

DI: 395605

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

getijgootonderzoek

vertrekkingsonderzoek met wandruwheid;
en een combinatie van wand- en bodemruwheid;

variatie lengteschaal

verslag modelonderzoek

BIBLIOTHEEK
Dienst Weg- en Waterbouwkunde
Postbus 5044, 2600 GA DELFT

M 896 - 32

oktober 1976

Z9039

RWS bibliotheek
locatie Utrecht
Postbus 20.000
3502 LA Utrecht

getijgootonderzoek

BIBLIOTHEEK RIJKSWATERSTAAT UTRECHT
NR. Z 9039 CWR

vertrekkingsonderzoek met wandruwheid;
en een combinatie van wand- en bodemruwheid;

variatie lengteschaal

BIBLIOTHEEK
Dienst Weg- en Waterbouwkunde
Postbus 5044, 2600 GA DELFT

- 9 SEP. 1991

verslag modelonderzoek

M 896 - 32

oktober 1976

INHOUD

Lijst van symbolen

	blz.
<u>1</u> <u>Inleiding</u>	1
<u>2</u> <u>Achtergronden</u>	3
2.1 Achtergronden toepassing wandruwheid; twee-dimensionale benadering	3
2.2 Achtergronden toepassing wand- en bodemruwheid; drie-dimensionale benadering	6
2.3 Berekening toegevoegde ruwheid	8
<u>3</u> <u>Beschrijving proeven</u>	14
3.1 Getijgoot	14
3.2 Meetopstelling en meetprogramma	14
3.3 Proefomstandigheden; proevenprogramma	16
3.4 Nauwkeurigheid	18
<u>4</u> <u>Resultaten</u>	20
4.1 Resultaten bij wandruwheid	20
4.2 Resultaten bij wand- en bodemruwheid	22
4.3 Samenvatting resultaten	23
<u>5</u> <u>Interpretatie</u>	25
<u>6</u> <u>Konklusies</u>	31

FIGUREN

Lijst van symbolen

A	dwarsdoorsnede: $A = b \cdot h$
$2a_0$	getijverschil
B	breedte prototype
b	breedte van het model
c	zoutconcentratie
C	Chézy-waarde
C_{mo}	Chézy-waarde van de modelruwheid
C_{proto}	Chézy-waarde van het prototype
C_w	Chézy-waarde van de wandruwheid
C_b	Chézy-waarde van de bodemruwheid
C_D	weerstandskoefficiënt van de wandruwheid betrokken op de gemiddelde snelheid
g	versnelling van de zwaartekracht: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
\bar{H}	gemiddelde waterdiepte in prototype (getij)
h	waterdiepte
\bar{h}	gemiddelde waterdiepte in model (getij)
$h(t)$	waterstand als functie van de tijd
I_E	energieverhang: $I_E = \partial/\partial x \left(\frac{u^2}{2g} + h \right)$
k_b	afmeting van de plaatjes bij bodemruwheid
k_{mo}	ekwivalente zandruwheid van het modelmateriaal
k_s	ekwivalente zandruwheid van de wandstrips
k_w	breedte van de wandstrips
L	onderlinge afstand van de wandstrips
L_{riv}	lengte rivier
$L_{i_{max}}$	maximum zoutindringing
$L_{i_{min}}$	minimum zoutindringing
n	aantal plaatjes per m^2 bodemoppervlakte bij bodemruwheid
n_x	schaal van x: $n_x = \frac{x \text{ in prototype}}{x \text{ in model}}$

Lijst van symbolen (vervolg)

O	natte omtrek
O_b	natte omtrek bij bodemruwheid
O_{mo}	natte omtrek bij ruwheid tengevolge van modelmateriaal
O_w	natte omtrek bij wandruwheid
\bar{p}	gemiddelde druk in de dwarsdoorsnede
$Q(t)$	getijdebiet op de rivierrand
Q_{riv}	konstante rivierafvoer op de rivierrand
R	hydraulische straal: $R = \frac{A}{O}$
R_b	hydraulische straal bij bodemruwheid: $R_b = \frac{b \cdot h}{b} = h$
R_{mo}	hydraulische straal bij modelruwheid: $R_{mo} = \frac{b \cdot h}{b+2h}$
R_w	hydraulische straal bij wandruwheid: $R_w = \frac{b \cdot h}{2h} = \frac{1}{2}b$
T_x	diffusief transport in x-richting
T_y	diffusief transport in y-richting
t	tijd
Δt	stapgrootte in de tijd bij de meting
u	lokale snelheid in de x-richting
\bar{u}	snelheid gemiddeld over de dwarsdoorsnede
\bar{u}^y	gemiddelde snelheid over de vertikaal
u^*	wandschuifspanningssnelheid
v	snelheid in de y-richting
x	koördinaat in de hoofdstroomrichting
Δx	stapgrootte in x-richting bij de meting
y	koördinaat in de verticale richting
Δy	stapgrootte in y-richting bij de meting
α	dimensieloze ekwivalente zandruwheid van de wandruwheid: $\alpha = k_s/k_w$
$\beta_{1,2,3,4}$	koëfficiënten

Lijst van symbolen (vervolg)

Δ	dikte van de viskeuze laag
δ	vertrekking $\delta = n_L/n_h$
ν	kinematische viscositeit
ρ	dichtheid
$\Delta\rho$	dichtheidsverschil tussen zee- en rivierwater
$\Delta\Delta\rho$	fout in instelling van $\Delta\rho$
$\bar{\rho}$	gemiddelde dichtheid over de dwarsdoorsnede
ρ_{zee}	dichtheid van het water in het zeereservoir
ρ_{rivier}	dichtheid van het zoete water van de rivierafvoer in het model
σ	standaardafwijking
τ	schuifspanning
τ_b	schuifspanning tengevolge van bodemruwheid
τ_{mo}	schuifspanning tengevolge van ruwheid modelmateriaal
τ_w	schuifspanning tengevolge van wandruwheid

1 Inleiding

Bij het onderzoek aan estuaria met behulp van vertrokken schaalmodellen kunnen de volgende belangrijke punten onderscheiden worden:

- Schaalkeuze: de keuze van de horizontale en de verticale schaal, waarbij impliciet een bepaalde vertrekking (verhouding lengteschaal, diepteschaal) gekozen wordt.
Voor een juiste keuze is het nodig te beschikken over een evaluatie van de mogelijke vertrekkingen op grond van ervaring met vertrokken modellen en op grond van vertrekkingsonderzoek zoals dat in de getijgoot (en mogelijk elders) uitgevoerd is.
- Geometrische schematisatie: bij het ontwerp van een model kan gekozen worden voor een zeer nauwkeurige reproductie van de geometrie (havens, kribben, bodemconfiguratie etc.) of als ander extreem voor een eenvoudig rechthoekig profiel, waarbij het doorstroomprofiel in overeenstemming is met het prototype. Hiervoor is het nodig te beschikken over kennis van de ruwheidsbijdrage (invloed op getijbeweging) van de verschillende mechanismen (wand- t.o.v. bodemruwheid; invloed kribben, havens en bodemvorm) en de mengende werking van deze mechanismen. Eventueel kunnen bij een sterk geschematiseerde reproductie bepaalde mechanismen door kustgrepen vervangen worden waarvan de invloed op de waterbeweging en de zoutverdeling gelijk is.
- Ruwheidselement: het ruwheidselement (in verband met de vertrekking) beïnvloedt de mate van reproductie van het snelheidsveld (1, 2 of 3-dimensionaal) en beïnvloedt tevens de verticale menging. Op deze manier kan het ruwheidselement tevens gebruikt worden om geometrische mengmechanismen (havens, kribben etc.) in een sterk geschematiseerd model te vervangen.

Voor een beter inzicht in de invloed van het type ruwheid en de wijze van weergave van de ruwheid in het model en in de invloed daarbij van de vertrekking zijn de bestaande onderzoeken met bodemruwheid en staafjesruwheid (zie hierna) aangevuld met proeven waarbij achtereenvolgens:

- a) een bepaald type wandruwheid bij variabele vertrekking geometrisch werd verkleind en de ruwheid werd aangevuld met bodemruwheid in de vorm van plaatjes (een gebruikelijke techniek voor estuariummodellen)
- b) bij variatie van de vertrekking alle benodigde ruwheid in de vorm van wand-

ruwheid werd aangebracht. Hierbij werd de geometrische gelijkvormigheid dus verlaten.

Bij dit onderzoek is de verticale schaal gelijk gehouden ($n_h = 64$) en de horizontale schaal gevarieerd (320, 640, 1280) waarbij de invloed van de vertrekking (5, 10 en 20) op de reproductie van snelheids- en zoutverdeling kan worden nagegaan.

Hierbij wordt gewerkt met een denkbepildig prototype, waarvan de karakteristieken overeenkomen met de Rotterdamsche Waterweg.

Het onderzoek is uitgevoerd in de getijgoot (zie paragraaf 3.1). In dit model zijn reeds enkele onderzoeken gewijd aan het effect van vertrekkingen op de zoutverdeling. Deze onderzoeken zijn:

- Verslag M 896-13: Schaalonderzoek. Hierbij is de dichtheidsverdeling ten gevolge van een bepaalde randinstelling bij de vertrekkingen 5, 10 en 20 onderling vergeleken. De verticale schaal is konstant gehouden (vertikale schaal: 64; horizontale schalen: 320, 640 en 1280). Voor de extra modelruwheid is gebruik gemaakt van staafjes- en bodemruwheid (plaatjes). Tevens zijn bij de proeven verschillende luchtdebieten toegepast ter versterking van de menging. Totaal 18 proeven.
- Verslag M 896-19: Schaalonderzoek; variatie verticale schaal. Bij dit onderzoek is gekeken naar het effect van de vertrekkingen 10 en 16 bij gelijkblijvende lengteschaal (640) en variabele diepteschaal (64 en 40). Voor de extra modelruwheid is gebruik gemaakt van staafjes. Tevens is de rivierafvoer gevarieerd (3x). De overige randinstellingen waren gelijk aan die bij M 896-13. Totaal 6 proeven.
- Verslag M 896-24: Aanvullend schaalonderzoek; proeven met gemengde en laagde omstandigheden.

Hierbij is gekeken naar de zoutverdeling bij de vertrekkingen 10 en 20 waarbij de lengteschaal gevarieerd is (640 en 1280) en de diepteschaal konstant gehouden is (64). De extra modelruwheid is aangebracht door middel van staafjes. Gevarieerd zijn verder: getijverschil, rivierafvoer en gootlengte. De overige randinstellingen waren gelijk aan die bij M 896-13.

Het onderzoek is uitgevoerd in het kader van het getijgootonderzoek in opdracht van Rijkswaterstaat, Deltadienst, Hoofdafdeling Waterloopkunde.

De proeven zijn uitgevoerd in de periode juli-augustus 1975.

Het onderzoek stond onder leiding van ir. J.P. Koenis, die ook dit verslag samenstelde.

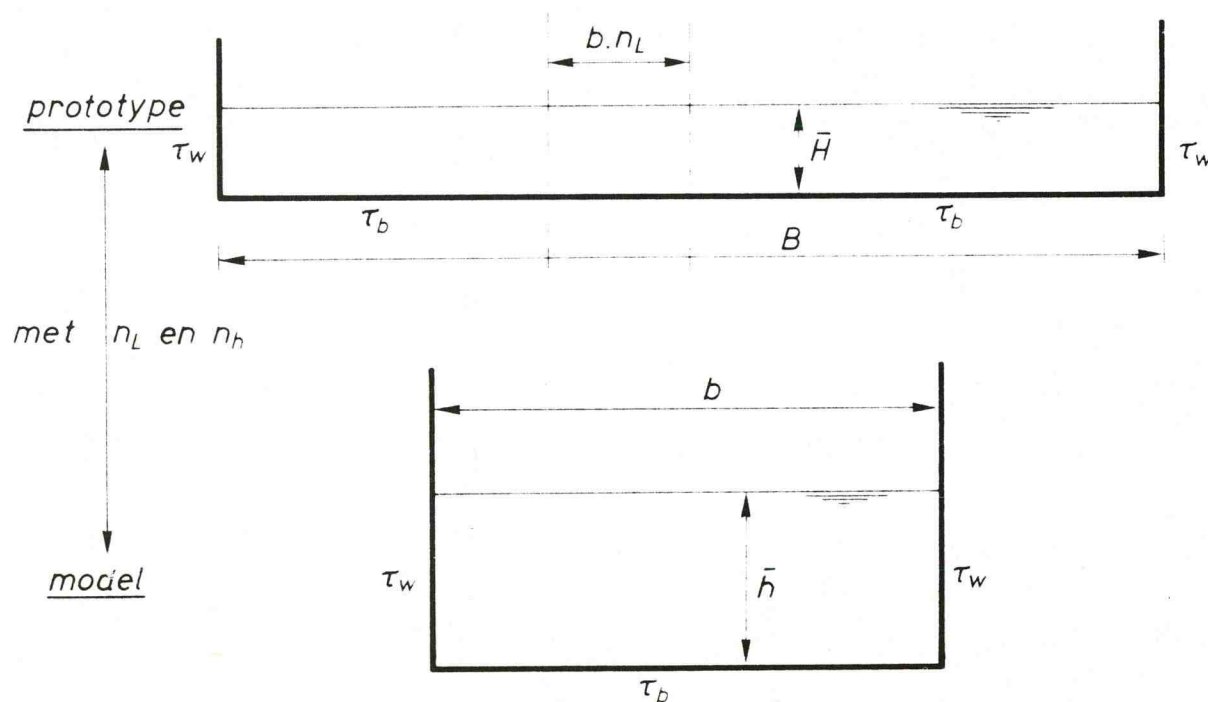
2 Achtergronden

2.1 Achtergronden toepassing wandruwheid; twee-dimensionale benadering

Met een twee-dimensionale benadering van het prototype wordt hier bedoeld dat het model een afbeelding op schaal is van een prototypesituatie, waarbij geen variatie optreedt in de dwarsrichting van de grootheden die een rol spelen (dichtheid, snelheid, waterdiepte).

Wel dus variaties in lengte- en diepterichting.

Voorbeeld



Dwarsdoorsnede waarbij: \bar{H} = gemiddelde waterdiepte prototype
 B = breedte prototype
 τ_b = bodemschuifspanning
 τ_w = wandschuifspanning

$$B \gg \bar{H} \rightarrow R = \frac{A}{O} = \frac{B \cdot \bar{H}}{B + 2\bar{H}} \approx \bar{H}$$

waarbij: R = hydraulische straal
A = "natte" doorsnede
O = "natte" omtrek
 n_h = schaal voor de verticale lengtemaat
 n_L = schaal voor de horizontale lengtemaat
 $n_x = \frac{\text{waarde van } x \text{ in prototype}}{\text{waarde van } x \text{ in model}}$
b = breedte model
 \bar{h} = gemiddelde waterdiepte model

Bovenstaand model is een afbeelding van een "moot" van het prototype; d.w.z. $b \cdot n_L \ll B$.

De schuifspanning langs de verticale wanden (oevers) heeft in deze prototype-situatie geen invloed op het snelheidsveld ter plaatse van de moot die in het model gereproduceerd wordt.

Ter bepaling van de totale effectieve ruwheid ten behoeve van een juiste reproductie van de getijvoortplanting is uitgegaan van de een-dimensionale bewegingsvergelijking.

Deze vergelijking luidt:

$$\rho \left(\frac{\delta \bar{u}}{\delta t} + \bar{u} \frac{\delta \bar{u}}{\delta x} \right) + \frac{\delta \bar{p}}{\delta x} + \frac{\tau_b}{R} = 0 \quad (2.1)$$

waarbij:

ρ = dichtheid van het water in kg/m^3
 \bar{u} = de over de dwarsdoorsnede gemiddelde snelheid in de hoofdstroomrichting
 \bar{p} = de over de dwarsdoorsnede gemiddelde druk
 τ_b = schuifspanning langs de bodem
R = hydraulische straal $\approx \bar{H}$
 $\tau_b = (g/C^2) \cdot \rho \cdot \bar{u}|\bar{u}|$ (per definitie)
g = versnelling van de zwaartekracht
C = Chézy-waarde.

Toepassing van de schaalregels op de tweede en vierde term van vergelijking (2.1), waarbij gebruik gemaakt wordt van de definitie voor de schuifspanning ($\tau_b = (g/C^2) \cdot \rho \cdot \bar{u}|\bar{u}|$) levert voor de schaal van g/C^2 :

$$n \frac{g}{C^2} = \frac{n_R}{n_L} \approx \frac{n_h}{n_L} \quad (\text{indien } R \approx h) \quad (2.2)$$

Stel: de vertrekking = $\frac{n_L}{n_h} = \delta$ (2.3)

Dan volgt uit de vergelijkingen (2.2) en (2.3):

$$n \frac{g}{C^2} = \delta^{-1} \quad (2.4)$$

Met andere woorden: bij vertrokken modellen moet de ruwheid (g/C^2) versterkt worden evenredig met de vertrekking.

Voor de extra ruwheid kan gekozen worden uit:

- bodemruwheid (strips, plaatjes, blokjes, etc.)
- staafjesruwheid
- wandruwheid
- combinaties van bovenstaande mogelijkheden.

Bodemruwheid

Bij dit ruwheidstype is de stroming in het model (mist de wanden zeer glad zijn) zo goed mogelijk twee-dimensionaal.

StAAFjes- en wandruwheid

Beide ruwheidstypes tasten het (twee-dimensionale) karakter van de stroming aan. Door de staafjesruwheid ontstaat een te homogene snelheidsverdeling in de vertikaal, waardoor bij homogene dichtheid een een-dimensionale stroming ontstaat. Door de wandruwheid ontstaat een drie-dimensionale stroming of indien de bodem zeer glad is, een twee-dimensionale stroming zonder variatie in de verticale richting.

De keuze van het ruwheidstype hangt dus samen met de nauwkeurigheid waarmee het snelheidsveld gereproduceerd moet worden ($\bar{u}^y = u(x,t)$ of $u = u(x,y,t)$). Deze keuze is daarnaast zeer belangrijk voor de reproductie van de dichtheidsverdeling. Bij gelijke totale ruwheid en dus gelijke invloed op de getijvoortplanting is de invloed op de menging van de verschillende ruwheidstypes duidelijk verschillend. Hierdoor ontstaat een invloed van het type ruwheid op

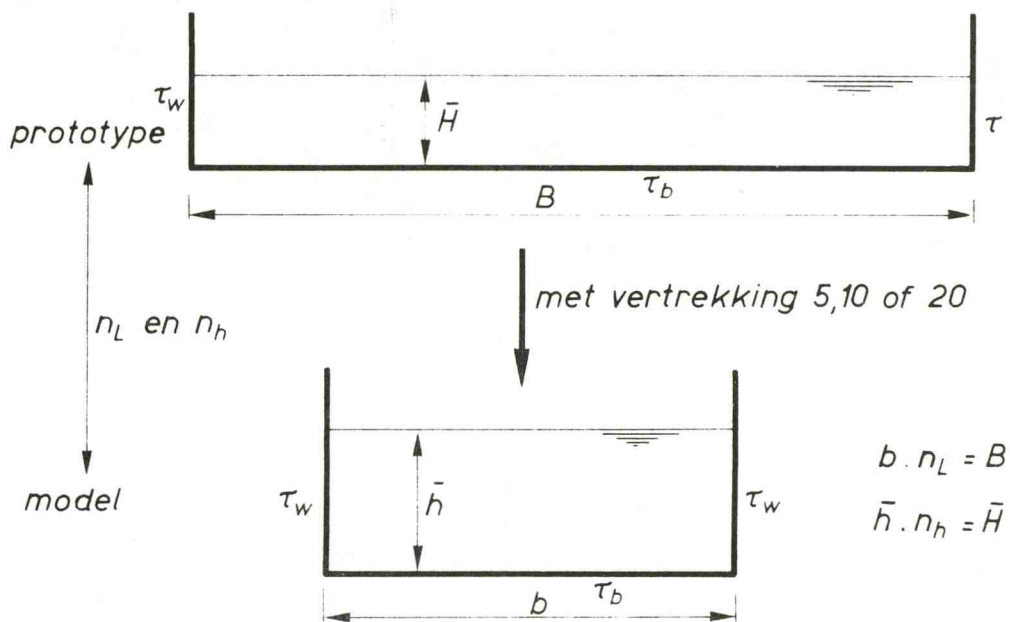
de zoutverdeling door enerzijds de invloed op de menging (turbulentie) en anderzijds de invloed op de reproductie van het snelheidsveld waardoor de dispersie ten gevolge van snelheidsvariatiies over het profiel wordt beïnvloed.

Wanneer gekozen wordt voor wandruwheid in de vorm van strippen dan kan de benodigde ruwheid, uitgedrukt in de effectieve zandruwheid van de strippen berekend worden als aangegeven in paragraaf 2.3.

2.2 Achtergronden toepassing wand- en bodemruwheid; drie-dimensionale benadering

Hierbij is gedacht aan een prototype met een rechthoekige dwarsdoorsnede met zodanige verhouding tussen de breedte (B) en de gemiddelde diepte (\bar{H}) dat het model een afbeelding is op schaal (met vertrekking) van het gehele prototype. Hierbij is in het prototype de bijdrage van de wandruwheid tot het totale verhang over het algemeen niet verwaarloosbaar (kribben, haveningangen).

Voorbeeld



Hierbij kan weer de een-dimensionale bewegingsvergelijking gebruikt worden:

$$A\rho\left(\frac{\delta\bar{u}}{\delta t} + \bar{u} \frac{\delta\bar{u}}{\delta x}\right) + A \frac{\delta\bar{p}}{\delta x} + 0 \cdot \tau = 0 \quad (2.5)$$

waarbij:

$$A = \text{"natte" doorsnede} = b \cdot \bar{h}$$

$$0 = \text{"natte" omtrek} = b + 2\bar{h}$$

De schuifspanning τ kan opgesplitst worden in de schuifspanning langs de verticale wanden (τ_w) en in de schuifspanning langs de bodem (τ_b). Wanneer uitgegaan wordt van een lineaire superpositie van de beide schuifkrachten (schuifspanning x oppervlakte), dan levert dit:

$$0 \cdot \tau = \tau_b \cdot b + \tau_w \cdot 2\bar{h} \quad (2.6)$$

Met de uitdrukking voor de wandschuifspanning:

$$\tau = \frac{g}{c^2} \cdot \rho \cdot \bar{u}|\bar{u}| \quad (2.7)$$

wordt vergelijking (2.5) dan:

$$\rho\left(\frac{\delta\bar{u}}{\delta t} + \bar{u} \frac{\delta\bar{u}}{\delta x}\right) + \frac{\delta\bar{p}}{\delta x} + \underbrace{\frac{g}{c_b^2 \cdot \bar{h}} \cdot \rho \cdot \bar{u}|\bar{u}|}_{\text{t.g.v. bodemruwh.}} + \underbrace{\frac{g}{c_w^2 \cdot \frac{b}{2}} \cdot \rho \cdot \bar{u}|\bar{u}|}_{\text{t.g.v. wandruwh.}} = 0 \quad (2.8)$$

*a_w = 1/2 b h
wandruwheid*

Ten gevolge van de vertrekking blijft de onderlinge verhouding tussen de Chézy-waarden voor de wand en de bodem niet gelijk. Met de schaalregels kan uit vergelijking (2.8) afgeleid worden dat:

$$n_{C_{\text{bodem}}} = \sqrt{\frac{n_L}{n_h}} = \sqrt{\delta}$$

$$n_{C_{\text{wand}}} = \sqrt{\frac{n_L}{n_b}} = \sqrt{\frac{n_L}{n_L}} = 1 \quad (2.9)$$

In het model verandert dus de verhouding tussen de beide Chézy-waarden afhankelijk van de vertrekking.

Een berekening van de juiste verdeling van de ruwheid over de wanden en de bodem in het model is alleen mogelijk als de verhouding tussen beide in het prototype bekend is.

De aanpak, waarvoor bij dit onderzoek gekozen is, verloopt als volgt. Bij vertrekking 5 is een zodanige ekwivalente zandruwheid voor de wandruwheid (k_s) berekend dat samen met de eigen ruwheid van het modelmateriaal (uitgedrukt in k_{mo}) de totale ruwheid van het model op schaal in overeenstemming is met de aangenomen waarde van het prototype.

Bij de vertrekkingen 10 en 20 zijn de afmetingen van het wandruwheidspatroon volgens de geldende lengteschaal aangepast. Op deze manier blijft de Chézy-waarde voor de wandruwheid konstant voor alle vertrekkingen. Meer details over de berekening van de Chézy-waarden is gegeven in paragraaf 2.3. De benodigde extra bodemruwheid bij de vertrekkingen 10 en 20 is aangebracht in de vorm van bodemplaatjes ($0,02 \times 0,02 \text{ m}^2$). Het model bij vertrekking 5 heeft zo gefungeerd als prototype voor de vertrekkingen 10 en 20.

2.3 Berekening toegevoegde ruwheid

Bij de berekening van de totale modelruwheid moet uitgegaan worden van de ruwheid in het prototype.

Wanneer daarbij gewerkt wordt met de Chézy waarde kan dit leiden tot moeilijkheden en/of misverstanden. De schaal voor de Chézy-waarde volgt uit de vergelijkingen (2.1) en (2.2):

$$n_C = \sqrt{\frac{n_L}{n_R}}$$

In het algemeen geldt dat n_R niet eenduidig uitgedrukt kan worden in de gekozen lengte- en diepteschaal. Slechts wanneer de hydraulische straal bij benadering gelijk is aan de waterdiepte, is dit het geval.

Een eenduidige omrekening van prototype naar model is wel mogelijk via de uitdrukking $g/C^2 R$. Uit de bewegingsvergelijking volgt:

$$n \left(\frac{g}{C^2 R} \right) = n_L^{-1} \quad (2.10)$$

In het model kan er gekozen worden voor verschillende types ruwheidselementen zoals wandstrips, bodemplaatjes en staafjes. Daarnaast levert het materiaal van het model (beton of perspex etc.) een bijdrage tot de totale ruwheid. Ter berekening van de totale hydraulische ruwheid is uitgegaan van een lineaire superpositie van de verschillende ruwheidsbijdragen. Bij dit onderzoek is naast de modelruwheid (perspex) gebruik gemaakt van wandruwheid (en bodemruwheid). Dit geeft dan:

$$\frac{1}{C^2 R} \Big|_{\text{model}} = \frac{1}{C_{mo}^2 R_{mo}} + \frac{1}{C_w^2 R_w} \left(+ \frac{1}{C_b^2 R_b} \right) \quad (2.11)$$

waarbij:

- $\frac{1}{C^2 R} \Big|_{\text{model}}$: totale hydraulische modelruwheid
- $\frac{1}{C_{mo}^2 R_{mo}}$: bijdrage van het modelmateriaal tot de totale ruwheid
- $\frac{1}{C_w^2 R_w}$: bijdrage van de wandstrippen tot de totale ruwheid
- $\frac{1}{C_b^2 R_b}$: bijdrage van de bodemplaatjes tot de totale ruwheid
- C_{mo} : Chézy-waarde ten gevolge van het modelmateriaal

$$C_{mo} = 2,5 \sqrt{g} \ln \frac{12 R_{mo}}{k_{mo} + 0,3 \Delta} \quad (2.12)$$

- g : versnelling van de zwaartekracht ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)
- R_{mo} : hydraulische straal voor de modelruwheid ($R_{mo} = \frac{b \cdot h}{b+2h}$)
- k_{mo} : ekwivalente zandruwheid van het modelmateriaal
- Δ : dikte van de viskeuze sublaag

$$\Delta = \frac{11,6 \nu}{u^*} \quad (2.13)$$

ν : kinematische viskositeit
 u^* : schuifspanningssnelheid. Deze u^* wordt berekend uit een proef in het model zonder extra ruwheid bij dezelfde maatgevende snelheid en waterdiepte als de proefomstandigheden.
 ($u^* = \sqrt{gR_{mo}I}$, waarbij I het gemeten energieverhang van bovenstaande proef is)

C_w : Chézy-waarde voor de wandruwheid

$$C_w = 2,5 \sqrt{g} \ln \frac{12 R_w}{\alpha \cdot k_w} \quad (2.14)$$

R_w : hydraulische straal voor de wandruwheid

α : verhouding ekwivalente zandruwheid tot de breedte van de wandstrippen: $\alpha = k_s/k_w$

$$\alpha = 12 \cdot (b/2k_w) \cdot e^{-\left(\frac{0,32}{C_D} \cdot L/k_w\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.15)$$

$$C_D = \beta_1 (b/2k_w)^{-\beta_2} \cdot e^{-\beta_3 (L/k_w)^{-\beta_4}} \quad (2.16)$$

b : breedte van het model

C_D : weerstandskoefficiënt van de wandruwheid betrokken op de gemiddelde snelheid

L : onderlinge afstand van de wandstrippen in de lengterichting

β_i : koefficiënten ($\beta_1 = 27,91$; $\beta_2 = 1,081$; $\beta_3 = 6,189$; $\beta_4 = 0,6645$)

k_s : ekwivalente zandruwheid van de wandstrippen

k_w : breedte van de wandstrippen

C_b : Chézy-waarde voor de bodemruwheid

$$C_b = \left(\frac{1,8}{g} \left(\frac{h}{k_b} \right)^{-2/3} \cdot nk_b^2 \cdot e^{-3nk_b^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.17)$$

h : waterdiepte

- k_b : afmeting (breedte en hoogte) bodemplaatjes (hier 0,02 m)
 n : aantal plaatjes per m^2 bodemoppervlak.

De bovenstaande formules voor de berekening van de wand- en bodemruwheid ((2.14) tot en met (2.17)) zijn ontleend aan de verslagen M 896-9: onderzoek bodemruwheid en M 896-31: wandruwheidsonderzoek.

Wandruwheid

Bij de proeven met alleen wandruwheid als extra ruwheidsmiddel is gebruik gemaakt van vergelijking (2.11) zonder de term van de bodemruwheid. Bij de aanvang van dit onderzoek had de interpretatie van het wandruwheidsonderzoek nog niet plaatsgevonden zodat geen gebruik gemaakt kon worden van de vergelijkingen (2.15) en (2.16). Wel is op grond van de directe proefresultaten van dat onderzoek het benodigde wandruwheidspatroon bepaald.

De breedte van de wandstrippen (k_w) is aangepast aan de lengteschaal en dus aan de vertrekking ($\delta = 5$: $k_w = 0,06$ m; $\delta = 10$: $k_w = 0,03$ m; $\delta = 20$: $k_w = 0,015$ m). Toepassing van $k_w = 0,06$ m bij alle vertrekkingen zou vooral bij $\delta = 20$ een te grote beperking geven van het dwarsprofiel ($\sim 20\%$) terwijl bij toepassing van $k_w = 0,03$ m en dus zeker bij $k_w = 0,015$ m voor alle vertrekkingen de totale ruwheid omgerekend naar het prototype te gering zou zijn ($C_{\text{proto}} > 72 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$).

Bij de bovengenoemde ruwheidspatronen is de situatie bij de vertrekking 20 maatgevend voor de maximale ruwheid die gerealiseerd kan worden in het model. Volgens onderstaande tabel 2.1 bleek dit op grond van de directe proefresultaten van het wandruwheidsonderzoek overeen te komen met een $C_{\text{proto}} = 68,6 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$.

δ	α -waarde (gekozen L/k_w)			k_s	$\frac{1}{C^2 R} [m^{-2} s^2]$	C_{proto}
	$k_w = 0,015 \text{ m}$	$k_w = 0,03 \text{ m}$	$k_w = 0,06 \text{ m}$			
5			7,8 (32)	0,468 m	$4,934 \cdot 10^{-3}$	
10		11,3 (12)		0,340 m	$9,869 \cdot 10^{-3}$	
20	12,0 (12)			0,180 m	$19,738 \cdot 10^{-3}$	
proto					$15,420 \cdot 10^{-6}$	$68,6 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$

waarbij: $k_{mo} = 0,08 \cdot 10^{-3} \text{ m}$;
 $u^* = f(\bar{u} = 0,20 \text{ m/s}; \bar{h} = 0,216 \text{ m}) = 10,1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
 $v = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Schatting modelruwheid

tabel 2.1

Op grond van de vergelijkingen (2.15) en (2.16), die ontstaan zijn uit de interpretatie van het wandruwheidsonderzoek, (verslag M 896-31) heeft een herberekening van de totale ruwheid plaatsgevonden, die weergegeven is in onderstaande tabel 2.2.

δ	L/k_w	α	k_w [m]	$\frac{1}{C^2 R} \Big _{\text{model}}$ [$m^{-2} s^2$]	$\frac{1}{C^2 R} \Big _{\text{proto}}$ [$m^{-2} s^2$]	Procentuele afwijking t.o.v. gemiddelde $\frac{1}{C^2 R} \Big _{\text{proto}}$
5	32	6,35	0,06	$4,542 \cdot 10^{-3}$	$14,194 \cdot 10^{-6}$	- 3,9%
10	12	11,25	0,03	$9,827 \cdot 10^{-3}$	$15,355 \cdot 10^{-6}$	+ 4,0%
20	12	11,25	0,015	$18,869 \cdot 10^{-3}$	$14,741 \cdot 10^{-6}$	- 0,1%
				gemiddeld:	$14,763 \cdot 10^{-6}$	

$C_{proto} = 70,1 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$

Berekende modelruwheid

tabel 2.2

Uit tabel 2.2 volgt dat de gemiddelde Chézy-waarde omgerekend naar het prototype $70,1 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$ is geweest en dat de fout in de berekende waarde voor C_{proto} bij de drie vertrekkingen $\leq 2\%$.

Wand- en bodemruwheid

Het ruwheidspatroon voor de proeven met wand- en bodemruwheid bij de vertrekkingen 5, 10 en 20 is bepaald uit een aantal permanentieproeven die hiervoor speciaal uitgevoerd zijn in het kader van het wandruwheidsonderzoek (verslag M 896-31). Hierbij is uitgegaan van een $C_{\text{proto}} = 60 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$. Hoewel bij de proeven met alleen wandruwheid slechts een waarde van $C_{\text{proto}} \approx 70 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$ gehaald kon worden, is hier toch gekozen voor $C_{\text{proto}} = 60 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$, omdat deze waarde dan in overeenstemming is met die van de andere schaalonderzoeken en omdat de ruwheid bij $C = 70 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$ tamelijk laag is voor prototypesituaties.

Bij vertrekking 5 (zonder bodemruwheid) is bepaald welke L/k_w -verhouding nodig was om een ruwheid te realiseren die overeenkomt met $C_{\text{proto}} = 60 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$. Dit gaf: $L/k_w = 18$. Voor de vertrekkingen 10 en 20 zijn permanentieproeven uitgevoerd met elk drie verschillende bodemruwheidspatronen.

Door interpolatie en extrapolatie van deze drie proeven is het benodigde aantal plaatjes bepaald (zie figuur 1). De gegevens hiervoor zijn weergegeven in onderstaande tabel 2.3, waarbij in de laatste kolom de gevonden waarde is weergegeven.

δ	C_{proto} [$\text{m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$]	$\frac{1}{C^2 R_{\text{model}}}$ [(m/s) $^{-2}$]	L/k_w	k_w [m]	n = aantal plaatjes/ m^2 (gemeten $\frac{1}{C^2 R_{\text{model}}} * 10^3$)			n
					proef 1	proef 2	proef 3	
5	60	$6,432 \cdot 10^{-3}$	18	0,06	-	-	-	-
10	60	$12,864 \cdot 10^{-3}$	18	0,03	40 (13,21)	50 (13,83)	60 (14,63)	36
20	60	$25,728 \cdot 10^{-3}$	18	0,015	50 (22,00)	100 (26,23)	150 (30,91)	90

tabel 2.3

3 Beschrijving proeven

3.1 Getijgoot (zie figuur 2)

De proeven voor dit onderzoek zijn uitgevoerd in de getijgoot. De getijgoot heeft een lengte van 101,5 m en een rechthoekige dwarsdoorsnede met een breedte van 0,672 m. De grootste toelaatbare waterdiepte bedraagt 0,50 m. De bodem van de goot ligt horizontaal.

Aan het benedenstroomse einde is de goot verbonden met een zeebassin van 6 x 8 x 1,5 m. Het verticale getij (waterstanden) op zee wordt geregeld met een regelklep. Het horizontale getij (debiet) aan het bovenstroomse einde wordt geregeld door middel van een getijtank.

De dichtheid van het zeewater wordt konstant gehouden door middel van een regelsysteem met pekelinjectie. De temperatuur van het zoete rivierwater wordt aangepast aan de temperatuur van het zeewater voor het in stand houden van een konstant dichtheidsverschil tussen zee- en rivierwater. Bij de regeling van het horizontale getij (debiet) op de bovenstroomse rand kan slechts gebruik gemaakt worden van homogeen zoet water. De randinstelling (vertikaal getij, rivierafvoer e.a.) moet dan ook zodanig zijn dat de maximale zoutindringing enige afstand verwijderd blijft van de bovenstroomse rand.

Voor een meer uitgebreide beschrijving van de getijgoot wordt verwezen naar het verslag M 896-2: Bouw getijgoot en opzet getijgootbedrijf.

3.2 Meetopstelling en meetprogramma

Ter vergelijking van de getijvoortplanting en de dichtheidsverdeling bij de vertrekkingen 5, 10 en 20 zijn de dichtheden, de snelheden en de waterstanden gemeten als functie van de tijd en de plaats (in de verticale en horizontale (lengte)richting) in gediskretiseerde vorm. Diskretisering betekent een keuze van de stapgrootte. De gebruikelijke stapgroottes bij het getijgootonderzoek zijn:

tijd : $\Delta t = \frac{1}{2}$ uur prototypetijd; hieruit volgt bij een dubbeldaags getij
per getijcyclus: $t/\Delta t = 1, 2, \dots, 25$

plaats: $\Delta x = 2,341$ km prototype; dit komt overeen in het model met

$$\delta = 5 : \Delta x = 7,316 \text{ m}$$

$$\delta = 10 : \Delta x = 3,658 \text{ m}$$

$$\delta = 20 : \Delta x = 1,829 \text{ m}$$

$$x/\Delta x = 1,2,3,\dots,16 \text{ (bij } \delta = 5 : x/\Delta x = 1,2,\dots,8) \text{ (zie figuur 4)}$$

$\Delta y = 1,062 \text{ m}$ prototype; dit komt overeen met 1/13 van de gemiddelde waterdiepte; $\Delta y_{\text{model}} = 16,59 \text{ mm}$

$$y/\Delta y = 1,2,3,\dots,12.$$

Bovenstaande stapgroottes zijn ontstaan uit een onderzoek naar de gewenste stapgroottes in verband met het berekenen van de gradiënten van de verschillende grootheden (zie hiervoor verslag M 896-5: Numerieke aspecten gegevensverwerking getijgootonderzoek).

De verschillende grootheden zijn als volgt gemeten:

Waterstanden

De waterstanden zijn gemeten met de zogenaamde Wavo's (waterstandvolgers) die vast opgesteld stonden in de standaard meetstations van de getijgoot:

$$x/\Delta x = 1,2,\dots,16 \text{ met } \Delta x = 3,658 \text{ m (zie figuur 2)}.$$

Snelheden

De snelheden zijn gemeten vanaf de verplaatsbare meetwagens (zie figuur 3). Per meetwagen zijn 3 micromolens bevestigd die tegelijkertijd op drie verschillende dieptes kunnen meten. Per vertikaal zijn 12 punten gemeten.

Dichtheden

De dichtheden zijn berekend uit de metingen van de geleidbaarheid per meetpunt per tijdstap en de gemiddelde temperatuur van het water. De geleidbaarheidsmeting is uitgevoerd analoog aan die van de snelheid (zie figuur 3).

De getijgoot heeft een vaste breedte (0,672 m). Bij toepassing van wandruwheid is het noodzakelijk de breedte van het model bij de verschillende lengteschalen aan te passen. Hiervoor is de onderstaande oplossing gekozen. Bij vertrekking 10 ($n_L = 640$) is de volledige breedte van de getijgoot gebruikt. Bij vertrekking 5 ($n_L = 320$) is het dan nodig te beschikken over de dubbele breedte: $b = 1,344 \text{ m}$. Hiertoe is op slechts één wand van de getijgoot de wandruwheid aangebracht. De andere wand is beschouwd als de symmetrie-as van een dubbele goot. Hoewel deze gladde perspex-wand enige ruwheid heeft en daardoor effect op de snelheidsverdeling, kan het beschouwd worden als een accep-

tabele benadering. De ruwheidsbijdrage van deze "extra" wand is wel verdis-
 konteerd in de totale ruwheid waardoor de getijvoortplanting niet beïnvloed
 werd. Bij vetrekking 20 is een extra tussenwand aangebracht. Op beide kanten
 van deze tussenwand en op beide wanden van de getijgoot zelf is het benodigde
 ruwheidspatroom aangebracht. Op deze manier zijn dus twee identieke stromings-
 situaties ontstaan met breedtes $b = 0,334$ m die in overeenstemming zijn met
 de lengteschaal van vertrekking 20: $n_L = 1280$ ($b = 0,334$ m in plaats van
 $0,336$ m in verband met de dikte van de perspex tussenwand). Een en ander is
 weergegeven in de figuren 5 en 6.

3.3 Proefomstandigheden; proevenprogramma

Het onderzoek is uitgevoerd bij drie combinaties van randinstellingen

- a. referentie-omstandigheden (zie onderstaande tabel 3.1, blz. 17).
- b. gemengdere situatie door middel van een grotere getijverschil: $2a_o = 3,20$ m
 prototype; de overige randinstellingen als bij a
- c. gelaagdere situatie door middel van een grotere rivierafvoer: $Q_{riv} =$
 $1900 \text{ m}^3/\text{s}$ prototype; overige randinstellingen als bij a.

Proevenprogramma

	$\delta=5$	$\delta=10$	$\delta=20$	
Referentie-omstandigheden	T 630	T 631	T 632	wandruwheid
	T 620	T 621	T 622	wand- en bodemruwheid
Refer. + $2a_o = 3,20$ m	T 633	T 634	T 635	wandruwheid
	T 623	T 624	T 625	wand- en bodemruwheid
Refer. + $Q_{riv} = 1900 \text{ m}^3/\text{s}$	T 636	T 637	T 638	wandruwheid
	T 626	T 627	T 628	wand- en bodemruwheid

Randinstellingen					
Referentieproef		Proto	Model		
			$\delta=5$	10	20
Getijverschil	$2a_o$	1,60 m	0,0250 m	0,0250 m	0,0250 m
Waterdiepte	\bar{h}	13,80 m	0,2156 m	0,2156 m	0,2156 m
Breedte	b	430 m	1,344 m	0,672 m	0,334 m
Zoutconcentratie in ‰		30	30	30	30
Dichtheidsverschil t.o.v. rivier	$\Delta\rho$	21-21,5 kg/m ³	21 - 21,5 kg/m ³		
Rivierlengte	L_{riv}	114.660 m	358,31 m	179,16 m	89,58 m
Rivierafvoer	Q_{riv}	950 m ³ /s	2,90 l/s*	2,90 l/s	1,45 l/s
Ruwheid					
- wand + bodemruwheid	C	60 m ^{1/2} /s	26,8 m ^{1/2} /s	19,0 m ^{1/2} /s	13,4 m ^{1/2} /s
- wandruwheid	C	70 m ^{1/2} /s	31,3 m ^{1/2} /s	22,1 m ^{1/2} /s	15,7 m ^{1/2} /s
Gemengdere proef					
Getijverschil	$2a_o$	3,20 m	0,0500	0,0500	0,0500
Gelaagdere proef					
Rivierafvoer	Q_{riv}	1900 m ³ /s	5,80 l/s*	5,80 l/s	2,90 l/s
Schalen: $n = \frac{x_{prototype}}{x_{model}}$					
hoogte	n_h		64	64	64
lengte	n_L		320	640	1280
tijd	n_t		40	80	160
debiet	n_Q		163.840	327.680	655.360
zoutconcentratie	n_c		1	1	1
ruwheid (Chézy-waarde)	n_C		$\sqrt{5}$	$\sqrt{10}$	$\sqrt{20}$

* i.v.m. reproductie van het halve prototype

3.4 Nauwkeurigheid

De nauwkeurigheid van de resultaten van dit onderzoek wordt bepaald door de nauwkeurigheid van de modelinstelling en van de meting van de dichtheid.

Modelinstelling

De grootheden die belangrijk zijn bij de modelinstelling zijn:

- waterstand op zee: $h(t)$
- dichtheidsverschil tussen de zee en de rivierafvoer: $\Delta\rho$
- getijdebiet op de rivierrand: $Q(t)$
- rivierafvoer: Q_{riv}
- ruwheid in het model uitgedrukt als Chézy-waarde: C .

De resultaten van de proeven zijn onderling vergeleken, waardoor bepaalde systematische fouten die bij alle proeven gelijk zijn, buiten beschouwing gelaten worden. Op grond hiervan kunnen de fouten in de instelling van $h(t)$ en $Q(t)$ verwaarloosd worden ten opzichte van de fouten in de overige randinstellingen.

Op grond van ervaring en daarop gericht onderzoek bij de getijgoot kan de onnauwkeurigheid van de overige randinstellingen als volgt gesteld worden. Daarbij is tevens een schatting gemaakt van de verandering van de maximale zoutindringing: $\sigma_{\text{Li}_{\text{max}}}$. Deze schatting is ontleend aan de resultaten van het onderzoek M 896-10: Systematisch onderzoek variatie randvoorwaarden en stromingskondities.

- $\Delta\rho$: de relatieve standaardafwijking in $\Delta\rho$: $\sigma_{\Delta\rho} \approx 1\%$
de standaardafwijking van de absolute fout in de maximale zoutindringing: $\sigma_{\text{Li}_{\text{max}}} \approx 0,2$ km proto (zie tabel 4.1, blz. 24).
- Q_{riv} : $\sigma_{Q_{\text{riv}}} \approx 1\%$; $\sigma_{\text{Li}_{\text{max}}} \approx 0,3$ km proto
- C : $\sigma_C \approx 2\%$; $\sigma_{\text{Li}_{\text{max}}} \approx 0,6$ km proto.

De totale standaardafwijking bedraagt dan:

$$\sigma'_{\text{Li}_{\text{max}}} = \sqrt{\sum \sigma_{\text{Li}_{\text{max}}}^2} = \sqrt{0,2^2 + 0,3^2 + 0,6^2} = \underline{0,7 \text{ km proto}}$$

Meting dichtheid

De onnauwkeurigheid in de meting van de dichtheid via geleidbaarheid en temperatuur kan gesteld worden op: $\sigma_{\rho} = 0,25 \text{ kg/m}^3$.

Deze fout is vooral belangrijk bij de beoordeling van de resultaten bij de punt van de zouttong (lijnen van gelijk dichtheidsverschil: $\Delta\rho = 0,5$ en $1,0 \text{ kg/m}^3$). Voor de dichtheidsvertikaaltjes moet rekening gehouden worden met deze fout bij de overgang zout/zoet in de vertikaal en bij de punt van de zouttong.

4 Resultaten

De resultaten van dit vertrekingsonderzoek zijn grotendeels gepresenteerd in de vorm van figuren. Per randinstelling en type modelruwheid zijn de vertrekkingen 5, 10 en 20 met elkaar vergeleken. Hierbij is gekeken naar:

- getijbeweging in de vorm van twee figuren. In de eerste figuur zijn de waterstanden van de verschillende vertrekkingen in de overeenkomstige meetstations (zie figuur 4) $x/\Delta x = 2, 8$ en 16 met elkaar vergeleken. In de tweede figuur is op dezelfde manier de gemiddelde snelheid gegeven van de meetstations $x/\Delta x = 1, 8$ en 16 . Deze gemiddelde snelheid is berekend uit de snelheidsmetingen in het midden van het model. (Bij $\delta=5$ is gemeten op $2/3$ van de getijgootbreedte vanaf de wand waarop de ruwheid aangebracht is.) De gemiddelde snelheid is een maat voor het totale debiet in een bepaalde doorsnede, waarbij verschillen in het snelheidsprofiel in de dwarsrichting bij de vertrekkingen oorzaak zijn van systematische fouten.
- dichtheidsverdeling in de vorm van vijf figuren. De eerste drie geven een vergelijking tussen de dichtheidsvertikalen van de vertrekkingen op de 25 tijdstappen $t/\Delta t$ voor de meetstations $x/\Delta x = 2, 5$ en 8 . De laatste twee figuren geven op de tijdstippen van minimale zoutindringing ($t/\Delta t = 1$) en van maximale zoutindringing ($t/\Delta t = 13$) een vergelijking van de dichtheidsverdeling bij de verschillende vertrekkingen door middel van lijnen met een gelijk dichtheidsverschil ten opzichte van het zoete rivierwater (het ingestelde dichtheidsverschil in de zee is ook afgestemd op de dichtheid van het zoete rivierwater).

De toegekende beoordelingen aan de overeenstemming tussen de verschillende vertrekkingen zijn gesteld in kwalitatieve termen: goed, redelijk, matig en slecht. Om deze begrippen toch iets meer te kwantificeren kunnen er de volgende getalwaarden aan toegekend worden

goed: niet of nauwelijks verschil in de lijnen van gelijk dichtheidsverschil

redelijk: onderling verschil tussen de lijnen van gelijk dichtheidsverschil

gemiddeld kleiner dan één Δx ($\Delta x_{\text{proto}} = 2,3 \text{ km}$)

matig: verschil gemiddeld tussen één en twee Δx

slecht : verschil groter dan twee Δx .

4.1 Resultaten bij wandruwheid

Referentie-omstandigheden: $\delta = 5$: T 630

$\delta = 10$: T 631

$\delta = 20$: T 632.

Getijbeweging: figuren 7 en 8.

Dichtheidsverdeling: figuren 9, 10, 11, 12 en 13.

De waterstanden en de snelheden van de vertrekkingen 10 en 20 stemmen goed overeen. De waterstandskromme van vertrekking 5 in station $x/\Delta x = 2$ vertoont een geringe fase- en middenstandverschuiving ten opzichte van de vertrekkingen 10 en 20. De middenstandverschuiving ($\sim 0,1$ cm model) is klein ten opzichte van de gemiddelde waterdiepte (21,6 cm model), waardoor het effect op de getijbeweging en op de zoutverdeling verwaarloosbaar is.

De faseverschuiving is kleiner dan een half uur (~ 20 min) proto waardoor het effect op de getijbeweging en de zoutverdeling gering zal zijn geweest. De snelheidskromme van vertrekking 5 geeft een duidelijke afwijking ten opzichte van de vertrekkingen 10 en 20 die waarschijnlijk veroorzaakt is door de bovengenoemde systematische fout door het verschil in plaats van de gemeten vertikaal in het dwarsprofiel.

De overeenstemming van de dichtheidsverdeling bij de vertrekkingen 5 en 10 is redelijk tot goed, terwijl de overeenstemming tussen de vertrekkingen 10 en 20 matig tot slecht is.

Referentie-omstandigheden + $2a_o = 3,20$ m proto $\delta = 5 : T 633$

 $\delta = 10 : T 634$
 $\delta = 20 : T 635.$

Getijbeweging: figuren 14 en 15.

Dichtheidsverdeling: figuren 16, 17, 18, 19 en 20.

Wat de overeenstemming van de getijbeweging betreft bij de drie vertrekkingen gelden dezelfde opmerkingen als bij bovenstaande proeven T 630, T 631 en T632.

De overeenstemming van de dichtheidsverdeling bij de vertrekkingen 5 en 10 is wederom redelijk tot goed en bij de vertrekkingen 10 en 20 matig tot slecht.

Referentie-omstandigheden + $Q_{riv} = 1900$ m³/s proto $\delta = 5 : T 636$

 $\delta = 10 : T 637$
 $\delta = 20 : T 638.$

Getijbeweging: figuren 21 en 22.

Dichtheidsverdeling: figuren 23, 24, 25, 26 en 27.

Wat de overeenstemming van de getijbeweging betreft gelden weer dezelfde opmerkingen als bij de proeven T 630, T 631 en T 632.

De overeenstemming van de dichtheidsverdeling bij de vertrekkingen 5 en 10 is wederom redelijk tot goed en bij de vertrekkingen 10 en 20 redelijk tot matig.

4.2 Resultaten bij wand- en bodemruwheid

Referentie-omstandigheden: $\delta = 5$: T 620

$\delta = 10$: T 621

$\delta = 20$: T 622.

Getijbeweging: figuren 28 en 29.

Dichtheidsverdeling: figuren 30, 31, 32, 33 en 34.

Wat betreft de overeenstemming van de getijbeweging bij deze drie proeven gelden weer dezelfde opmerkingen als bij de proeven T 630, T 631 en T 632.

De overeenstemming van de dichtheidsverdeling bij de vertrekkingen 5 en 10 is redelijk tot goed, terwijl de overeenstemming bij de vertrekkingen 10 en 20 redelijk is.

Referentie-omstandigheden + $2a_o = 3,20$ m proto $\delta = 5$: T 623

$\delta = 10$: T 624

$\delta = 20$: T 625.

Getijbeweging: figuren 35 en 36.

Dichtheidsverdeling: figuren 37, 38, 39, 40 en 41.

De waterstanden van alle vertrekkingen in meetstation $x/\Delta x = 2$ stemmen goed met elkaar overeen. In de andere meetstations ($x/\Delta x = 8$ en 16) stemmen de vertrekkingen 10 en 20 goed overeen. De overeenstemming in $x/\Delta x = 8$ van vertrekking 5 met de twee anderen is redelijk. De gemiddelde snelheid van de vertrekkingen 10 en 20 stemmen goed overeen. Bij vertrekking 5 is dezelfde fout aanwezig die bij alle proeven reeds is opgetreden.

De overeenstemming van de dichtheidsverdeling is wederom redelijk tot goed bij de vertrekkingen 5 en 10 en redelijk bij de vertrekkingen 10 en 20.

Referentie-omstandigheden + $Q_{riv} = 1900$ m³/s proto $\delta = 5$: T 626

$\delta = 10$: T 627

$\delta = 20$: T 628.

Getijbeweging: figuren 42 en 43.

Dichtheidsverdeling: figuren 44, 45, 46, 47 en 48.

De overeenstemming van de getijbeweging is hetzelfde als bij de zojuist behandelde proeven T 623, T 624 en T 625.

De overeenstemming van de dichtheidsverdeling is weer redelijk tot goed bij de vertrekkingen 5 en 10 en redelijk bij de vertrekkingen 10 en 20.

4.3 Samenvatting resultaten

Getijbeweging : Over het algemeen is er sprake van een goede overeenstemming van de getijbeweging. Bij een aantal proeven met $\delta = 5$ is een geringe fase- en middenstandverschuiving gekonstateerd bij de meting van de waterstand in station $x/\Delta x = 2$. De invloed hiervan op de dichtheidsverdeling wordt verwaarloosbaar geacht. De snelheidsmeting bij de vertrekking 5 is afwijkend van die van de vertrekkingen 10 en 20, doordat bij vertrekking 5 niet in de as van het model gemeten kon worden. Over het algemeen is bij vertrekking 5 een lagere gemiddelde snelheid gevonden.

Dichtheidsverdeling: De overeenstemming tussen de dichtheidsverdelingen bij de vertrekkingen 5 en 10 is redelijk tot goed zowel bij de proeven met alleen wandruwheid als ook bij de proeven met wand- en bodemruwheid. De overeenstemming tussen de dichtheidsverdelingen bij enerzijds de vertrekkingen 5 en 10 en anderzijds de vertrekking 20 is matig tot slecht bij de proeven met uitsluitend wandruwheid en redelijk bij de proeven met wand- en bodemruwheid.

Tijdens de proeven is ook de maximum en minimum zoutindringing bepaald (Li_{\max} en Li_{\min}). Omdat bij deze proeven de situatie redelijk gemengd was, was een nauwkeurige bepaling van deze waarden niet mogelijk. De fout in de bepaling van deze waarden kan gesteld worden op:

$$- \sigma_{Li_{max}} \approx 0,5 \text{ m model} \stackrel{\Delta}{=} 0,4 \text{ km proto } (n_L = 640).$$

In onderstaande tabel 4.1 zijn de waarden voor de zoutindringing gegeven.

Tevens is de fout aangegeven in de instelling van $\Delta\rho$: $\Delta\Delta\rho$

$$\Delta\Delta\rho = \frac{\Delta\rho - \overline{\Delta\rho}^3}{\overline{\Delta\rho}^3} \times 100 ; \overline{\Delta\rho}^3 = 1/3 \sum_{\delta=5,10,20} \Delta\rho_{\delta}$$

Proef nr.	ρ_{zee} [kg/m ³]	ρ_{rivier} [kg/m ³]	\bar{t} [°C]	$\Delta\rho = \rho_{zee} - \rho_{rivier}$ [kg/m ³]	$\Delta\Delta\rho$ [%]	Li_{max} proto [km]	Li_{min} proto [km]
T 620	1019,5	998,3	21,1	21,1	0,2	20,8	9,9
T 621	1019,7	998,7	18,7	21,0	- 0,5	23,9	11,8
T 622	1020,0	998,8	18,7	21,2	0,3	26,9	14,9
T 623	1019,8	998,5	20,3	21,3	0,6	24,2	6,4
T 624	1019,9	998,6	19,3	21,2	0,2	24,7	8,3
T 625	1019,8	998,8	18,5	21,0	- 0,9	28,8	10,1
T 626	1019,5	998,5	20,0	21,0	- 0,2	17,5	3,8
T 627	1019,8	998,7	18,9	21,2	0,5	16,7	6,4
T 628	1019,8	998,7	18,6	21,0	- 0,2	17,2	8,7
T 630	1019,7	998,5	20,3	21,2	- 0,3	24,7	11,8
T 631	1019,7	998,2	21,9	21,5	0,9	26,9	12,1
T 632	1019,9	998,7	19,2	21,2	- 0,7	34,6	20,0
T 633	1019,8	998,6	20,3	21,2	0,2	26,6	8,0
T 634	1019,5	998,2	22,1	21,3	0,9	30,2	11,3
T 635	1019,6	998,7	19,2	20,9	- 1,1	36,4	15,6
T 636	1019,6	998,6	20,3	21,0	- 0,3	19,5	8,2
T 637	1019,3	998,1	21,8	21,1	0,2	20,0	7,0
T 638	1019,9	998,8	19,5	21,1	0,1	22,7	10,8

5 Interpretatie

In dit hoofdstuk wordt een eerste poging gedaan om de resultaten van de verschillende schaalonderzoeken die uitgevoerd zijn in het kader van het getijgootonderzoek (zie hoofdstuk 1: Inleiding) met elkaar te vergelijken en daaruit voorlopige konklusies te trekken. Een en ander is nog niet uitgebreid onderzocht. Dit hoofdstuk moet dan ook meer gezien worden als een opening van de discussie en als start voor verder onderzoek.

Met behulp van de schaalregels kan uit de continuïteitsvergelijking voor het zout afgeleid worden hoe de menging versterkt moet worden in een vertrokken model. Deze vergelijking luidt:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (uc + T_x) + \frac{\partial}{\partial y} (vc + T_y) = 0 \quad (5.1)$$

waarbij:

c : zoutconcentratie

T_x : diffusief transport in x-richting

T_y : diffusief transport in y-richting; de grootte van deze term is een maat voor de menging.

Toepassing van de schaalregels op de termen $\partial/\partial x(uc)$ en $\partial/\partial y T_y$ van deze vergelijking geeft:

$$n_{T_y} = \frac{n_u \cdot n_c \cdot n_h}{n_L} = \frac{n_h}{n_L} \cdot \sqrt{n_h} = \delta^{-1} \cdot \sqrt{n_h} \quad (5.2)$$

wanneer $n_c = 1$.

De vergelijking (5.2) betekent dat bij een konstante diepteschaal zoals bij dit onderzoek, de verticale menging T_y in het model evenredig met de vertrekking δ versterkt moet worden.

(Hetzelfde geldt voor de ruwheid ; zie vergelijking (2-4).)

De menging in het model wordt direkt en indirect veroorzaakt door de ruwheidselementen. Direkt doordat stroomafwaarts van de ruwheidselementjes een zoggebied ontstaat met sterke werveling. De grootte van het zoggebied is afhankelijk van de oppervlakte van de ruwheidselementjes geprojecteerd in de

hoofdstroomrichting en van de grootte van de snelheid ter plaatse van het elementje. De sterkte van de menging zal dus samenhangen met de oppervlakte van de ruwheidselementjes en met het snelheidsveld. Omdat de snelheidsschaal alleen afhankelijk is van de diepteschaal ($n_v = \sqrt{n_h}$) en de diepteschaal bij dit onderzoek konstant gehouden is, mag bij onderlinge vergelijking van deze proeven het effect van de snelheid buiten beschouwing gelaten worden. De ruwheidselementjes veroorzaken ook indirect menging doordat de ruwheid een snelheidsgradiënt veroorzaakt. Door deze snelheidsgradiënt en de bijbehorende schuifspanningen wordt weer turbulentie opgewekt waardoor menging ontstaat. Een koppeling van dit effect aan het aantal ruwheidselementjes of aan het totale oppervlakte van de elementjes is vooralsnog niet mogelijk.

Daarnaast zijn belangrijk de vorm van het ruwheidsmiddel en de plaats van het ruwheidsmiddel ten opzichte van de positie van het grensvlak zout/zoet. Dit kan toegelicht worden met de volgende situatie.

Veronderstel een gelaagde stromingssituatie die gekenmerkt wordt door een onderlaag die homogeen zout is, door een overgangsgebied van zout naar zoet (dikte overgangslaag 5 à 10% van de waterdiepte) en door een bovenlaag die homogeen zoet is. In deze situatie kan de volgende kwalitatieve beschouwing gehouden worden over het verschil tussen bodem- en wandruwheid. Bodemruwheid, waarvan de afmetingen klein zijn ten opzichte van de waterdiepte en ook ten opzichte van de dikte van de zoute onderlaag, veroorzaakt naast weerstand ook menging speciaal in het zogebied. Deze menging ten gevolge van de opgewekte turbulentie in het zogebied is vooral effectief in een gebied van enkele malen de hoogte van de ruwheidselementen. Dit gebied is homogeen zout waardoor deze menging geen verdere dichtheidsverandering geeft. Zout water wordt met zout water vermengd. Een gedeelte van de turbulentie wordt doorgegeven in verticale richting. Ter plaatse van het grensvlak zout/zoet wordt de turbulentie die daar "aankomt" onderdrukt door de daar heersende dichtheidsgradiënt. Afhankelijk van de stromingssituatie en dus van de hoeveelheid turbulentie die opgewekt wordt ter plaatse van de bodemplaatsjes, is de turbulentie ter plaatse van het grensvlak wel of niet in staat zijn kinetische energie om te zetten in potentiële energie in de vorm van menging van zout en zoet water. Wanneer deze menging optreedt, ontstaat er meteen een menging over de gehele onderlaag, omdat de turbulente energie en dus de menging toeneemt naar de bodem. De dikte van de overgangslaag zout/zoet blijft ongeveer even klein. De bovenlaag blijft zoet. De grenslaag schuift dus naar boven terwijl de

dichtheid van de onderlaag afneemt, maar wel homogeen blijft in de vertikaal. Dit effect wordt "entrainment" genoemd.

Wanneer in boven geschetste gelaagde stromingssituatie wandruwheid wordt toegepast strekt het turbulente zoggebied achter de wandstrippen zich uit van de bodem tot aan het oppervlakte. Dit betekent dat ook ter plaatse van het grensvlak direkt turbulentie wordt opgewekt. Wanneer door deze turbulentie menging veroorzaakt wordt, treedt er een vergroting op van de dikte van de overgangslaag zout/zoet waardoor weer een groter gedeelte van het zoggebied effectieve menging van zout en zoet water geeft. Dit proces kan afhankelijk van de randkondities van de stromingssituatie uiteindelijk leiden tot een volledig gemengde situatie. Hier treedt dus niet de bovengenoemde entrainment op, maar een turbulente diffusie die er voor zorgt dat de dikte van de overgangslaag zout/zoet steeds groter wordt.

Voor ruwheid door middel van staafjes geldt dezelfde beschouwing als voor wandruwheid zij het dat de turbulentie een kleinere lengteschaal heeft en daardoor minder mengt (afmetingen staafjes klein t.o.v. gebruikte wandruwheid).

De ervaring bij het getijgootonderzoek leert dat bij proefomstandigheden die overeenkomen met de omstandigheden van dit onderzoek, de dichtheidsverdeling bij bodemruwheid sterk gelaagd is, terwijl bij wandruwheid een veel meer gemengde dichtheidsverdeling ontstaat. Dit is in beeld gebracht door figuur 49.

Uit bovenstaande kan de voorlopige konklusie getrokken worden dat het effect van de bodemruwheid op de vertikale menging gering is in vergelijking met het effect van wandruwheid bij overeenkomstige stromingssituaties.

Een samenvatting van de hier gegeven beschouwing, die voornamelijk kwalitatief van aard is, luidt als volgt.

- a) Bij gegeven diepteschaal moet de vertikale menging in vertrokken modellen versterkt worden evenredig met de vertrekking.
- b) De mengende werking van ruwheidselementjes hangt samen met de oppervlakte van de elementjes loodrecht op de hoofdstroomrichting en met (de grootte van) het snelheidsveld. Bij onderlinge vergelijking van proeven met over-

eenkomstig prototype, waarbij de diepteschaal gelijk is, mag het effect van de snelheid buiten beschouwing gelaten worden omdat de snelheidsschaal slechts afhankelijk is van de diepteschaal ($n_v = \sqrt{n_h}$)

- c) De menging van bodemruwheid bij een gelaagdsysteem (zout/zoet) is zodanig dat zoet water van de bovenlaag gelijkmatig opgemengd wordt over de gehele onderlaag. De bovenlaag blijft homogeen zoet, het grensvlak zout/zoet blijft scherp en beweegt in verticale richting (Entrainment).
- d) De menging van wandruwheid en ook van staafjesruwheid bij een gelaagd systeem is zodanig dat de gelaagdheid wordt afgebroken. De dikte van de overgangslaag zout/zoet wordt steeds groter (turbulente diffusie).
- e) Bij overigens gelijke omstandigheden en dus ook gelijke totale effectieve ruwheid geven wandruwheid en staafjes aanzienlijk meer menging dan bodemruwheid.

De bovenstaande punten zijn getoetst aan de resultaten van de verschillende schaalonderzoeken tot nu toe in de getijgoot (zie ook paragraaf 1: Inleiding). Ten behoeve van de punten a en b zijn in onderstaande tabel 5.1 enkele gegevens verzameld. Hieruit kan gekonkludeerd worden dat de verhoudingen tussen de oppervlaktes niet in alle gevallen ongeveer overeenstemmen met de verhoudingen tussen de vertrekkingen. Vooral wanneer het ruwheidspatroon zodanig is dat de ruwheidselementen elkaar beïnvloeden waardoor relatief veel extra ruwheidsoppervlakte nodig is om de gewenste totale ruwheid te verkrijgen, zijn bovenstaande verhoudingen anders (wandruwheid $\delta = 5 : L/k_w = 32$; $\delta = 10$ en $20 : L/k_w = 12$). Uitgaande van het feit dat de overeenstemming van de dichtheidsverdeling bij de verschillende vertrekkingen en bij de verschillende ruwheidsmiddelen redelijk is, kan gesteld worden dat de mengende werking van de ruwheidselementen analoog verloopt als het effect op de ruwheid. Dat wil zeggen dat wanneer er een reductie optreedt van de ruwheidsbijdrage per element, omdat er sprake is van min of meer onderlinge beïnvloeding, dezelfde reductie ook optreedt voor de menging. De menging van de ruwheidselementjes is dus evenredig met de oppervlakte van deze elementjes loodrecht op de hoofdstroomrichting. De evenredigheidscoëfficiënt is echter afhankelijk van de onderlinge beïnvloeding van de elementjes. Deze afhankelijkheid is gelijk aan de afhankelijkheid voor de ruwheidsbijdrage.

Vertrekking	$\delta=5$	$\delta=10$	$\delta=20$			
Verhouding oppervlakte				$\frac{\delta=10}{\delta=5}$	$\frac{\delta=20}{\delta=5}$	$\frac{\delta=20}{\delta=10}$
<u>Gegevens ruwheid</u>						
<u>Bodemruwheid (M 896-13)</u>						
aantal per m ²	75	206	80			
afmeting [m]	0,02x0,02	0,02x0,02	0,04x0,04			
<u>Staafjes (M 896-13)</u>						
aantal per m ²	11	26	57			
afmeting [m]	0,005 x h	0,005 x h	0,005 x h			
<u>Wandruwheid (M 896-32)</u>						
aantal per m ² (2/Lb)	0,78	8,27	33,3			
afmeting [m]	0,06 x h	0,03 x h	0,015 x h			
<u>Wand- en bodemruwheid (M 896-32)</u>						
Wand:						
aantal per m ² (2/Lb)	1,38	5,51	22,18			
afmeting [m]	0,06 x h	0,03 x h	0,015 x h			
Bodem:						
aantal per m ²	0	36	90			
afmeting [m]	-	0,02x0,02	0,02x0,02			
<u>Oppervlakte \perp hoofdstroomrichting [m²]</u> per m ² horizontaal oppervlak van het model						
Bodemruwheid	0,0300	0,0824	0,1280	2,7	4,3	1,6
Staafjes	0,0119	0,0281	0,0616	2,4	5,2	2,2
Wandruwheid	0,0101	0,0536	0,1079	5,3	10,7	2,0
<u>Wand- en bodemruwheid</u>						
Wand	0,0179	0,0357	0,0719	2,0	4,0	2,0
Bodem	-	0,0144	0,0360			

Wat de punten c en d betreft kan geïllustreerd worden met behulp van figuur 49 dat de verschillen in effect op de zoutverdeling van de verschillende ruwheidselementen ook gelden onder getij-omstandigheden. Bij bodemruwheid treedt er een goed gemengde in verticale zin homogene onderlaag op (lijnen van gelijke dichtheid bijna vertikaal), een scherpe overgang van zout naar zoet (de horizontale gedeeltes van de lijnen van gelijke dichtheid dicht bij elkaar) en een volledig zoetebovenlaag. Karakteristiek zijn de geknikte dichtheidslijnen. Bij wandruwheid en in mindere mate bij staafjes ontstaat een dichtheidsvertikaal zonder scherpe overgang van zout naar zoet (grotere afstand tussen de lijnen van gelijke dichtheid). Dat er geen volledig gemengde vertikaal ontstaat komt door de randinstelling die zo gekarakteriseerd kan worden dat aan de ene kant continu volledig zoet water wordt aangevoerd (rivierafvoer) en aan de andere kant zout water (zee-invloed). Hierdoor wordt een horizontale dichtheidsgradiënt in stand gehouden waardoor de zogenaamde gravitatie-circulatie optreedt waarbij het zwaardere water onder het lichtere water wil wegstromen en het lichtere water over het zwaardere in tegengestelde richting.

Het entrainment-effekt van de bodemplaatjes kan ook gekonstateerd worden bij de proeven met wand- en bodemruwheid.

Bij de vertrekking 20, waarbij een aanzienlijke hoeveelheid ruwheid van de bodemplaatjes komt (zie tabel 5.1), gaan de lijnen van gelijk dichtheidsverschil bij de bodem vertikaal lopen (zie de figuren 34, 41 en 48). Dit laatste is minder het geval bij de vertrekkingen 10 en niet of nauwelijks bij vertrekking 5.

Punt e wordt duidelijk geïllustreerd door figuur 49.

6 Konklusies

Ten aanzien van de resultaten van het vertrekingsonderzoek met wandruwheid en wand- en bodemruwheid kunnen de volgende konklusies geformuleerd worden

- bij een diepteschaal $n_h = 64$ en bij toepassing van alleen wandruwheid op een manier zoals aangegeven in dit verslag geven modellen met een lengteschaal van $5 \text{ à } 10 \times n_h$ een redelijk goede overeenkomstige dichtheidsverdeling. De overeenkomst bij een lengteschaal van $20 \times n_h$ wordt al minder goed.
- bij toepassing van wand- en bodemruwheid op een manier zoals aangegeven is in dit verslag geven modellen met een lengteschaal van $5 \text{ à } 10 \times n_h$ ($n_h = 64$) een redelijk goede overeenstemming, terwijl de overeenstemming bij $20 \times n_h$ nog redelijk genoemd mag worden.

Op grond van de schaalonderzoeken tot nu toe in de getijgoot kan gekonkludeerd worden dat:

- bij een diepteschaal van $n_h = 64$ gelden bovenstaande konklusies voor alle ruwheidstypes (bodemruwheid, staafjes, wandruwheid en wand- en bodemruwheid).
- bij overeenkomstige totale effectieve ruwheid en gelijke randinstellingen heeft elk ruwheidstype een verschillende invloed op de menging en dus op de dichtheidsverdeling. Het effect op de dichtheidsverdeling en de zoutindringing van de keuze van het ruwheidsmiddel is groter dan het effect van de lengteschaal in het gebied: $n_L = 5 \text{ à } 20 \times n_h$. Vooral het effect op de zoutverdeling van enerzijds bodemruwheid en anderzijds staafjes of wandruwheid of wand- en bodemruwheid is groot. Dit houdt in dat in schaalmodellen van estuaria de keuze van de ruwheidsmiddelen een rol kan spelen bij de reproductie van de zoutverdeling.
- bij een lengteschaal $n_L = 640$ en bij ruwheid door middel van staafjes is de overeenstemming tussen de proeven met een diepteschaal $n_h = 1/10 \times n_L$ en $n_h = 1/16 \times n_L$ redelijk (M 896-19). Deze overeenstemming is des te beter naarmate de proefomstandigheden meer gelaagd zijn (hoge rivierafvoer). Dit is in overeenstemming met vergelijking (5.2) : $n_{T_y} = \delta^{-1} \cdot \sqrt{n_h}$ omdat bij gelaagde omstandigheden de invloed van T_y op de zoutverdeling klein is ten opzichte van de konvektieve termen uc en vc .

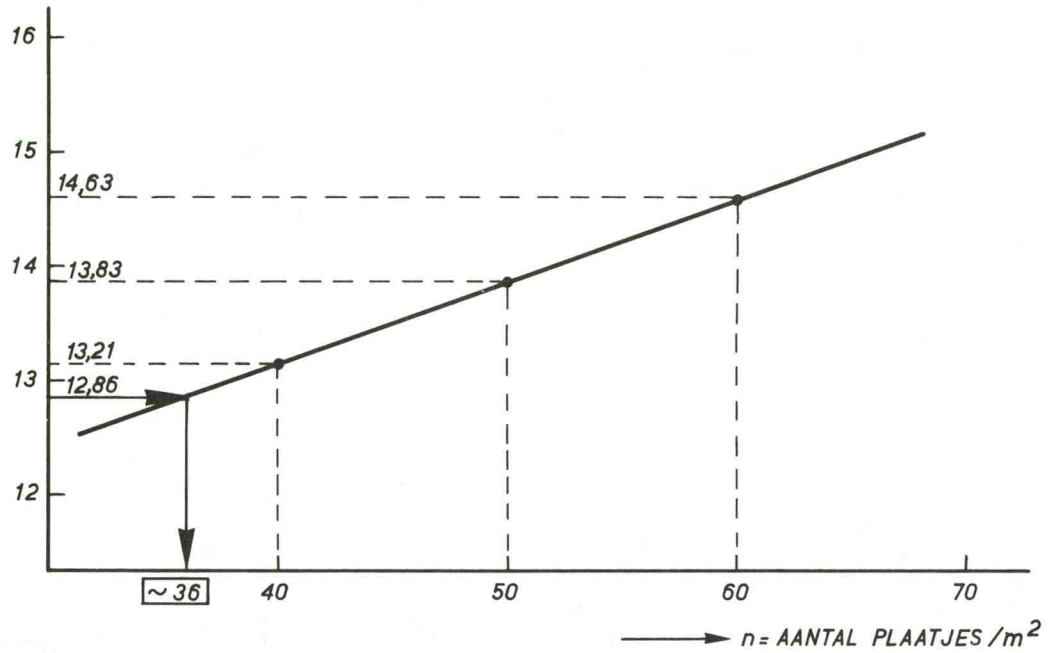
De resultaten van alle schaalonderzoeken tot nu toe bij de getijgoot geven nog geen antwoord op alle vragen die men tegen kan komen bij het ontwerpen

van een schaalmodel met dichtheidsstromen. Een aantal van die vragen zouden verder onderzocht kunnen worden in de getijgoot. Hieraan is ook aandacht besteed in verslag M 896-35/W 76 B 905 L : Programma voor getijgootonderzoek; Waterloopkundig Laboratorium en Rijkswaterstaat Hoofdafdeling Waterloopkunde Deltadienst. Vragen in dit kader zijn:

- wat is het effect van de grootte van de lengte- en diepteschaal bij konstante verhouding op de reproductie van de dichtheidsverdeling? Dit kan bijvoorbeeld onderzocht worden door bij een vertrekking 10 de lengte- en diepteschaal te variëren met factoren 2 en 4 ($n_h = 32/n_L = 320$; $n_h = 64/n_L = 640$; $n_h = 128/n_L = 1280$) speciaal bij gemengde omstandigheden omdat daar het schaafeffect van $n_{Ty} = \delta^{-1} \cdot \sqrt{n_h}$ het grootst is.
- wat is het effect van een variatie van n_h bij konstante n_L vooral bij gemengde proefomstandigheden (wederom in verband met n_{Ty})?
- in hoeverre kunnen schaafeffecten die uit bovenstaand onderzoek volgen, gecompenseerd worden door de keuze van een bepaald ruwheidspatroon of door toevoeging van extra menging door luchtbellen?
- hoe kunnen de effecten van bepaalde geometrische grootheden van het prototype (zoals vorm dwarsprofiel, kribben, etc.) op de dichtheidsverdeling vertaald worden naar de modelgeometrie (sterk geschematiseerd of gelijkvormig nagebouwd) en het toe te passen ruwheidspatroon? In dit kader is de ervaring bij het Getijmodel Rijnmond (M 900/M 1350) dat bij dit geometrisch gelijkvormig model met vertrekking 10 ($n_h = 64/n_L = 640$) de overeenstemming van het model met het prototype goed is, terwijl de invloed van de keuze van het ruwheidsmiddel gering is in vergelijking met de getijgoot waar de geometrische ruwheid ontbreekt.

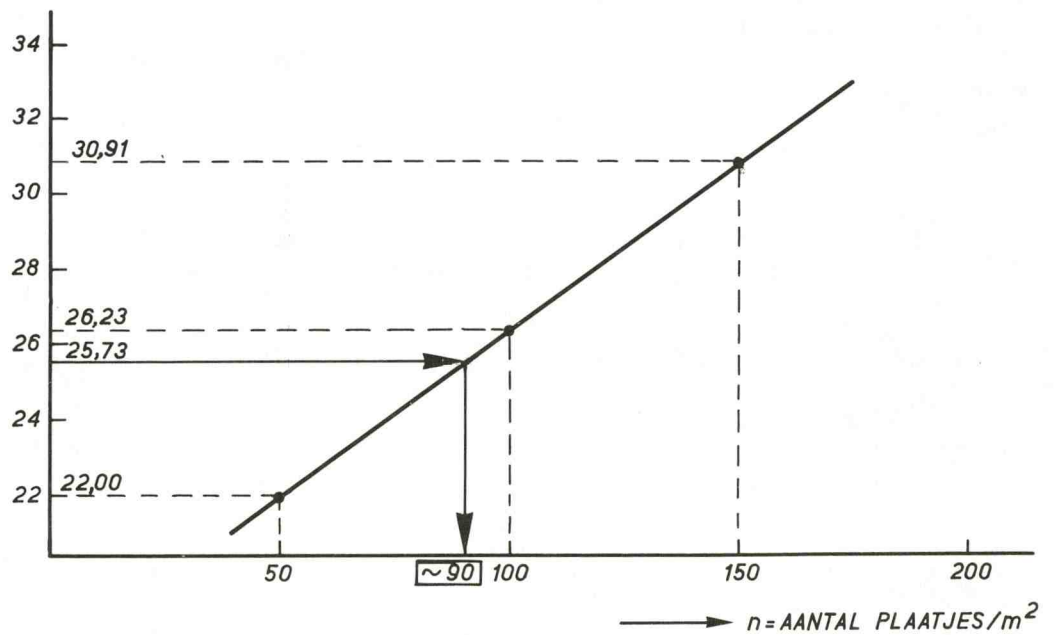
In het kader van het getijgootonderzoek zou op een aantal van deze vragen een antwoord gegeven kunnen worden.

$$10^3 \times \frac{1}{C^2 R} \Big|_{\text{model}} \quad \left[(m/s)^{-2} \right]$$



a) VERTREKKING 10

$$10^3 \times \frac{1}{C^2 R} \Big|_{\text{model}} \quad \left[(m/s)^{-2} \right]$$



b) VERTREKKING 20

BEPALING AANTAL BODEMRUWHEIDSELEMENTEN

JB

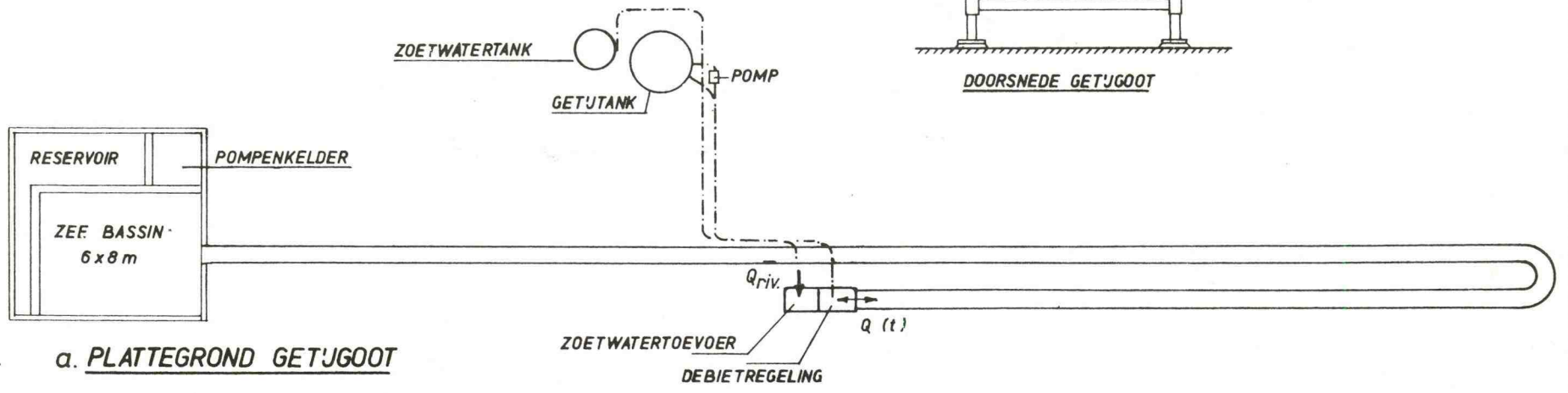
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

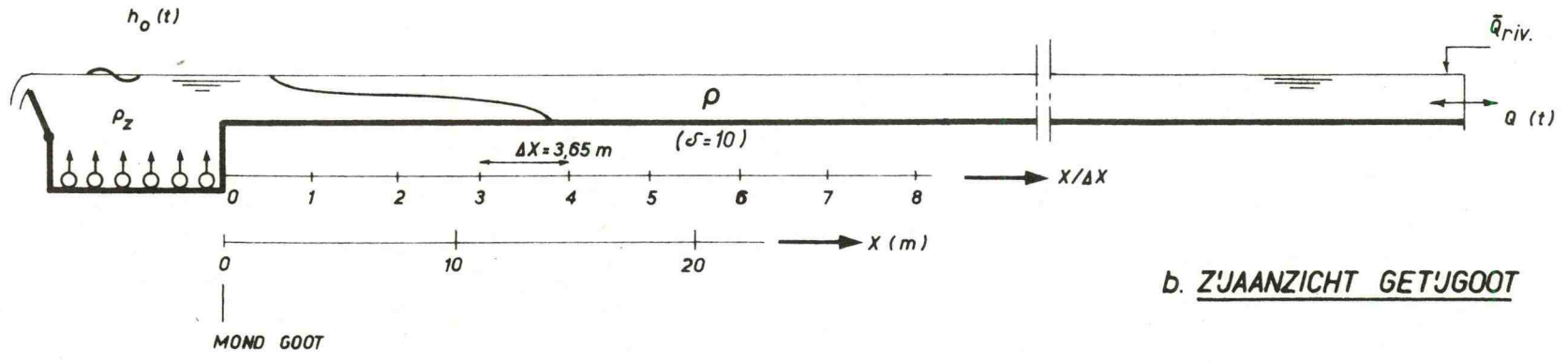
M896-2381

FIG. 1

RANDINSTELLING	
ZEE	: $h_0(t), \rho_z$
RIVIER	: $Q(t), \bar{Q}_{riv.}$



a. PLATTEGROND GETJUGOOT



b. ZJAANZICHT GETJUGOOT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

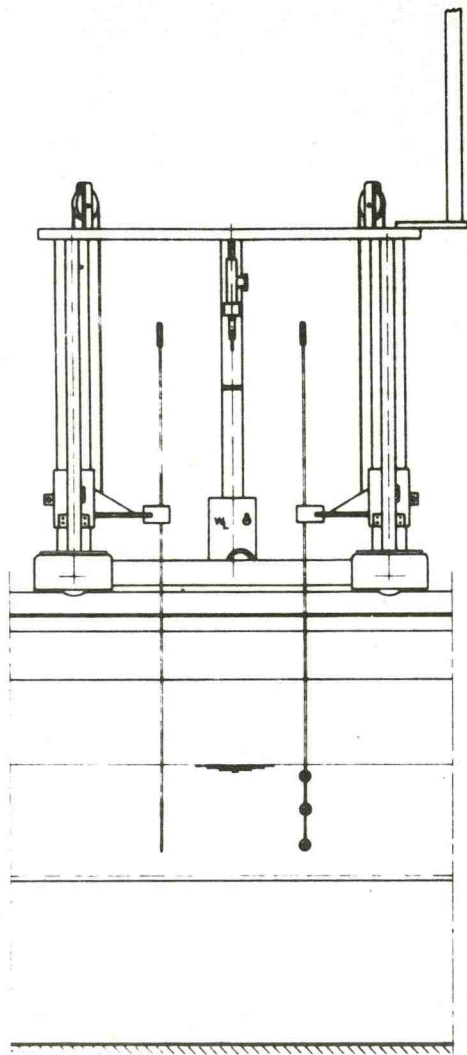
OPSTELLING MET MEETWAGENS

M. 896 - 2383

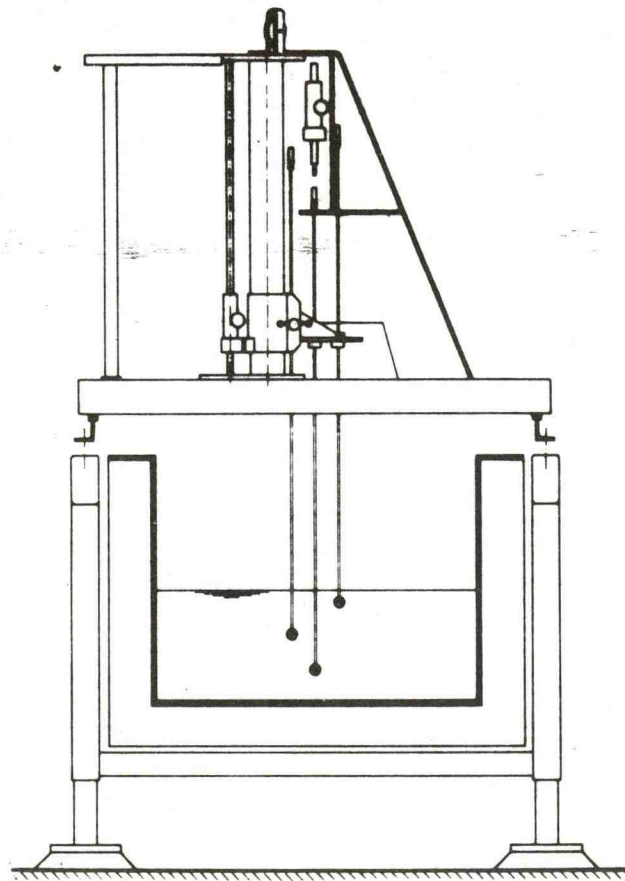
FIG. 3

A4

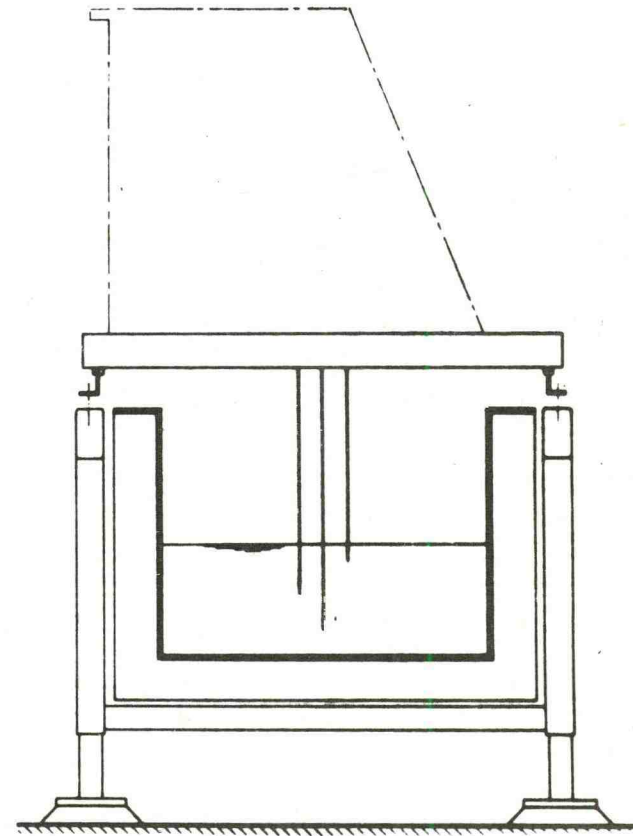
J.W.



AANZICHT MEETWAGEN MET MEETAPPARATUUR

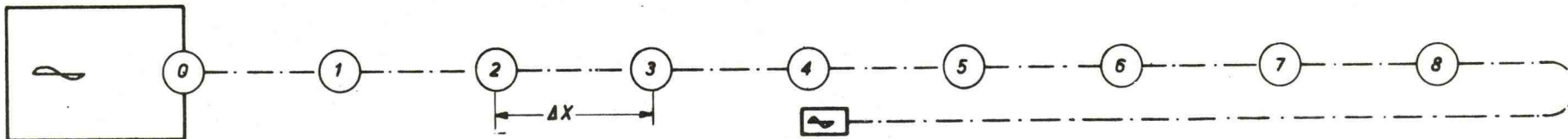


DOORSNEDE GOOT t.p.v. SNELHEIDSMOLENS



DOORSNEDE GOOT t.p.v. ZOUTOPNEMERS

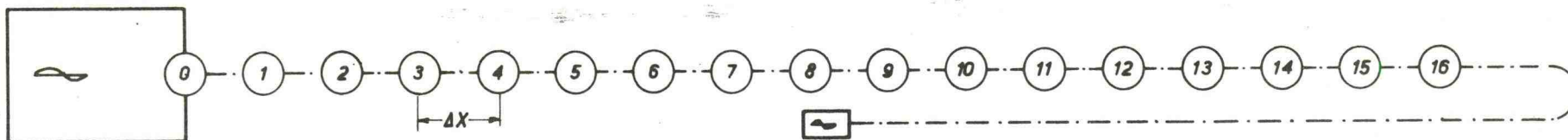
MEETPUNTEN IN DE X-RICHTING BIJ DE VERTREKKINGEN
8-5, 10 EN 20



ZEERAND
WATERSTAND- EN
DICHTHEIDSREGELING

RIVIERRAND : GETJREGELING (DEBIETREGELING)
ZOETWATERTOEVER

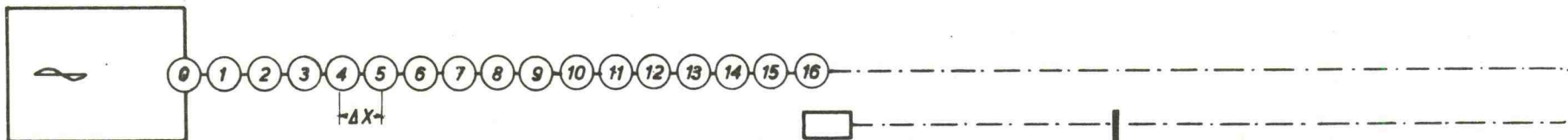
MEETSTATIONS BIJ $n_l/n_h = 320/64$



ZEERAND
WATERSTAND- EN
DICHTHEIDSREGELING

RIVIERRAND: GETJREGELING (DEBIETREGELING)
ZOETWATERREGELING

MEETSTATIONS BIJ $n_l/n_h = 640/64$

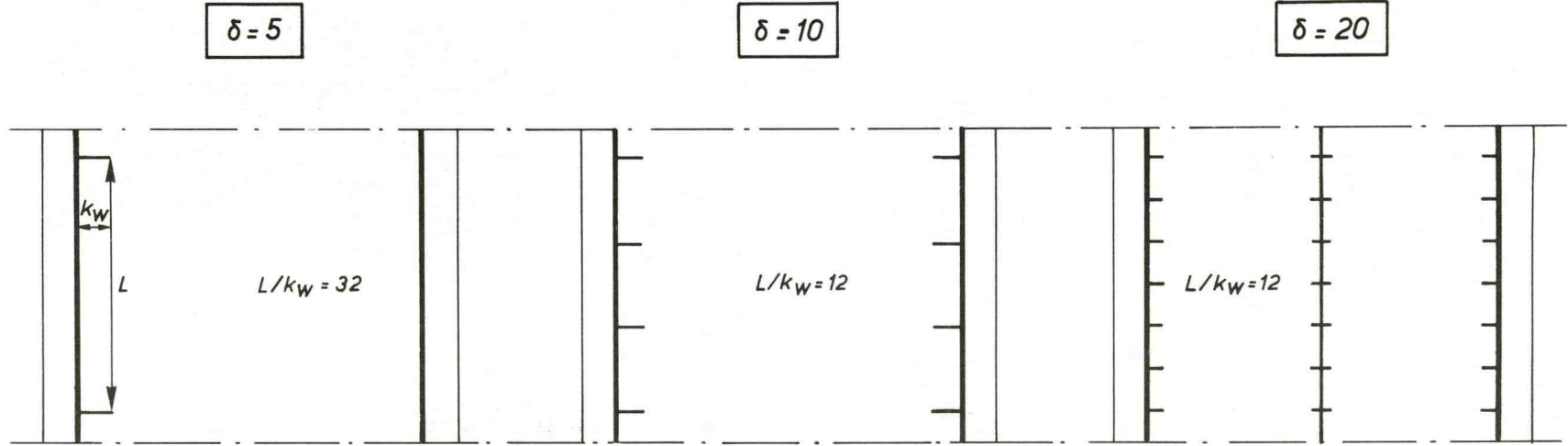


ZEERAND
WATERSTAND- EN
DICHTHEIDSREGELING

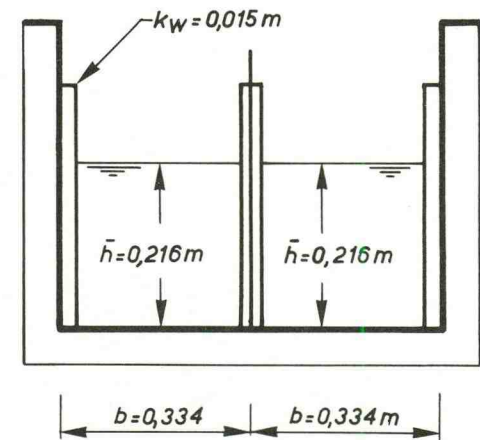
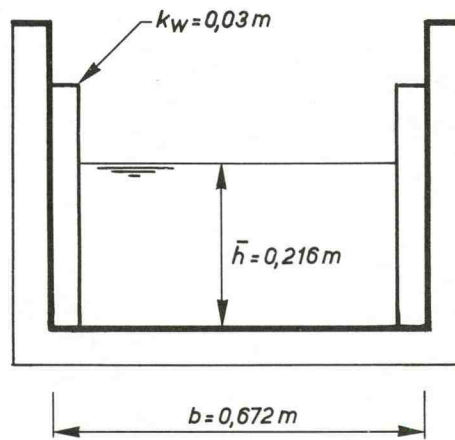
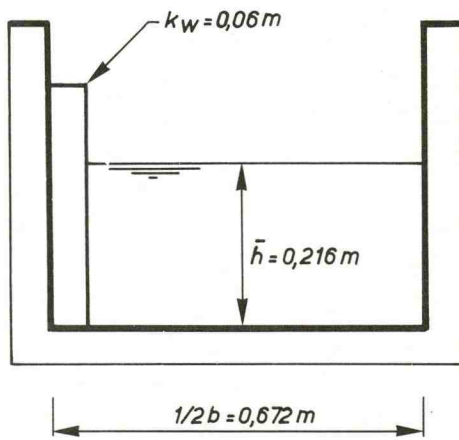
RIVIERRAND:
ZOETWATERTOEVER.

SCHOT MET OVERSTORT

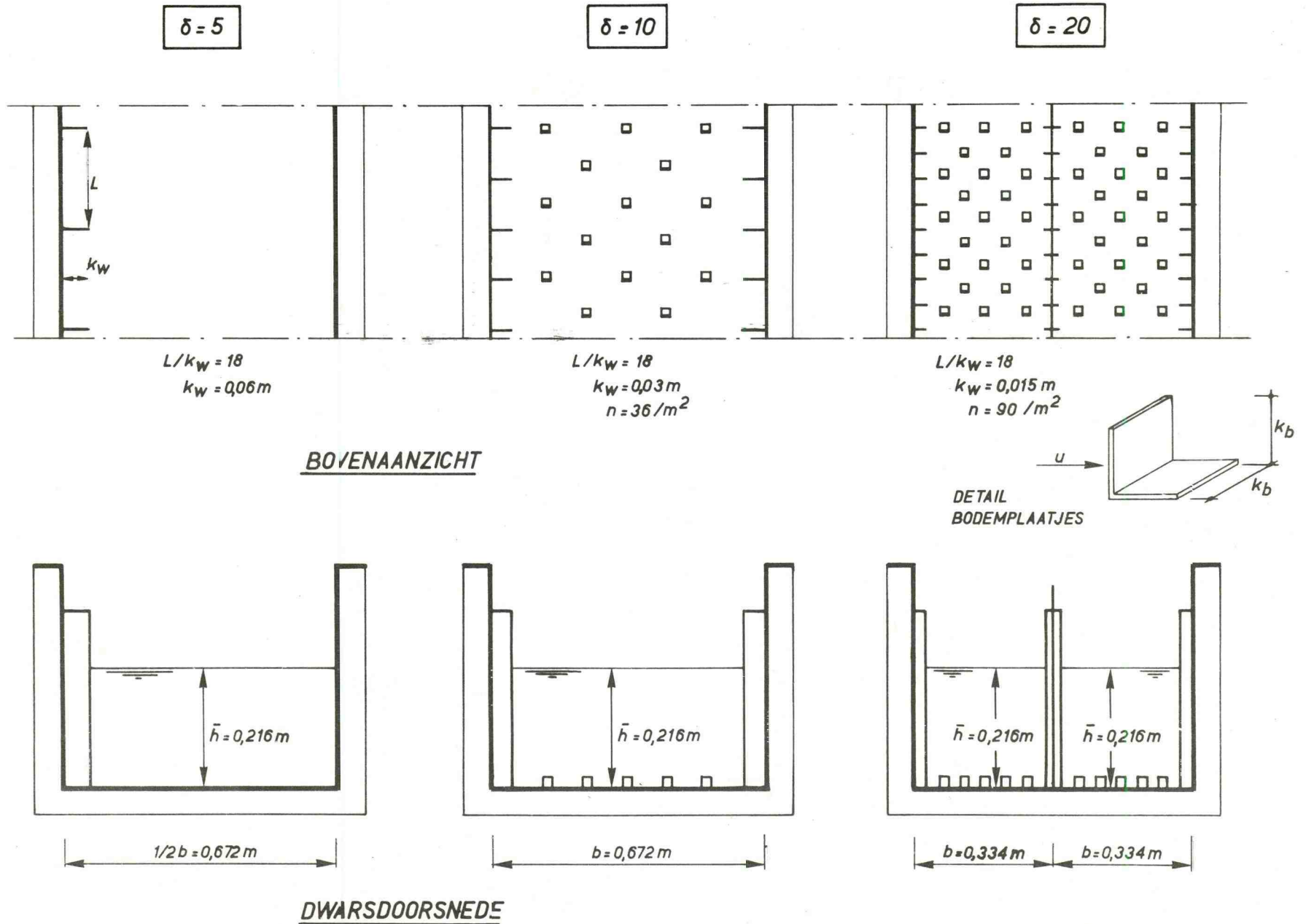
MEETSTATIONS BIJ $n_l/n_h = 1280/64$



BOVENAANZICHT



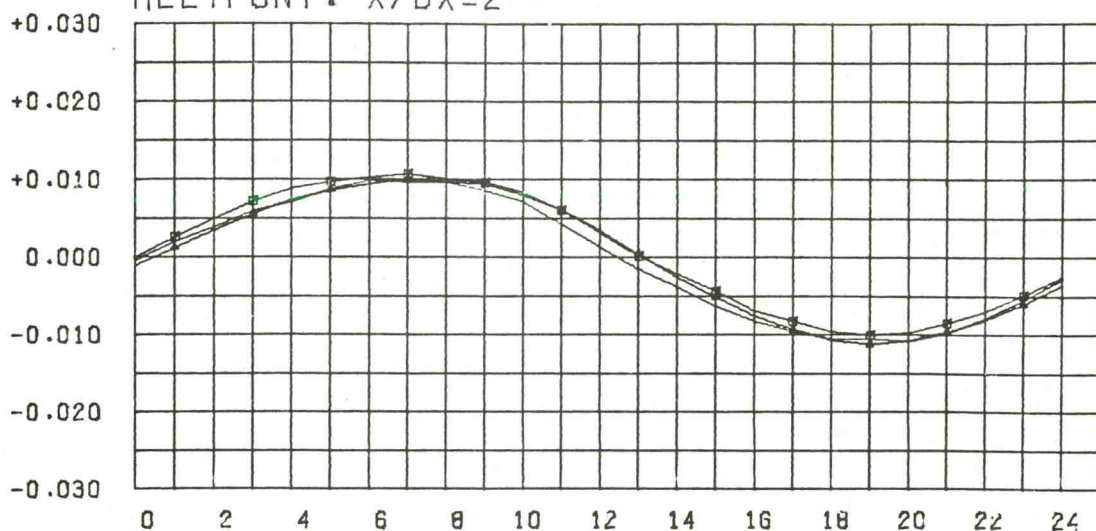
DWARSDOORSNEDE



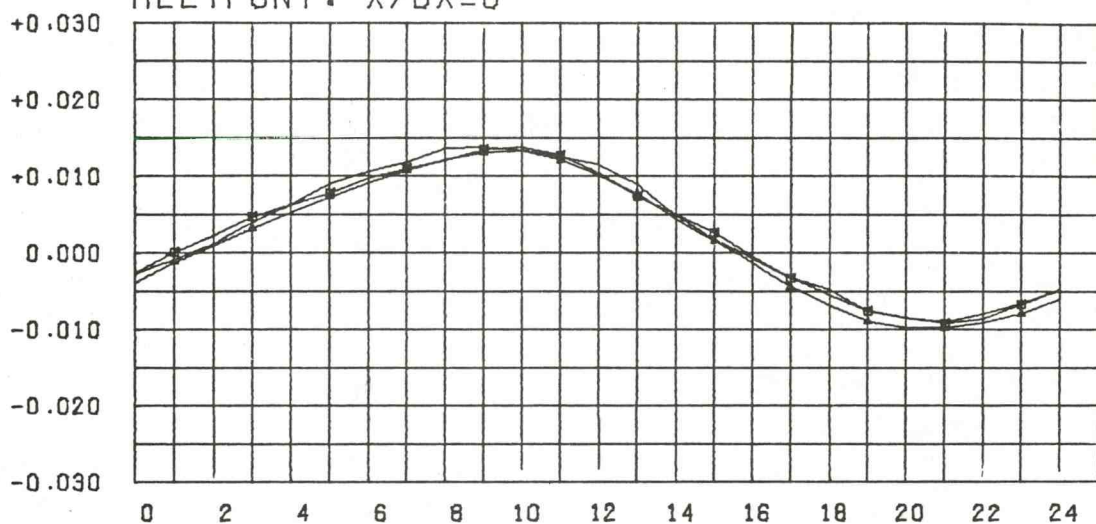
WATERSTAND T.O.V. MIDDENSTAND (M-MODEL)



MEETPUNT : X/DX=2



MEETPUNT : X/DX=8



MEETPUNT : X/DX=16



→ T/DT (DT=30 MIN. PROTO)

VERTREKKINGSONDERZOEK WANDRUWHEID

T630 T631 T632

REF. TOESTAND

— VERTREKKING : 5
 -□- " : 10
 -▲- " : 20

JB

A4

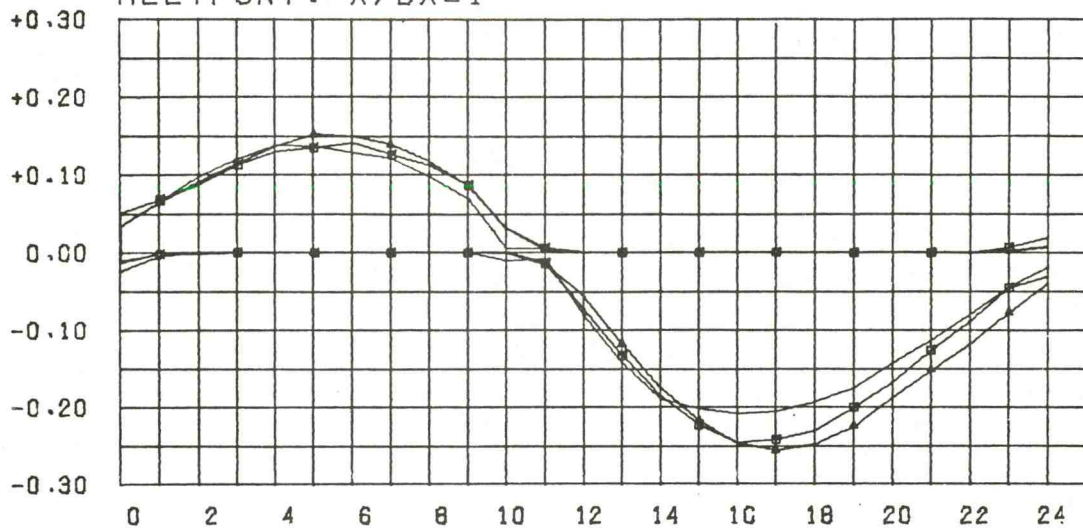
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2387

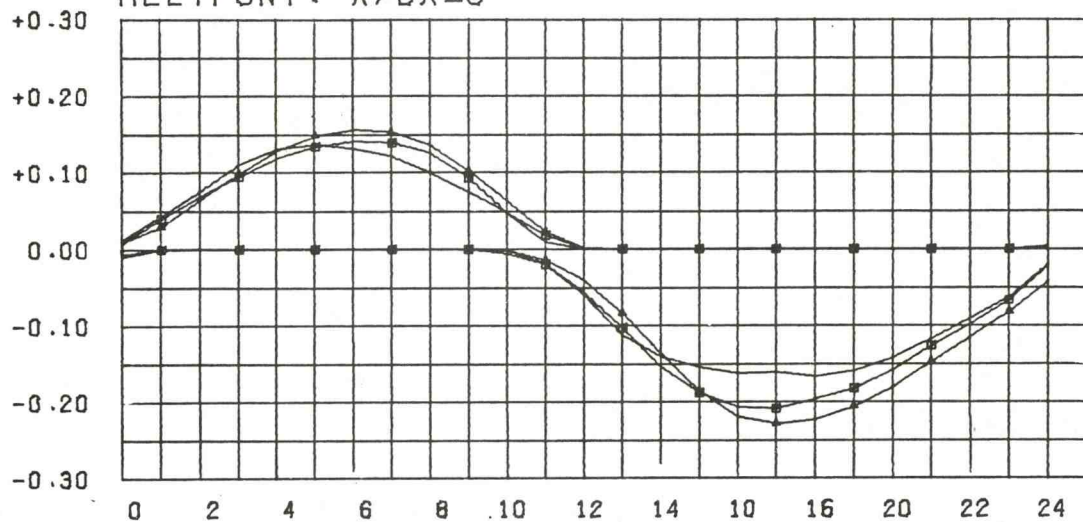
FIG. 7

GEMIDDELDE SNELHEID (M/S-MODEL) (EB ∇ VLOED)

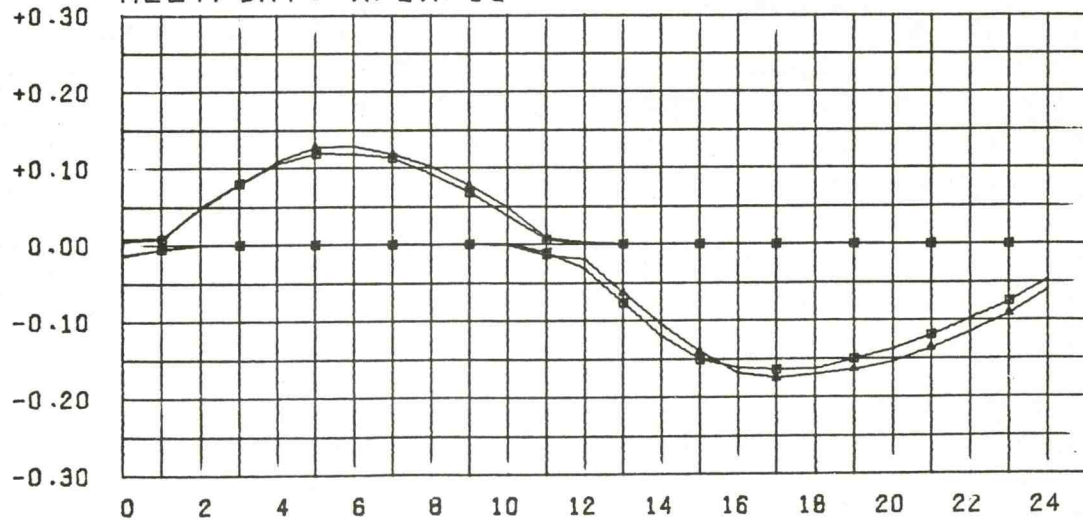
MEETPUNT: X/DX=1



MEETPUNT: X/DX=8



MEETPUNT: X/DX=16



— ∇ T/DT (DT=30 MIN. PROTO)

VERTREKKINGSONDERZOEK WANDRUWHEID

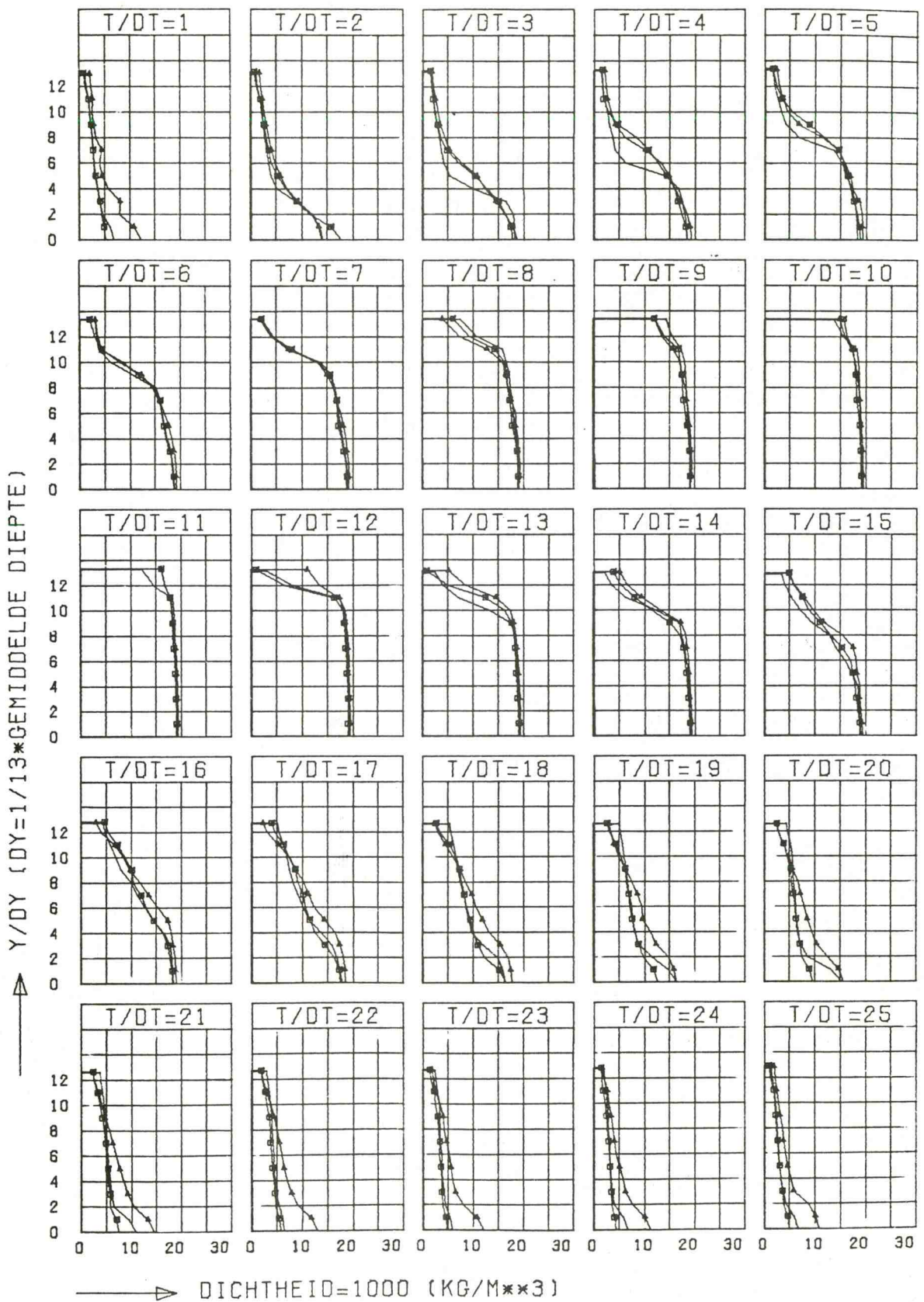
T630 T631 T632

REF. TOESTAND

— VERTREKKING 5
 -□- " 10
 -▲- " 20

JB

A4



VERTREKKINGSONDERZOEK WANDRUWHEID

MEETPUNT = X/DX = 2

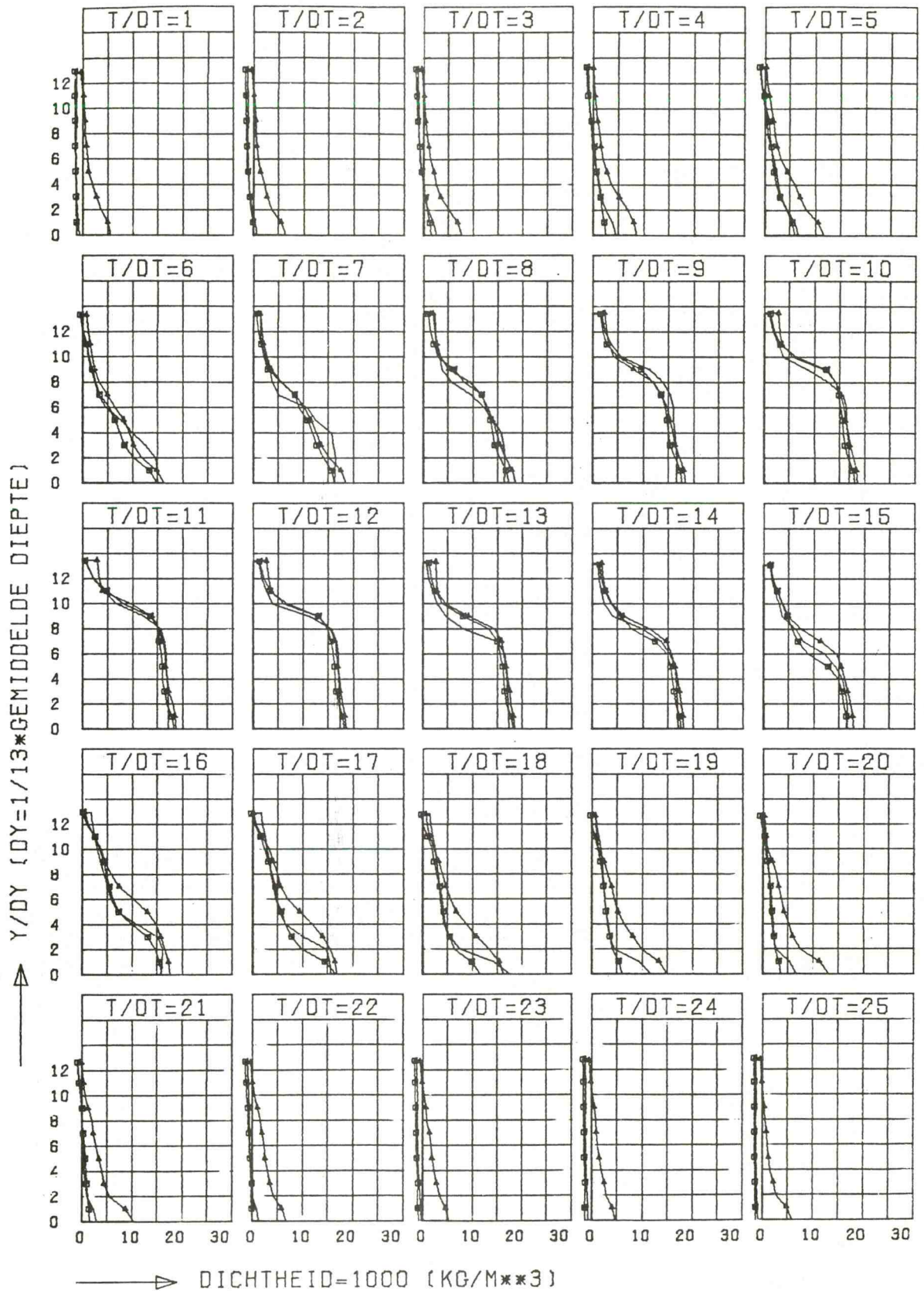
T 630 T 631 T 632

REF. TOESTAND

— VERTREKKING : 5
 —□— " : 10
 —▲— " : 20

JB

A4



VERTREKKINGSONDERZOEK WANDRUWHEID

MEETPUNT : X/DX = 5

T630 T631 T632

REF. TOESTAND

— VERTREKKING : 5

JB

—□— " : 10

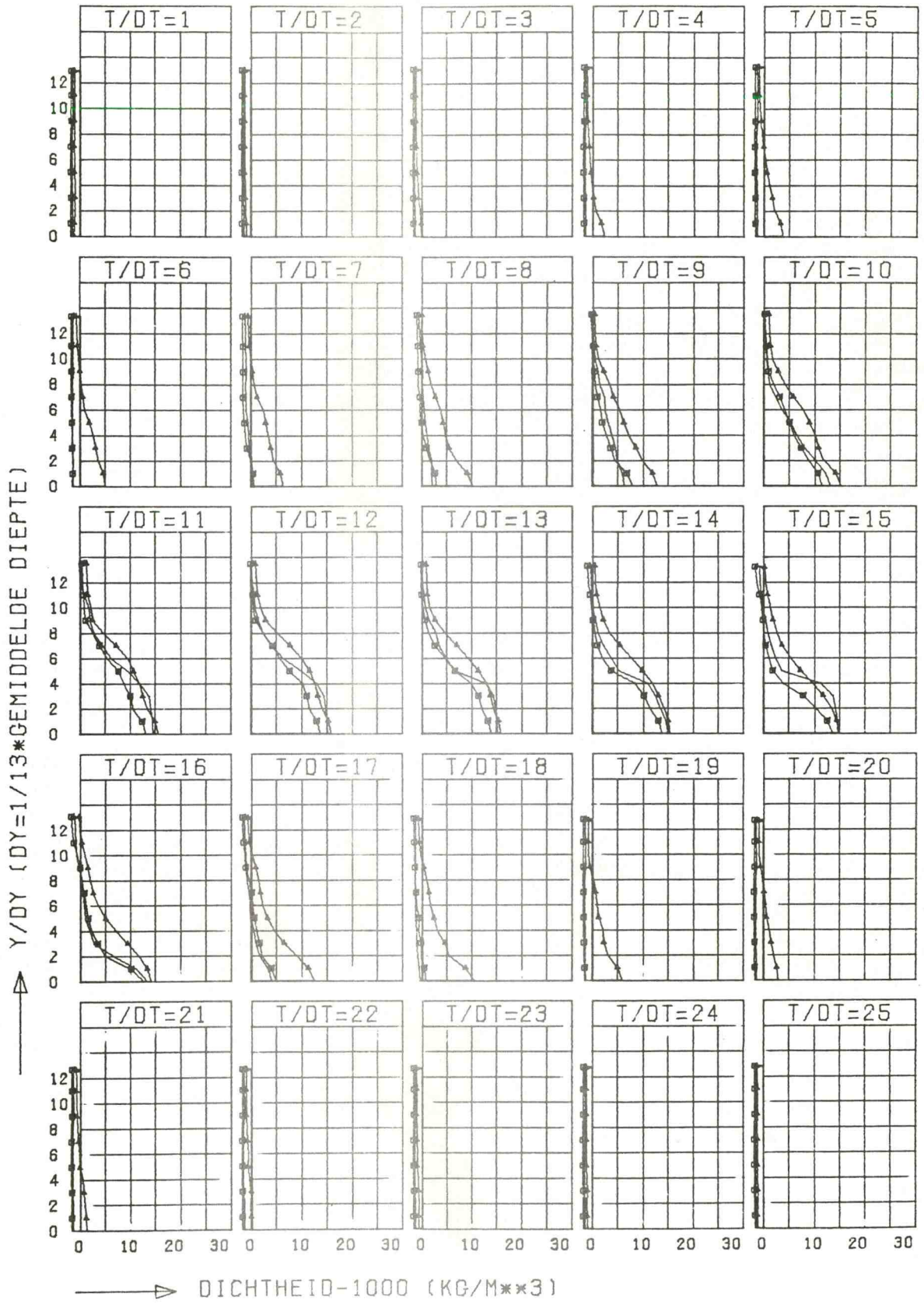
A4

—▲— " : 20

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2400

FIG.10



VERTREKKINGSONDERZOEK WANDRUWHEID

MEETPUNT : X/DX = 8

T630 T631 T632

REF. TOESTAND

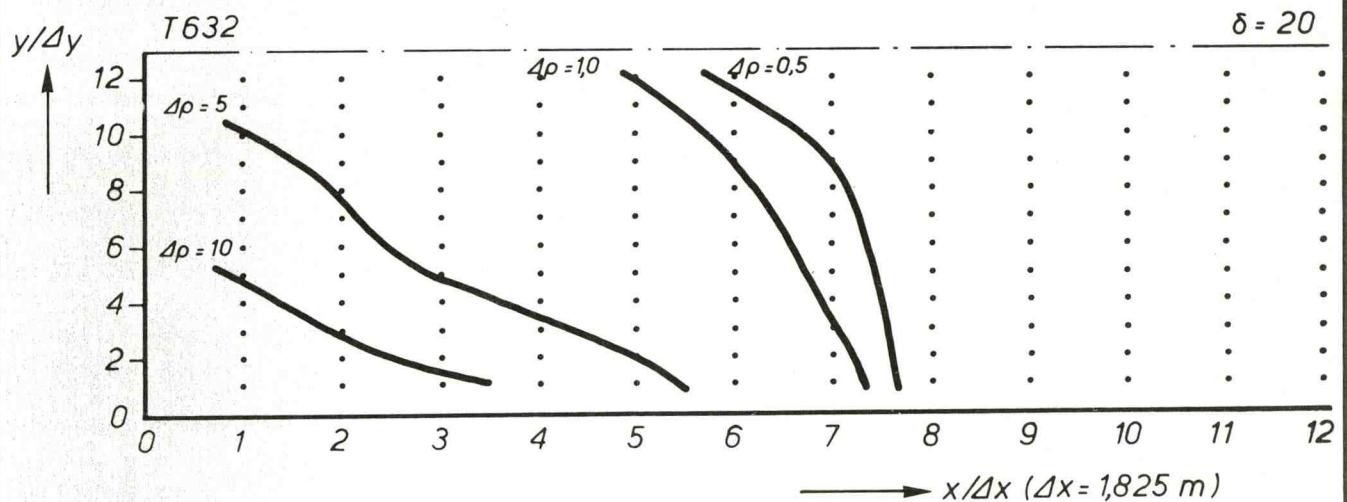
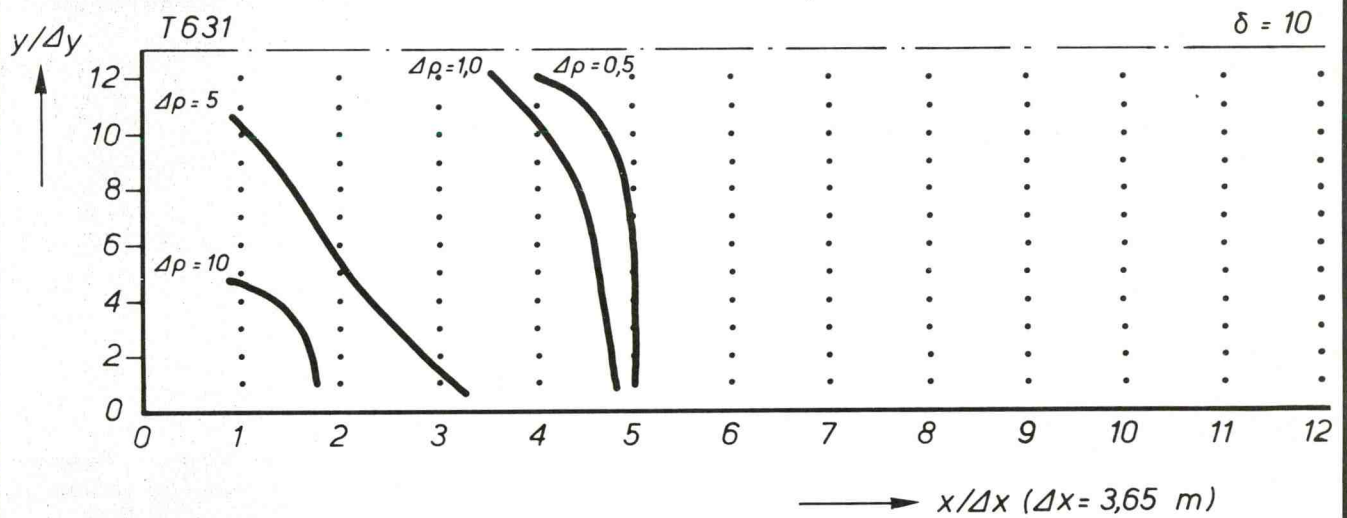
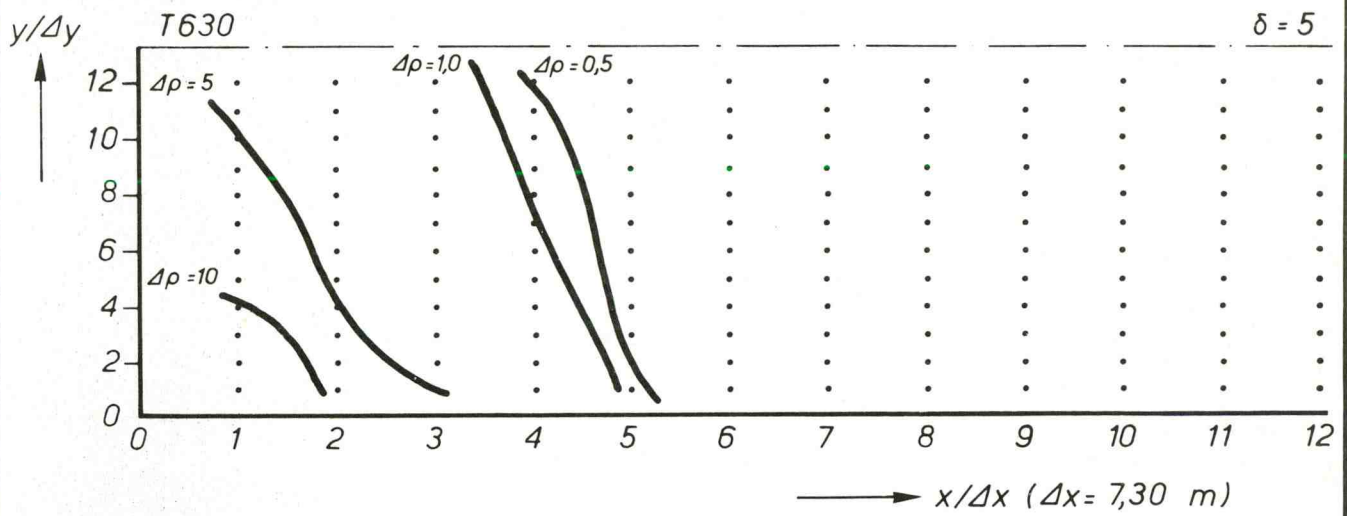
— VERTREKING : 5

JB

—□— " : 10

A4

—▲— " : 20



WANDRUWHEID
REFERENTIE OMSTANDIGHEDEN

TJDSTIP: $t/\Delta t = 1$

JB

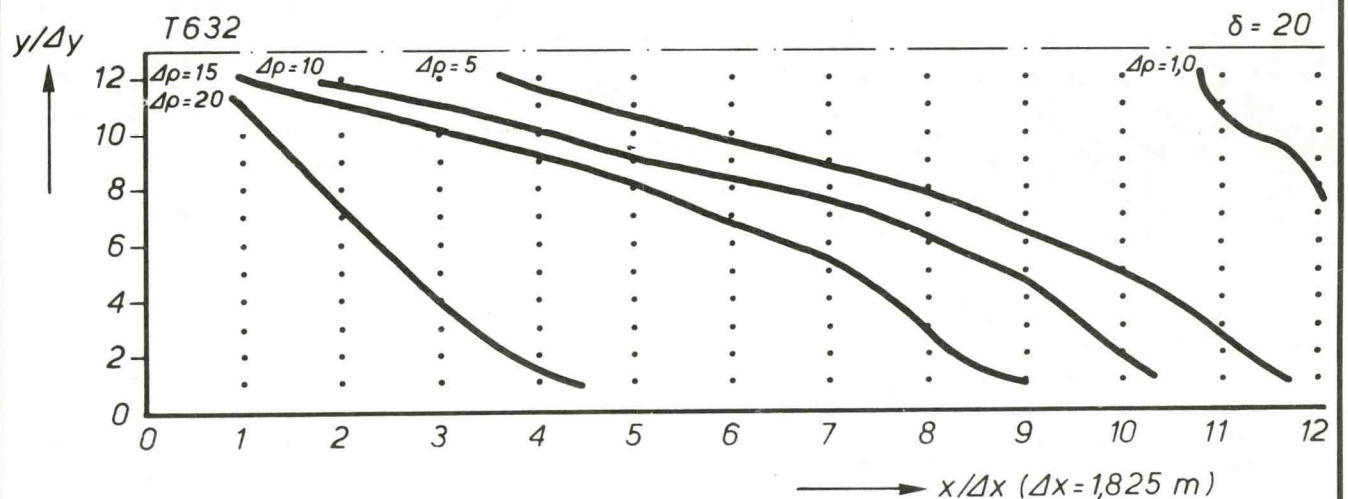
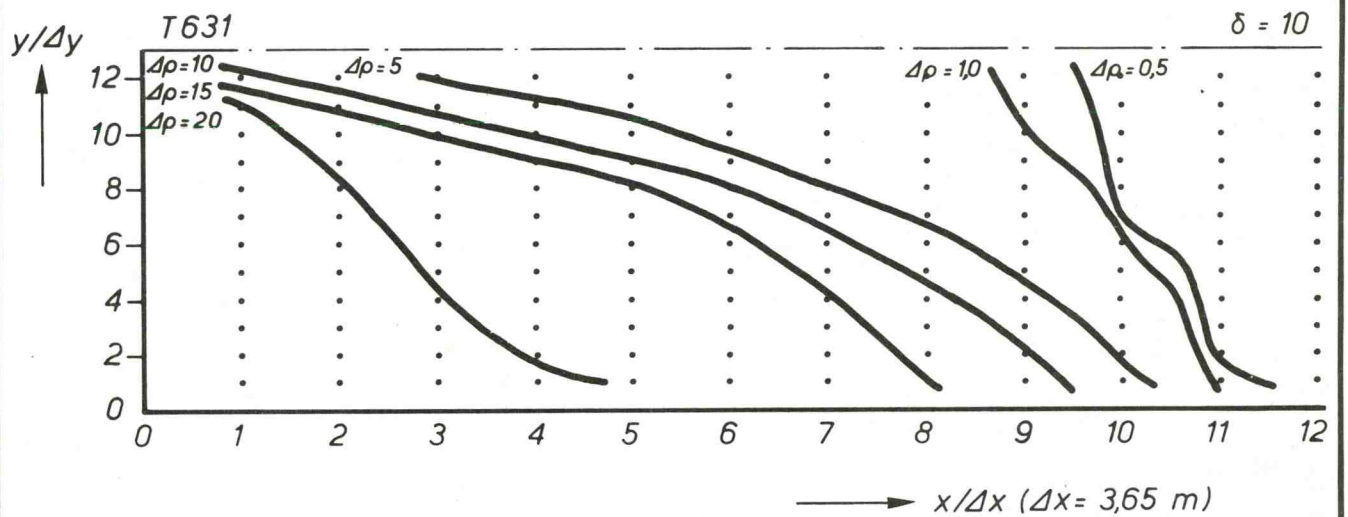
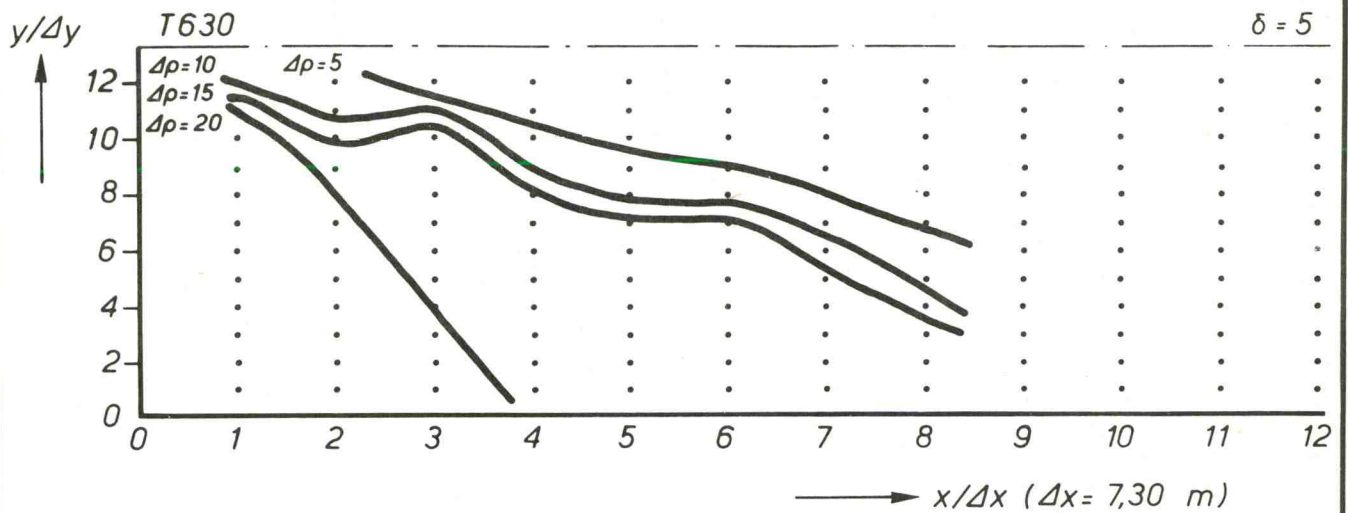
• MEETPUNT

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2406

FIG.12



WANDRUWHEID
REFERENTIE OMSTANDIGHEDEN

TJJDSTIP: $t/\Delta t = 13$

JB

• MEETPUNT

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

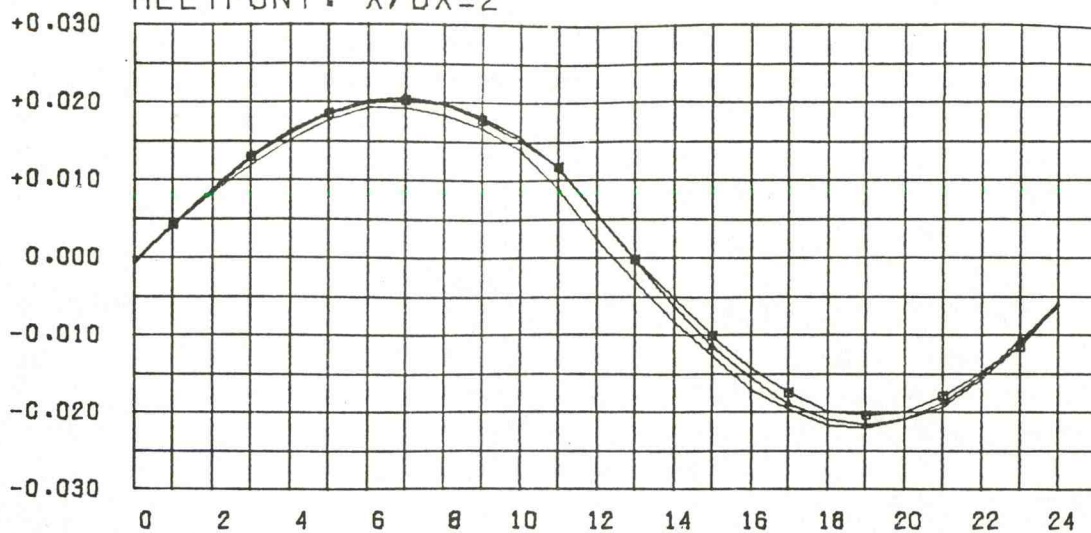
M896-2393

FIG.13

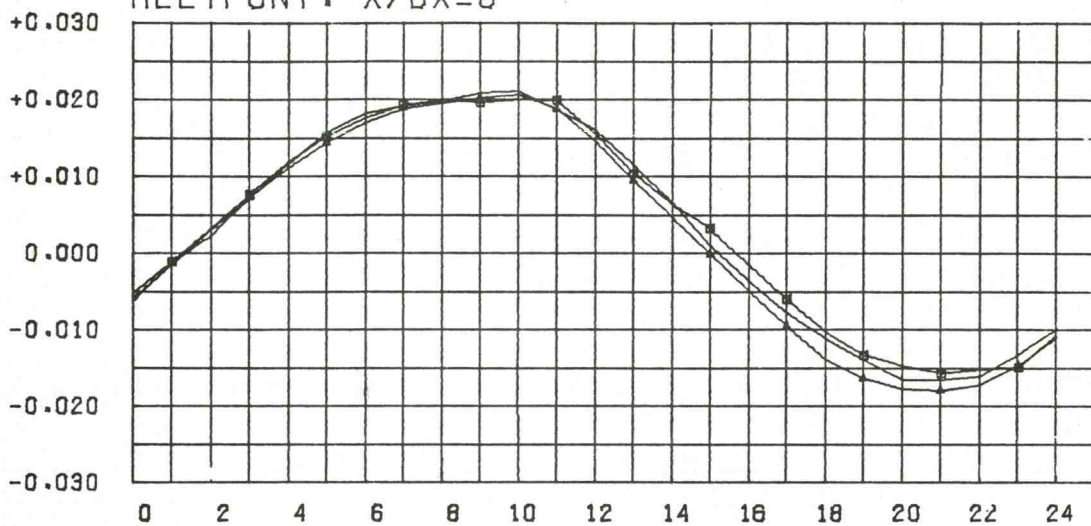
WATERSTAND T.O.V.-MIDDENSTAND (M-MODEL)



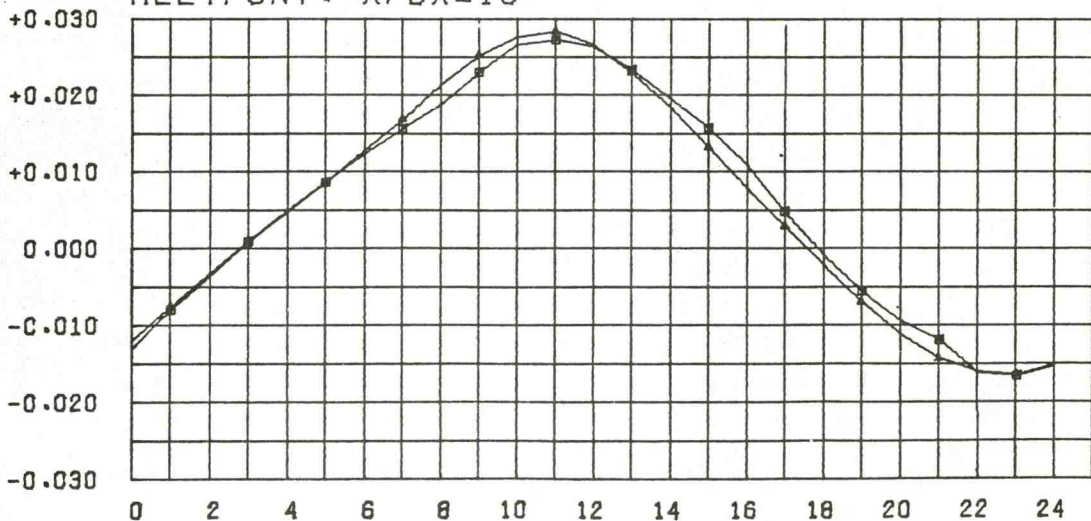
MEETPUNT : $X/DX=2$



MEETPUNT : $X/DX=8$



MEETPUNT : $X/DX=16$



→ T/DT ($DT=30$ MIN. PROTO)

VERTREKKINGSONDERZOEK WANDRUWHEID

T633 T634 T635

GETJ ($2a_0$) = 3,20m

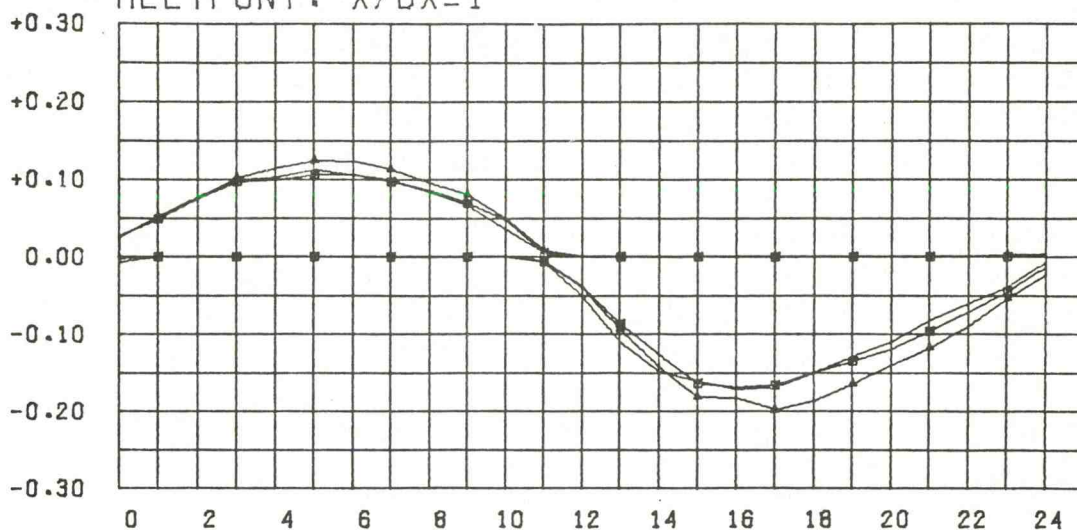
— VERTREKKING 5
 —□— " 10
 —▲— " 20

JB

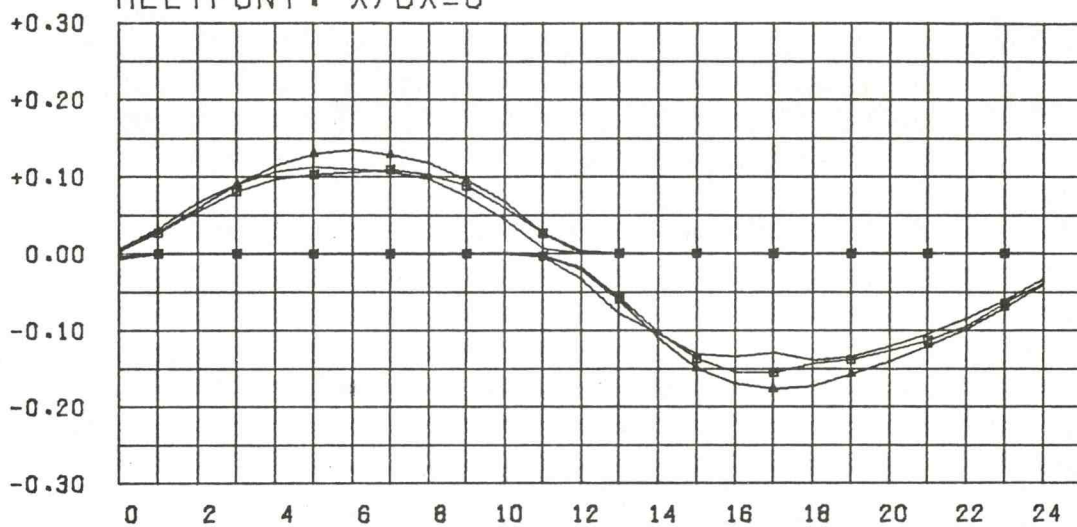
A4

GEMIDDELTE SNELHEID (M/S-MODEL) (EB \leftrightarrow VLOED)

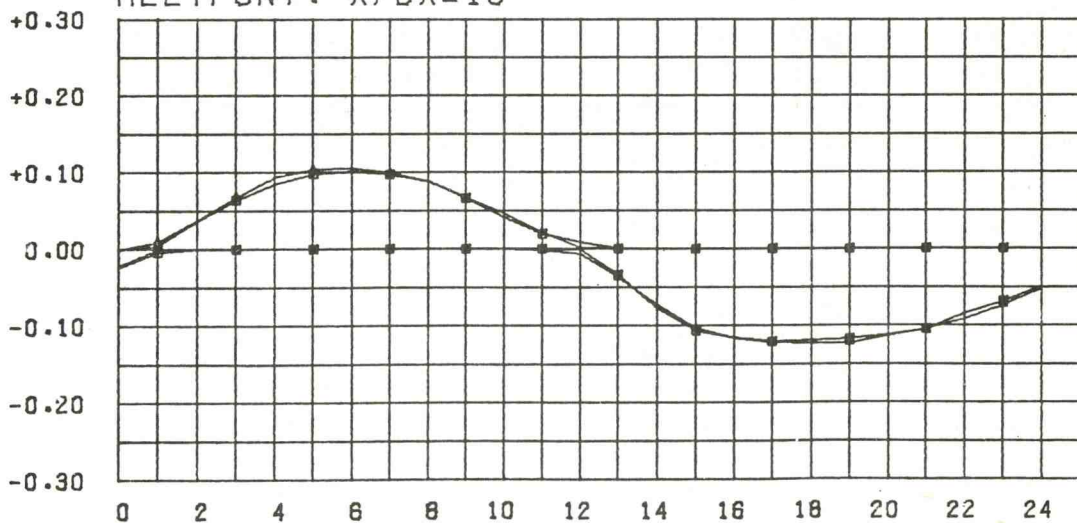
MEETPUNT: $X/DX=1$



MEETPUNT: $X/DX=8$



MEETPUNT: $X/DX=16$



\longrightarrow T/DT (DT=30 MIN. PROTO)

VERTREKKINGSONDERZOEK WANDRUWHEID

T633 T634 T635

GETJ ($2a_0$) = 3,20m

— VERTREKKING : 5

□ " : 10

▲ " : 20

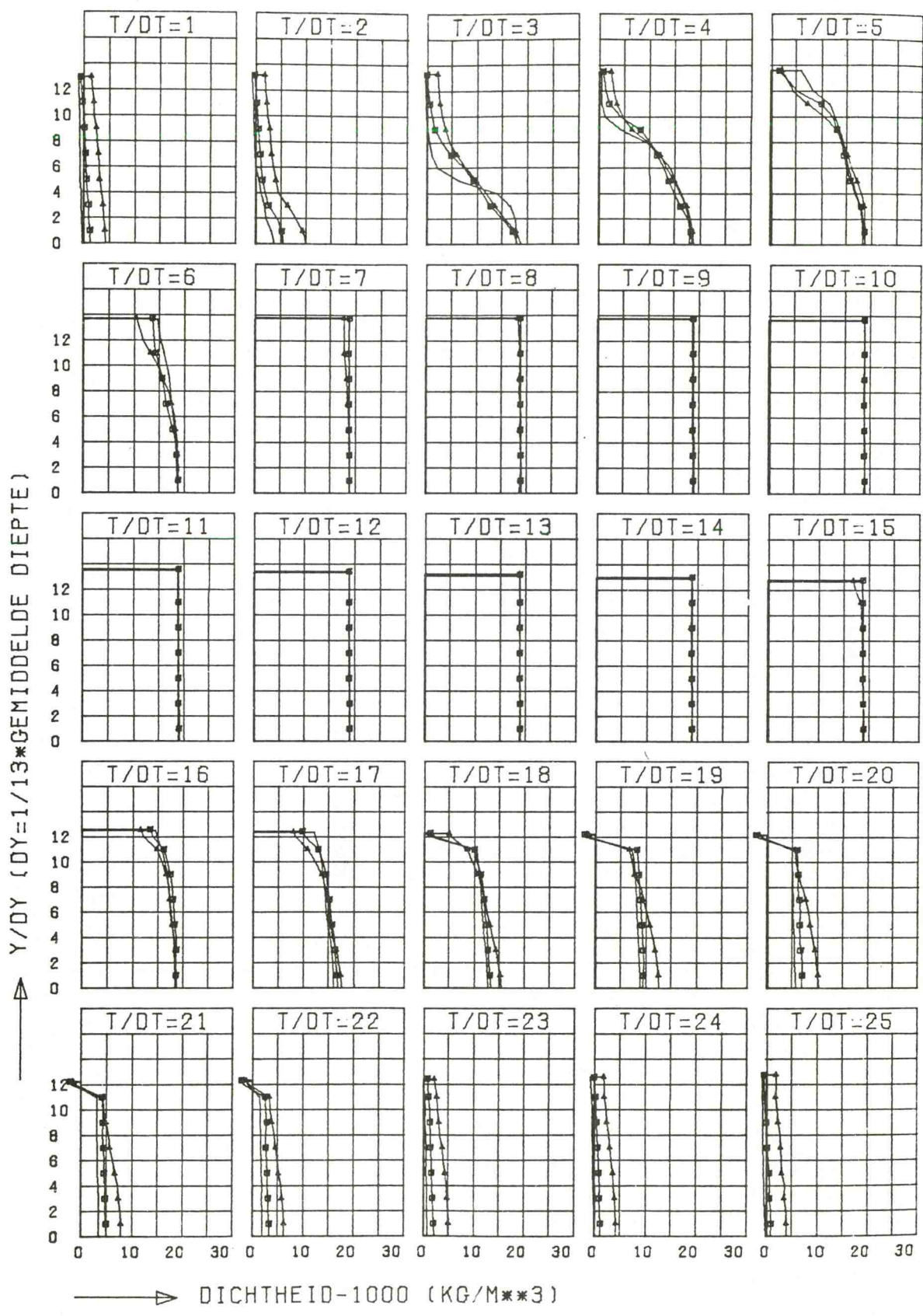
JB

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2395

FIG.15



VERTREKKINGSONDERZOEK WANDRUWHEID

MEETPUNT : X/DX = 2

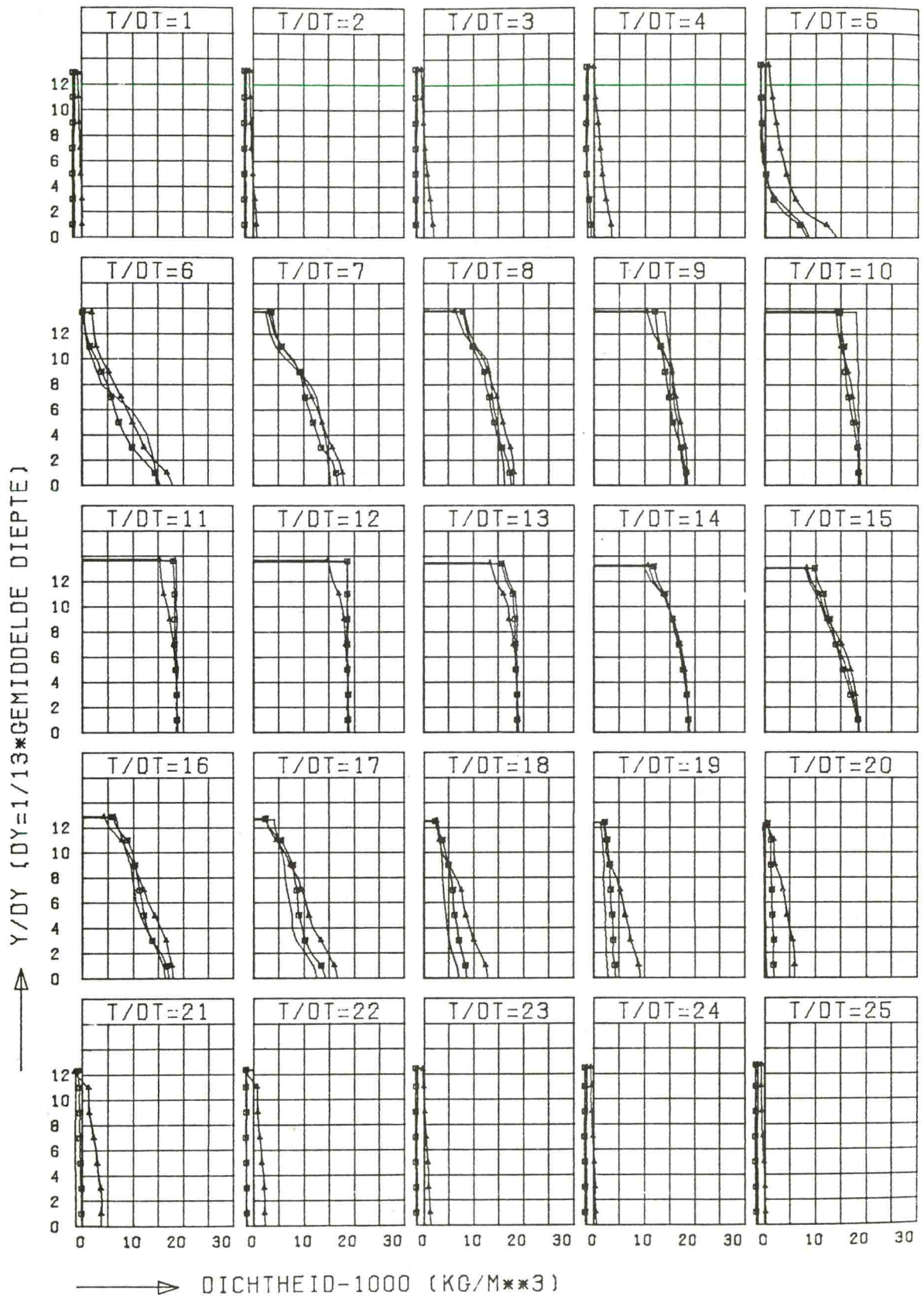
T633 T634 T635

GETU (2a₀) = 3,20m

- VERTREKKING : 5
- " : 10
- ▲— " : 20

JB

A4



VERTREKKINGSONDERZOEK WANDRUWHEID

MEETPUNT : X/DX = 5

T633 T634 T635

GETJ(2 α_0) = 3,20m

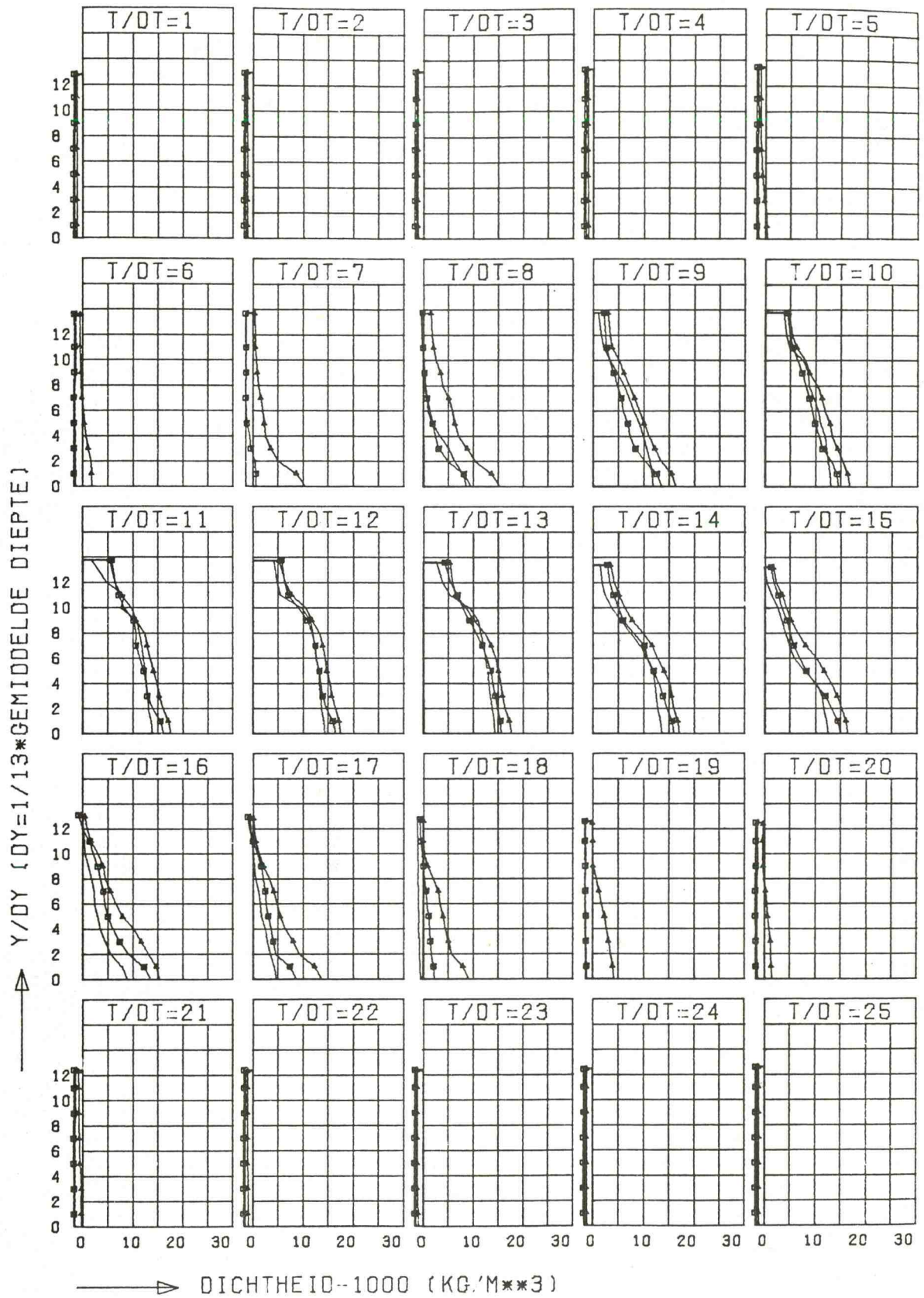
— VERTREKKING : 5

—□— " : 10

—▲— " : 20

JB

A4



VERTREKKINGSONDERZOEK WANDRUWHEID

MEETPUNT : X/DX = 8

T633 T634 T635

GETJ(2a₀) = 3,20m

— VERTREKKING : 5

JB

—○— " : 10

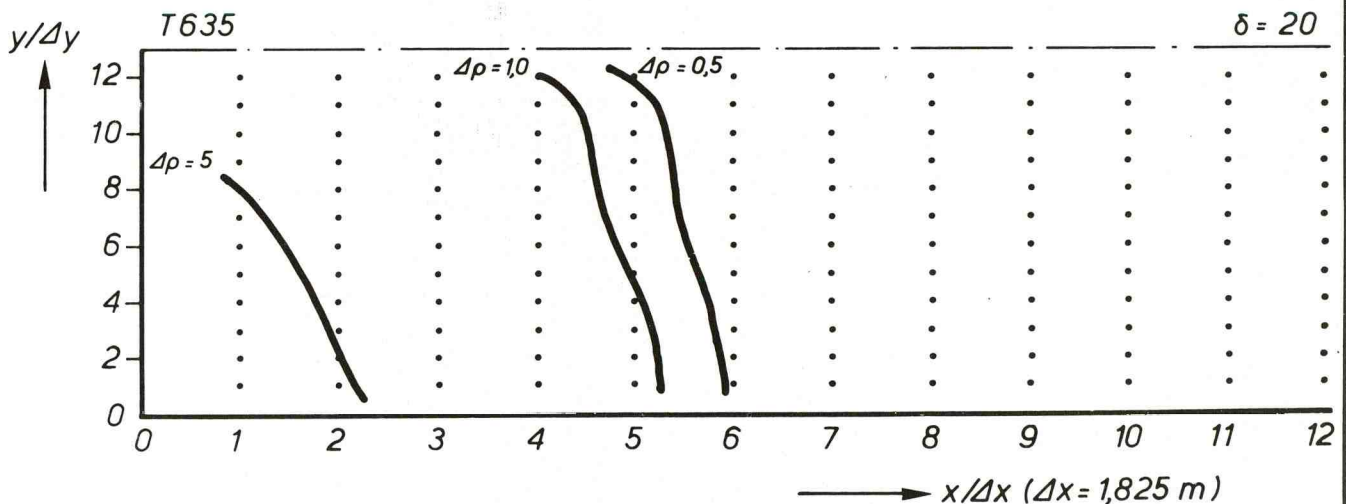
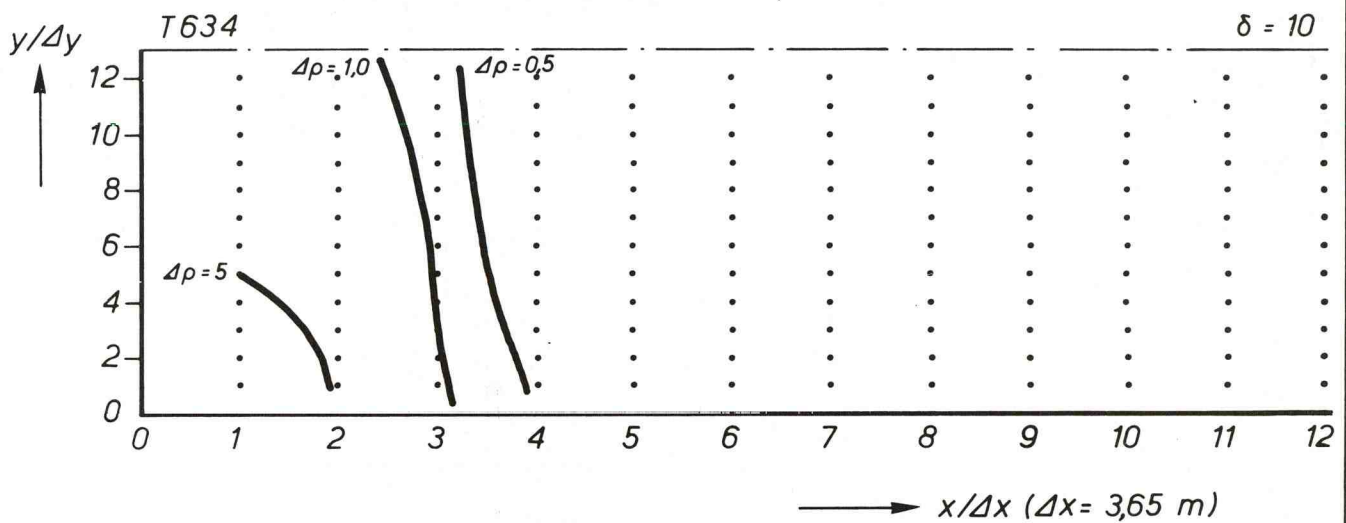
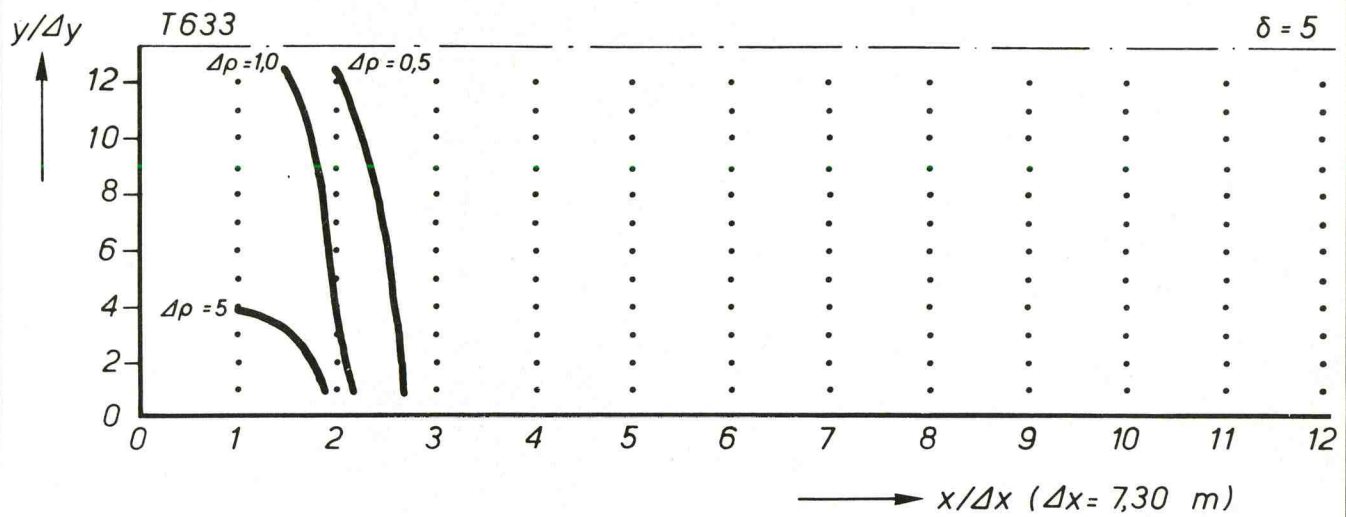
A4

—△— " : 20

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2408

FIG.18



WANDRUWHEID
REF. OMSTANDIGHEDEN + $2\alpha_0 = 3,20\text{m}$

TJDSTIP: $t/\Delta t = 1$

JB

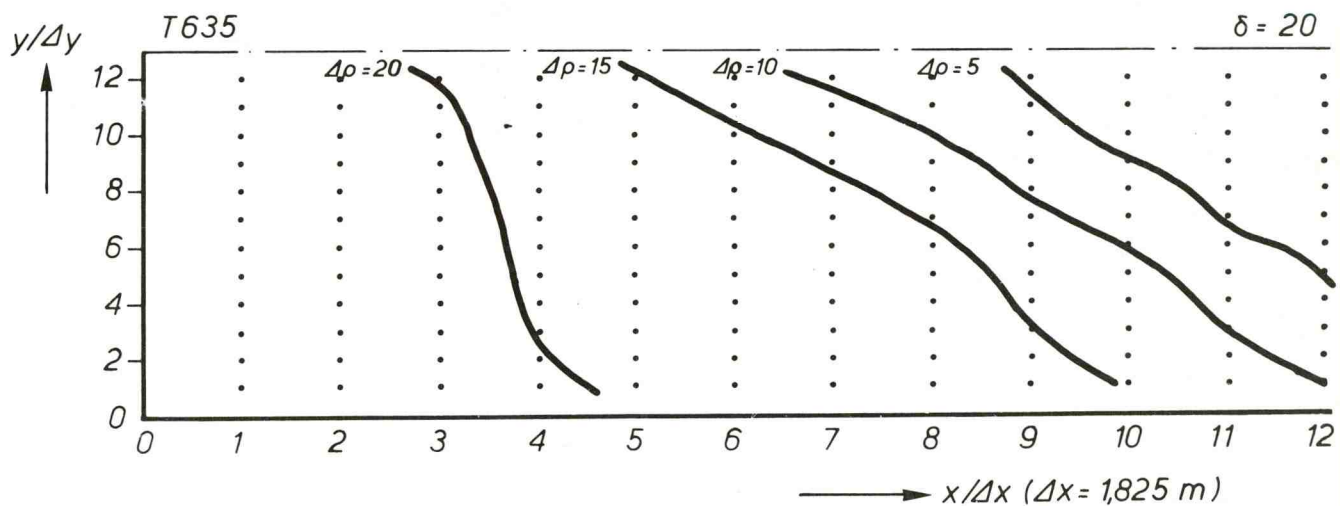
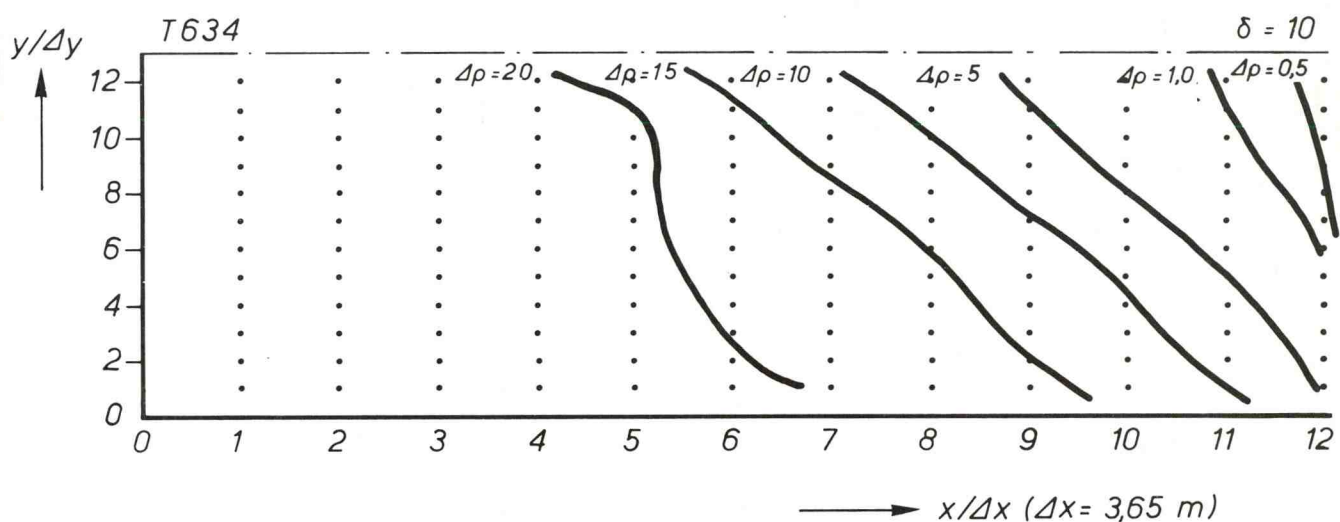
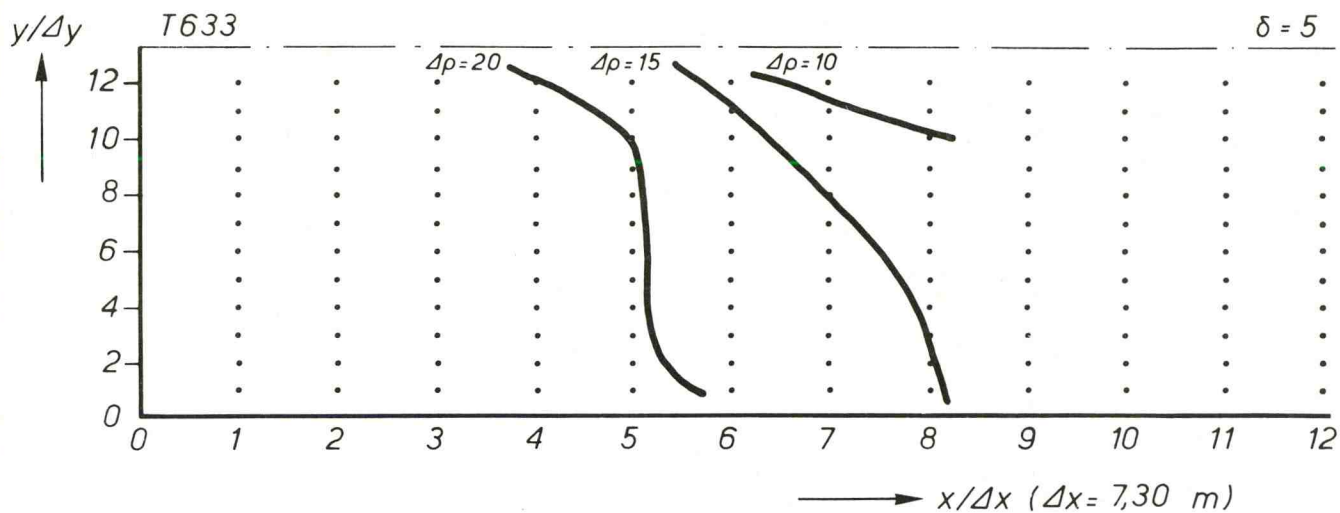
• MEETPUNT

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2399

FIG. 19



WANDRUWHEID
REF. OMSTANDIGHEDEN $+ 2a_0 = 3,20$ m

TJdstip: $t/\Delta t = 13$

JB

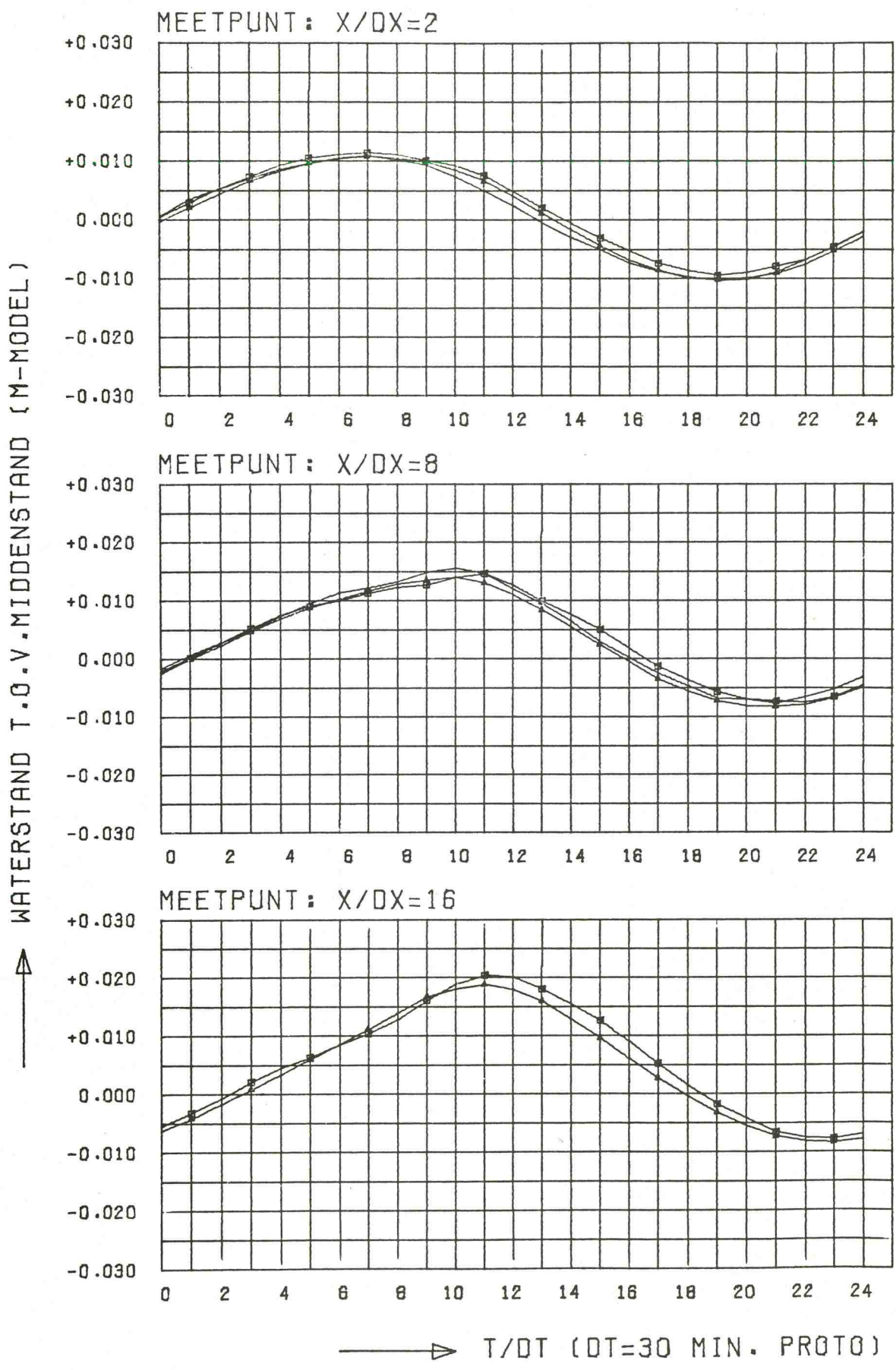
• MEETPUNT

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORORIUM

M896-2400

FIG. 20



VERTREKKINGSONDERZOEK WANDRUWHEID

T636 T637 T638

AFVOER = $1900\text{m}^3/\text{s}$

— VERTREKKING : 5

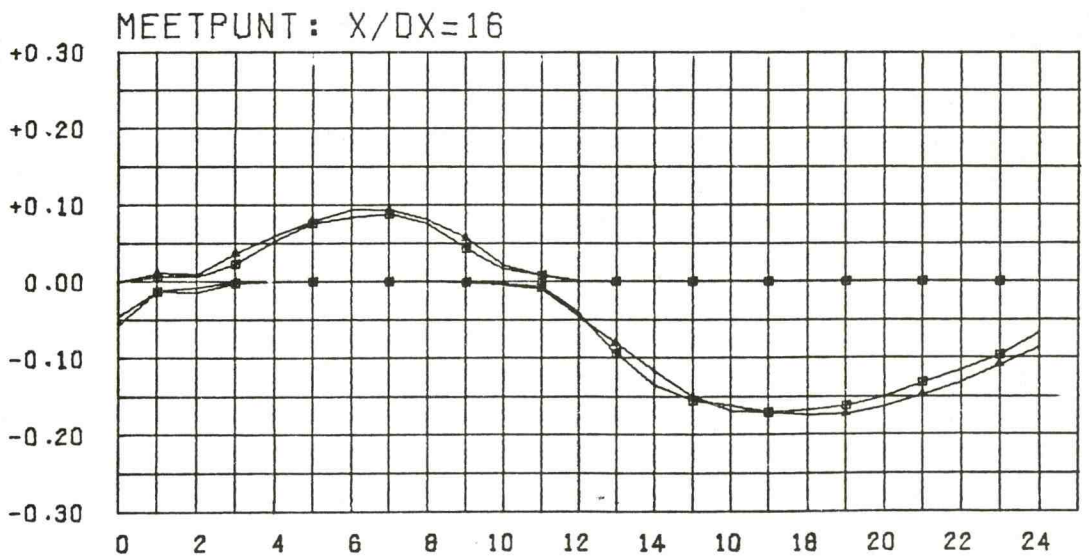
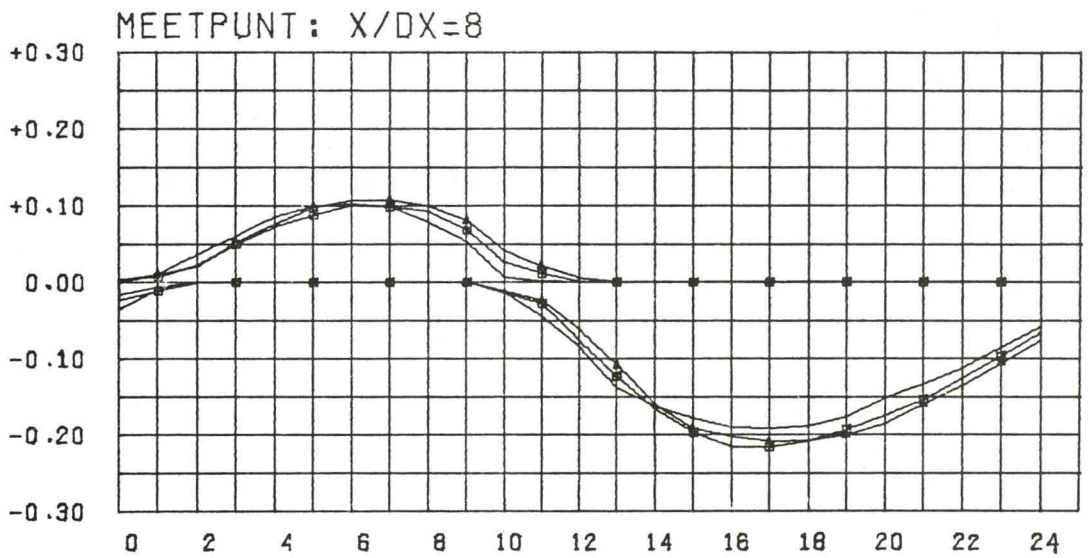
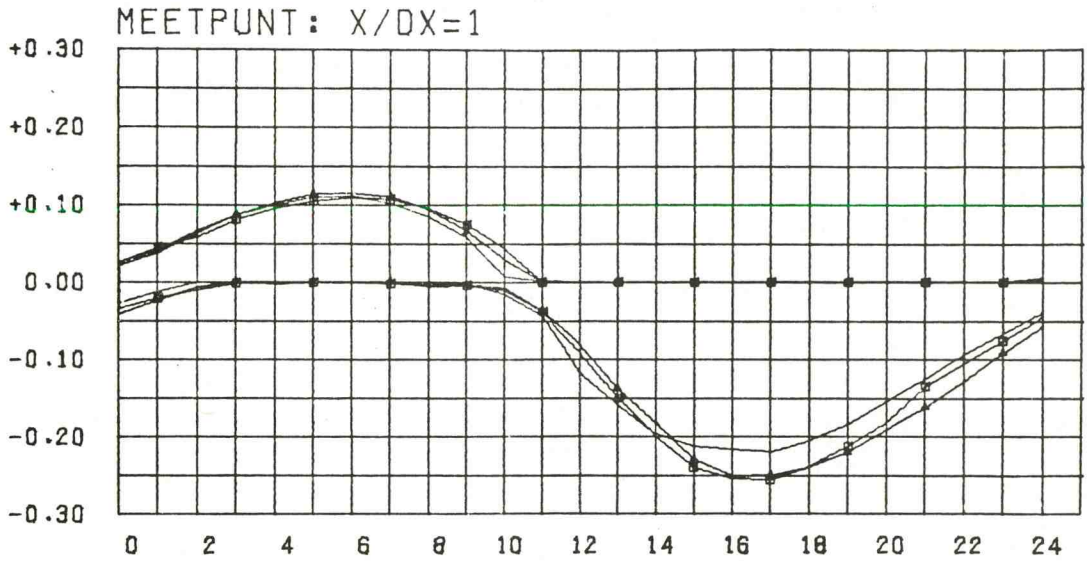
—□— " : 10

—▲— " : 20

JB

A4

GEMIDDELTE SNELHEID (M/S-MODEL) (EB \leftrightarrow VLOED)



\longrightarrow T/DT (DT=30 MIN. PROTO)

VERTREKKINGSONDERZOEK WANDRUWHEID

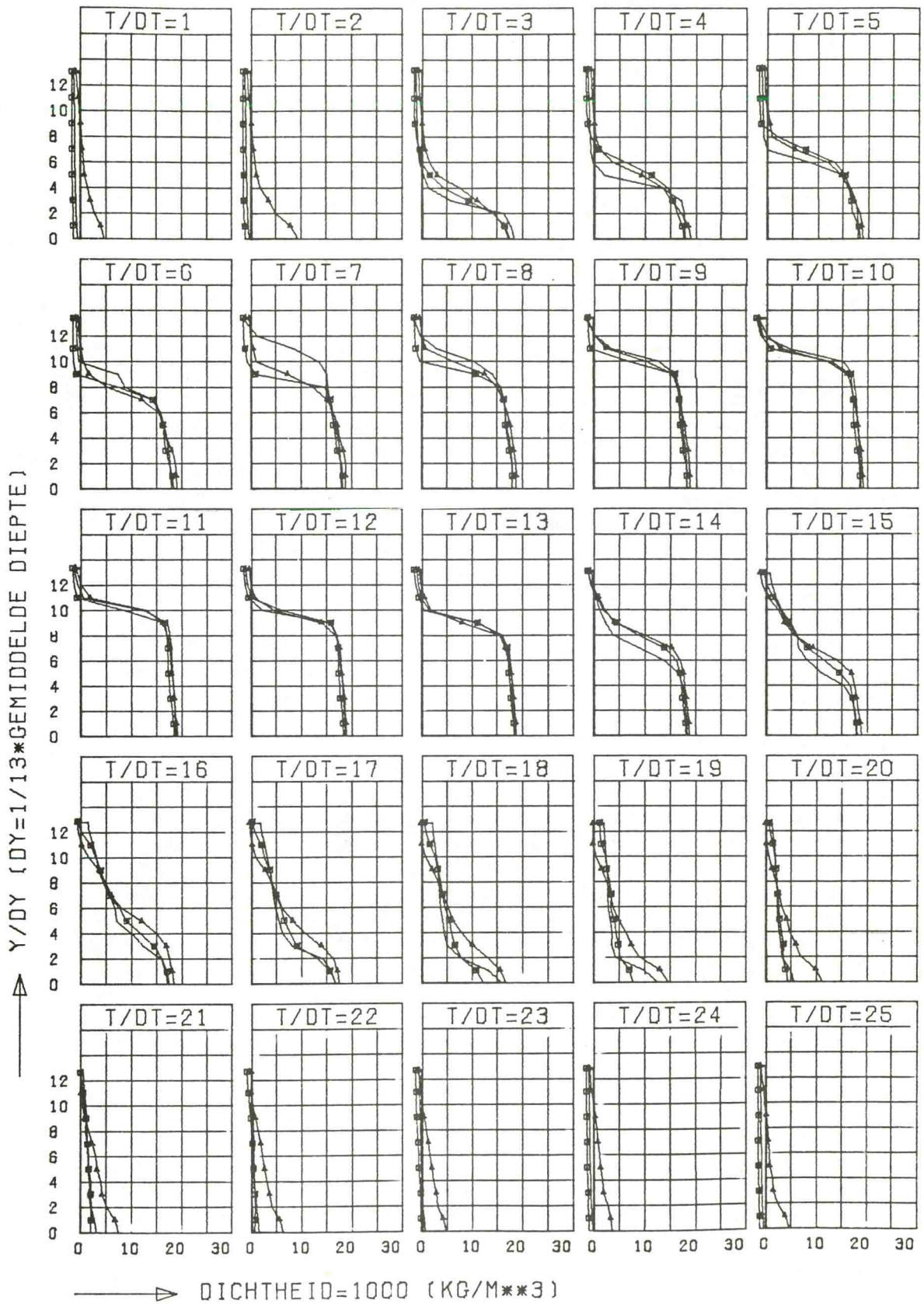
T636 T637 T638

AFVOER = 1900 m³/s

— VERTREKKING 5
 —□— " 10
 —▲— " 20

JB

A4



VERTREKKINGSONDERZOEK WANDRUWHEID

MEETPUNT : X/DX = 2

T636 T637 T638

AFVOER = 1900 m³/s

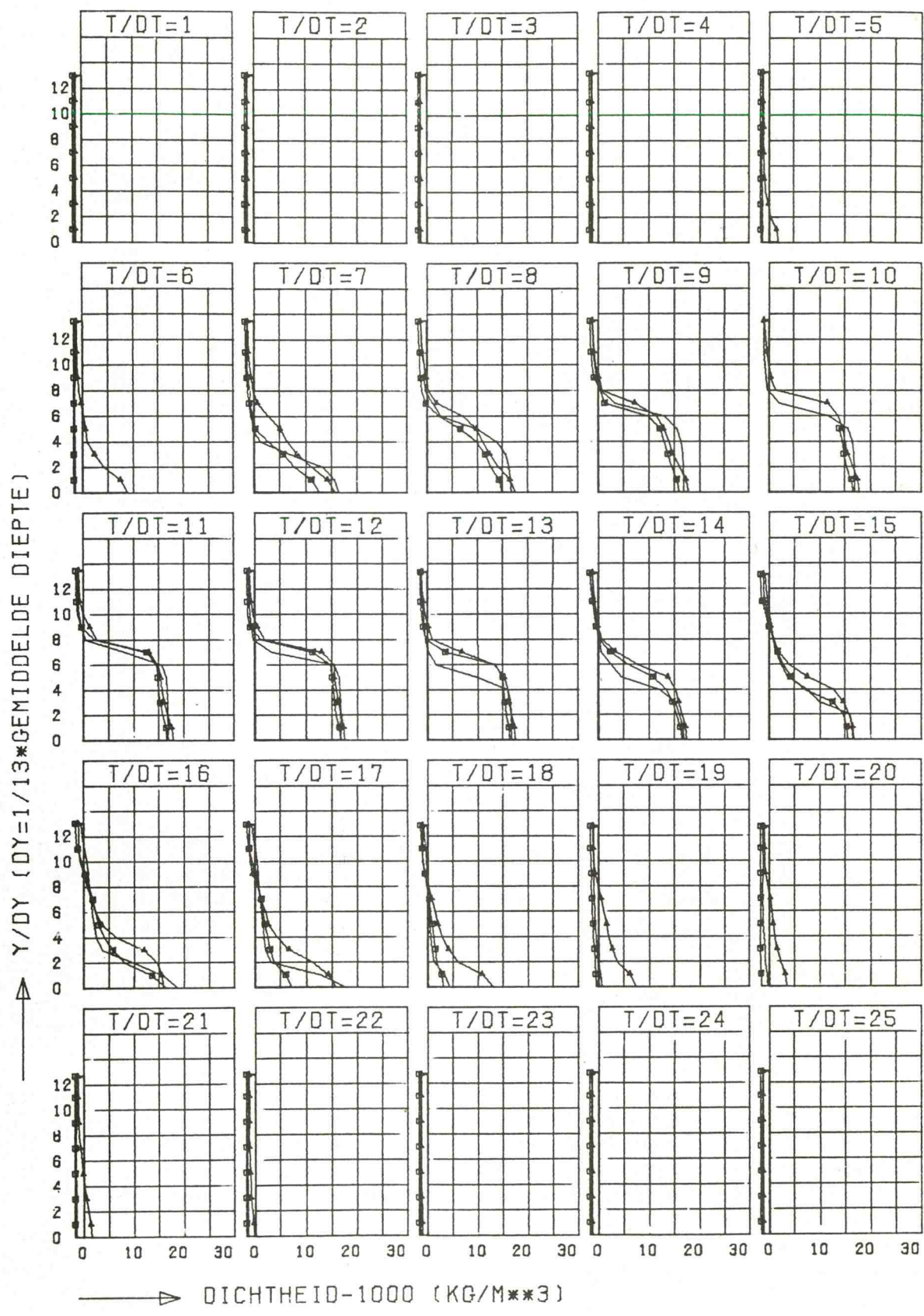
— VERTREKKING : 5

JB

—□— " : 10

A4

—▲— " : 20



VERTREKKINGSONDERZOEK WANDRUWHEID

MEETPUNT : X/DX = 5

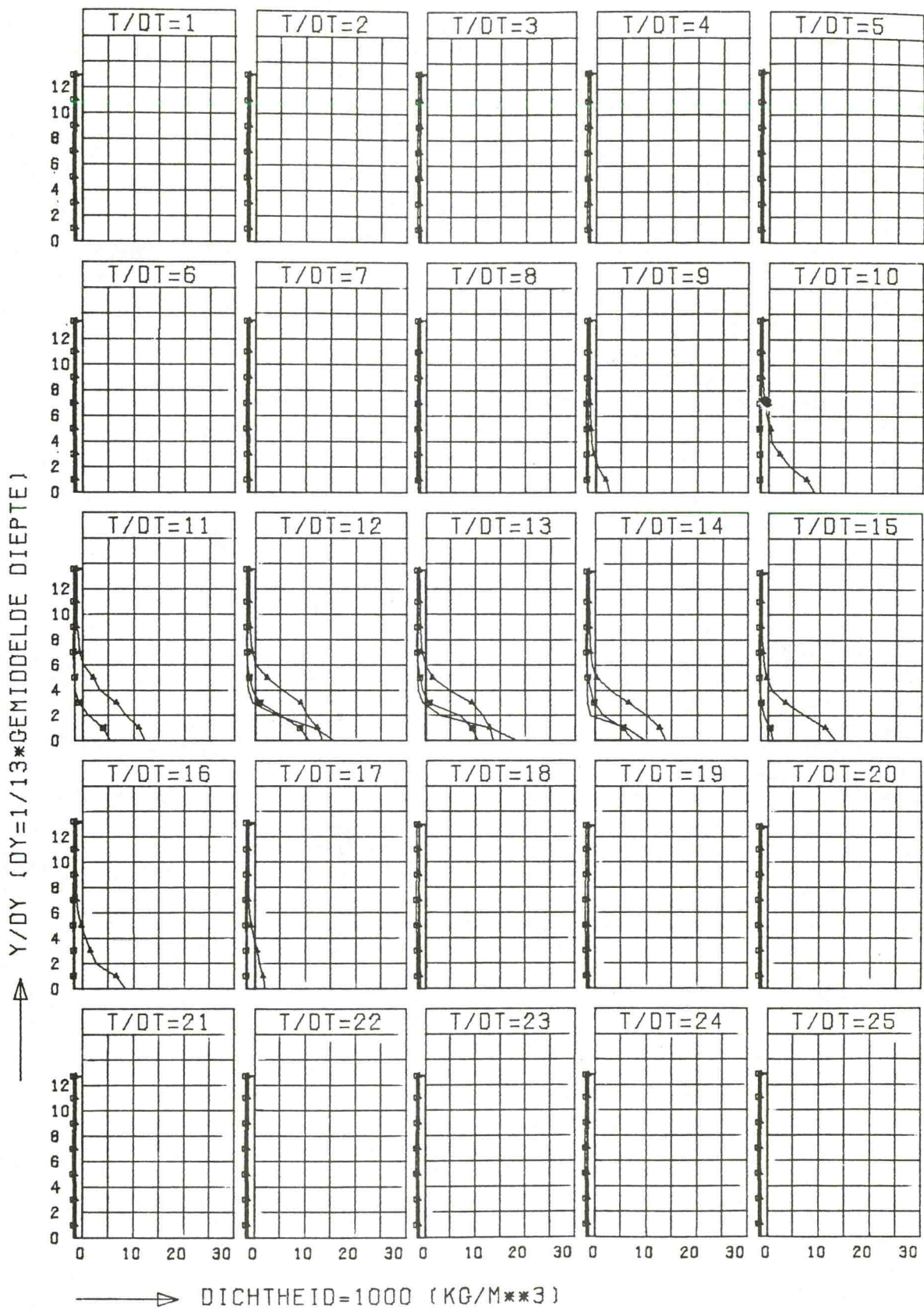
T636 T637 T638

AFVOER = 1900 m³/s

— VERTREKKING : 5
 —□— " : 10
 —▲— " : 20

JB

A4



VERTREKKINGSONDERZOEK WANDRUWHEID

MEETPUNT : $X/DX = 8$

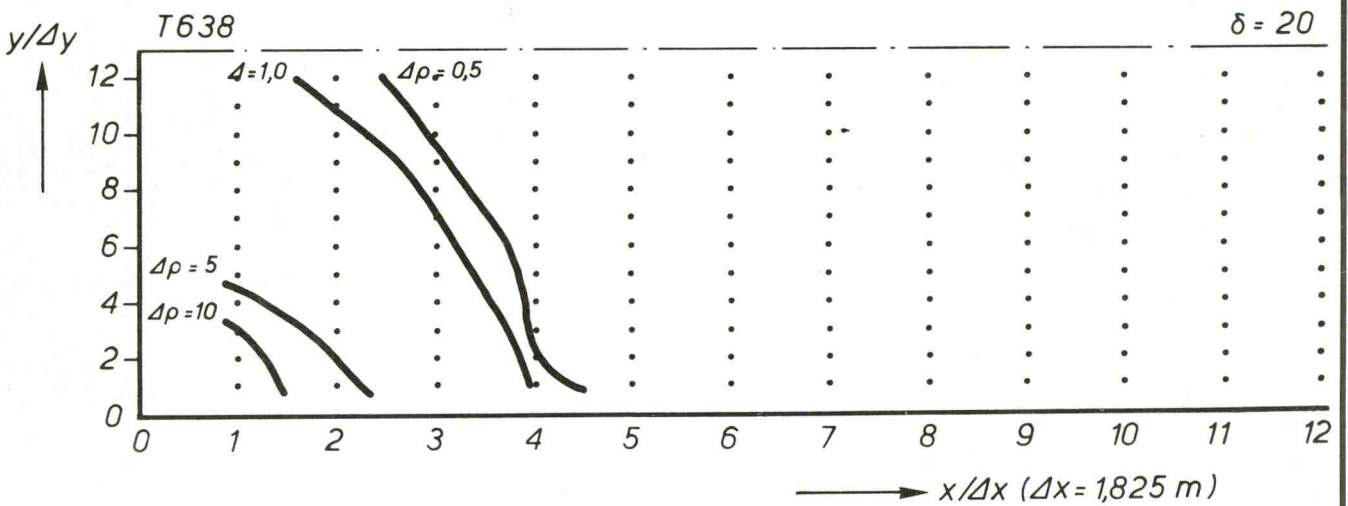
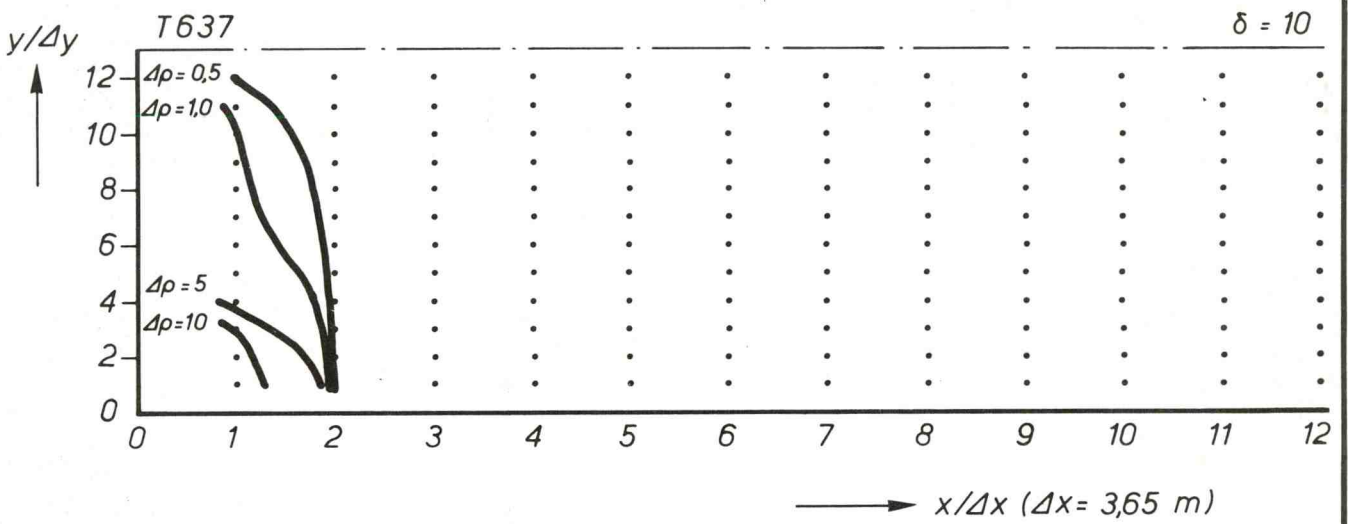
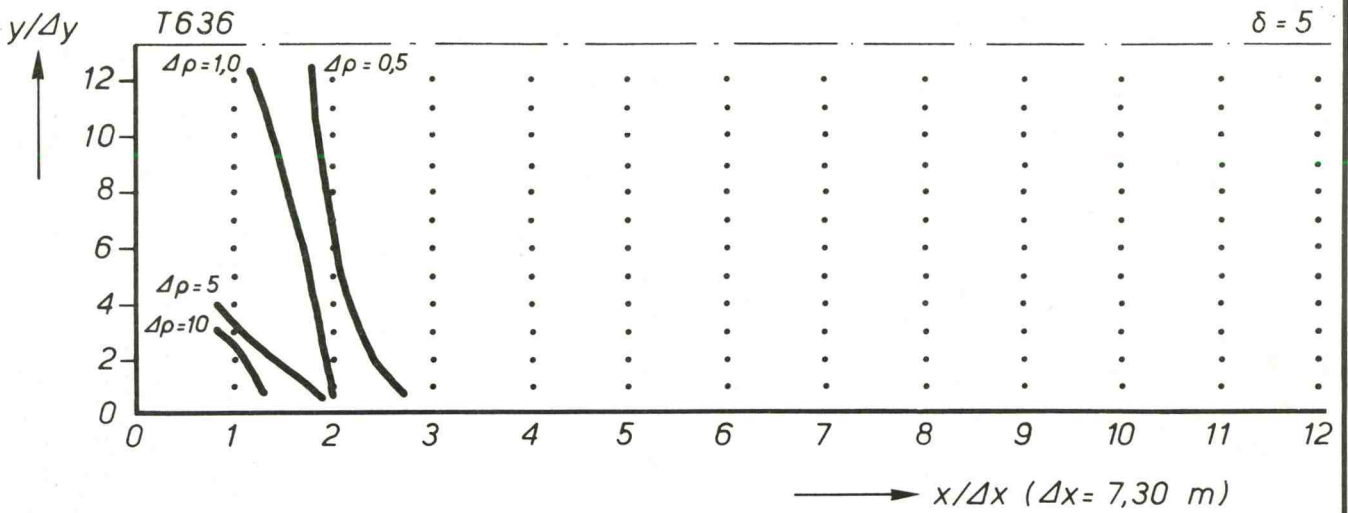
T636 T637 T638

AFVOER = $1900 \text{ m}^3/\text{s}$

— VERTREKKING : 5 JB

—□— " : 10

—▲— " : 20 A4



WANDRUWHEID
 REF. OMSTANDIGHEDEN + $Q_{riv} = 1900 \text{ m}^3/\text{s}$

TJJDSTIP: $t/\Delta t = 1$

JB

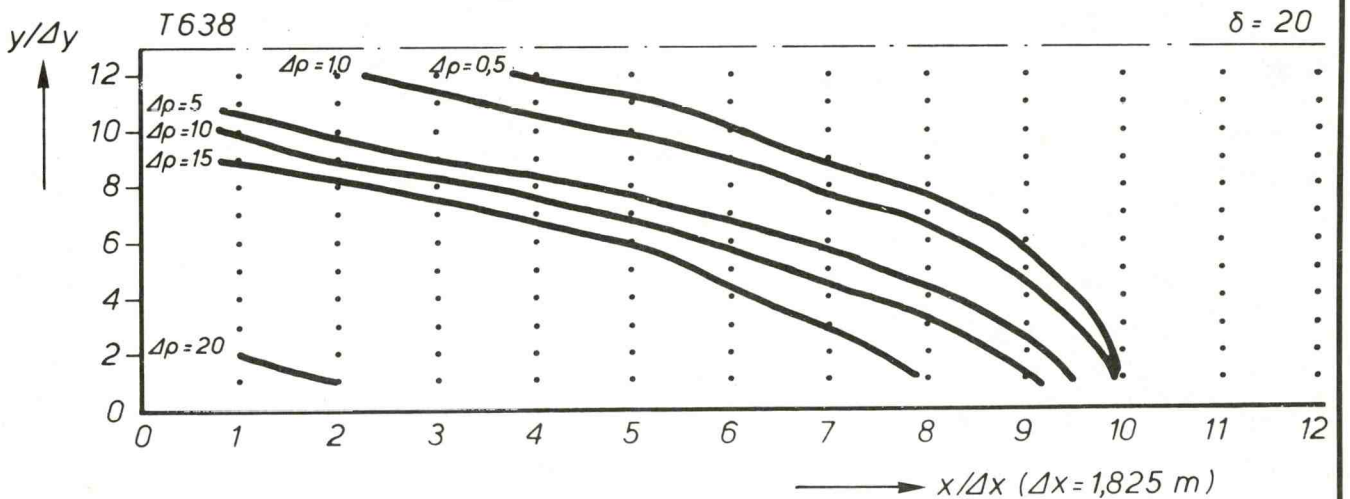
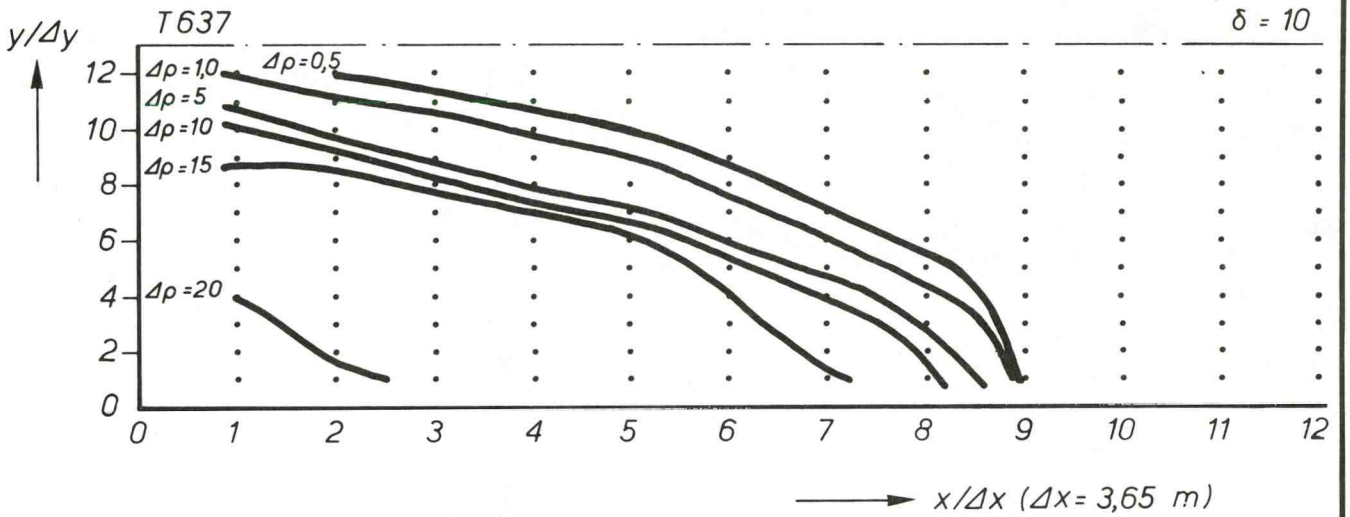
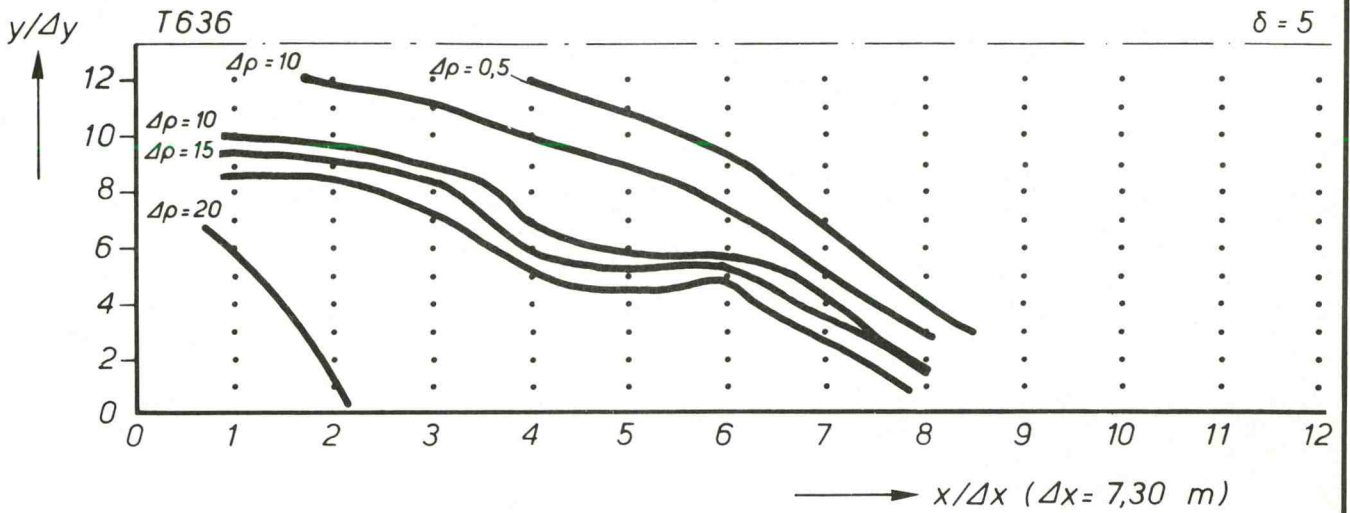
• MEETPUNT

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2392

FIG. 26



WANDRUWHEID
REF. OMSTANDIGHEDEN + $Q_{riv} = 1900 \text{ m}^3/\text{s}$

TJdstip: $t/\Delta t = 13$

JB

• MEETPUNT

A 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

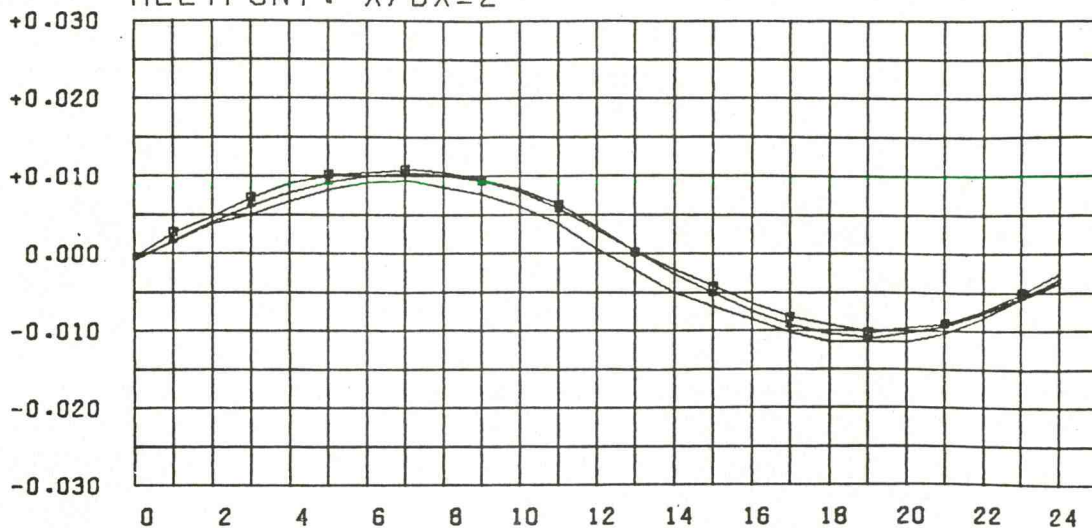
M 896-2407

FIG. 27

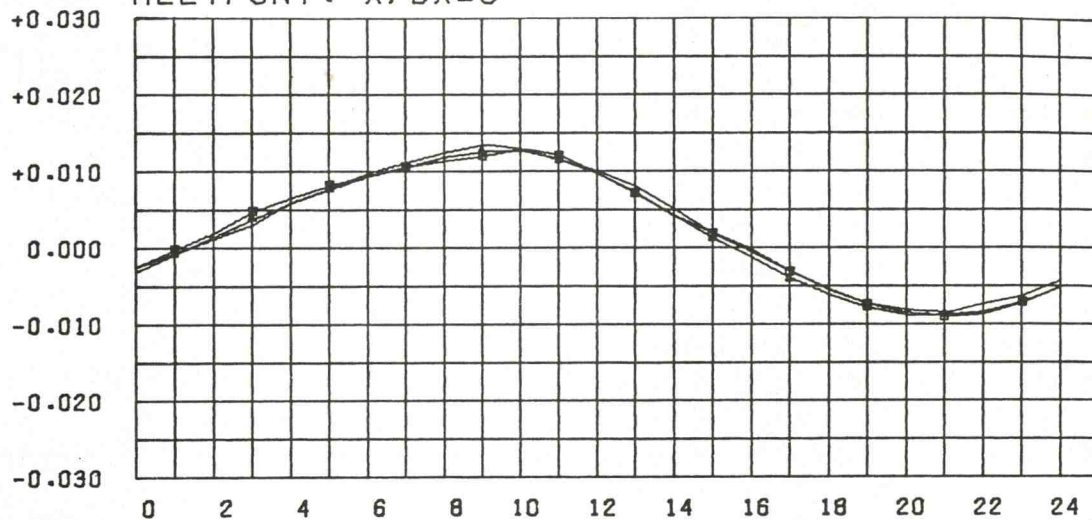
WATERSTAND T.O.V. MIDDENSTAND (M-MODEL)



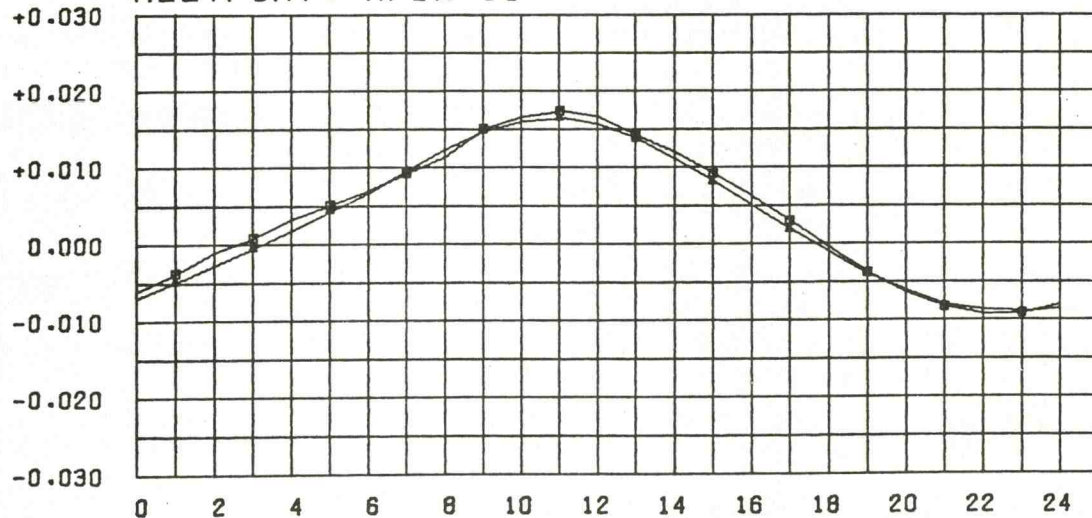
MEETPUNT : $X/DX=2$



MEETPUNT : $X/DX=8$



MEETPUNT : $X/DX=16$



→ T/DT (DT=30 MIN. PROTO)

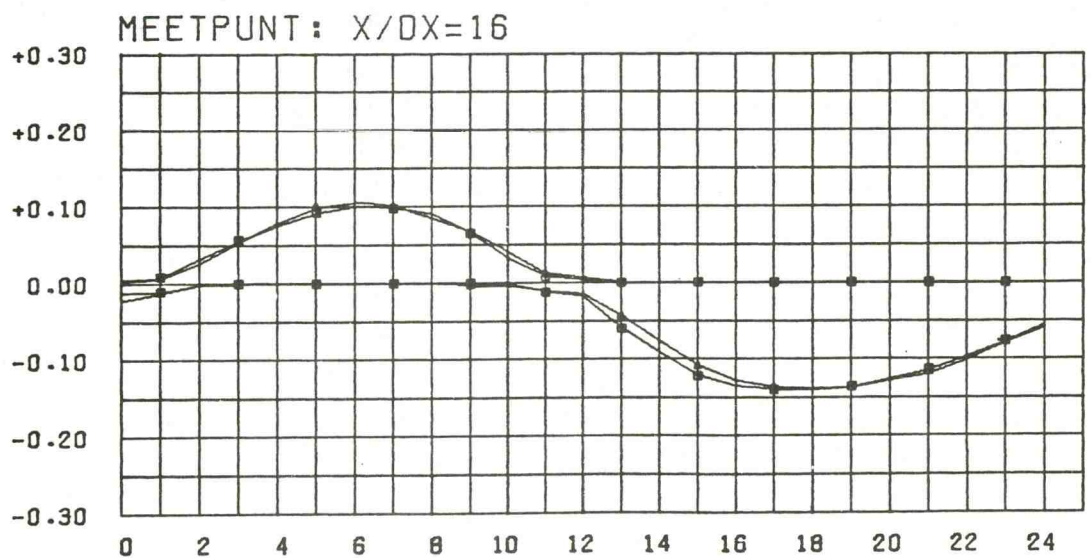
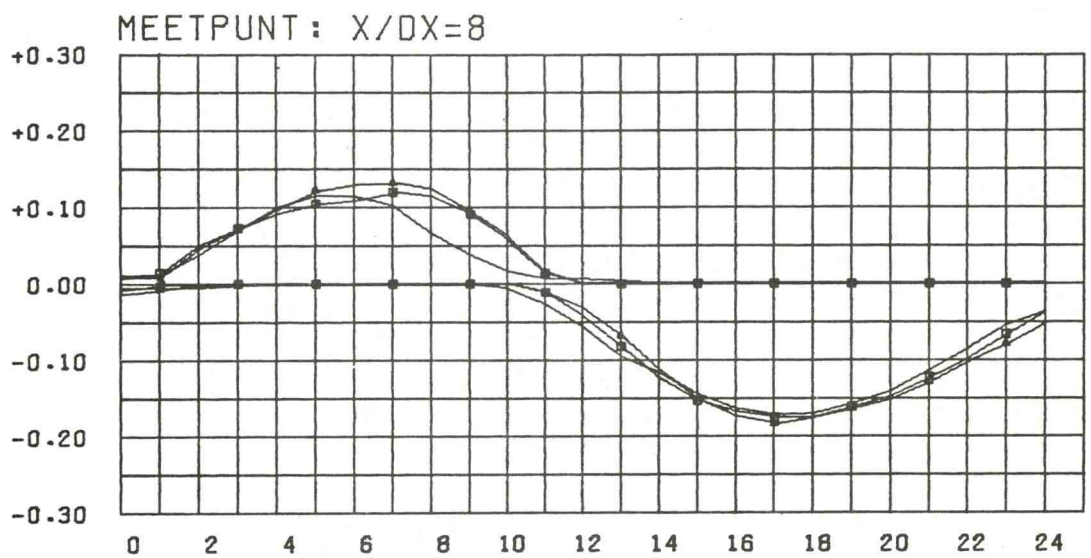
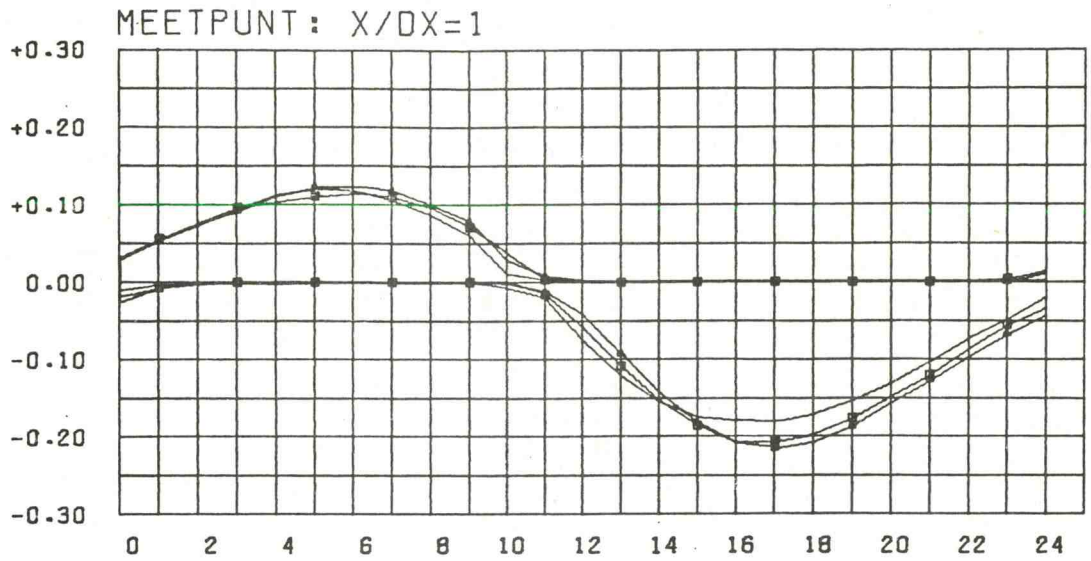
VERTREKKINGSONDERZOEK WAND- EN BODEMRUWHEID
T620 T621 T622 REF. TOESTAND

— VERTREKKING : 5
 -□- " : 10
 -▲- " : 20

JB

A4

GEMIDDELTE SNELHEID (M/S-MODEL) (EB ⇄ VLOED)



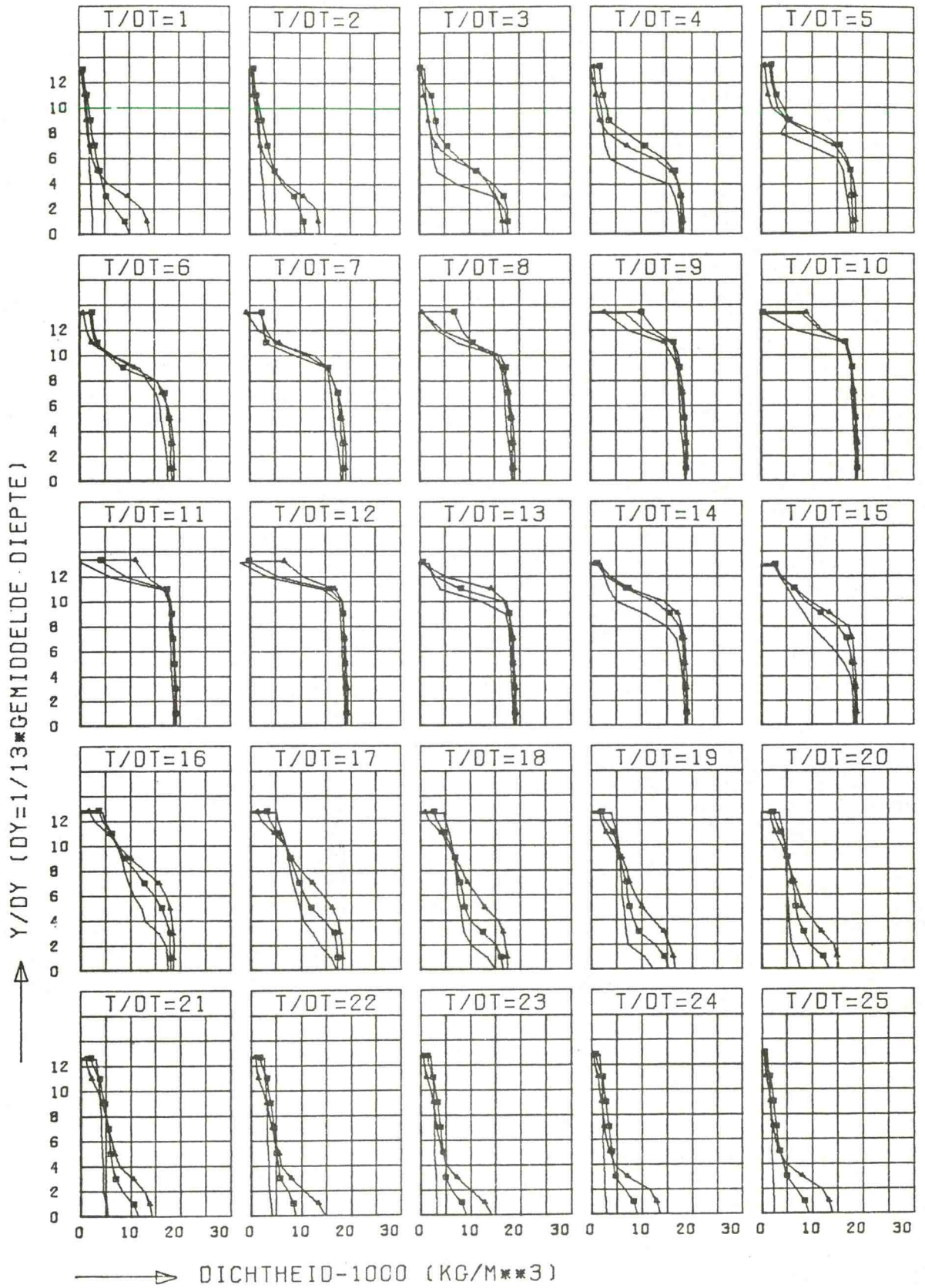
→ T/DT (DT=30 MIN. PROT.)

VERTREKKINGSONDERZOEK WAND- EN BODEMRUWHEID
T620 T621 T622 REF. TOESTAND

— VERTREKKING 5
-□- " 10
-▲- " 20

JB

A4



VERTREKKINGSONDERZOEK WAND- EN BODEMRUWHEID

MEETPUNT : X/DX = 2

T620 T621 T622

REF. TOESTAND

— VERTREKKING : 5

JB

—□— " : 10

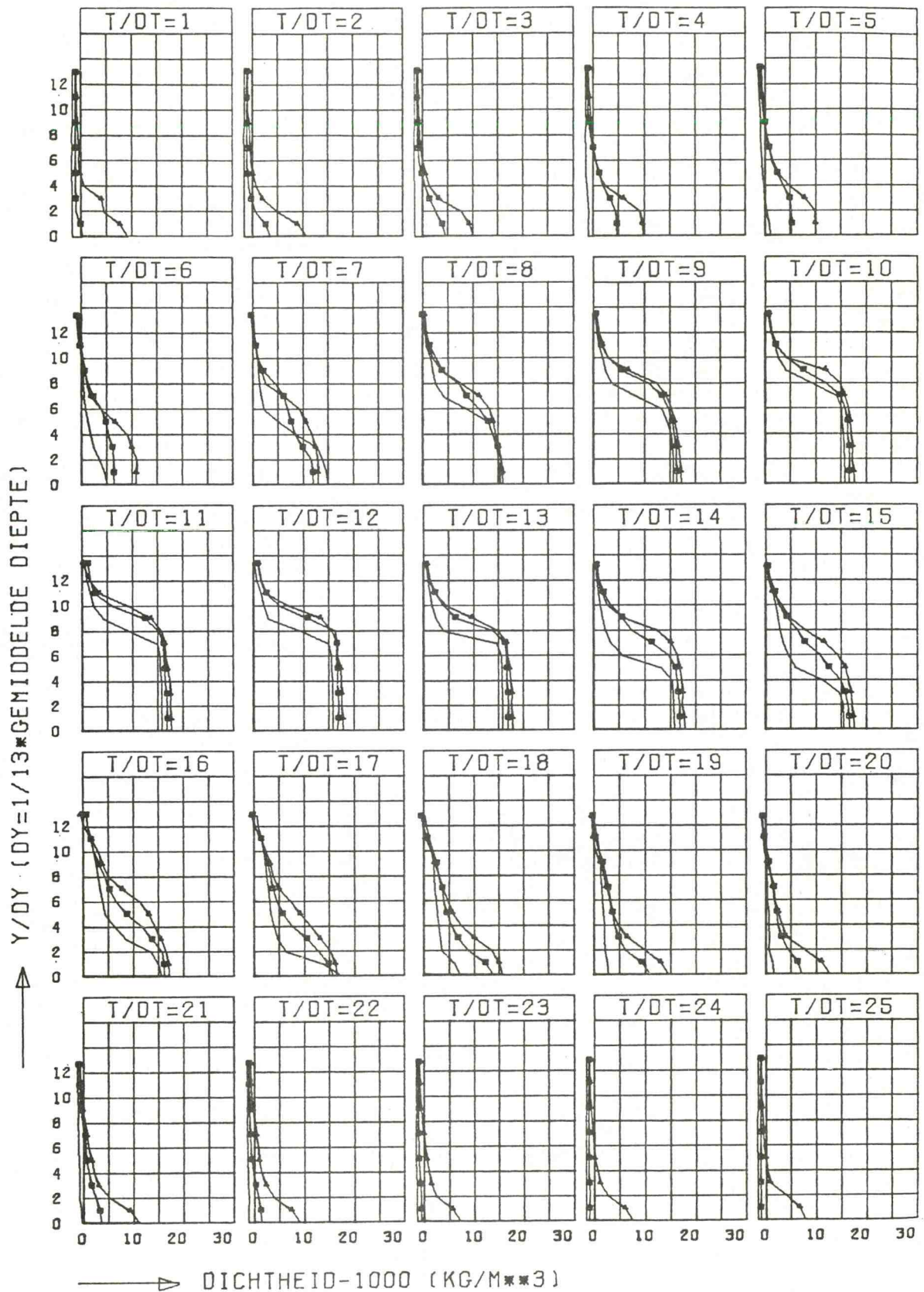
A4

—▲— " : 20

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2420

FIG. 30



VERTREKKINGSONDERZOEK WAND- EN BODEMRUWHEID

MEETPUNT : X/DX = 5

T630 T621 T622

REF. TOESTAND

— VERTREKKING : 5
 —□— " : 10
 —▲— " : 20

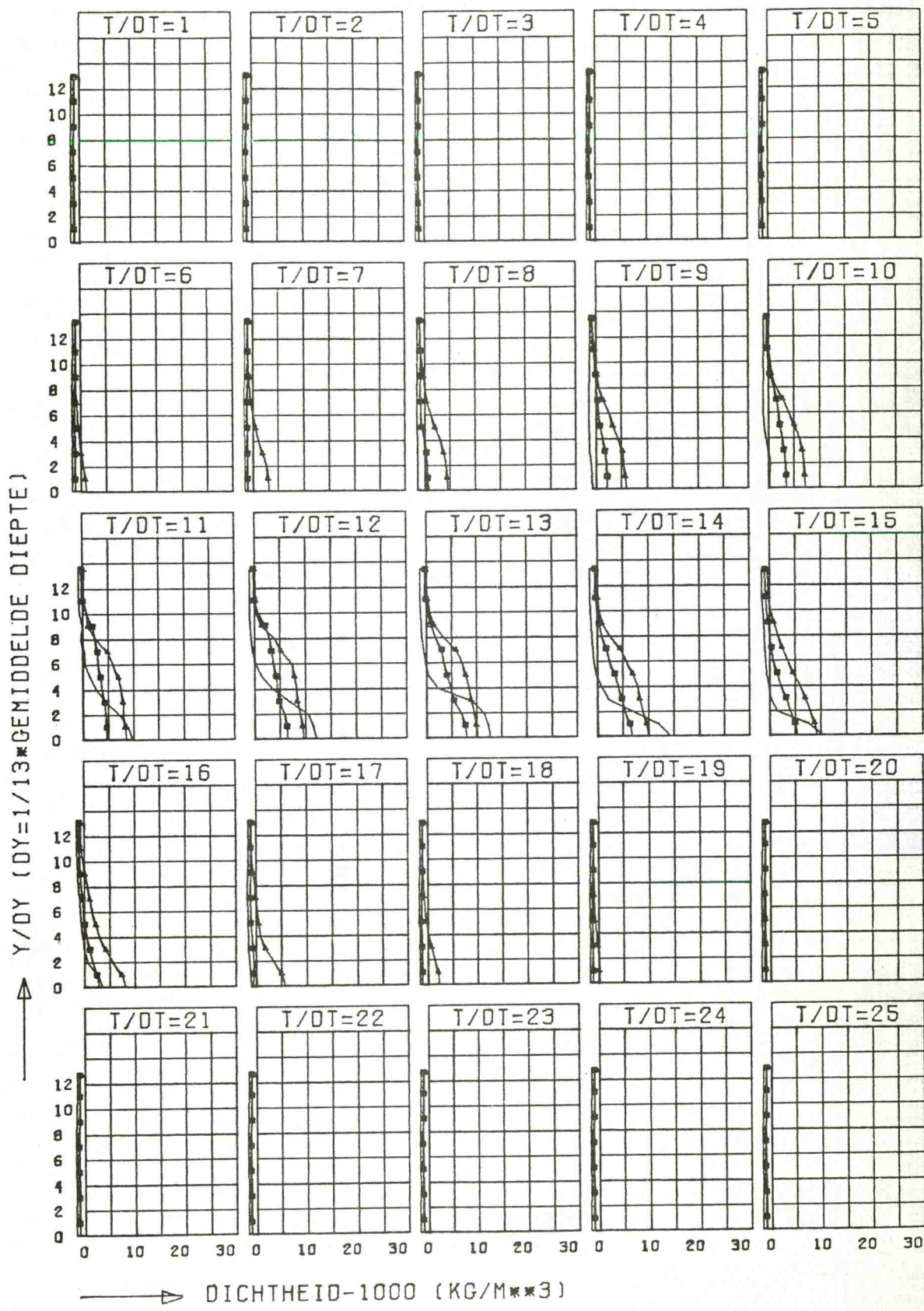
JB

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2421

FIG.31



VERTREKKINGSONDERZOEK WAND- EN BODEMRUWHEID

MEETPUNT : $X/DX = 8$

T620 T621 T622

REF. TOESTAND

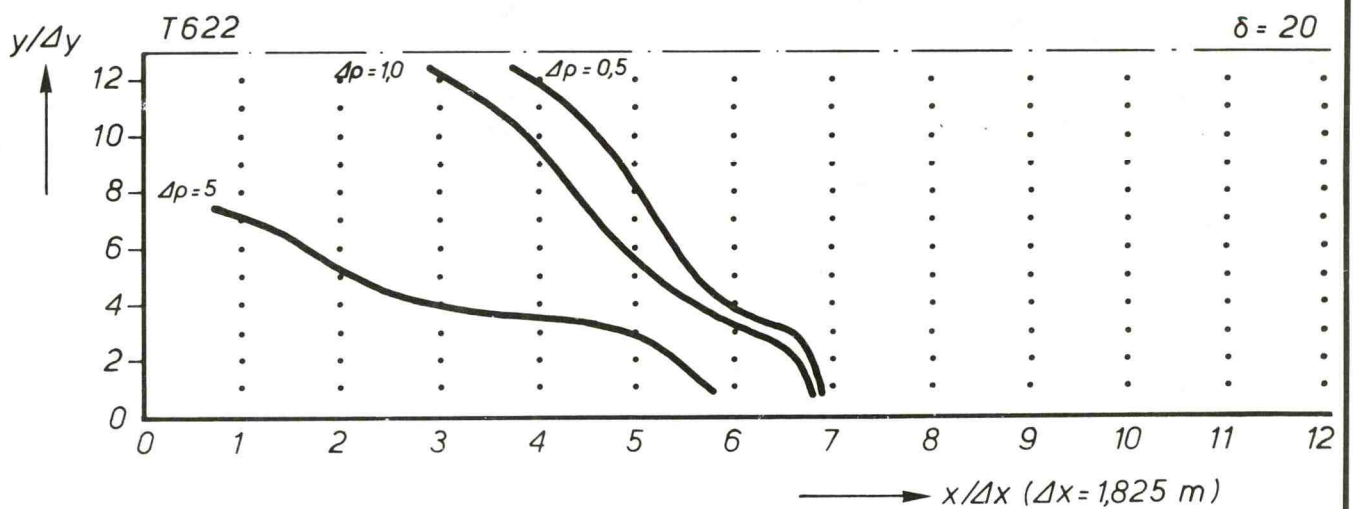
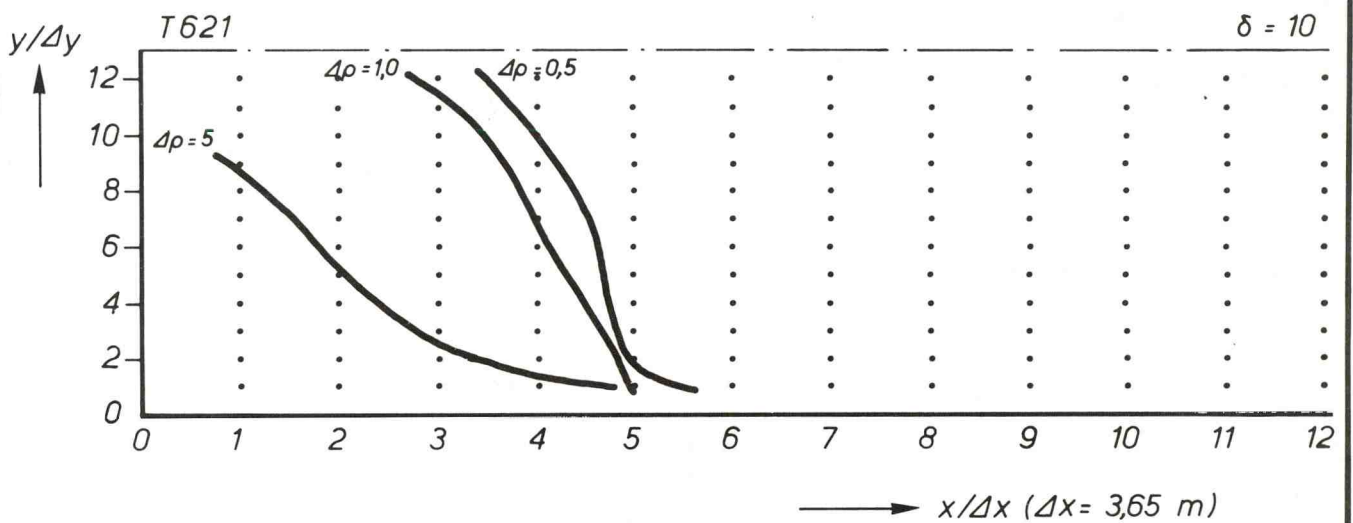
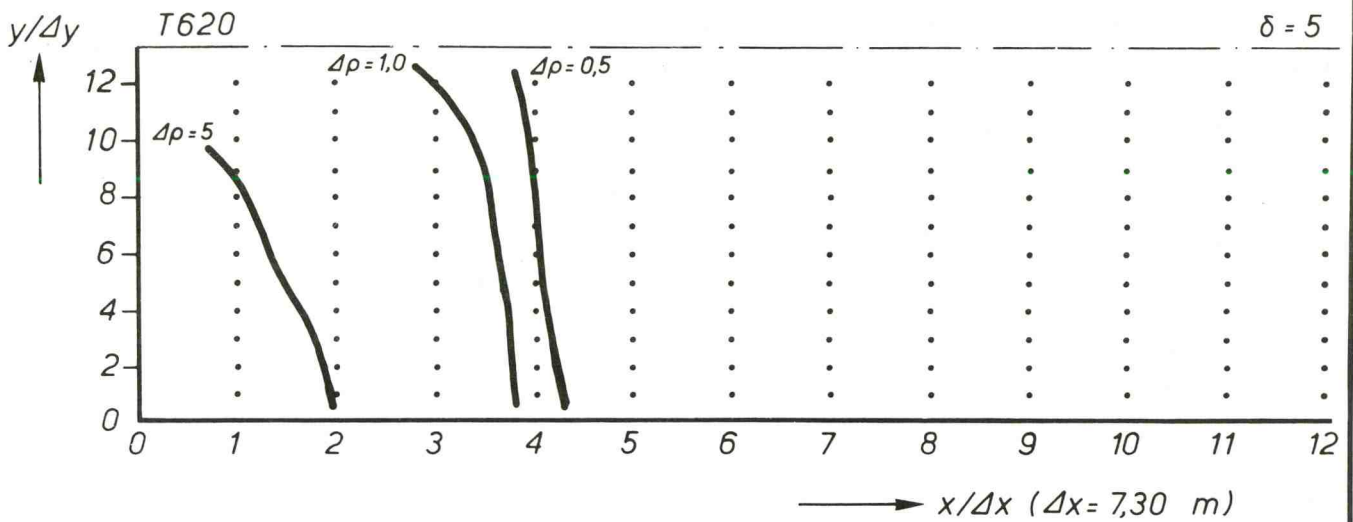
— VERTREKKING : 5

□ " : 10

▲ " : 20

JB

A4



WAND- EN BODEMRUWHEID
REFERENTIE OMSTANDIGHEDEN

TJdstip: $t/\Delta t = 1$

JB

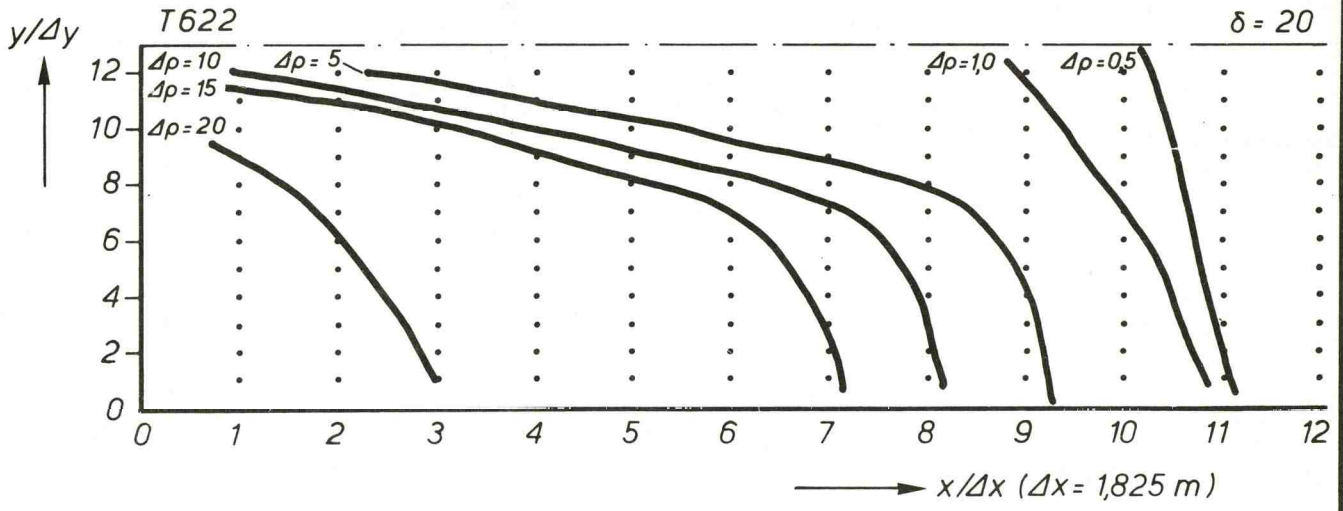
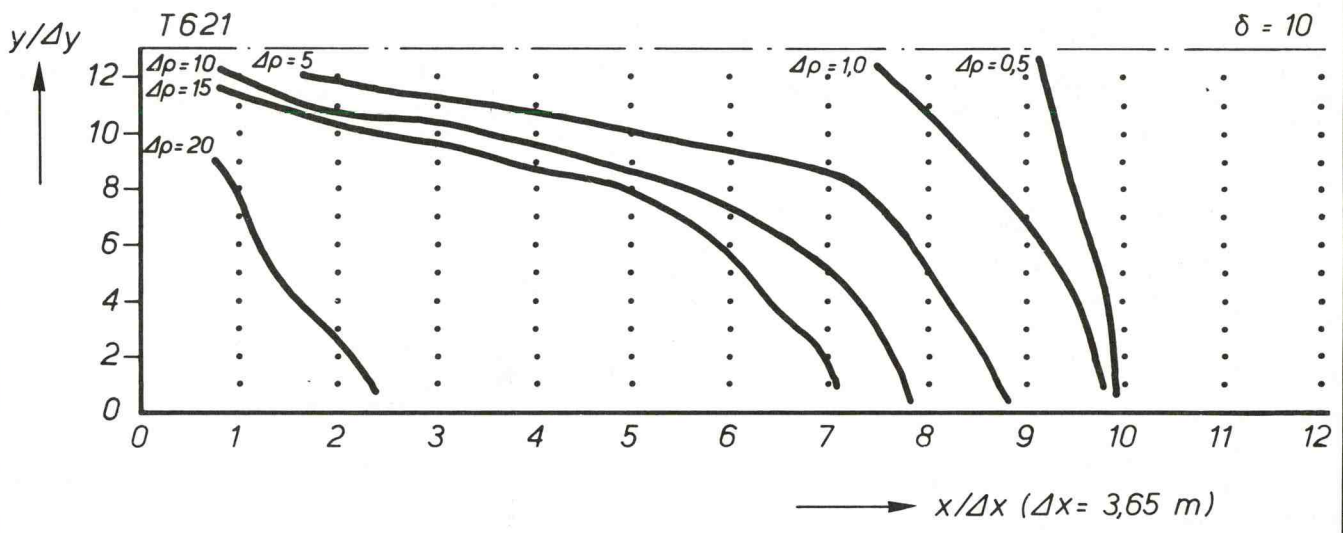
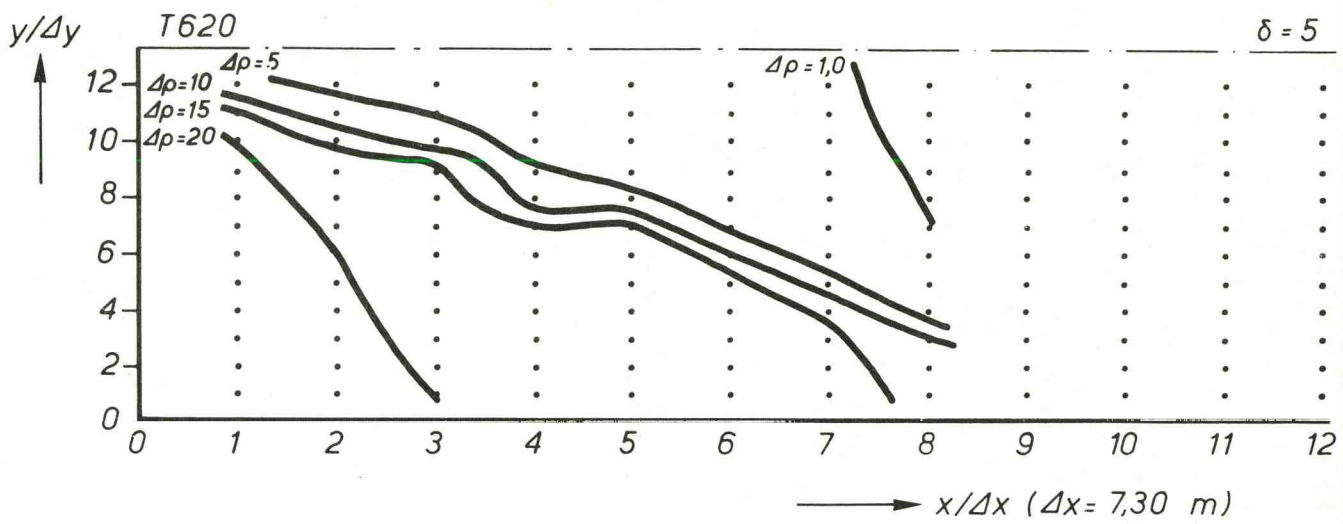
• MEETPUNT

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2413

FIG. 33



WAND- EN BODEMRUWHEID
REFERENTIE OMSTANDIGHEDEN

TJDSTIP: $t/\Delta t = 13$ JB

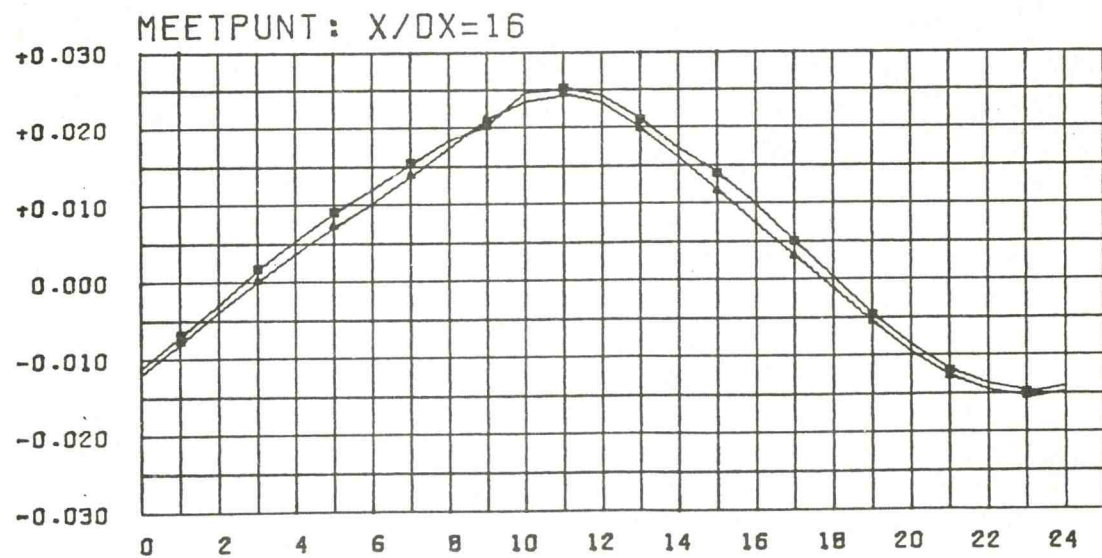
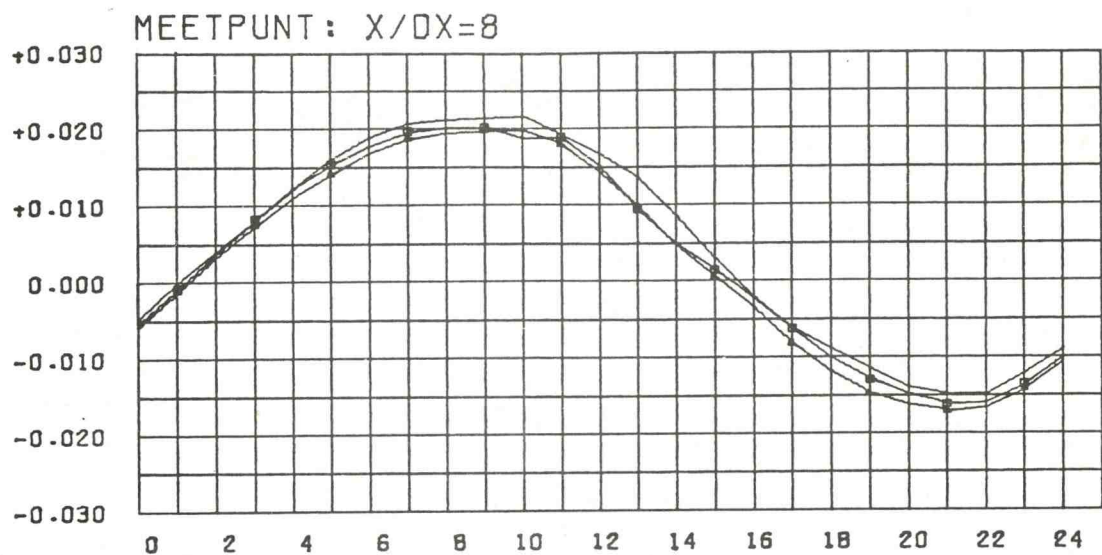
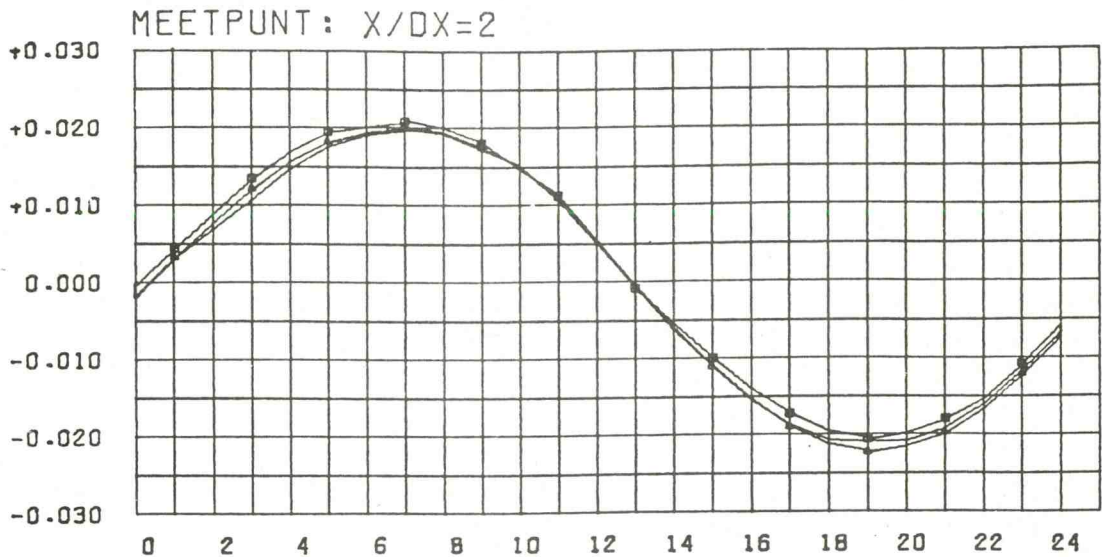
• MEETPUNT A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2314

FIG. 34

WATERSTAND T.O.V. MIDDENSTAND (M-MODEL)



— \blacktriangleright T/DT ($DT=30$ MIN. PROT.)

VERTREKKINGSONDERZOEK WAND- EN BODEMRUWHEID
 T623 T624 T625 $GETJ(2\alpha_0)=3,20m$

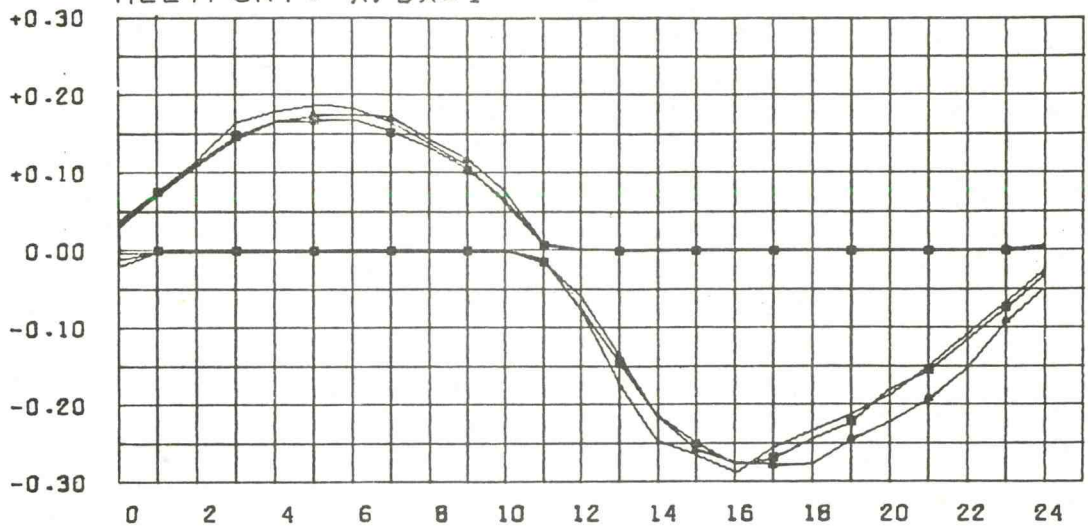
— VERTREKKING 5
 \square " 10
 \blacktriangle " 20

JB

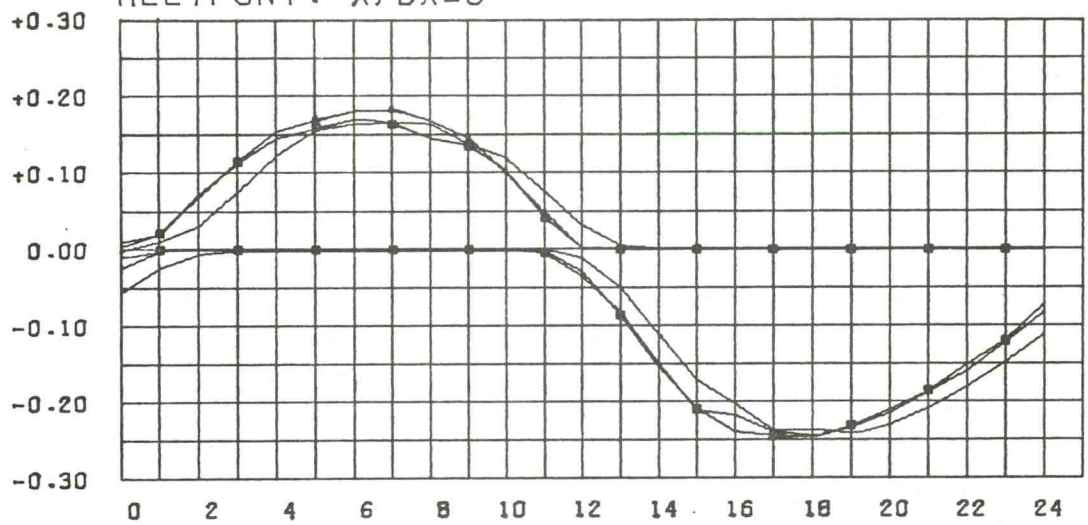
A4

GEMIDDELTE SNELHEID (M/S-MODEL) (EB \rightarrow VLOED)

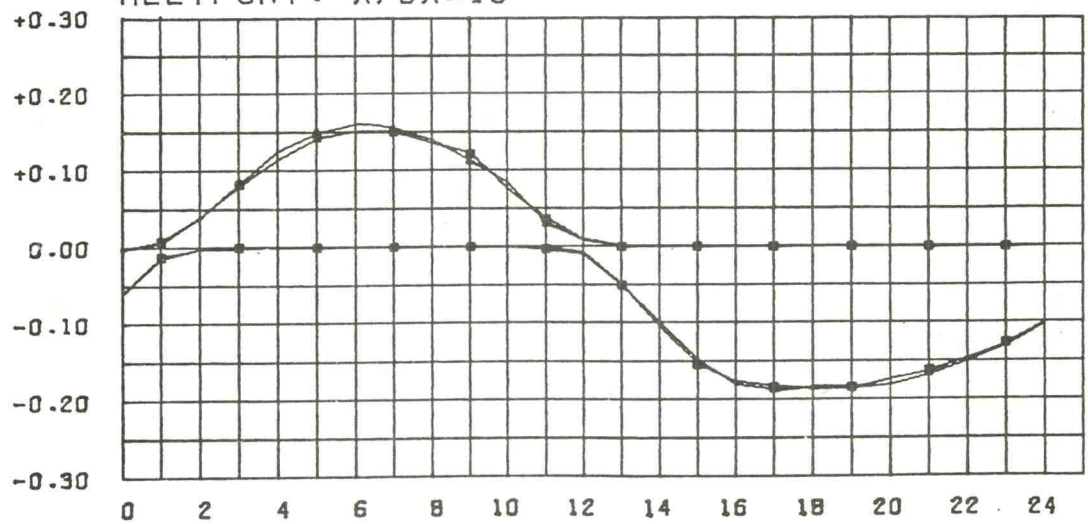
MEETPUNT: $X/DX=1$



MEETPUNT: $X/DX=8$



MEETPUNT: $X/DX=16$



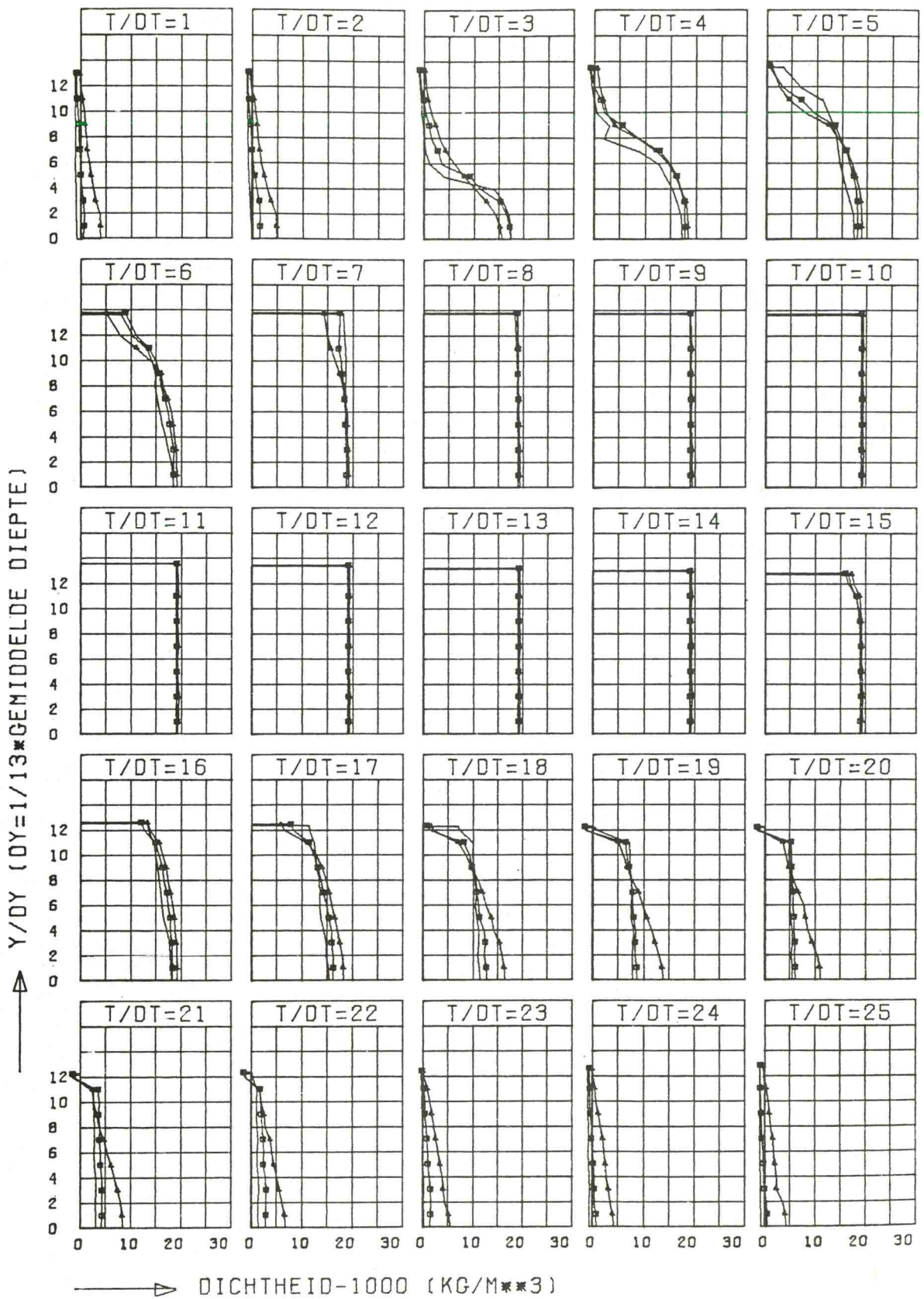
\rightarrow T/DT (DT=30 MIN. PROTO)

VERTREKKINGSONDERZOEK WAND- EN BODEMRUWHEID
T623 T624 T625 GETJ($2\alpha_0$)=3,20m

— VERTREKKING 5
—□— " 10
—△— " 20

JB

A4



VERTREKKINGSONDERZOEK WAND- EN BODEMRUWHEID

MEETPUNT : $X/DX = 2$

T623 T624 T625

GETU($2\alpha_0$) = 3,20m

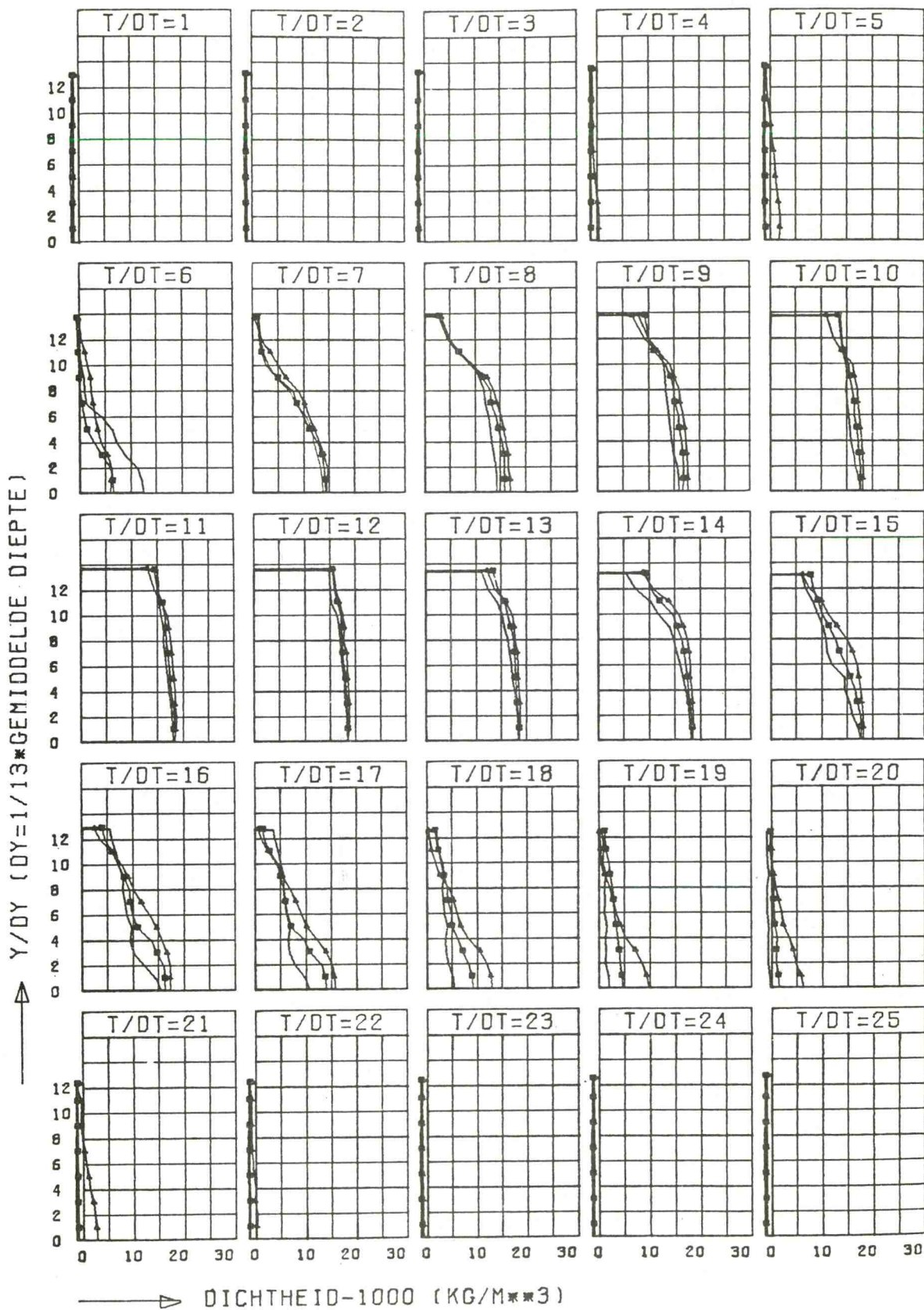
— VERTREKKING : 5

□ " : 10

▲ " : 20

JB

A4



VERTREKKINGSONDERZOEK WAND- EN BODEMRUWHEID

MEETPUNT : X/DX=5

T623 T624 T625

GETJ(2a₀)=3.20m

— VERTREKKING : 5
 —□— " : 10
 —▲— " : 20

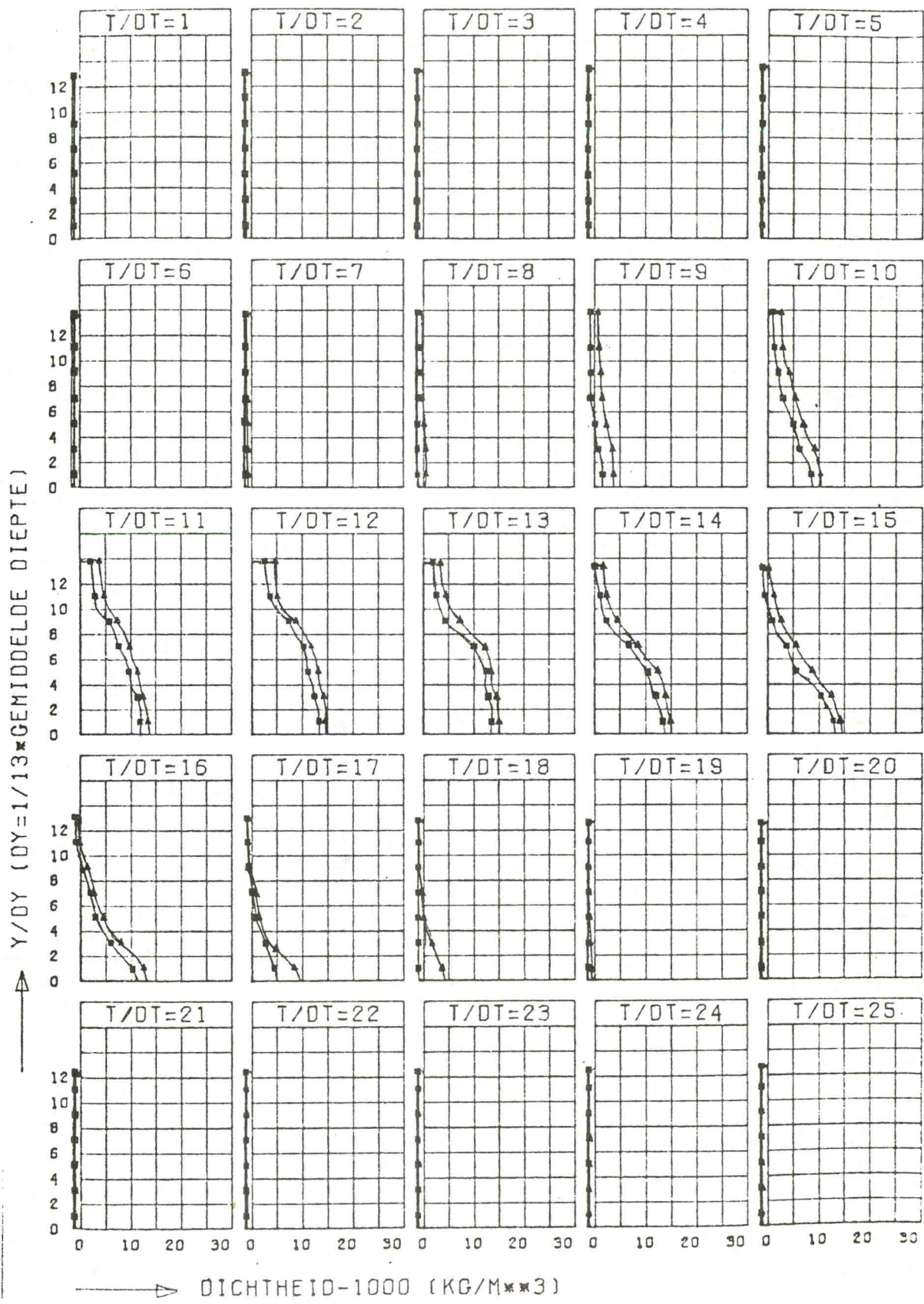
JB

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2428

FIG.38



VERTREKKINGSONDERZOEK WAND- EN BODEMRUWHEID

MEETPUNT : $X/DX = 8$

T624 T624 T625

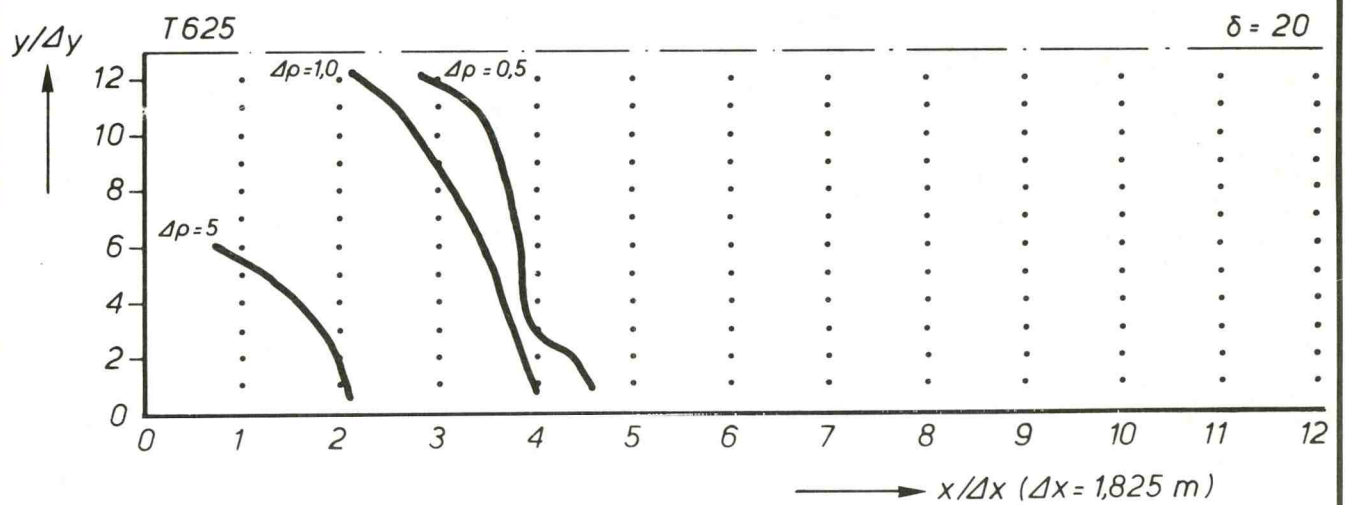
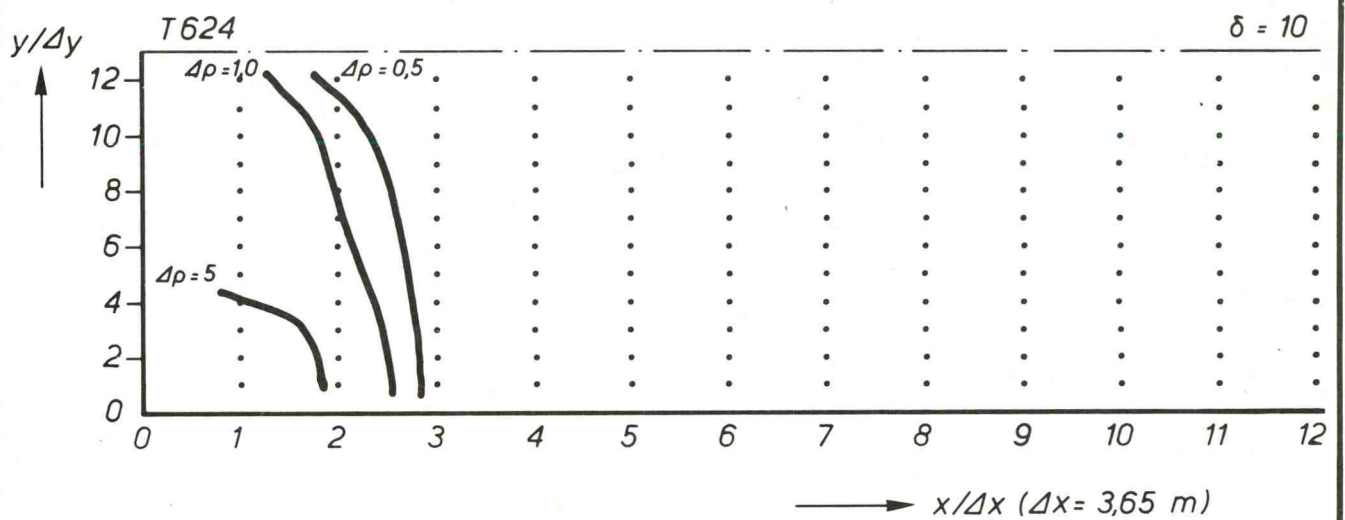
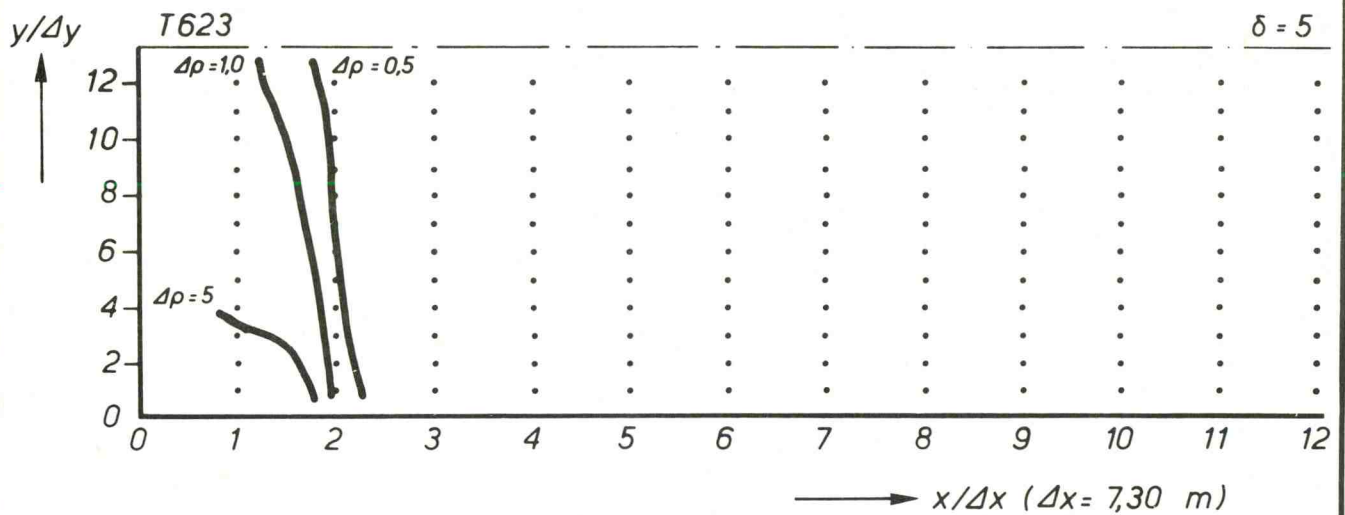
GETJ($2a_0$) = 3,20m

—	VERTREKKING : 5	JB
—□—	" : 10	A4
—▲—	" : 20	

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2419

FIG.39



WAND- EN BODEMRUWHEID
 REF. OMSTANDIGHEDEN $+2a_0 = 3,20\text{m}$

TJJDSTIP: $t/\Delta t = 1$

JB

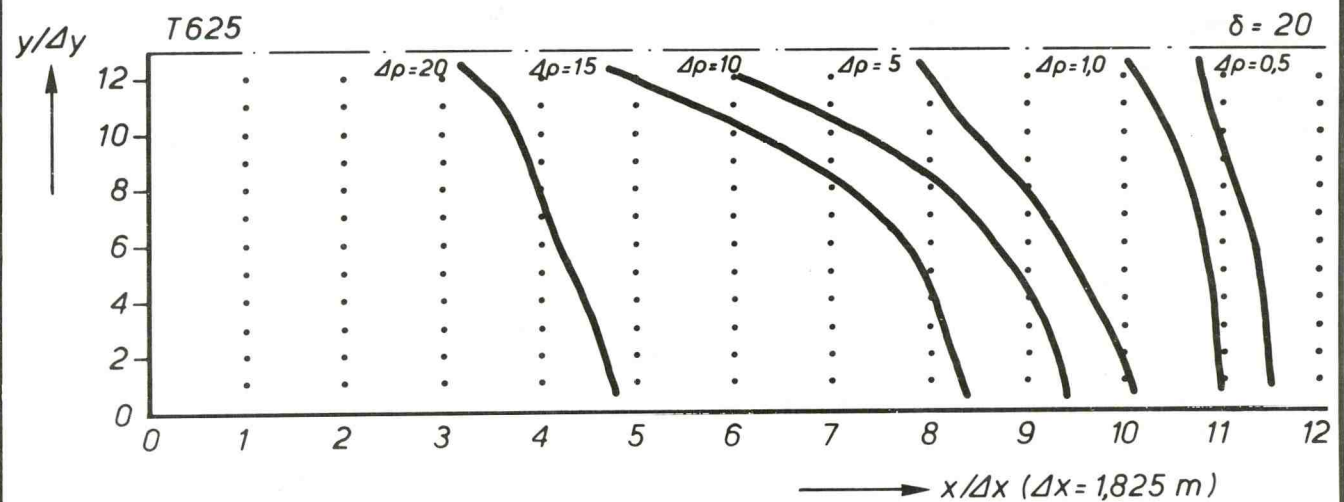
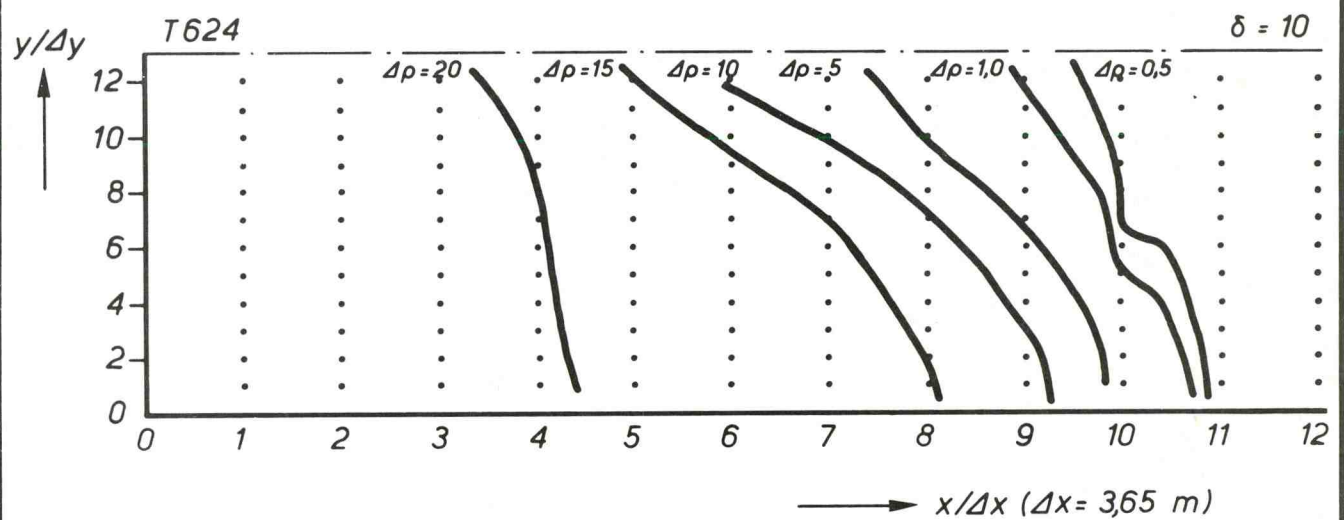
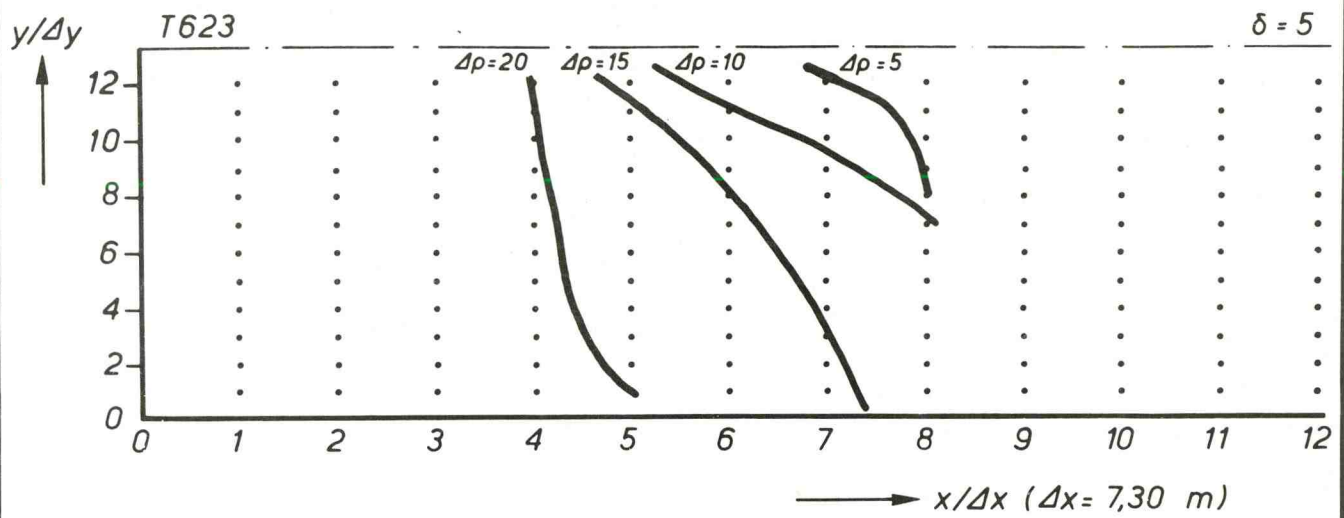
• MEETPUNT

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2420

FIG. 40



WAND- EN BODEMRUWHEID
REF. OMSTANDIGHEDEN $+2a_0 = 3,20 \text{ m}$

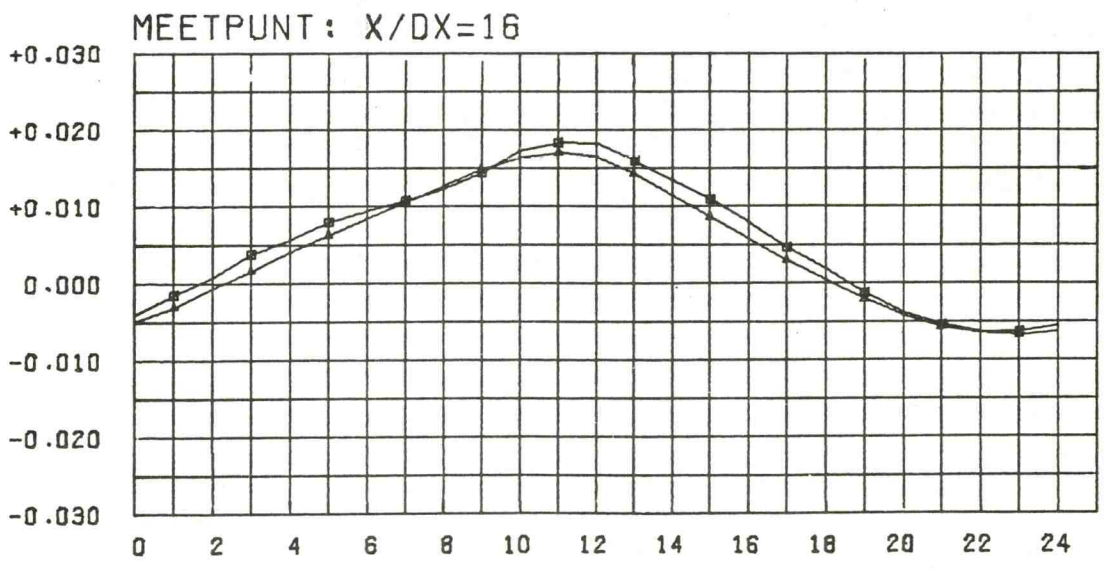
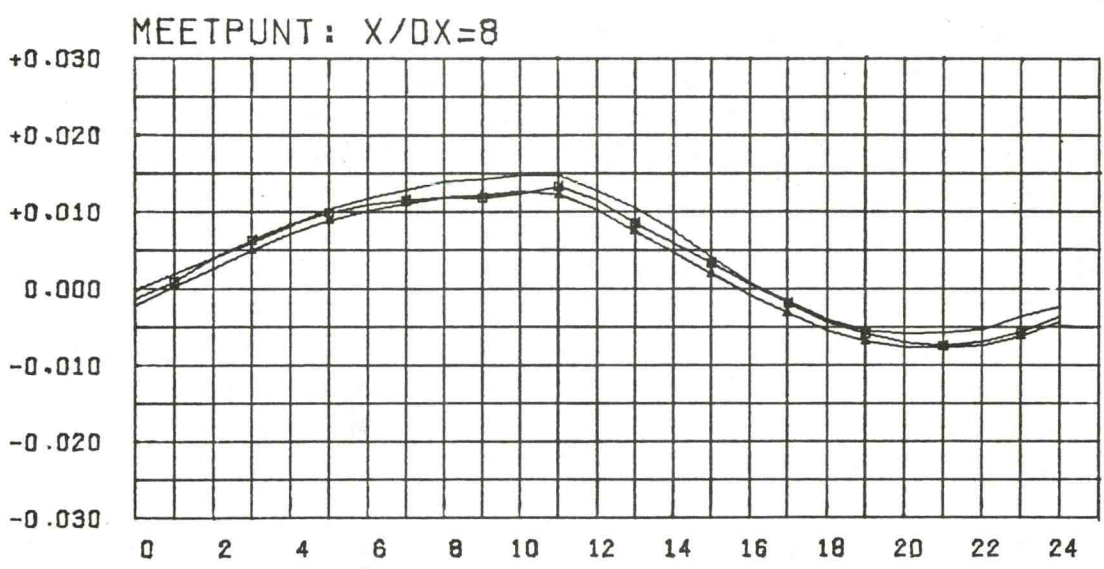
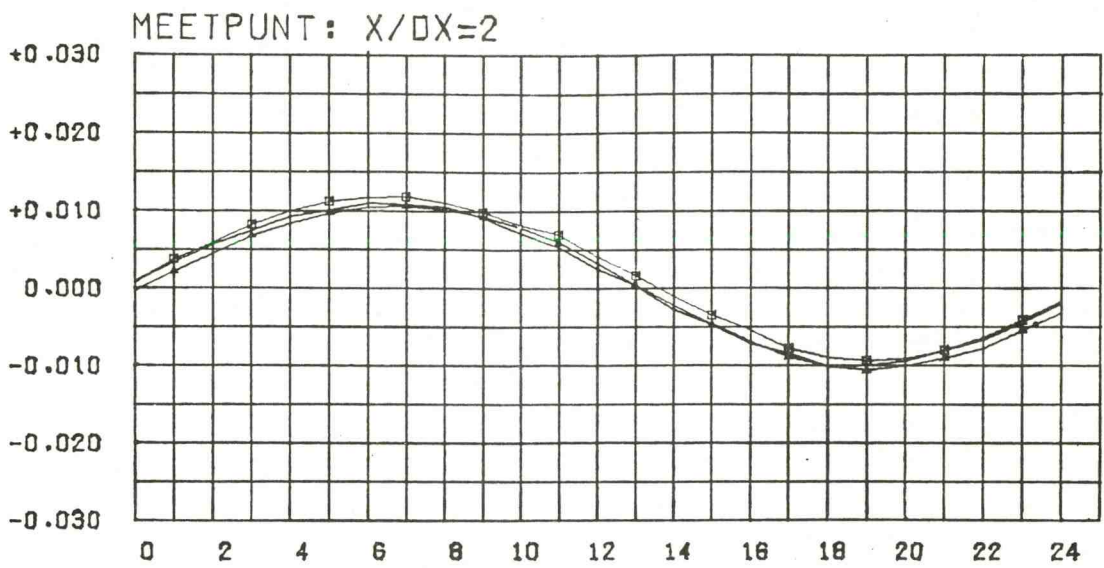
TJDSTIP: $t/\Delta t = 13$	JB
• MEETPUNT	A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2421

FIG. 41

WATERSTAND T.O.V. MIDDENSTAND (M-MODEL)



→ T/DT (DT=30 MIN. PROT)

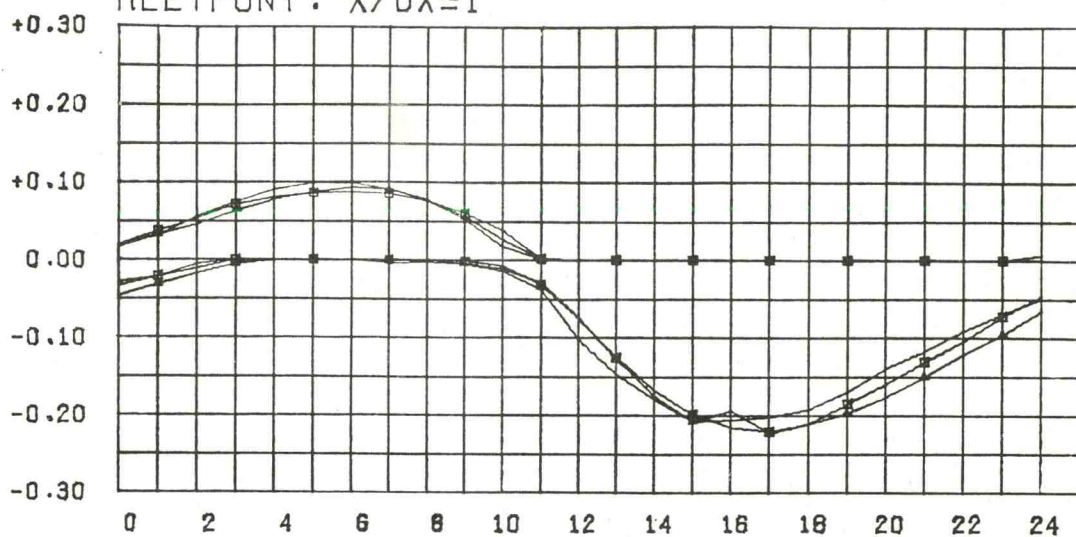
VERTREKKINGSONDERZOEK WAND- EN BODEMRUWHEID
 T626 T627 T628 AFVOER=1900m³/s

— VERTREKKING 5
 □ " 10
 ▲ " 20

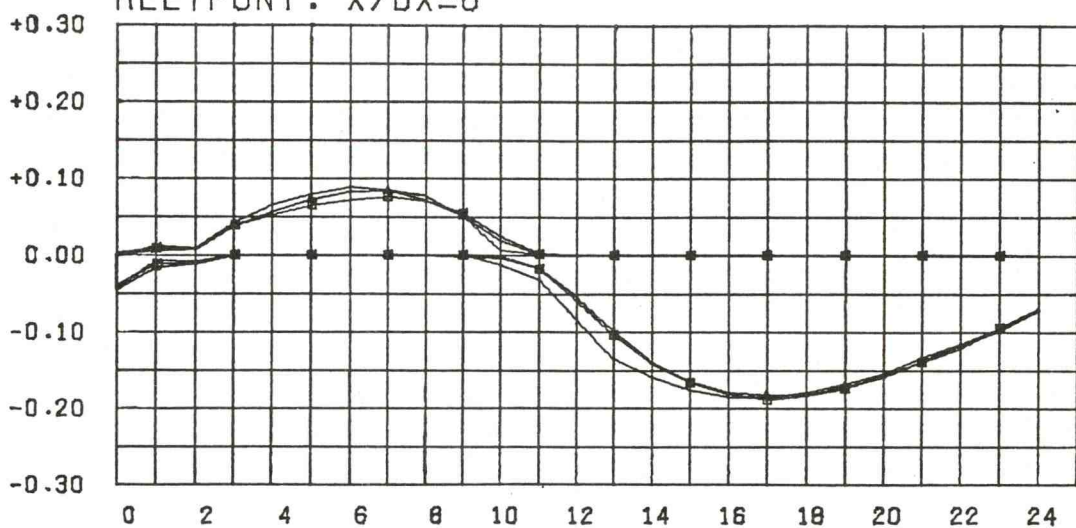
JB
 A4

GEMIDDELDE SNELHEID (M/S-MODEL) (EB ∇ VLOED)

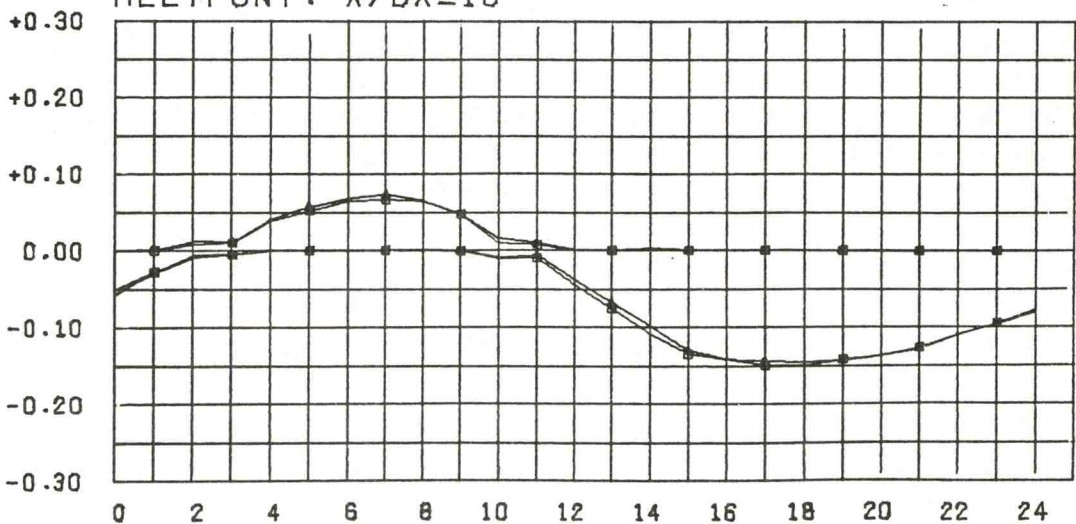
MEETPUNT : X/DX=1



MEETPUNT : X/DX=8



MEETPUNT : X/DX=16



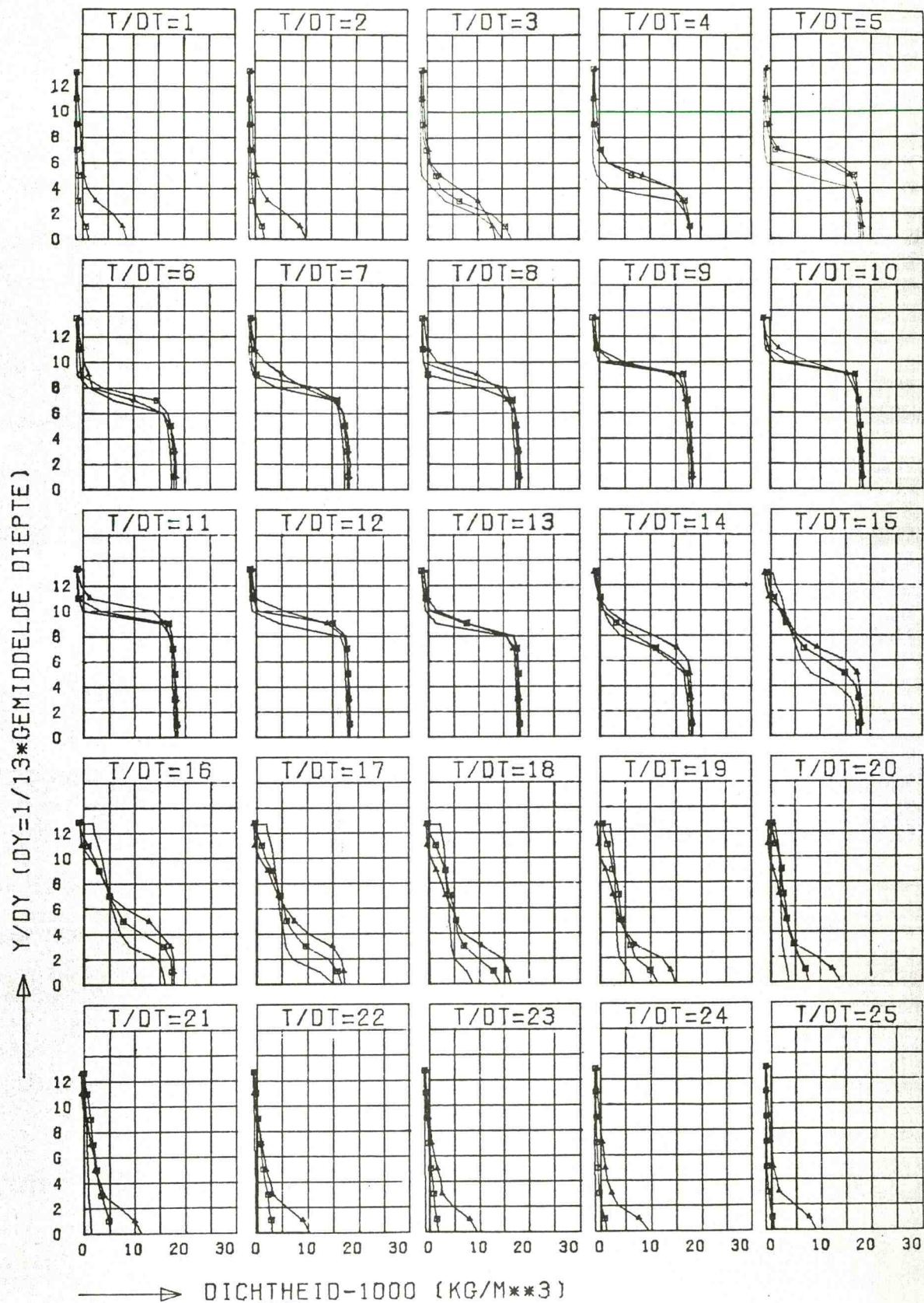
\longrightarrow T/DT (DT=30 MIN. PROTO)

VERTREKKINGSONDERZOEK WAND- EN BODEMRUWHEID
T626 T627 T628 AFVOER=1900m³/s

— VERTREKKING : 5
 —□— " : 10
 —▲— " : 20

JB

A4



VERTREKKINGSONDERZOEK WAND- EN BODEMRUWHEID

MEETPUNT : X/DX = 2

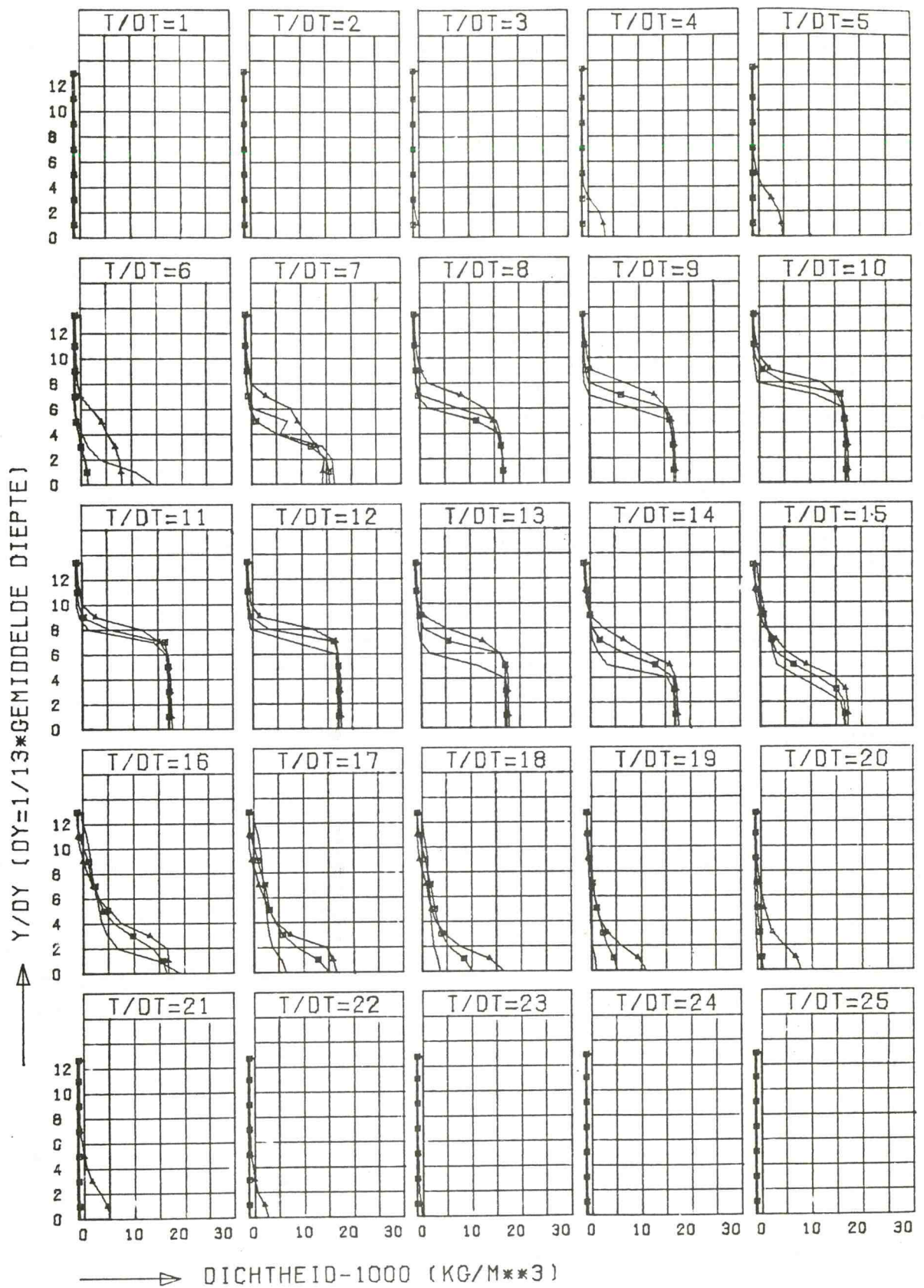
T626 T627 T628

AFVOER = 1900 m³/s

— VERTREKKING : 5
 —□— " : 10
 —▲— " : 20

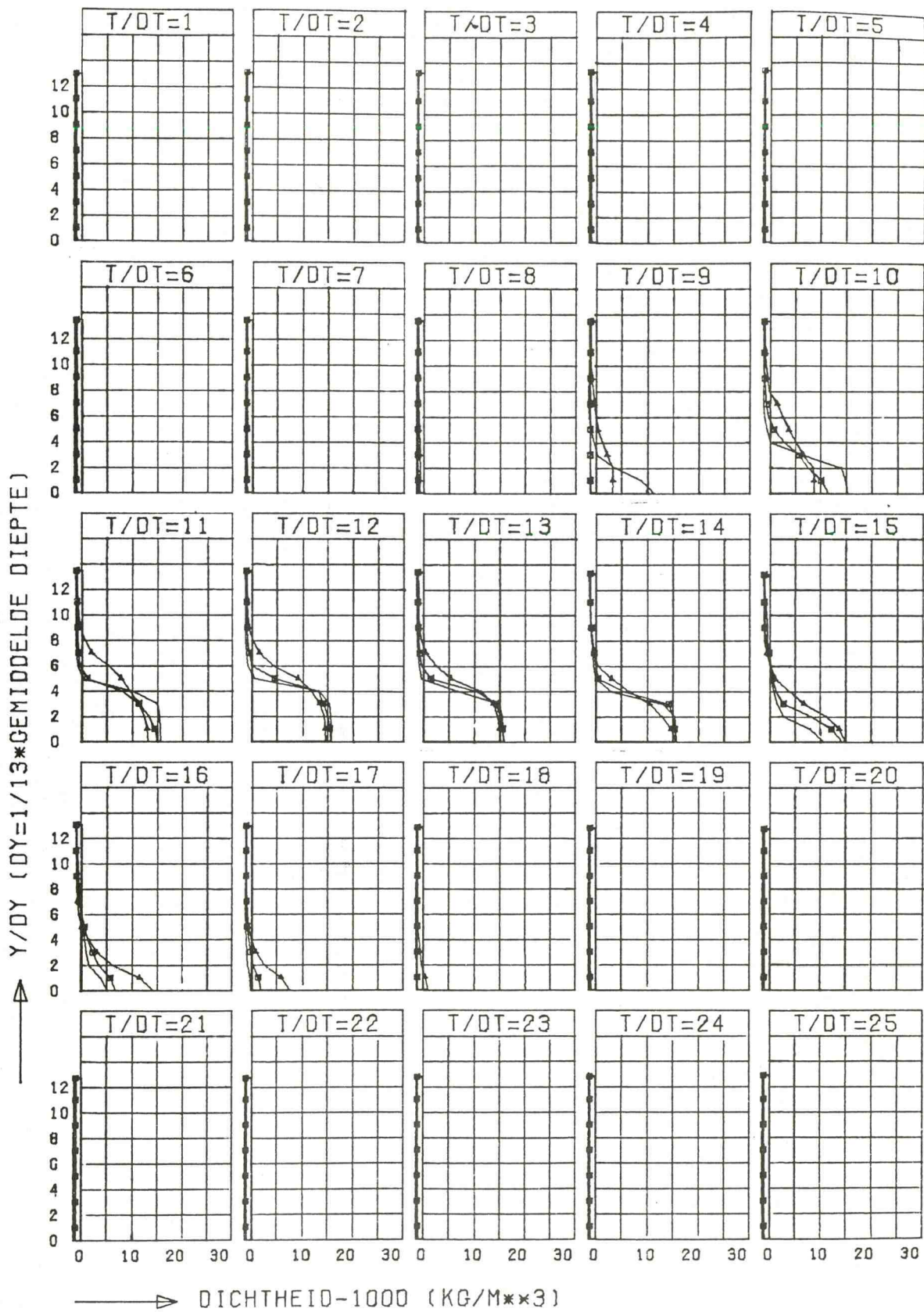
JB

A4



VERTREKKINGSONDERZOEK WAND- EN BODEMRUWHEID
 MEETPUNT : X/DX = 4
 T626 T627 T628 AFVOER = 1900 m³/s

—	VERTREKKING : 5	JB
—□—	" : 10	
—▲—	" : 20	
		A4



VERTREKKINGSONDERZOEK WAND- EN BODEMRUWHEID

MEETPUNT : $X/DX = 6$

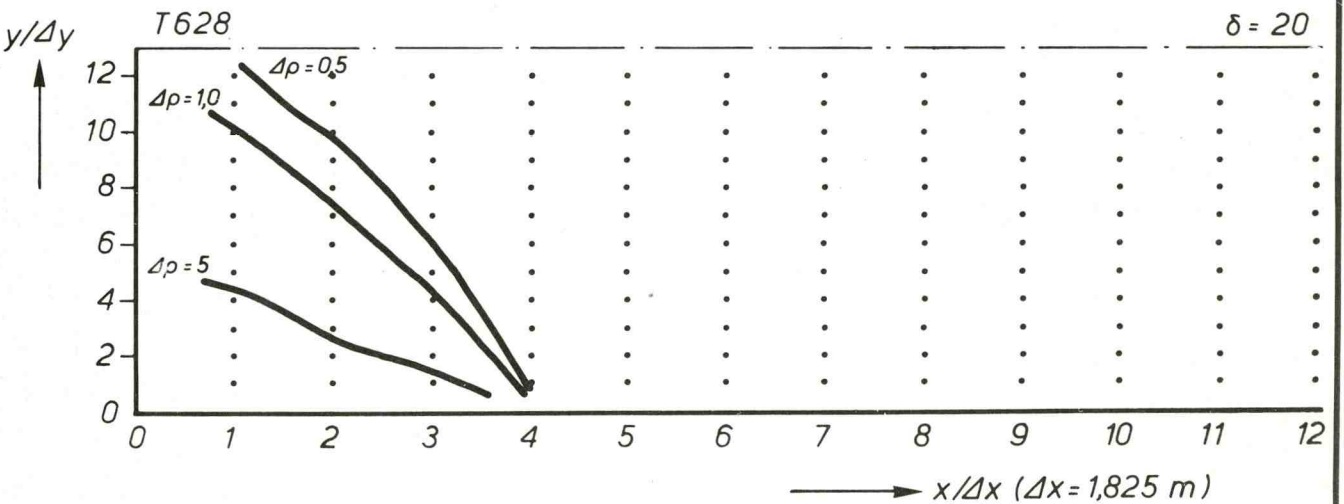
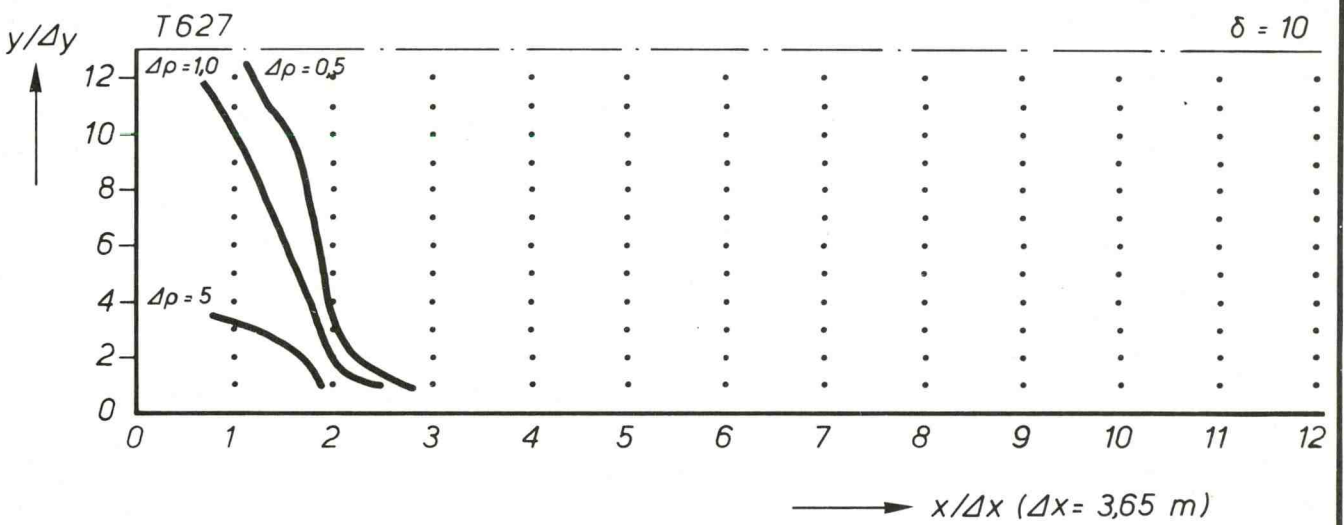
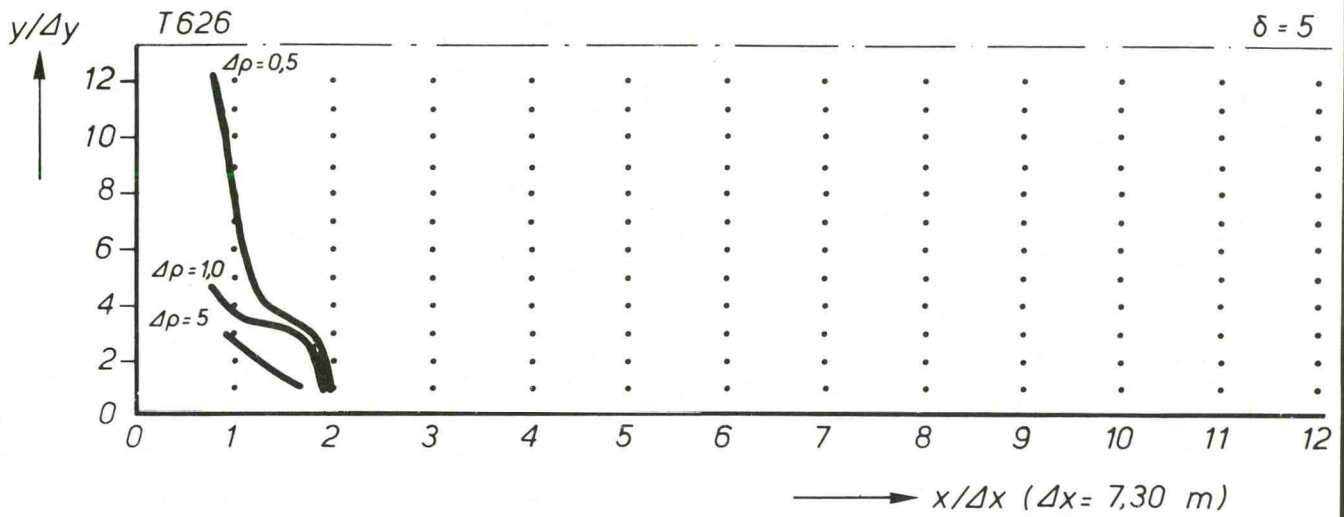
T626 T627 T628

AFVOER = $1900 \text{ m}^3/\text{s}$

— VERTREKKING : 5
 —□— " : 10
 —▲— " : 20

JB

A4

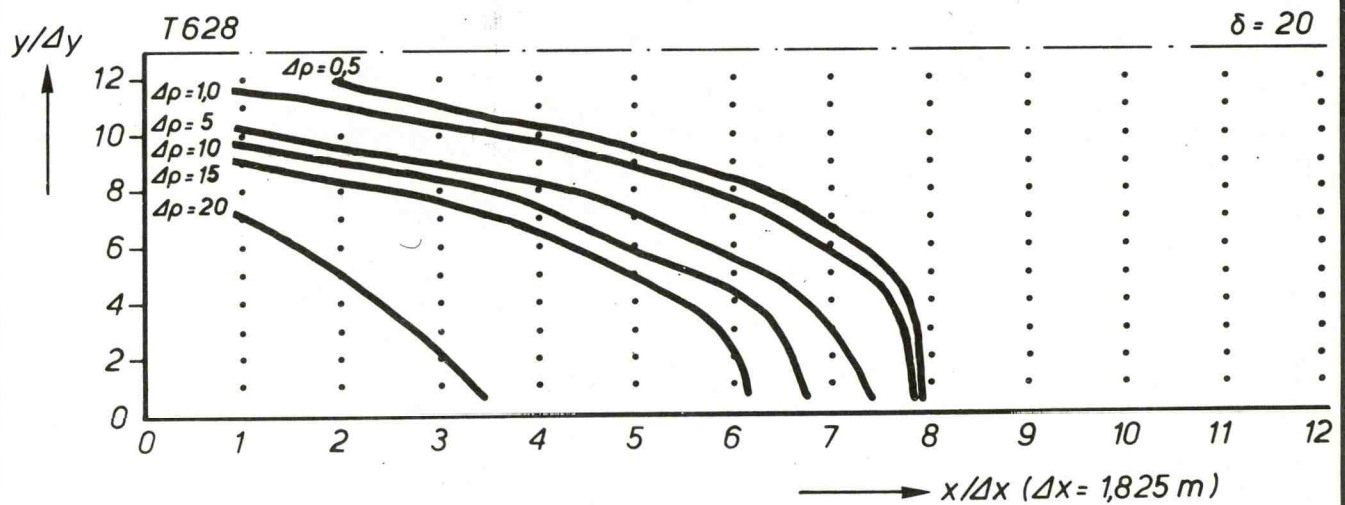
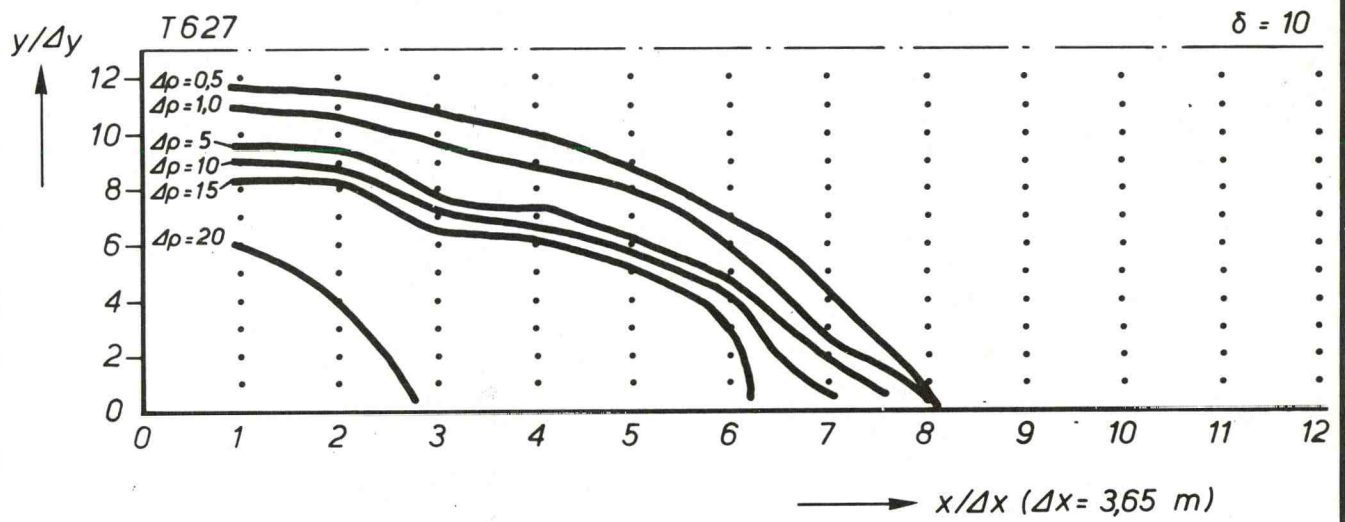
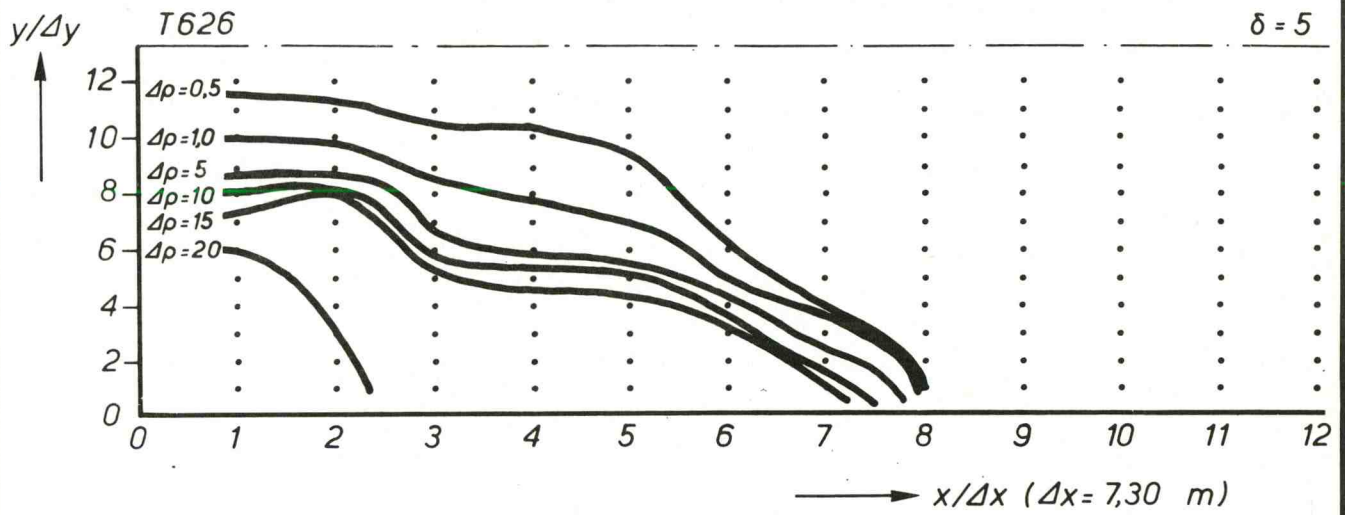


WAND- EN BODEMRUWHEID
 REF. OMSTANDIGHEDEN $+Q_{riv.} = 1900 \text{ m}^3/\text{s}$

TJDSTIP: $t/\Delta t = 1$	JB
• MEETPUNT	A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2427	FIG.47
-----------	--------



WAND- EN BODEMRUWHEID
 REF. OMSTANDIGHEDEN $+Q_{riv.} = 1900 \text{ m}^3/\text{s}$

TJdstip: $t/\Delta t = 13$

JB

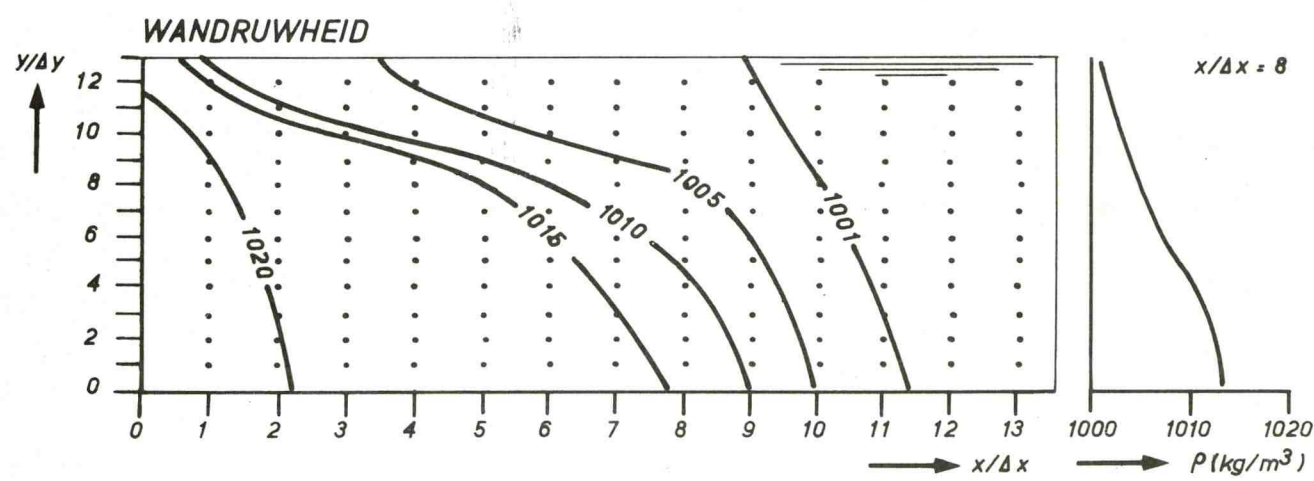
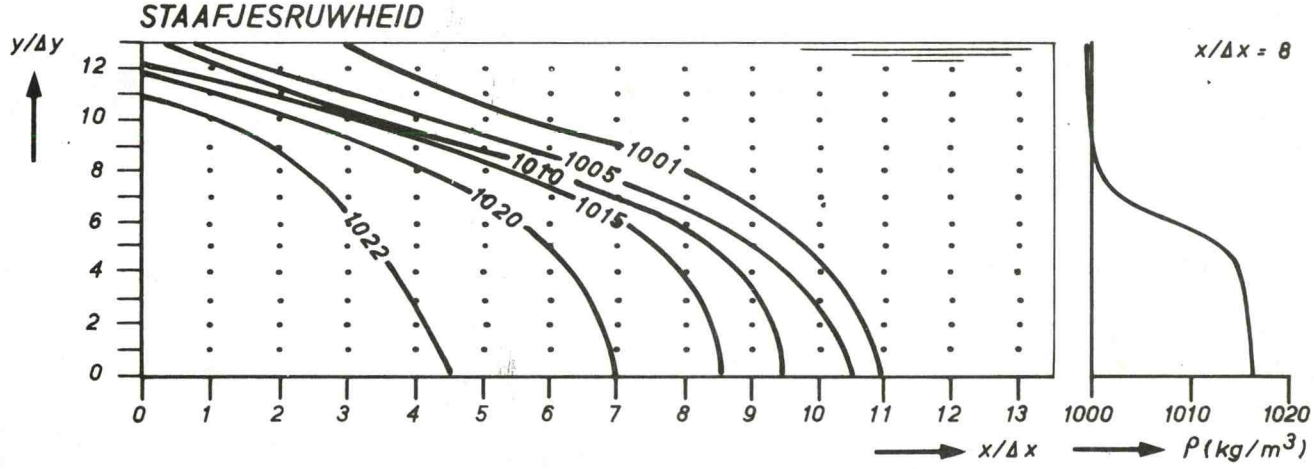
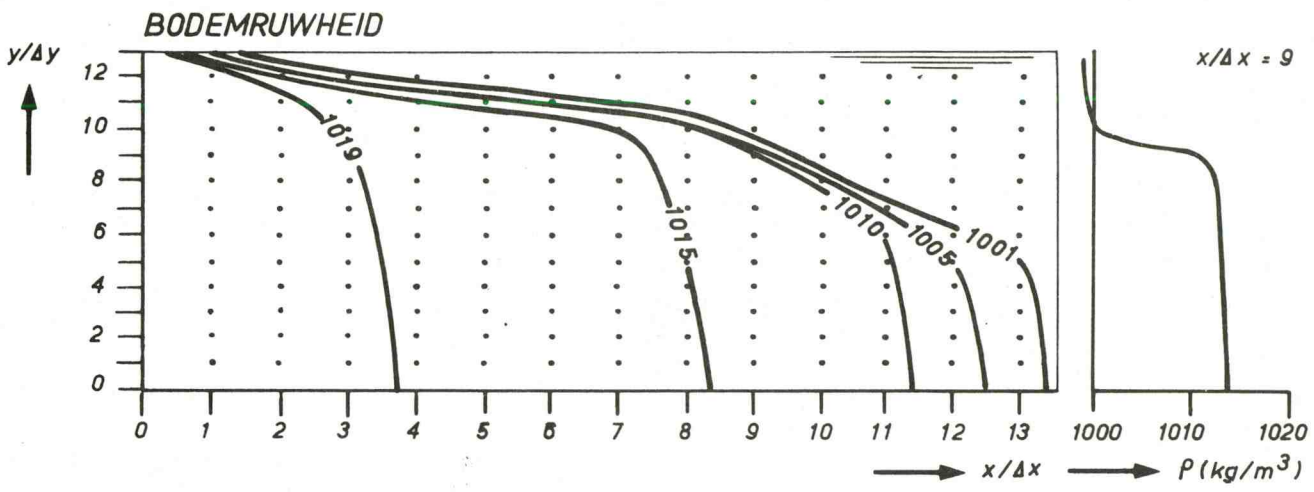
• MEETPUNT

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896-2428

FIG.48



PROEFOMSTANDIGHEDEN (PROTO) :
 GETIJVERSCHIL 1,60 m
 WATERDIEPTE 13,8 m
 RIVIERAFVOER 950 m³/s
 DICHTHEIDSVerschil = 22,5 kg/m³

VERGELIJKING DICHTHEIDSVERDELING BIJ BODEMRUWHEID, STAAFJESRUWHEID EN WANDRUWHEID

— 1005 —	JM
DICHTHEID ρ (kg/m ³)	
• ← MEETPUNTEN	A4

p.o. box 177

delft

the netherlands