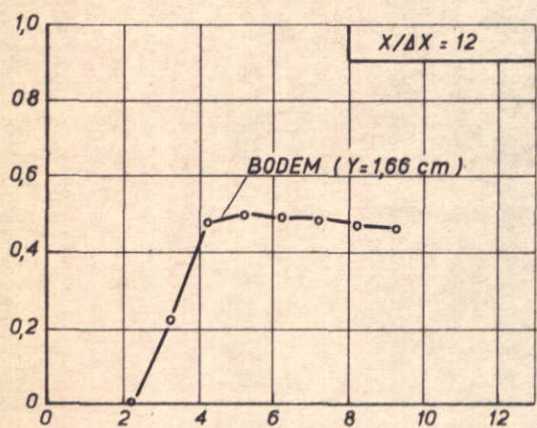
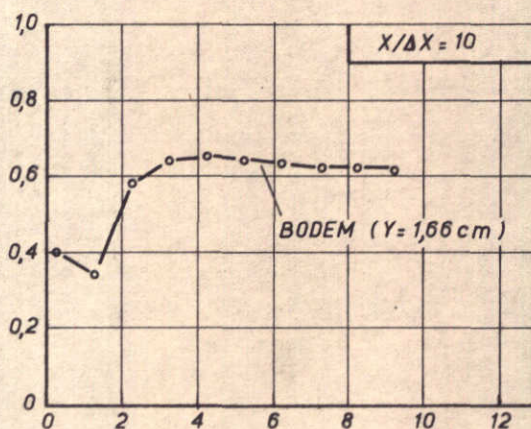
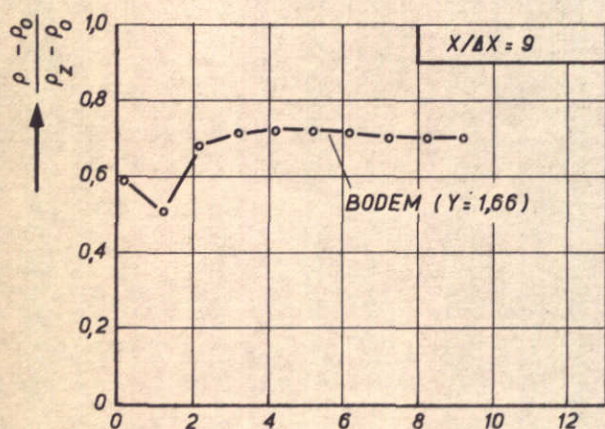
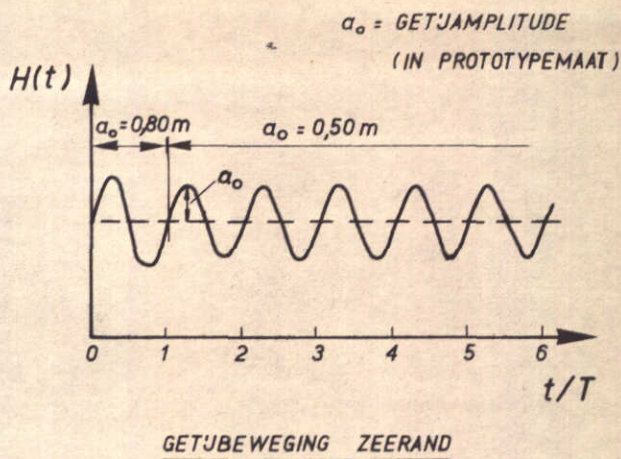
GEMIDDELDE REL. DICHTHEID OVER DE VERTIKAAL
ALS $f(x)$ BIJ MAXIMALE ZOUTINDRINGING IN
OPEENVOLGENDE GETJPERIODEN

JB

A4



(a) VERLOOP MAXIMALE ZOUTINDRINGING



(b) VERLOOP MAXIMALE RELATIEVE DICHTHEID BIJ DE BODEM

(a) MAXIMALE ZOUTINDRINGING } BIJ OPEENVOLGENDE
(b) MAXIMALE REL. DICHTHEID } TIJDSTIPPEN VOOR H.W.K.

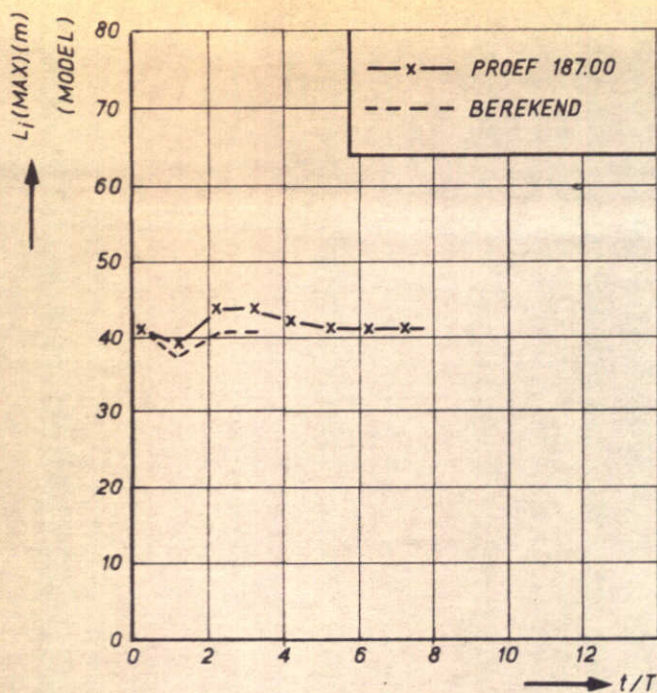
PROEF : 186.00

H.W.K. : $t/T = k + \frac{11}{25}$

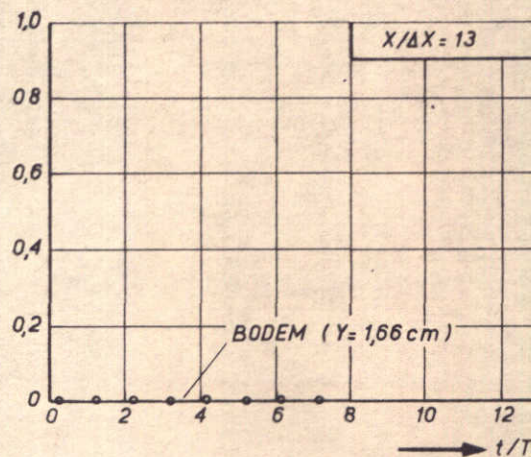
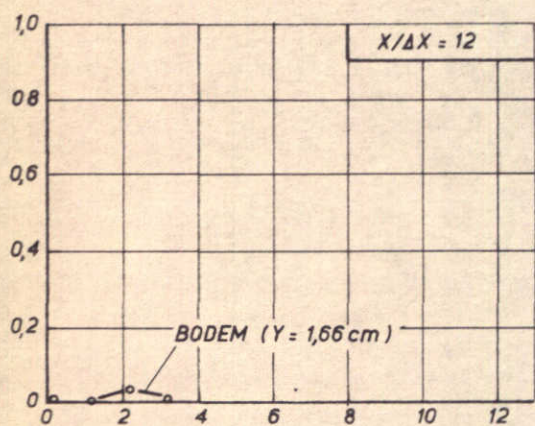
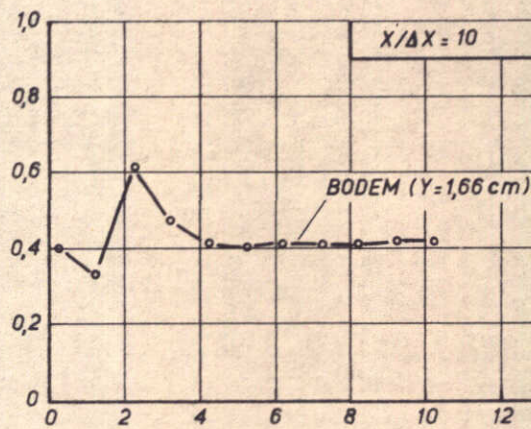
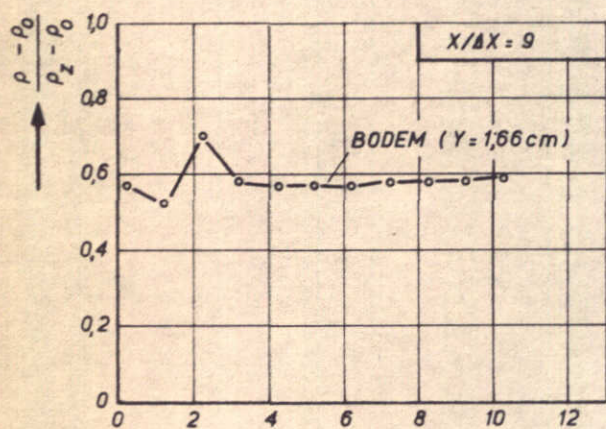
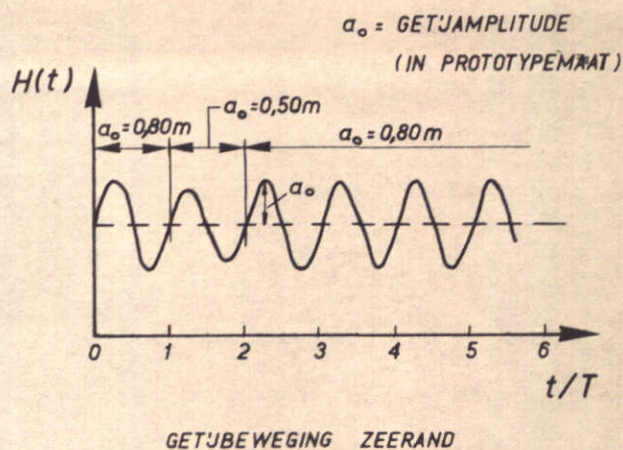
$k = 0,1,2, \dots$

JB

A4



(a) VERLOOP MAXIMALE ZOUTINDRINGING



(b) VERLOOP MAXIMALE RELATIEVE DICHTHEID BIJ DE BODEM

(a) MAXIMALE ZOUTINDRINGING } BIJ OPEENVOLGENDE
(b) MAXIMALE REL. DICHTHEID } TIJDSTIPPEN VOOR H.W.K.

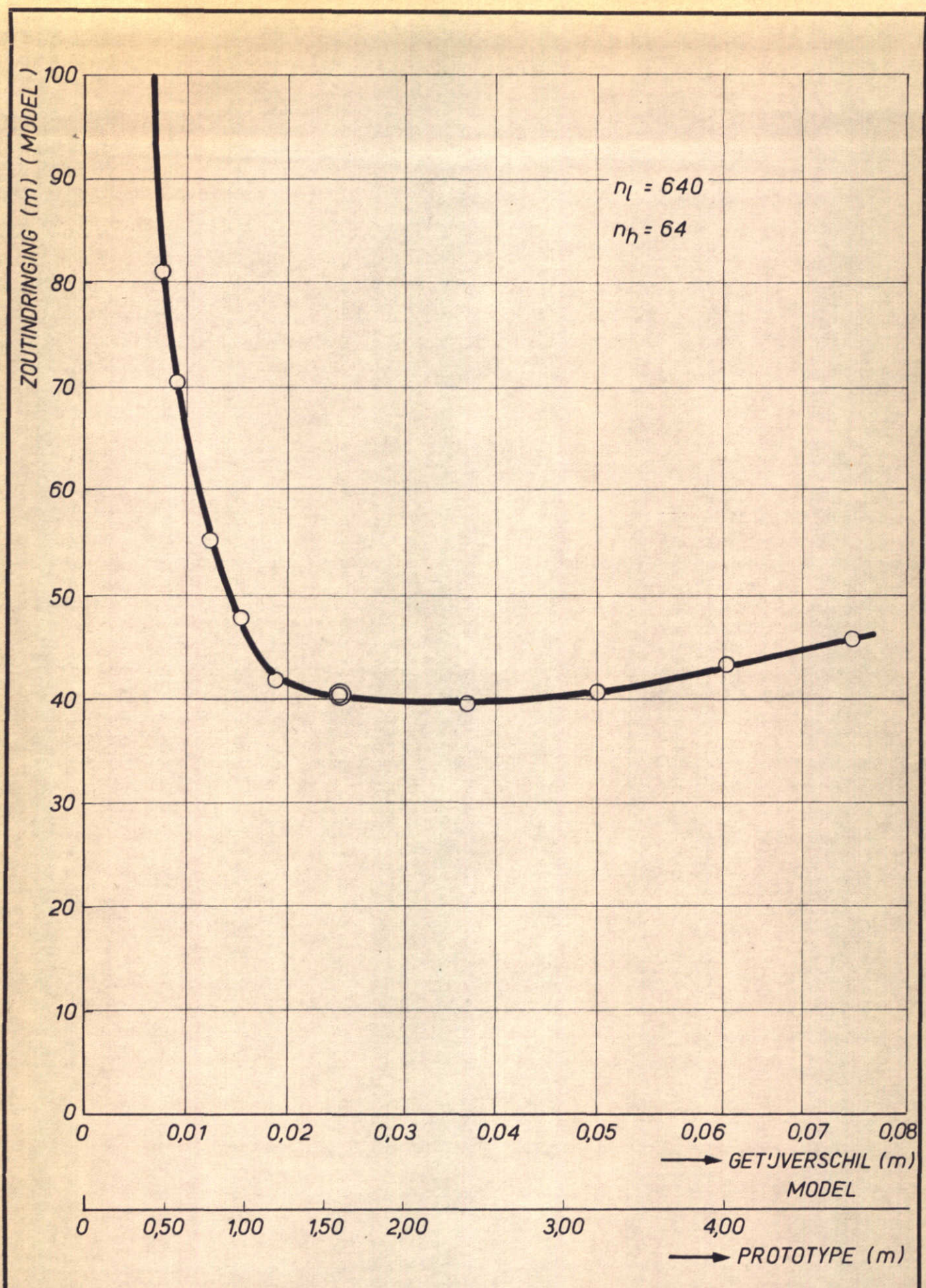
PROEF: 187.00

H.W.K.: $t/T = k + \frac{11}{25}$

$k = 0,1,2, \dots$

JB

A4



ZOUTINDRINGING BIJ VARIATIE GETJVERSCHIL
(OVERGENOMEN UIT RAPPORT M896-10)

○ MEETRESULTATEN
● REFERENTIEPROEF

JB
A4

