

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

getijgootonderzoek

invloed luchtinblazen op getijbeweging
en dichtheidsverdeling

verslag modelonderzoek

M 896 - 34

april 1977

getijgootonderzoek

invloed luchtinblazen op getijbeweging
en dichtheidsverdeling

verslag modelonderzoek

M 896 - 34

april 1977

INHOUD

	blz.
<u>1</u> <u>Inleiding</u>	1
<u>2</u> <u>Beschrijving meetopstelling en proeven</u>	2
2.1 Getijgoot	2
2.2 Luchtinjektiesysteem	2
2.3 Proevenprogramma; meetprogramma	3
<u>3</u> <u>Invloed lucht op getijbeweging</u>	6
3.1 Invloed op de ruwheid; meetresultaten	6
3.1.1 Permanentieproeven	6
3.1.2 Proeven met getij	7
3.2 Invloed op de weerstand; theoretische beschouwing	13
3.3 Invloed op snelheidsverdeling	15
<u>4</u> <u>Invloed lucht op dichtheidsverdeling en zoutindringing</u>	17
4.1 Invloed op dichtheidsverdeling	17
4.2 Invloed op zoutindringing	17
<u>5</u> <u>Vertikale menging</u>	19
5.1 Achtergronden	19
5.2 Resultaten bij bodemruwheid	22
5.3 Resultaten bij staafjes	24
5.4 Resultaten bij wandruwheid	24
<u>6</u> <u>Samenvatting; konklusies</u>	26
<u>7</u> <u>Aanbevelingen voor verder onderzoek</u>	30

LITERATUUR

FIGUREN

FOTO

1 Inleiding

Dit onderzoek is uitgevoerd om te bepalen wat de invloed is van luchtinblazen op de getijbeweging en de dichtheidsverdeling in de getijgoot. Wat de getijbeweging betreft is met name gekeken naar de verandering van de effectieve ruwheid en de gevolgen hiervan voor de getijbeweging. Wat de dichtheidsverdeling betreft is gekeken naar de verandering van de zoutindringing en de vorm van de dichtheidsvertikalen. De laatste twee veranderingen zijn veroorzaakt door een versterking van de verticale menging. Geprobeerd is de verticale menging te kwantificeren.

Tevens zijn de resultaten opgenomen van een aantal permanentieproeven waarbij verschillende luchtdebieten zijn toegepast ($0-160 \text{ cm}^3/\text{sm}^2$). Ook hierbij is de invloed op de effectieve ruwheid bepaald.

De getijgoot kan gezien worden als een vertrokken model van een rechthoekige getijrivier. De karakteristieken van deze getijrivier zoals rivierlengte, getijverschil, waterdiepte enz. zijn ontleend aan de situatie bij de Rotterdamse Waterweg. Dit heeft geleid tot modelinstellingen die bij het getijgootonderzoek de referentie-omstandigheden genoemd worden (zie hiervoor tabel 2, blz. 5). Het luchtinblazen is uitgevoerd met dunne buisjes met kleine gaatjes op de bodem over de breedte van de getijgoot. De onderlinge afstand van de buisjes in de lengterichting van de goot bedroeg 0,40 m.

Bij het onderzoek zijn gevarieerd:

- het luchtdebiet per m^2 bodemoppervlakte ($0-80 \text{ cm}^3/\text{sm}^2$)
- het type ruwheidsmiddel (bodemuwheid, staafjes, wandruwheid)
- het dichtheidsverschil tussen zeewater en rivierafvoer (dichtheidsverschil ongeveer $21,5 \text{ kg}/\text{m}^3$ en geen dichtheidsverschil).

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

De proeven zijn uitgevoerd in een aantal periodes tussen mei 1974 en januari 1975.

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

2 Beschrijving meetopstelling en proeven

2.1 Getijgoot (zie figuren 1 en 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 zoutin-dringing 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 [1].

2.2 Luchtinjectionssysteem

De luchtvoorziening voor de getijgoot is verdeeld over 18 regelpunten; per 3 regelpunten kan het luchtdebiet gemeten worden (totaal 6 rotameters). Voor de luchtvoorziening wordt gebruik gemaakt van de compressoren van het Getijmodel Rijnmond. Door een reduceerventiel wordt de druk teruggebracht tot 1 ato.

De elementen voor het injecteren van lucht zijn ontwikkeld tijdens het onderzoek M 923. Het geheel bestaat uit een raampje met een inwendige diameter van 3 mm, waarin een buisje bevat is met een uitwendige diameter van 3 mm. Dit buisje is voorzien van 25 geboorde gaatjes met een diameter van 0,2 mm. Het geheel is afgebeeld in figuur 3. Zie ook foto 1.

Bij dit onderzoek zijn de elementen aangebracht op een onderlinge afstand van

0,40 m. De elementen zijn slechts aangebracht op het gedeelte van de getijgoot vanaf het zeereservoir tot aan de bocht: ± 60 m (zie figuur 1).

Bij het ontwerp van dit luchtinjectionssysteem is uitgegaan van een maximale zoutindringing van 60 m. Daarom is ook alleen voor deze 60 m het injectiesysteem aangebracht. De randinstellingen bij dit onderzoek waren zodanig dat de zoutindringing maximaal ± 55 m is geweest.

2.3 Proevenprogramma; meetprogramma

Bij dit onderzoek zijn gevarieerd:

- het luchtdebiet per m^2 bodemoppervlakte (0/20/40/80 cm^3/sm^2)
- het type ruwheidsmiddel:
 - bodemplaatjes $2 \times 2 cm^2$; aantal 267 per 2 m gootlengte
 - staafjes $0,5 \times 0,5 cm^2$; aantal 35 per 2 m gootlengte
 - wandruwheid; breedte strips: 3 cm; onderlinge afstand 40 cm; op beide wanden.

Er zijn proeven uitgevoerd met dichtheidsverschil van ongeveer $21,5 kg/m^3$ (zout/zoet) en proeven zonder dichtheidsverschil (homogeen zoet).

Bij de proeven is op twee manieren gemeten. Bij een aantal proeven is een zogenaamde standaard langsmeting uitgevoerd.

Bij deze meting worden in 16 vaste meetstations de waterstand, de dichtheidsvertikaal en de snelheidsvertikaal als functie van de tijd gedurende een volledige getijcyclus gemeten. De onderlinge afstand van de meetstations (Δx) bedraagt: $\Delta x = 3,65$ m. Voor de snelheid en de dichtheid worden 12 punten per vertikaal gemeten: $\Delta y = 1/13 \bar{h} = 0,0166$ m. De tijdstap is een half uur in prototypetijd.

Bij een aantal proeven is tevens een dwarsmeting uitgevoerd.

Bij deze meting is tijdens een proef op twee plaatsen een volledige dwarsdoorsnede doorgemeten. Daartoe zijn in elke dwarsdoorsnede 9 vertikalen volledig doorgemeten ($\Delta y = 1/13 \bar{h}$). De onderlinge afstand tussen de vertikalen bedroeg 7,5 cm. De afstand tot de wand van de getijgoot van de buitenste vertikalen bedroeg 3,6 cm. De plaats van de beide dwarsmetingen is gekozen ten opzichte van de maximale zoutindringing (Li_{max}). De dwarsmetingen zijn uitgevoerd op $x = 1/3 Li_{max}$ en $x = 2/3 Li_{max}$.

Bij een aantal proeven is slechts de getijbeweging vastgelegd door meting van de waterstand in alle meetstations.

Voorgaande is samengevat weergegeven in onderstaande tabel 1 en in tabel 2 op bladzijde 5.

Proefnummer	Type ruwheid	Luchtdebiet [cm ³ /sm ²]	Opmerkingen	Meting
T 3 G	Staafjes	0	homogeen zoet	●
T 3 E	Staafjes	0	zout/zoet	●
T 3 F	Staafjes	0	zout/zoet	○
T 126 B	Staafjes	80	zout/zoet	●
T 126 C/D	Staafjes	80	zout/zoet	○
T 161 C	Bodemplaatjes	0	zout/zoet	●
T 161 D/E	Bodemplaatjes	0	zout/zoet	○
T 161 H	Bodemplaatjes	0	homogeen zoet	▲
T 162 C	Bodemplaatjes	20	zout/zoet	●
T 162 B	Bodemplaatjes	40	zout/zoet	●
T 163 B	Bodemplaatjes	80	zout/zoet	●
T 163 C/D	Bodemplaatjes	80	zout/zoet	○
T 163 E	Bodemplaatjes	80	homogeen zoet	▲
T 606 B	Wandstrips	0	zout/zoet	●
T 606 K	Wandstrips	0	homogeen zoet	●
T 606 H/I	Wandstrips	0	zout/zoet	○
T 606 C	Wandstrips	20	zout/zoet	●
T 606 D	Wandstrips	40	zout/zoet	●
T 606 E	Wandstrips	80	zout/zoet	●
T 606 F/G	Wandstrips	80	zout/zoet	○
T 606 L	Wandstrips	80	homogeen zoet	●

● meting van 16 stations in de lengterichting (x, y)

○ meting van 2 dwarsdoorsnedes (y, z)

▲ meting van waterstand in alle meetstations

Tabel 1: Overzicht proeven

Randinstellingen (referentie-omstandigheden)			
	Symbol	Prototype	Model
Getijverschil	$2a_o$	1,60 m	0,0250 m
Waterdiepte	\bar{h}	13,80 m	0,2156 m
Breedte	b	430 m	0,672 m
Zoutconcentratie in zeereservoir	c	30 ‰	30 ‰
Dichtheidsverschil	$\Delta\rho$	21,0-21,5 kg/m ³	21,0-21,5 kg/m ³
Rivierlengte	L_{riv}	114.660 m	179,16 m
Rivierafvoer	Q_{riv}	950 m ³ /s	2,90 l/s
Chézy-waarde	C	60 m ^{1/2} /s	19,0 m ^{1/2} /s
Schalen: $n_x = \frac{x_{prototype}}{x_{model}}$			
hoogte	n_h	64	
lengte	n_L	640	
tijd	n_t	80	
debiet	n_Q	327.680	
zoutconcentratie	n_c	1	
Chézy-waarde	n_C	$\sqrt{10}$	

Tabel 2: Randinstellingen en schalen

3 Invloed lucht op getijbeweging

3.1 Invloed op de ruwheid; meetresultaten

3.1.1 Permanentieproeven

Voorafgaande aan dit onderzoek zijn een aantal permanentieproeven uitgevoerd in de getijgoot. De proeven zijn uitgevoerd met bodemruwheid ($2 \times 2 \text{ cm}^2$). De proefomstandigheden en de resultaten zijn weergegeven in onderstaande tabel 3. De ruwheid is bepaald met behulp van de formule van De Chézy ($\bar{u} = C\sqrt{RI}$). Het verhang (I) is gemeten.

$\bar{h} \approx 0,200 \text{ m}; Q = 10 \text{ of } 20 \text{ l/s } (\bar{u} \approx 0,075 \text{ of } 0,150 \text{ m/s})$				
luchtdebiet [$\text{cm}^3/\text{s}/\text{m}^2$]	10 l/s		20 l/s	
	C [$\text{m}^{1/2}/\text{s}$]	ΔC %	C [$\text{m}^{1/2}/\text{s}$]	ΔC %
0	19,0		18,8	
40	17,1	10	18,7	0,5
80	14,9	22		
160	13,7	28	16,3	13
$\bar{h} \approx 0,205 \text{ à } 0,215 \text{ m}; Q = 10 \text{ l/s } (\bar{u} \approx 0,071 \text{ m/s})$				
0	18,6			
160	12,9	31		

C : Chézy-waarde

ΔC : verandering van Chézy-waarde ten opzichte van luchtdebiet = $0 \text{ cm}^3/\text{sm}^2$.

Tabel 3

De resultaten zijn tevens weergegeven in figuur 4a.

Hoewel dit slechts een beperkt aantal proeven betreft, waarbij de meetnauwkeurigheid niet groot was, kunnen hieruit toch de volgende konklusies getrokken worden:

- bij luchtinblazen van de orde van grootte van $80 \rightarrow 160 \text{ cm}^3/\text{sm}^2$ is de invloed op de Chézy-waarde en dus op de ruwheid (g/C^2) aanzienlijk ($\Delta C \approx 30\%$; hieruit volgt een $\Delta g/C^2 \approx 100\%$)
- de invloed op de weerstand is afhankelijk van onder anderen de verhouding tussen het luchtdebiet en de gemiddelde snelheid bij konstante waterdiepte.

- In hoeverre er sprake zou zijn van afhankelijkheid van andere parameters zoals de waterdiepte, kan op grond van deze proeven niet bepaald worden.
- de resultaten bij $Q = 10$ l/s geven aan dat bij nog hogere luchtdebieten de verandering van de Chézy-waarde afneemt en mogelijk een bepaalde eindwaarde bereikt.
 - bij de proeven is gekonstateerd dat ten gevolge van luchtinblazen de snelheidsverdeling in een dwarsdoorsnede veranderde in driedimensionale zin. In het midden van de goot nam de snelheid over de gehele diepte af; aan de wanden nam de snelheid over de gehele diepte toe; daar tussenin neemt de snelheid aan het oppervlak af en aan de bodem toe. Met kleurstofinjectie kon worden aangetoond dat er een spiraalvormige stroming optrad: in het midden vertikaal omhoog, aan het oppervlak naar buiten gericht, aan de wanden naar beneden en aan de bodem naar binnen gericht. Mogelijke oorzaak is het feit dat binnen een strook van 5 cm langs de wand geen lucht wordt ingeblazen ten gevolge van de konstruktie van het luchtinjectiesysteem.

3.1.2 Proeven met getij

Om het effect van luchtinblazen op de effectieve ruwheid te bepalen bij de proeven met getij, zijn de volgende twee methodes gebruikt:

- door middel van harmonische analyse zijn de gemeten waterstanden vergeleken met de waterstanden van homogene getijberekeningen waarbij de ruwheid gevarieerd is.
- uit de metingen is met behulp van een ééndimensionaal model voor de waterbeweging de waarde van de effektieve schuifspanning bepaald.

Harmonische analyse; homogene getijberekeningen

Veranderingen van de effectieve ruwheid ten gevolge van luchtinblazen veroorzaken veranderingen van de getijbeweging. Veranderingen in de gemeten getijbewegingen kunnen dus als indirecte maatstaf gebruikt worden voor de veranderingen van de ruwheid. Bij deze methode is hiervan als volgt gebruik gemaakt.

De getijbeweging bestaat uit een verticale getijbeweging (waterstanden) en een horizontale getijbeweging (debieten). Bij de getijgootproeven is de waterstand als functie van de tijd opgelegd op de zeerand. De debieten zijn opgelegd ter plaatse van de rivierrand (getijtank + V-stuw). Veranderingen van de waterstanden kunnen met behulp van de waterstandvolgers (Wavo's) veel nauwkeuriger gemeten worden dan de veranderingen in de debieten. Voor de debieten

is slechts één snelheidsvertikaal gemeten in de as van de goot. De verschillende ruwheidstypes zorgen voor verschillende snelheidsprofielen dwars op de hoofdstroomrichting. Bovendien ontstaan ten gevolge van het luchtinblazen extra driedimensionale effecten, waardoor de nauwkeurigheid van de debietmeting niet goed genoeg is. De verandering van de waterstand ten gevolge van een bepaald luchtdebiet is des te groter, naarmate de afstand tot de zeerand groter wordt. Op grond van bovenstaande is de waterstand in station $x/\Delta x = 16$ gekozen voor de analyse. Station 16 is het meetstation juist voor de bocht.

Van alle proeven is de gemeten waterstand in station 16 vergeleken met de berekende waterstand in de overeenkomstige plaats van een homogene getijberekening met dezelfde stromingskondities. Er is sprake van een homogene getijberekening omdat bij deze berekening geen dichtheidseffecten meegenomen zijn. Dit is dezelfde berekening die gebruikt is om de debieten uit te rekenen voor de rivierrandregeling van de proeven. Voor meer bijzonderheden over de homogene getijberekeningen: zie verslag M 896-1B [2]. Bij deze vergelijking zijn de fase- en amplitudeverschillen bepaald. Voor de interpretatie is slechts gebruik gemaakt van het amplitudeverschil (ΔA_1) van de eerste harmonische en van het faseverschil van dezelfde component ($\Delta \phi_1$). Dit vormt de 1e fase van de analyse.

De 2e fase van de analyse bestaat uit een onderlinge vergelijking van verschillende homogene getijberekeningen. De eerste berekening die gebruikt is, is dezelfde berekening als bovengenoemde. Hierbij zijn alle parameters gelijk aan die bij de proeven (behalve dan het dichtheidsverschil). Dit betekent met name dat overal voor de ruwheid een Chézy-waarde van $60 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ (prototypemaat) aangehouden is. Bij de andere berekeningen is over het traject, waarop bij de proeven de lucht is ingeblazen (van de zeerand tot aan de bocht), bij elke berekening een andere Chézy-waarde genomen. Daarbij is de Chézy-waarde gevarieerd van 30 tot $80 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. Van deze berekeningen is wederom de waterstand van station 16 vergeleken met de waterstand van de eerste berekening. Hieruit zijn weer de amplitude- en faseverschillen bepaald van de eerste harmonische. Deze verschillen zijn weergegeven in figuur 5. In figuur 5 zijn ook de verschillen van de middenstand (ΔA_0) weergegeven. Deze verschillen zijn niet gebruikt bij de analyse omdat de instelnaauwkeurigheid van de middenstand kleiner is dan de instelnaauwkeurigheid van het vertikaal getij op de zeerand en het horizontaal getij op de rivierrand.

In de derde fase van deze analyse worden de verschillen tussen de proeven en de eerste homogene getijberekening (fase 1) vergeleken met de verschillen van fase 2. Van elke proef is de ΔA_1 en $\Delta \phi_1$ bekend. In figuur 5 kan dan opgezocht worden bij welke Chézy-waarde dezelfde ΔA_1 en/of $\Delta \phi_1$ optreedt.

De resultaten van deze vergelijking zijn weergegeven in figuur 6.

Hierbij vallen de volgende punten op:

- bij ruwheid door middel van staafjes vallen de punten van de verschillen van fase en amplitude ($\Delta \phi_1$ en ΔA_1) goed samen, zowel bij de zout/zoet proeven als bij de homogene proef.
- bij bodemruwheid is er geen sprake van overeenkomst tussen het gedrag van de fase en de amplitude bij toenemend luchtdebiet. Ook het verschil tussen enerzijds de homogene proeven en anderzijds de zout/zoet proeven is opvallend.
- bij wandruwheid is er weer een betere overeenkomst tussen de homogene en de zout/zoet proeven. Wel is er weer sprake van een verschil tussen het gedrag van de fase en het gedrag van de amplitude. Dit verschil wordt kleiner bij toenemend luchtdebiet.
- de resultaten van figuur 6 geven aan dat er verschillen bestaan tussen de getijbeweging bij de homogene getijberekening en de getijbeweging bij de proeven. Per ruwheidstype is dit verschil weer anders. Vooralsnog is niet duidelijk waar deze verschillen precies door veroorzaakt worden.
- met deze methode is er een verschil gevonden tussen de waterstanden van station 16 van enerzijds de homogene getijberekening en anderzijds de verschillende proeven zonder lucht. Dit verschil komt wat de homogene proeven betreft voort uit de onnauwkeurigheden die samenhangen met de rekenformules voor de verschillende ruwheidstypes. Bij de zout/zoet proeven kan dit verschil versterkt worden door bijvoorbeeld het afdekeffect bij bodemruwheid.

De resultaten van deze analyse zijn samengevat in onderstaande tabel 4. Daarbij is de Chézy-waarde voor een proef bepaald door te middelen over de resultaten van de fase en de amplitude. In deze tabel zijn ook de resultaten gegeven van de tweede methode die gebruikt is om de verandering van de ruwheid te bepalen (analyse 2; zie blz. 11). De resultaten van tabel 4 zijn ook weergegeven in figuur 7a en b. Hieruit kan het volgende gekonkludeerd worden:

- De verandering van de Chézy-waarde (C) ten gevolge van luchtinblazen bij staafjes en wandruwheid (met en zonder dichtheidseffekten) is ongeveer gelijk. Over het gebied van 0 tot $80 \text{ cm}^3/\text{sm}^2$ is de verandering van de Chézy-waarde lineair te benaderen.

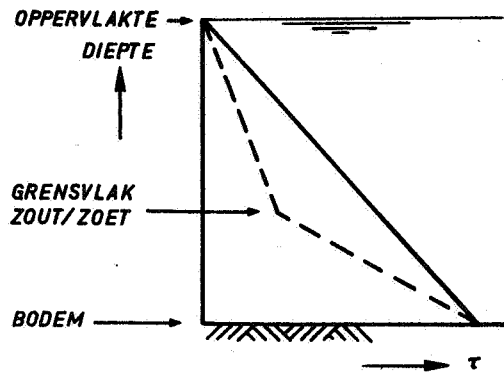
Ruwheid	Luchtdebiet	Chézy-waarde : C [m ^{1/2} /s]	ΔC [%]	Δg/C ² Analyse 1 [%]	Δg/C ² Analyse 2 [%]
Staafjes	0	62,5			
	80	52,5	16	42	42
Bodemplaatjes	0	73,8			
	20	69,8	5	12	25
	40	63,3	14	36	36
	80	55,3	25	78	64
Wandstrips	0	65,5			
	20	63,6	3	6	5
	40	61,5	6	13	20
	80	56,5	14	34	31
Wandstrips homogeen zoet	0	68,0			
	80	56,5	17	45	-
Bodemplaatjes homogeen zoet	0	64,7			
	80	59,1	16	43	-

ΔC : verschil in Chézy-waarde ten opzichte van geen lucht

Δg/C²: verschil in ruwheid ten opzichte van geen lucht

Tabel 4

- De verandering van de Chézy-waarde bij bodemplaatjes met zout/zoet is duidelijk anders dan bij de beide andere ruwheidstypes. Figuur 7a geeft aan dat er sprake is van een toename van de Chézy-waarde met 25% ten opzichte van de situatie zonder lucht. Deze interpretatie is echter misleidend. De werkelijke situatie is dat bij de proef zonder lucht en met dichtheidseffekten de effectieve ruwheid van de bodemplaatjes verminderd wordt door het zogenaamde afdekeffect. Ter plaatse van de bodemplaatjes bevindt zich de zoute onderlaag. De overgang van de zoute onderlaag (dichtheid: $\rho \approx 1020 \text{ kg/m}^3$) naar de zoete bovenlaag ($\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$) gaat gepaard met sterke dichtheidsgradiënten. Deze sterke gradiënten onderdrukken de turbulentie die opgewekt is ter plaatse van de bodem en dus de turbulente schuifspanning die uitgeoefend wordt op de zoete bovenlaag. Dit wordt kwalitatief geïllustreerd door onderstaand figuur. De getrokken lijn is het



schuifspanningsprofiel bij een homogeen zoete stroming. De gestippelde lijn is het schuifspanningsprofiel bij een twee-lagen-stroming met scherpe overgang zout/zoet. Verondersteld is dat de opgewekte schuifspanning ter plaatse van de bodem in beide situaties gelijk is. De totale effectieve schuifkracht in de zout/zoet situatie is dus kleiner dan in de homogene situatie.

Hierbij kan ook nog een ander effect een rol spelen. De schuifspanning die opgewekt wordt door de bodemplaatsjes is evenredig met de snelheid in het kwadraat. Wanneer in de zoute onderlaag de gemiddelde snelheid over de hoogte van de bodemplaatsjes kleiner is dan in de situatie zonder dichtheidseffekten, ontstaat er nog een extra vermindering van de effectieve schuifkracht.

Beide bovengenoemde effecten zijn er de oorzaak van dat bij de proef met bodemruwheid zonder lucht de ruwheid aanzienlijk lager is dan in de homogene situatie. Door de luchtinjetie worden bovengenoemde effecten teniet gedaan, waardoor bij een luchtdebiet van $80 \text{ cm}^3/\text{sm}^2$ de Chézy-waarde in de buurt komt te liggen van de overige proeven (figuur 7b). De spreiding ter plaatse van $80 \text{ cm}^3/\text{sm}^2$ is veroorzaakt door een verschil in de aangebrachte ruwheid (spreiding in de meetresultaten die ten grondslag liggen aan de rekenformules voor de verschillende ruwheidstypes).

Bovenstaande wordt bevestigd door de resultaten van de homogene proeven met bodemruwheid (zie in figuur 7a en b). Hierbij worden voor bodemruwheid dezelfde resultaten gevonden als bij staafjes en wandruwheid.

Eëndimensionaal model; effectieve schuifspanning

De tweede methode die gebruikt is om het effect van luchtinblazen op de ruwheid te bepalen, maakt gebruik van alle meetresultaten (waterstand, dichtheid en snelheid) en een eëndimensionaal model voor de waterbeweging. Dit model wordt weergegeven door de volgende vergelijking:

$$\bar{\rho} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} g h \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x} + \bar{\rho} g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\tau_b}{R} = 0 \quad (3-1)$$

waarbij:

- $\bar{\rho}$: dichtheid gemiddeld over de dwarsdoorsnede
 \bar{u} : snelheid in de x-richting gemiddeld over de dwarsdoorsnede
h : waterdiepte
x : koördinaat in de lengterichting
t : tijd
g : versnelling van de zwaartekracht ; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
 τ_b : bodemschuifspanning
R : hydraulische straal.

Uit de metingen zijn $\bar{\rho}$, \bar{u} , h, $\partial\bar{\rho}/\partial x$, $\partial\bar{u}/\partial x$, $\partial\bar{u}/\partial t$, $\partial h/\partial x$ en R bepaald. De enige onbekende in vergelijking (3-1) is dan τ_b , die met deze vergelijking dus berekend kan worden. Bij toepassing van dit model, vormt de berekening van de \bar{u} en de afgeleiden van \bar{u} een belangrijke foutenbron. Bij de proeven is een snelheidsvertikaal gemeten in de as van de goot. Door driedimensionale effecten ten gevolge van de wandruwheid en het luchtinblazen is deze vertikaal niet helemaal representatief voor de gehele dwarsdoorsnede. Toch is uit deze snelheidsvertikaal met behulp van het oppervlakte van de dwarsdoorsnede de \bar{u} berekend, zonder met deze driedimensionale effecten rekening te houden.

Met behulp van vergelijking (3-1) is τ_b voor elk tijdstip (totaal 25 per getijcyclus) en voor elke plaats (totaal 16 stations) berekend. Bij deze analyse is slechts gekozen voor twee tijdstippen: maximale ebstroom en maximale vloedstroom. Op deze tijdstippen zijn de traagheidstermen ($\bar{\rho}(\partial\bar{u}/\partial t + \bar{u} \partial\bar{u}/\partial x)$) relatief klein, terwijl de verhangterm $\bar{\rho} g \partial h/\partial x$ relatief groot is. In de traagheidstermen komt de fout in de bepaling van \bar{u} tot uitdrukking. De meting van de verhangterm en de term met de dichtheidsgradiënt is redelijk nauwkeurig omdat de waterstand en ook de dichtheid nauwkeurig gemeten worden. De $\bar{\rho}$ is net als bij de \bar{u} berekend uit de metingen van een dichtheidsvertikaal in de as van de goot. Bij de dichtheid was echter nauwelijks sprake van gradiënten in de dwarsrichting.

Van beide tijdstippen is het gemiddelde bepaald van τ_b over de 16 stations. Er was toch nog een aanzienlijke spreiding tussen de waarden voor τ_b op de verschillende stations en ook tussen de gemiddelden over de stations voor beide tijdstippen. Daarom kan het eindresultaat van deze analyse slechts gezien worden als een globale schatting van het effect van luchtinblazen op de ruwheid. Het eindresultaat is weergegeven in tabel 4 op bladzijde 10. Wat orde van grootte betreft zijn deze waarden gelijk aan die van analyse 1.

Tenslotte zijn de resultaten van de proeven met getijbeweging en/of dichtheidseffekten vergeleken met de resultaten van de permanentieproeven (figuur 4a). Bij de permanentieproeven is geconstateerd dat het effect van luchtinblazen afhankelijk is van het debiet bij gelijke waterdiepte (afhankelijk dus van de gemiddelde snelheid). Bij de proeven met getijbeweging was de gemiddelde waterdiepte ($\bar{h} = 0,216$ m) ongeveer gelijk aan die bij de permanentieproeven ($\bar{h} \approx 0,200$ à $0,215$ m). Bij de proeven met getij was het debiet gemiddeld over een getijperiode en over het traject van het luchtinblazen ongeveer gelijk aan 13 liter per seconde. De vergelijking van de resultaten is gegeven in figuur 4b. Hierbij valt op dat de proeven met wandstrips en staafjes goed overeenstemmen met de tendenzen van de permanentieproeven. Het verschillend gedrag van de proeven met bodemruwheid en dichtheidsverschillen hangt weer samen met het eerder vermelde afdekeffect. De proef met bodemruwheid zonder dichtheidsverschillen geeft weer hetzelfde resultaat als staafjes en wandruwheid.

3.2 Invloed op de weerstand; theoretische beschouwing

In onderstaande is gekeken in hoeverre de verandering van de ruwheid verklaard kan worden met de impulsoverdracht naar de luchtbellens en de toegevoegde massa van deze bellen.

Doordat de luchtbellens bij het inblazen alleen een verticale impuls (massa x snelheid) hebben en het omringende water een horizontale impuls heeft, oefenen beide krachten op elkaar uit die voor het water beschouwd kunnen worden als een extra weerstandskracht. Deze kracht is evenredig met de massa van het lucht vermeerderd met de toegevoegde massa van de luchtbelletjes. De toegevoegde massa van een bol bedraagt:

$$\frac{1}{2} \times \text{inhoud bol} \times \text{soortelijke massa} \quad (3-2)$$

De totale massa + toegevoegde massa per m^2 bodemoppervlak bedraagt dan:

$$\text{Massa} = (\rho_{\text{lucht}} \times l + \rho_{\text{water}} \times \frac{1}{2}) \times Q_{\text{lucht}} \quad (3-3)$$

Dan wordt de kracht per eenheid (m^2) van bodemoppervlak

$$\tau' = (\rho_{\text{lucht}} \times l + \rho_{\text{water}} \times \frac{1}{2}) \times Q_{\text{lucht}} \times \bar{u} \quad (3-4)$$

Hierbij is het luchtdebiet (Q_{lucht}) uitgedrukt in een debiet per bodemoppervlakte-eenheid: m^3/sm^2 . Er is hierbij aangenomen dat de waterdiepte en de verticale impuls van de luchtbellens zodanig is dat de luchtbellens een horizontale snelheid \bar{u} hebben wanneer de bellens door het oppervlak de vloeistof verlaten. Wanneer dit in het model niet het geval zou zijn (geringe waterdiepte en grote verticale snelheid van de bellens) moet er gerekend worden met een gereduceerde snelheid: $\alpha\bar{u}$ waarbij $0 \leq \alpha \leq 1$. De massa van de luchtbelletjes kan verwaarloosd worden ten opzichte van de toegevoegde massa daar $\rho_{\text{lucht}} \ll \rho_{\text{water}}$ (\sim faktor 1000).

De extra schuifspanning bedraagt dan:

$$\tau' = \frac{1}{2} \rho_{\text{water}} \cdot Q_{\text{lucht}} \cdot \alpha\bar{u}$$

Bij de proeven was: $\rho_{\text{water}} \approx 1010 \text{ kg/m}^3$
 $Q_{\text{lucht}} (\text{max.}) = 80 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sm}^2$
 $\bar{u} \approx 0,15 \text{ m/s}$ (bij maximale eb- en vloedstroming).

De extra schuifspanning wordt dan:

$$\tau' = \frac{1}{2} \cdot 1010 \cdot 80 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha \cdot 0,15 = \alpha \cdot 0,00606 \text{ Newton/m}^2$$

Bij de proeven was ingesteld: Chézy (model) = $19,0 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. Dit geeft een effectieve schuifspanning

$$\tau_b = g/C^2 \rho \bar{u}/\bar{u} = 0,0272 \times 1010 \times 0,15^2 = 0,6181 \text{ N/m}^2$$

De totale weerstand bedraagt dan:

$$\tau_b = \tau' = (0,6181 + \alpha \times 0,0061) \text{ N/m}^2$$

Volgens bovenstaande geeft het luchtinblazen dus een toename van de weerstand met maximaal ($\alpha = 1$) ongeveer 1% van de ingestelde waarde.

Bovenstaande mechanisme verklaart dus niet de toename van de weerstand bij luchtinblazen. De extra weerstand (+ 45%) moet dan ook verklaard worden met het feit dat door het luchtinblazen (met sterke verticale snelheden van de belletjes) extra werveling is opgewekt die gezorgd heeft voor een grotere

inwendige schuifspanning ten gevolge van de turbulenties (Reynoldse spanningen).

3.3 Invloed op snelheidsverdeling

In paragraaf 3.1.1 is al aangegeven dat bij de permanentieproeven geconstateerd is dat er een spiraalvormige stroming ontstond.

Bij enkele proeven met getij- en dichtheidseffekten is het snelheidsveld in de hoofdstroomrichting vastgelegd in twee doorsnedes. Deze doorsnedes zijn gekozen ten opzichte van de maximale zoutindringing (Li_{max}); doorsnede 1 ter plaatse van $x = 1/3 * Li_{max}$ en doorsnede 2 ter plaatse van $x = 2/3 * Li_{max}$. Om beide plaatsen volledig door te meten was het noodzakelijk de meting in twee dagen uit te voeren. Daarbij zijn steeds de vertikalen bij de wand op beide meetdagen gemeten. Alleen bij de situatie met ruwheid door middel van staafjes en zonder lucht is slechts op één meetdag de helft van beide dwarsdoorsnedes doorgemeten. De overige meetpunten zijn bepaald door aan te nemen dat de stromingssituatie en de dichtheidsverdeling symmetrisch is ten opzichte van een vertikaal vlak door de as van de getijgoot. De afwijking die daarbij gevonden is voor de buitenste vertikalen die wel beide gemeten zijn, heeft ertoe geleid dat bij de overige proeven de totale dwarsdoorsnede is doorgemeten in twee meetdagen.

In dit verslag is een gedeelte van deze metingen gepresenteerd op twee manieren:

- snelheidsprofielen in de dwarsrichting (z-richting) van de over de vertikaal gemiddelde snelheid (\bar{u}^y). Hierbij zijn bovendien alle snelheden dimensieloos gemaakt door te delen door de over de gehele dwarsdoorsnede gemiddelde snelheid (\bar{u}^z). De relatieve snelheden die hierdoor ontstaan, zijn beter onderling vergelijkbaar. De resultaten van de tijdstippen rond de maximale vloedstroming (MVS; $t/\Delta t = 6$) en de maximale ebstroming (MES; $t/\Delta t = 18$) voor beide dwarsdoorsnedes zijn weergegeven in de figuren 8, 9 en 10. Hierbij vallen de volgende punten op:
 - de snelheidsverdeling bij staafjesruwheid met en zonder lucht is tamelijk onregelmatig. Dit hangt samen met de positie van de meetvertikaal ten opzichte van de positie van de staafjes. In figuur 11 is een beeld gegeven van deze snelheidsverdeling bij homogene permanente stroming.
 - de snelheidsverdeling bij de verschillende ruwheidsmiddelen zonder lucht

is onderling duidelijk verschillend. Hierbij valt bij bodemruwheid op dat de invloed van de wanden op de snelheidsverdeling nog tamelijk sterk is.

- ten gevolge van het luchtinblazen verandert de snelheidsverdeling aanzienlijk. Hierbij is geen sprake van een duidelijke regelmatigheid. Op een aantal plaatsen is het snelheidsbeeld herkenbaar dat samenhangt met een dubbele spiraalstroming symmetrisch om de as van de goot. Hierbij treedt een afname van de snelheid in de as op, terwijl bij de wanden een hogere snelheid ontstaat. Dit snelheidsbeeld is beschreven bij de permanentieproeven. Het verschil tussen de permanentieproeven en de proeven met getij is dat ten gevolge van de dichtheidsgradiënten bij de proeven met getij de spiraalstroming over de gehele vertikaal onderdrukt wordt. Eventueel kan er per laag (zoute onderlaag en zoete bovenlaag) een of meerdere spiraalvormige stromingen ontstaan afhankelijk van de verhouding tussen de hoogte van de laag en de breedte van de getijgoot.
 - lijnen van gelijke snelheid in de hoofdstroomrichting per dwarsdoorsnede. Ook hierbij zijn de snelheden dimensieloos gemaakt met de over de dwarsdoorsnede gemiddelde snelheid \bar{u}^2 .
- De resultaten voor de doorsnedes op $x = 1/3 Li_{\max}$ (station 1) en $x = 2/3 Li_{\max}$ (station 2) en voor de tijdstippen MVS en MES zijn weergegeven in de figuren 12 tot en met 17.

4 Invloed lucht op dichtheidsverdeling en zoutindringing

4.1 Invloed op dichtheidsverdeling

Door het inblazen van lucht wordt de verticale menging versterkt. Samen met het effect van het type ruwheid op de verticale menging ontstaat er voor elke situatie een verschillende dichtheidsvertikaal. Ook de dichtheidsverdeling in de lengterichting is voor elke situatie verschillend door het verschil in verticale menging en door het verschil in de snelheidsverdeling ten gevolge van het type ruwheidsmiddel en ook weer ten gevolge van het luchtinblazen.

Bovenstaande is in beeld gebracht door twee types figuren: figuren met lijnen van gelijk dichtheidsverschil en figuren met dichtheidsvertikalen. De figuren 18 tot en met 23 geven de lijnen van gelijk dichtheidsverschil voor de verschillende ruwheidstypes met en zonder lucht op de tijdstippen van maximale en minimale zoutindringing. De lijnen geven het dichtheidsverschil ten opzichte van het zoete water van de rivierafvoer. Deze figuren zijn gebaseerd op metingen in de as van de goot. Bij de dwarsmetingen is echter gekonstateerd dat er geen of nauwelijks sprake is van verandering van de dichtheid in de dwarsrichting. Daarom zijn deze figuren representatief voor de gehele breedte.

Uit deze figuren kan gekonkludeerd worden dat de dichtheidsverdeling sterk verschilt per ruwheidstype (zonder lucht). Door luchtinblazen worden de verschillen verkleind en bij $80 \text{ cm}^3/\text{sm}^2$ praktisch opgeheven.

Het boven weergegeven beeld van de dichtheidsverdeling wordt bevestigd en aangevuld door de figuren 24, 25, 26 en 27 waarin van een aantal meetstations ($x/\Delta x = 2, 4, 6$ en 8) op 4 tijdstippen de dichtheidsvertikalen zijn gegeven met en zonder luchtinblazen. De tijdstippen zijn maximale vloedstroming (MVS; $t/\Delta t = 6$), maximale zoutindringing ($t/\Delta t = 12$), maximale ebstroming (MES; $t/\Delta t = 18$) en minimale zoutindringing ($t/\Delta t = 24$).

4.2 Invloed op zoutindringing

Bij de proeven is bepaald tot welk punt het zout maximaal in de getijgoot is opgedrongen ($x = Li_{\text{max}}$) tijdens de vloed en ook weer is teruggedrongen tijdens de eb ($x = Li_{\text{min}}$). De bepaling hiervan gebeurde visueel. De nauwkeurigheid hiervan is bij gelaagde omstandigheden redelijk (standaardafwijking

ongeveer 0,20 m); bij meer gemengde situaties wordt de onnauwkeurigheid groter (standaardafwijking ongeveer 0,50 m).

De resultaten zijn weergegeven in figuur 28a. Hieruit kan het volgende gekonkludeerd worden:

- de grootte van de zoutindringing als functie van het luchtdebiet bij staafjes en wandruwheid is ongeveer gelijk.
- de zoutindringing bij bodemruwheid zonder lucht is aanzienlijk groter dan bij staafjes en wandruwheid. Dit is een gevolg van het feit dat bij bodemruwheid een sterk gelaagde dichtheidssituatie ontstaat waarbij de optredende gravitatie-circulatie zorgt voor een grotere zoutindringing. Een gedeelte van deze grotere zoutindringing hangt samen met het eerder in dit verslag gekonstateerde afdekeffect. Door dit afdekken van de bodemruwheid ontstaat een kleinere effectieve ruwheid. Hierdoor verandert de getijbeweging zodanig dat een grotere zoutindringing het gevolg is.
- voor alle proeven met luchtinblazen geldt dat de verandering van de zoutindringing niet alleen samenhangt met de versterking van de verticale menging. Door het luchtinblazen verandert de effectieve ruwheid en daarmee de getijbeweging. Figuur 28b laat zien hoe bij staafjes als ruwheidsmiddel de zoutindringing verandert bij verschillende Chézy-waarden (\square). Bij deze situatie is echter over de gehele rivierlengte de Chézy-waarde veranderd, waardoor ook de rivierrandinstelling (debieten) aangepast is. Bij de proeven met luchtinblazen ($\blacksquare, \bullet, \blacktriangle$, figuur 28b) is echter de Chézy-waarde slechts veranderd over het gebied waarop het lucht gebruikt is (± 60 m, terwijl de rivierlengte in model ± 180 m is). Bovendien is de instelling op de rivierrand niet aangepast omdat de verandering van de Chézy-waarde onbekend en niet direkt gewenst was. Daarom is het nu nog niet mogelijk te kwantificeren welk gedeelte van de afname van de zoutindringing samenhangt met de verandering van de effectieve ruwheid en welk gedeelte met de toename van de verticale menging. Het valt in figuur 28b op dat wanneer de punten van de verschillende situaties met luchtinblazen benaderd worden door een rechte, de helling van deze lijn ongeveer gelijk is voor alle drie ruwheidstypes (staafjes , bodemruwheid en wandruwheid). Deze helling is duidelijk anders dan bij de situatie met staafjes waarbij de verandering van de Chézy-waarde verkregen is door aanpassing van het aantal staafjes (\square). Onbekend is of bij wand- en bodemruwheid dezelfde helling gevonden zal worden als bij staafjes (\square), wanneer ook hierbij de Chézy-waarde veranderd zou zijn door aanpassing van het aantal ruwheidselementen.

5 Vertikale menging

5.1 Achtergronden

Een van de doelstellingen van dit onderzoek was om te kijken of het mogelijk was de verticale menging te kwantificeren bij verschillende ruweidsmiddelen en bij het inblazen van lucht.

Kwantificeren van de verticale menging betekent het bepalen van het vertikaal transport van zout ten gevolge van de turbulentie. Dit transport is een van de termen van de volgende vergelijkingen. Voor een driedimensionale stromings-situatie met dichtheidsverschillen gelden de volgende vergelijkingen:

Behoud van volumens:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5-1)$$

Balans voor de dichtheid:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'\rho'}) + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{v'\rho'}) + \frac{\partial}{\partial z} (\overline{w'\rho'}) = 0 \quad (5-2)$$

waarbij: x, y, z : coördinaten in lengte-, verticale- en dwarsrichting

u, v, w : snelheden in x, y en z -richting, waarbij de turbulentie uitgemiddeld is

u', v', w' : turbulente snelheidscomponenten

ρ : dichtheid waarbij de turbulentie uitgemiddeld is

ρ' : turbulente component van de dichtheid

$\overline{u'\rho'}, \overline{v'\rho'}, \overline{w'\rho'}$: transport van zout in x, y en z -richting ten gevolge van turbulentie.

Bij de beschrijving van de driedimensionale stromingssituatie behoren ook nog de drie bewegingsvergelijkingen in de x, y en z -richting. Deze vergelijkingen zijn hier weggelaten omdat ze voor de verdere analyse niet nodig zijn. De afleiding van deze vergelijkingen is gegeven in verslag M 896-3: "Theoretische grondslagen getijgootonderzoek", Waterloopkundig Laboratorium, Delft, september 1971 [3].

Bij een aantal proeven in het kader van dit onderzoek is er bij benadering sprake van een tweedimensionale stromingssituatie. Bij andere proeven zoals

met wandruwheid en ook met luchtinblazen treden er driedimensionale effecten op in het snelheidsveld. Toch zijn de vergelijkingen (5-1) en (5-2) ook voor deze situaties benaderd door de volgende tweedimensionale vergelijkingen:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5-3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{v'\rho'}) = 0 \quad (5-4)$$

$$\overline{v'\rho'} = \epsilon_M \frac{\partial \rho}{\partial y} \quad (\text{diffusie-benadering}) \quad (5-5)$$

Wanneer bovenstaande driedimensionale analyse toegepast wordt op een moot in de as van de goot met een lengte van $2\Delta x$, een breedte van enkele centimeters en een hoogte gelijk aan de waterdiepte, dan geldt voor de vergelijkingen (5-1) en (5-2) dat:

- $\frac{\partial w}{\partial z} = 0$ uit symmetrie-overwegingen.
- $\frac{\partial \rho}{\partial z}$ en $\frac{\partial}{\partial z} (\overline{w'\rho'}) \approx 0$ uit symmetrie-overwegingen, maar ook omdat er nauwelijks gradiënten van de dichtheid in de dwarsrichting zijn opgetreden ($\overline{w'\rho'} = \epsilon_z \frac{\partial \rho}{\partial z}$).
- $\frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'\rho'}) \ll \frac{\partial}{\partial y} (\overline{v'\rho'})$ omdat de optredende dichtheidsgradiënten in de x-richting veel kleiner zijn dan in de y-richting (+ faktor 100). Beide transporten worden evenredig gesteld met deze gradiënten (zie vergelijking (5-5)).

Met deze benaderingen gaan de vergelijkingen (5-1) en (5-2) dus over in de vergelijkingen (5-3) en (5-4).

Bij de langsmetingen zijn u en ρ gemeten als functie van x , y en t in diskrete stappen. Hiermee kunnen de verschillende termen van de vergelijkingen (5-3) en (5-4) berekend worden door de differentiaalvergelijkingen te benaderen door differentievergelijkingen. Onbekenden zijn v en $\overline{v'\rho'}$ die dan ook met beide vergelijkingen berekend kunnen worden. Deze aanpak is ook toegepast in de verslagen M 896-11: tweedimensionaal onderzoek [4] en M 896-28: tweedimensionaal onderzoek; turbulente diffusiekoëfficiënten [5].

Of het mogelijk is op bovengenoemde wijze het vertikaal turbulent transport te berekenen is zeer twijfelachtig. Bij de onderzoeken die beschreven zijn in

de verslagen M 896-11 en 28 [4, 5] is reeds aangegeven en gebleken dat de methode behept is met grote onnauwkeurigheden. Deze onnauwkeurigheden komen voort uit:

- meetfouten; bij de metingen worden systematische en toevallige fouten gemaakt. Deze fouten werken versterkt door in het berekenen van de differentietermen van de vergelijkingen, omdat bij een verschil (differentie) van twee getallen van ongeveer dezelfde grootte, die behept zijn met toevallige fouten, de fout in het verschil relatief groot is.
- vergelijkingen; de onbekende grootte $\overline{v'\rho'}$ is bepaald uit het verschil van een aantal termen in vergelijking (5-4). Wat hierboven is opgemerkt voor de fout in elke term, geldt ook voor het verschil tussen een aantal termen waarvan ook weer enkelen van dezelfde orde van grootte zijn.
- 3-dimensionale effecten; hoewel hierboven is aangegeven dat de benadering met de 2-dimensionale vergelijkingen in deze situatie acceptabel kan zijn, leveren ook deze benaderingen een bijdrage in de onnauwkeurigheid van de einduitkomst.

De totale onnauwkeurigheid van het eindresultaat ($\overline{v'\rho'}$ als functie van de waterdiepte) is moeilijk te bepalen. Dat toch deze weg bewandeld is, komt omdat vooralsnog geen andere methode beschikbaar is. Direkte meting van de term $\overline{v'\rho'}$ is met de op dit moment bekende meetmethoden niet mogelijk. Een controle op de waarde van het eindresultaat van een dergelijke analyse is mogelijk zo gauw er tweedimensionale rekenprogramma's beschikbaar zijn die een dergelijke stroming met dichtheidseffekten kunnen berekenen. Een gevoeligheidsanalyse op de parameters die de verticale menging beschrijven kan dan meer inzicht verschaffen in de absolute grootte van deze parameters en hun afhankelijkheid van andere parameters, die de stromings- en dichtheidssituatie karakteriseren (bijvoorbeeld het lokale Richardson-getal:

$$Ri = - g \frac{\partial \rho}{\partial y} / \rho \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (5-6)$$

Bij de analyse is wederom gebruik gemaakt van de zogenaamde nullijnkorrektie. Meer achtergrond hierover is gegeven in het verslag M 896-28, paragraaf 5 [5]. Bij de analyse is $\overline{v'\rho'}$ bepaald als functie van y door middel van een integratie over de vertikaal. De waarde van $\overline{v'\rho'}$ moet positief zijn omdat er sprake is van een stabiele gelaagdheid (afnemende dichtheid van de bodem tot aan het oppervlak). Bovendien geldt de voorwaarde dat aan het oppervlak de waarde voor $\overline{\rho'v'}$ gelijk nul moet zijn. De nullijn van $\overline{\rho'v'}$ als functie van de

waterdiepte is zodanig gedraaid dat aan beide voorwaarden voldaan is.

5.2 Resultaten bij bodemruwheid

Van de proef met bodemruwheid zonder lucht (T 161 C) zijn de berekende waarden voor ϵ_M (zie vergelijking (5-5)) op dezelfde manier uitgezet als bij het onderzoek van M 896-11 en M896-28 [4, 5]. Dit betekent dat ϵ_M dimensieloos gemaakt is door te delen door ϵ_N . Deze ϵ_N is de waarde voor de verticale uitwisselingscoëfficiënt onder neutrale condities, dat wil zeggen geen dichtheids-effecten. Voor de benadering van ϵ_N is gekozen voor de formule van Reichardt (zie [6])

$$\epsilon_N = \kappa u^* y (1 - 11/6 y/h + 4/3 y^2/h^2 - 1/3 y^3/h^3) \quad (5-7)$$

De grafiek van deze formule is gegeven in figuur 29. De dimensieloze grootte ϵ_M/ϵ_N is uitgezet tegen het getal van Richardson (zie vergelijking (5-6)). Het resultaat van drie tijdstippen rond de maximale ebstroming is gegeven in Fig. 30a. Figuur 30b geeft de resultaten van drie tijdstippen rond de maximale vloedstroming. De geweldige spreiding rond de tendens van M 896-11/28 bevestigt de opmerkingen over de betrouwbaarheid van de methode. Hierbij kan slechts opgemerkt worden dat de ervaring bij het onderzoek van M 896-11 heeft geleerd dat het niet mogelijk was op het tijdstip van maximale vloedstroming (figuur 30b) zinnige resultaten te krijgen met deze analyse. Veel onnauwkeurigheid hangt samen met de bepaling van het lokale Richardson-getal. Vooral de noemer van dit getal waarin de verticale snelheidsgradiënten in het kwadraat voorkomt, geeft aanleiding tot grote onnauwkeurigheid.

Bij de proef met bodemruwheid en lucht ($80 \text{ cm}^3/\text{sm}^2$; T 163 B) is ϵ_M niet uitgezet tegen het lokale Richardson-getal maar tegen $\partial\rho/\partial y$. Bovendien is ϵ_M niet genormeerd met ϵ_N volgens de formule van Reichardt maar volgens het logaritmische profiel. Hieraan liggen de volgende argumenten ten grondslag:

- Het lokale Richardson-getal (Ri) is een maat voor de verhouding tussen enerzijds de lokale produktie van turbulente energie, die evenredig is met de lokale snelheidsgradiënt en anderzijds tussen de onderdrukkende werking die door de lokale dichtheidsgradiënt uitgeoefend wordt op de turbulentie. Door het luchtinblazen ontstaat er een totaal andere verdeling van turbulente energie over de vertikaal.
- Er is aangenomen dat de verdeling van turbulente energie ten gevolge van het

luchtinblazen over de vertikaal homogeen is behalve bij de bodem en bij het oppervlakte. Bovendien is aangenomen dat de turbulente energie ten gevolge van het luchtinblazen groot is ten opzichte van turbulente energie van de bodemruwheid.

- Er is aangenomen dat het effect van de bodem en van het vrije oppervlak op de lokale turbulentie gelijk is. Dit effect is een onderdrukking van de lokale turbulentie. Deze onderdrukking is tot uitdrukking gebracht door ϵ_M te normeren met ϵ_N volgens het logaritmische profiel:

$$\epsilon_N = \kappa u^* h \cdot y/h(1 - y/h) \quad (5-8)$$

Dit logaritmische profiel is weergegeven in figuur 29 samen met de formule van Reichardt. Over een groot gebied is er kwalitatief maar ook wel kwantitatief niet zo veel verschil tussen beide profielen. Wel echter dicht bij het oppervlak.

- Het lokale Richardson-getal (Ri) zou vervangen kunnen worden door een ander type Richardson-getal (stel Ri^*). Bij Ri^* komt in de teller weer de lokale dichtheidsgradiënt voor ($\partial\rho/\partial y$) terwijl de noemer zou kunnen bestaan uit twee termen. De eerste term is een maat voor de produktie van turbulentie over de vertikaal ten gevolge van het snelheidsveld en het ruwheidstype. De tweede term is een maat voor de extra turbulentie ten gevolge van het luchtinblazen. Bij dit onderzoek is nog niet gezocht naar de juiste samenstelling van deze termen. In principe geldt voor Ri^* :

$$Ri^* = \frac{-\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y}}{f_1(\bar{u}, h, \text{ruwheidstype}, \dots) + f_2(Q_a, \rho, \rho_2, h, g, \bar{u}, \dots)}$$

- waarbij: \bar{u} : karakteristieke gemiddelde snelheid
h : waterdiepte
Q : luchtdebiet
 ρ_2 : dichtheid lucht
 ρ : dichtheid water
g : versnelling zwaartekracht
y : coördinaat in verticale richting.

Per proef zijn echter f_1 en f_2 konstant, waardoor slechts sprake zou kunnen zijn van een afhankelijkheid van $\partial\rho/\partial y$. Een onderlinge vergelijking van de resultaten is slechts mogelijk, als meer bekend is over f_1 en f_2 .

In figuur 31 zijn de resultaten weergegeven van de proef met bodemruwheid en lucht ($80 \text{ cm}^3/\text{sm}^2$; T 163 B). In figuur 31a zijn de resultaten gegeven op drie tijdstippen rond maximale ebstroming. In figuur 31b zijn tevens de resultaten van drie tijdstippen rond maximale vloedstroming gegeven. De resultaten bevestigen een afhankelijkheid van $\partial\rho/\partial y$. In figuur 32 zijn de resultaten gegeven wanneer in de situatie zonder luchtinblazen ook ϵ_M/ϵ_N uitgezet wordt tegen $-\partial\rho/\partial y$ en tevens ϵ_N genomen wordt volgens het logaritmische profiel. De ligging van de punten is hierbij zodanig dat er geen sprake is van een duidelijke tendens. Vergelijking van de figuren 30 en 32 leidt tot de konklusie dat er een duidelijk verschil is tussen beide maar dat geen van de twee een redelijk resultaat oplevert zoals dat bijvoorbeeld het geval is bij figuur 31.

5.3 Resultaten bij staafjes

Bij de proeven met staafjes met en zonder lucht zijn de verticale diffusiecoëfficiënten niet bepaald omdat ten gevolge van meetfouten grote diskontinuiteiten zijn opgetreden in de snelheidsvertikaal. De meetfouten zijn veroorzaakt door een foutieve opstelling van één van de snelheidsmeters ten opzichte van de staafjes. Berekening van diffusiecoëfficiënten was daarom niet meer zinvol.

5.4 Resultaten bij wandruwheid

Ten aanzien van wandruwheid en wandruwheid met luchtinblazen gelden dezelfde overwegingen die gegeven zijn bij bodemruwheid met lucht. Deze overwegingen leiden tot het uitzetten van de verticale diffusiecoëfficiënt ϵ_M tegen $\partial\rho/\partial y$, genormeerd door ϵ_N volgens het logaritmisch profiel. Bij wandruwheid zonder lucht wordt door het type ruwheid dat loopt van bodem tot oppervlak een homogene verdeling van turbulente energie geïntroduceerd. Bij de bodem en bij het oppervlak wordt deze turbulentie onderdrukt. Bovendien wordt de turbulentie plaatselijk onderdrukt door dichtheidsgradiënten. Voor deze situatie zou dus een afhankelijkheid voor ϵ_M gelden van Ri^* waarbij $f_2 = 0$. Bij wandruwheid met lucht geldt hetzelfde. Bovendien zou f_2 dan het effect van lucht op de turbulentie moeten uitdrukken.

Ook voor deze beide situaties (wandruwheid met/zonder lucht) geldt dat ϵ_M alleen uitgezet is tegen $\partial\rho/\partial y$. De resultaten van de proef zonder lucht (T 606 B) zijn weergegeven in figuur 33. In figuur 33a de resultaten op drie tijdstippen rond maximale ebstroming. Ook deze resultaten bevestigen een afhankelijkheid

van $\partial\rho/\partial y$. De punten die voortgekomen zijn uit metingen bij het oppervlak veroorzaken extra spreiding. In figuur 33a zijn deze punten voorzien van het nummer 12 ($y/\Delta y = 12$). In figuur 33b zijn de resultaten weergegeven van enkele tijdstippen rond maximale vloedstroming. Deze resultaten bevestigen het resultaat van figuur 33a niet.

In figuur 34 zijn op dezelfde manier de resultaten gegeven van de proef met wandruwheid en lucht ($80 \text{ cm}^3/\text{sm}^2$). Ook hierbij weer een redelijk resultaat rond maximale ebstroming terwijl bij maximale vloedstroming een grote spreiding gevonden is. Een verklaring voor de slechte resultaten bij maximale vloedstroming is niet te geven. Eerder in dit verslag is reeds vermeld dat de ervaring bij het onderzoek van M 896-11 heeft geleerd dat op tijdstippen rond maximale ebstroming de resultaten steeds redelijk waren, terwijl rond maximale vloedstroming dit niet het geval was.

6 Samenvatting; konklusies

In dit verslag zijn de resultaten gegeven van het onderzoek naar de invloed van luchtinblazen op de getijbeweging (ruwheid en snelheidsverdeling) en de dichtheidsverdeling (dichtheidsvertikaal, zoutindringing, verticale menging). Deze resultaten en eventuele konklusies zijn hierna kort samengevat. Enkele aanbevelingen voor verder onderzoek zijn gegeven in hoofdstuk 7.

Verandering ruwheid bij permanentieproeven (zie figuur 4a)

- bij luchtinblazen tot $160 \text{ cm}^3/\text{sm}^2$ is de invloed op de Chézy-waarde aanzienlijk: $\Delta C \approx 30\%$ bij $\bar{u} \approx 0,075 \text{ m/s}$ en $h \approx 0,20 \text{ m}$. De ruwheid is evenredig met C^{-2} . De overeenkomstige verandering van de ruwheid is dan ook: $\Delta g/C^2 \approx 100\%$
- de invloed op de ruwheid is afhankelijk van onder anderen de verhouding tussen het luchtdebiet en de gemiddelde snelheid bij konstante waterdiepte. In hoeverre er sprake is van afhankelijkheid van andere parameters zoals de waterdiepte kan op grond van deze proeven niet bepaald worden
- de resultaten bij $Q = 10 \text{ l/s}$ geven aan dat bij nog hogere luchtdebieten de verandering van de Chézy-waarde afneemt en mogelijk een bepaalde eindwaarde bereikt.

Verandering ruwheid bij getij-omstandigheden (figuur 7a en b)

- De verandering van de Chézy-waarde (C) ten gevolge van luchtinblazen bij staafjes en wandruwheid (met en zonder dichtheidseffekten) is ongeveer gelijk. Over het gebied van 0 tot $80 \text{ cm}^3/\text{sm}^2$ is de verandering van de Chézy-waarde lineair te benaderen: $\Delta C \approx 15\%$ bij $80 \text{ cm}^3/\text{sm}^2$
- De verandering van de C bij bodemplaatjes met zout/zoet is duidelijk anders dan bij beide andere ruwheidstypes ($\Delta C \approx 25\%$ bij $80 \text{ cm}^3/\text{sm}^2$). Dit hangt samen met het afdekeffect wat zich voordoet bij deze situatie (zie blz. 15). Bij de proeven met bodemplaatjes zonder dichtheidseffekten was de verandering van C gelijk aan die bij staafjes en wandruwheid
- De resultaten van de proeven met getij zijn vergeleken met de permanentieproeven in figuur 4b. Voor de proeven met getij is de gemiddelde snelheid bepaald. Samen met de gemiddelde diepte en de breedte levert dit een gemiddeld debiet op van 13 l/s (modelmaat). De proeven met wandstrips en staafjes stemmen goed overeen met de tendenzen van de permanentieproeven en bevestigen het feit dat het effect van luchtinblazen op de Chézy-waarde afhankelijk is van de gemiddelde snelheid (de gemiddelde waterdiepte bij de proeven met getij is ongeveer gelijk aan die bij de permanentieproeven).

Dit geldt ook voor de proeven met bodemruwheid zonder dichtheidseffekten. Het verschillend gedrag van de proeven met bodemruwheid en zout/zoet hangt weer samen met het eerder vermelde afdekeffect

- De toename van de effectieve ruwheid kan niet verklaard worden uit het feit dat de luchtbellen en hun toegevoegde watermassa een horizontale impuls krijgen en daardoor een weerstandskracht uitoefenen op het water (zie paragraaf 3.2). Deze beschouwing verklaart een toename van de weerstand van 1%, terwijl de optredende weerstandsverandering ($\Delta g/c^2$) ongeveer 45% bedraagt. Deze extra weerstand moet dan ook verklaard worden met het feit dat door het luchtinblazen extra werveling is opgewekt die gezorgd heeft voor een grotere inwendige schuifspanning ten gevolge van de turbulenties (Reynoldse spanningen).

Invloed luchtinblazen op snelheidsverdeling

- Bij de permanentieproeven is geconstateerd dat ten gevolge van het luchtinblazen secundaire stromingen ontstonden. Deze stromingen hadden het karakter van een dubbele spiraalvormige stroming symmetrisch ten opzichte van de as van de goot. Hierbij trad in het midden een omhoog gerichte stroming op en aan de wanden naar beneden; bij het oppervlak naar buiten en aan de bodem naar binnen gericht. Een mogelijke oorzaak was het feit dat binnen een strook van 5 cm langs de wand geen lucht is ingeblazen ten gevolge van de constructie van het luchtinjectionssysteem.
- De snelheidsverdeling bij de verschillende ruwheidsmiddelen zonder luchtinblazen is onderling duidelijk verschillend (zie de figuren 8, 9 en 10). Hierbij valt bij bodemruwheid op dat de invloed van de wanden op de snelheidsverdeling nog tamelijk sterk was.
- Ten gevolge van het luchtinblazen veranderde de snelheidsverdeling aanzienlijk. Hierbij is geen sprake van een duidelijke regelmatigheid. Op een aantal plaatsen was het snelheidsbeeld herkenbaar dat samenhangt met een dubbele spiraalstroming symmetrisch om de as van de goot. Hierbij trad een afname van de snelheid (gemiddeld over de vertikaal) in de as op, terwijl bij de wanden een hogere snelheid ontstond.

Verandering van de dichtheidsverdeling

- Ten gevolge van het luchtinblazen is een aanzienlijke verandering van de dichtheidsverdeling in de verticale en in de horizontale (lengte) richting ontstaan. Dit is in beeld gebracht door de figuren 18 tot en met 23 in de

vorm van lijnen van gelijke dichtheid voor de verschillende situaties en door de figuren 24 tot en met 27 in de vorm van dichtheidsvertikalen.

Bij de proeven zijn geen dichtheidsgradiënten opgetreden in de dwarsrichting ten gevolge van de luchtinjectie.

- De verandering van de dichtheidsverdeling is ook duidelijk tot uitdrukking gekomen in de verandering van de maximale en minimale zoutindringing. Dit is weergegeven in figuur 28a. Daarbij valt op dat:
 - de grootte van de zoutindringing als functie van het luchtdebiet bij staafjes en wandruwheid ongeveer gelijk was .
 - de zoutindringing bij bodemruwheid zonder lucht aanzienlijk groter was dan bij staafjes en wandruwheid. Dit was een gevolg van het feit dat bij bodemruwheid een sterk gelaagde dichtheidssituatie aanwezig was waarbij de optredende gravitatie-circulatie zorgde voor een aanzienlijk grotere zoutindringing (zie ook bladzijde 18).
 - de afname van de zoutindringing bij bodemruwheid als functie van een toenemend luchtdebiet groter was dan bij staafjes en wandruwheid. Dit hangt samen met het opheffen van de sterke gelaagdheid en dus het sterke effect van de gravitatie-circulatie. Het resultaat hiervan was dat bij $80 \text{ cm}^3/\text{sm}^2$ lucht de zoutindringing bij alle ruwheidsmiddelen ongeveer gelijk was.
- Voor alle proeven geldt dat de verandering van de zoutindringing niet alleen samenhangt met de versterking van de verticale menging. Door het luchtinblazen verandert de effectieve ruwheid en daarmee de getijbeweging. In figuur 28b is in beeld gebracht hoe bij staafjesruwheid de zoutindringing verandert bij variatie van de Chézy-waarde (modelmaat). In dit figuur zijn tevens de resultaten weergegeven van alle proeven met lucht. Daarbij valt op dat de proeven met luchtinblazen van alle ruwheidstypes benaderd kunnen worden door een rechte waarvan de helling duidelijk anders is dan de helling van de lijn voor de proeven met staafjes, waarbij de ruwheid verandert is door aanpassing van het aantal staafjes. Het is echter nu nog niet mogelijk te kwantificeren welk gedeelte van de afname van de zoutindringing samenhangt met de verandering van de effectieve ruwheid en welk gedeelte met de verticale menging. Dit komt omdat bij de proeven met luchtinblazen de ruwheid (Chézy-waarde) slechts veranderd is over het gebied waarop het lucht gebruikt is ($\pm 60 \text{ m}$, terwijl de totale rivierlengte in modelmaat $\pm 180 \text{ m}$ is). Bovendien is de instelling op de rivierrand niet aangepast omdat de Chézy-waarde onbekend en niet direkt gewenst was. Bij de proeven met staafjes (\square) is de ruwheid aangepast over de totale lengte van de rivier, waardoor ook een aangepaste rivierrandinstelling is gebruikt.

Kwantificeren verticale menging

- De methode die gebruikt is om het verticale transport ten gevolge van de turbulentie te kwantificeren, was behept met fouten die samenhangen met de metingen en met de benadering van afgeleiden door differenties. Bij de proeven zijn bovendien 3-dimensionale effecten opgetreden. De resultaten, zo die al gevonden zijn, moeten beschouwd worden als mogelijke tendenzen.
- Bij bodemruwheid zonder lucht zijn de resultaten op dezelfde wijze uitgezet als bij de onderzoeken van de verslagen M 896-11 en 28 [4, 5]. Dit betekent dat de verticale diffusiecoëfficiënt (ϵ_M) dimensieloos is gemaakt met de coëfficiënt voor neutrale (zonder dichtheidseffekten) condities (ϵ_N) volgens de formule van Reichardt (vergelijking (5-7); bladzijde 22). ϵ_M/ϵ_N is uitgezet tegen het lokale Richardson-getal: Ri (zie (5-6)). Figuur 30 geeft aan dat er sprake was van een grote spreiding van de resultaten ten opzichte van de tendens die gevonden is bij M 896-11/28.
- Bij de proeven met luchtinblazen en ook bij de proeven met ruwheid door middel van staafjes en wandruwheid zonder lucht is ϵ_M uitgezet tegen alleen de dichtheidsgradiënt. Bovendien is ϵ_M dimensieloos gemaakt door ϵ_N te nemen volgens het logaritmische profiel (vergelijking (5-8); bladzijde 23). De overwegingen hierbij zijn gegeven op de bladzijden 22 en 23).
- De proef met bodemruwheid zonder lucht is ook op dezelfde wijze uitgezet als de proef met bodemruwheid met lucht (ϵ_M volgens log-profiel en $\partial\rho/\partial y$). Het resultaat hiervan is weergegeven in figuur 32. Vergelijking van de figuren 30 en 32 leidt tot de konklusie dat er een duidelijk verschil is tussen beide, maar dat geen van twee een redelijk resultaat oplevert zoals dat bijvoorbeeld het geval is bij figuur 31.
- Bij bodemplaatsjes met lucht is er duidelijk sprake van een afhankelijkheid van de dichtheidsgradiënt (zie figuur 32).
- Bij wandruwheid met en zonder lucht was deze afhankelijkheid ook aanwezig op de tijdstippen rond de maximale ebstroming (zie figuren 33a en 35a). Rond maximale vloedstroming vertoonden de resultaten veel meer spreiding (figuur 34b) of een lagere tendens (figuur 33b).
- De proeven met staafjes zijn niet verder uitgewerkt vanwege diskontinuiteiten in de gemeten snelheidsvertikalen ten gevolge van een verkeerde opstelling van de snelheidsmolens bij de metingen.

7 Aanbevelingen voor verder onderzoek

Op grond van de proeven van dit onderzoek was het niet mogelijk voor alle geconstateerde verschijnselen een juiste en afdoende verklaring te vinden. Het is mogelijk met specifiek gericht onderzoek meer kwalitatief en wellicht kwantitatief begrip te krijgen van een aantal van deze verschijnselen.

Verandering ruwheid bij luchtinblazen

Het effect op de ruwheid van luchtinblazen is duidelijk gebleken zowel bij permanentie als bij getij-omstandigheden.

Ook is er sprake van afhankelijkheid van de snelheid bij konstante waterdiepte. Onderzocht kan worden hoe de verandering van de weerstand afhankelijk is van hydraulische grootheden zoals waterdiepte, snelheid, dichtheid en eventueel van de konstruktie van het luchtinjetsysteem (vele kleine gaatjes, weinig grotere gaten, onderlingen afstand etc.). Daarbij kan dan gekeken worden of er ook een samenhang is met de grootheden die het stromingsveld beschrijven dat ontstaat ten gevolge van een luchtbellenscherm in stilstaand water (maximale snelheid bij het oppervlak, totale kinetische energie die opgewekt wordt etc.).

Afdekeffect

In dit verslag is gesproken over het zogenaamde afdekeffect, dat wil zeggen een vermindering van de effectieve bodemruwheid door een zoute onderlaag (zouttong). Hierbij treedt een getijbeweging in het homogeen zoete gebied op die afwijkt van de getijbeweging van de homogene getijberekening en ook van de getijbeweging in het model zonder dichtheidsverschillen. Ook is er een verschil geconstateerd tussen de homogene berekening en de homogene proef. Daarbij is ook geconstateerd dat de afwijking verschillend is voor de fase en de amplitude in station 16 (zie figuur 6). Omdat bij de getijgoot de debieten ter plaatse van de rivierstrand berekend worden met behulp van een homogene getijbeweging, is het belangrijk te weten hoe groot de verschillen zijn tussen deze berekening en wat er in het model gebeurt bij toepassing van bodemruwheid in allerlei vormen. Over dit verschijnsel kan meer aan de weet gekomen worden door hierop gericht onderzoek, waarbij enerzijds de homogene getijberekening vergeleken wordt met proeven zonder dichtheidsverschillen (homogeen zoet) bij verschillende ruwheidstypes en anderzijds de homogene proeven vergeleken worden met proeven met zout/zoet bij overigens gelijke instellingen.

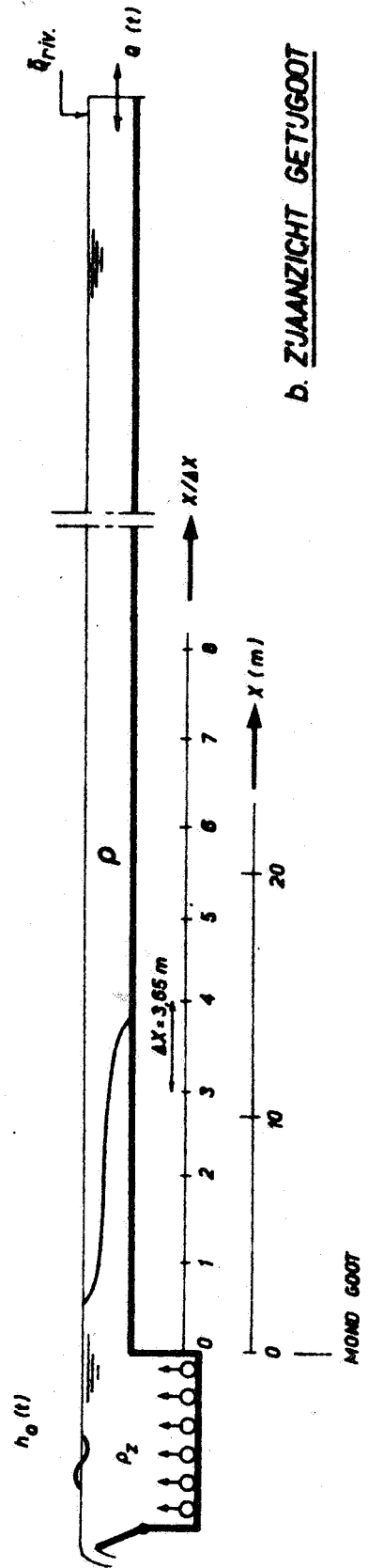
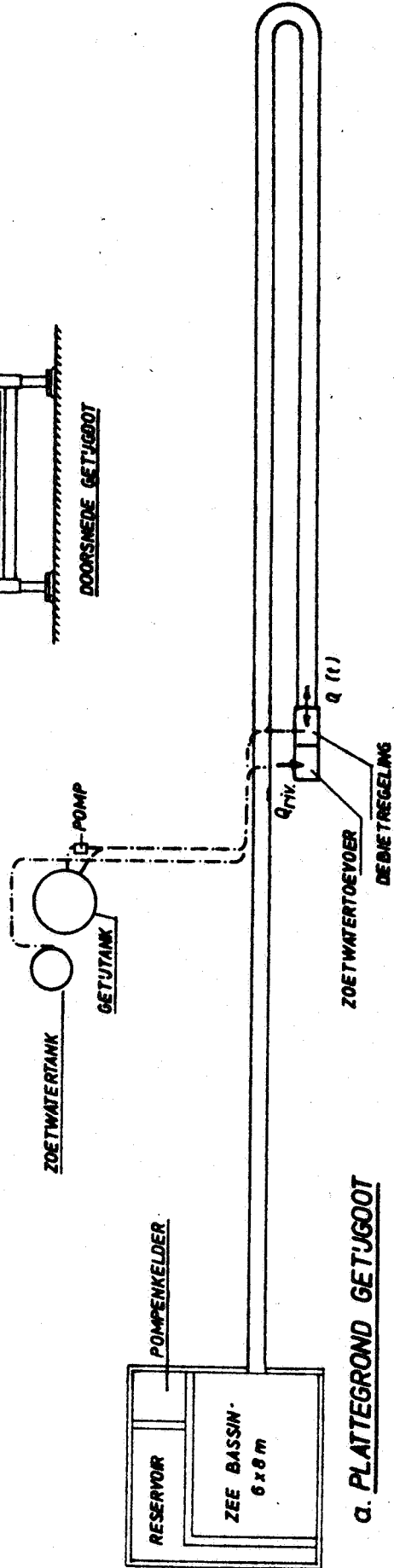
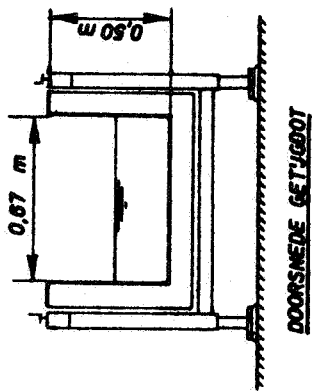
Vertikale menging

De verticale menging is berekend uit de metingen met behulp van de continuïteitsvergelijkingen voor water en zout. Een eventuele voortzetting van deze wijze van berekenen van het vertikaal transport is pas zinvol nadat met behulp van een tweedimensionaal rekenprogramma voor de waterbeweging en de dichtheidsverdeling onderzocht is wat de waarde is van de gevonden tendenzen. Een dergelijk rekenprogramma is in ontwikkeling bij het Waterloopkundig Laboratorium in het kader van het Toegepast Onderzoek Waterstaat (TOW projekt: R 897). De beste voortzetting zou een direkte meting zijn van het verticale transport ten gevolge van de turbulentie ($\overline{v'\rho'}$). De meetapparatuur hiervoor is echter nog niet bekend en dus voorlopig niet beschikbaar.

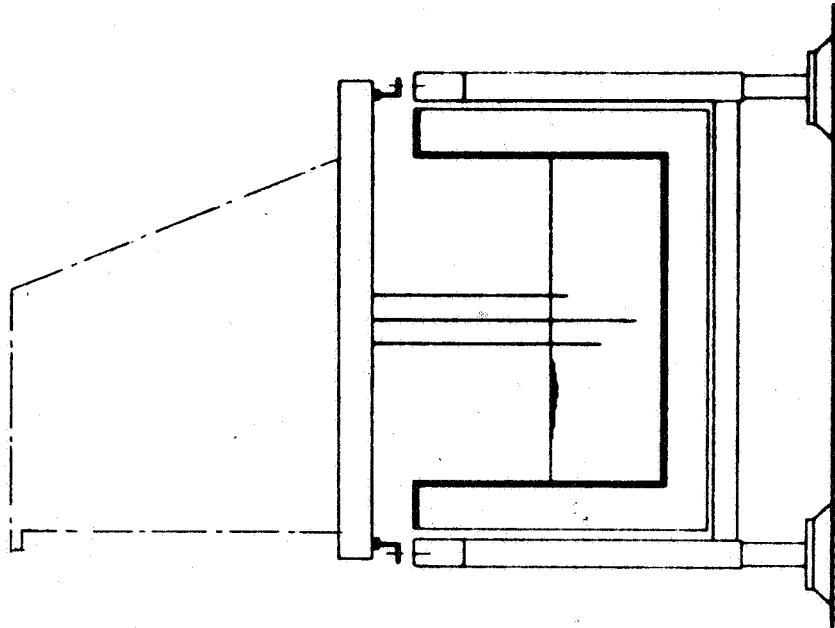
LITERATUUR

- 1 Waterloopkundig Laboratorium, "Reproduktie zouttoestand getijrivieren; bouw getijgoot en opzet getijgootbedrijf"
M 896-2, december 1974
- 2 Waterloopkundig Laboratorium, "Reproduktie zouttoestand getijrivieren; vooronderzoek getijberekeningen"
M 896-1B, december 1973
- 3 Waterloopkundig Laboratorium, "Reproduktie zouttoestand getijrivieren; theoretische grondslagen getijgootonderzoek"
M 896-3, Delft, september 1971
- 4 Waterloopkundig Laboratorium, "Reproduktie zouttoestand getijrivieren; twee-dimensionaal onderzoek"
M 896-11, Delft, april 1974
- 5 Waterloopkundig Laboratorium, "Tweedimensionaal onderzoek; turbulente diffusiecoëfficiënten"
M 896-28, Delft, april 1976
- 6 Waterloopkundig Laboratorium, "Momentum and mass transfer in stratified flows; report on literature study"
R 880, December 1974

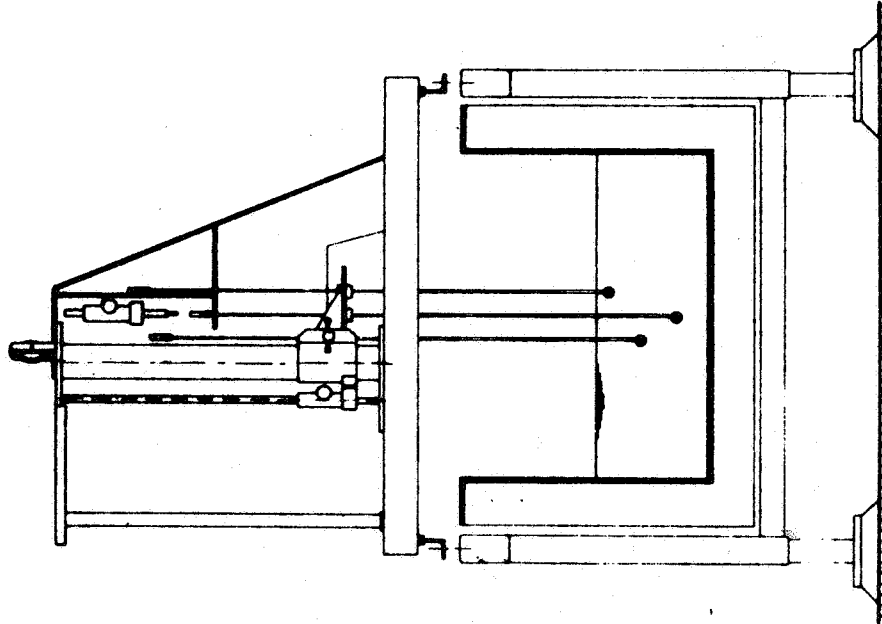
RANDINSTELLING	
ZEE	: $h_0(t), \rho_z$
RIVIER	: $Q(t), \bar{Q}_{riv}$



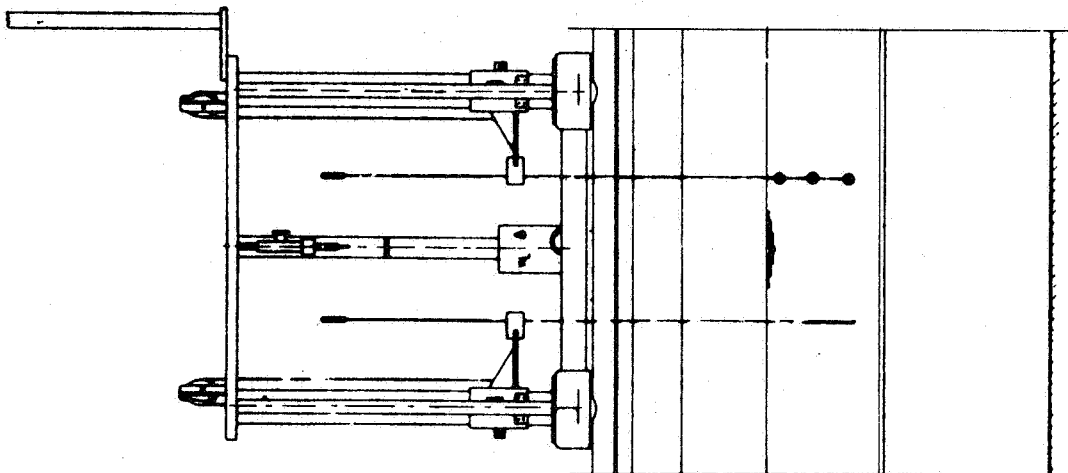
OVERZICHT VAN DE GETIJGOOT



DOORSNEDEN GOOT I.P.V. ZOUTOPNEMERS



DOORSNEDEN GOOT I.P.V. SNELHEIDSMOLENS



AANZICHT MEETWAGEN MET MEETAPPARATUUR

OPSTELLING MET MEETWAGENS

j.w.

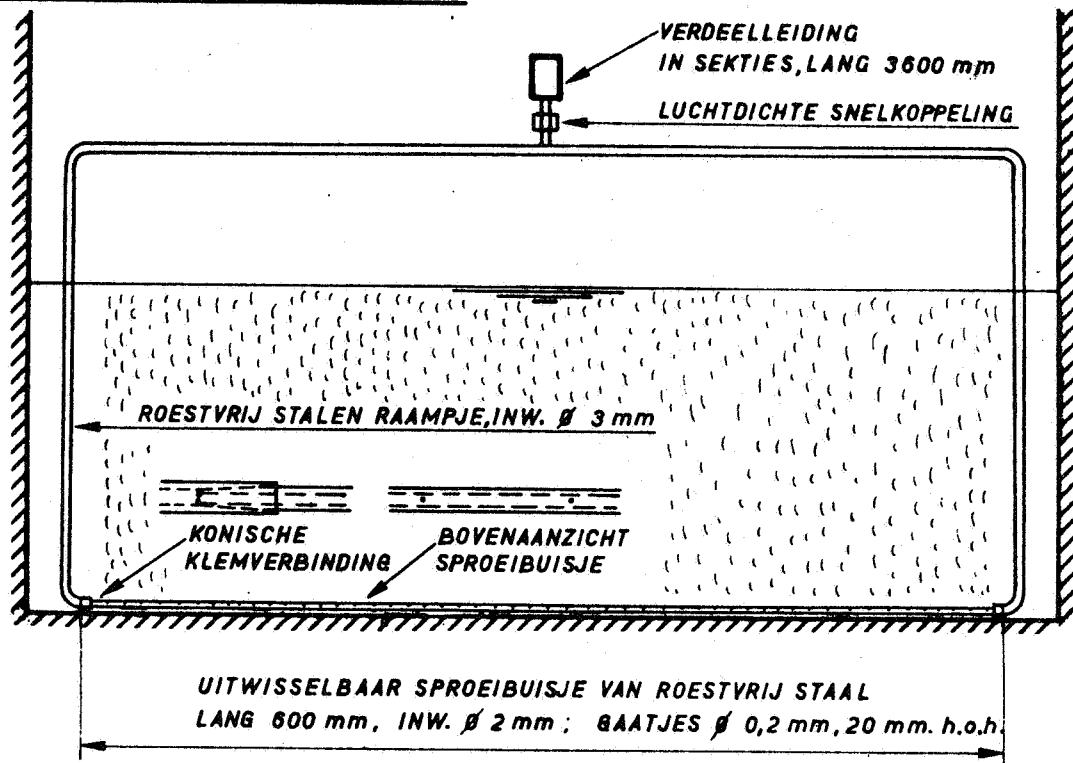
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

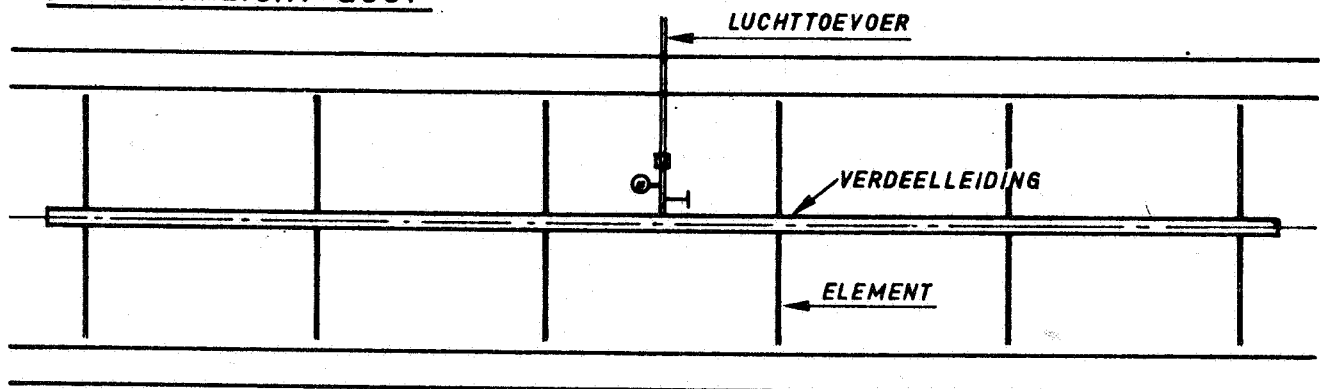
M. 896- 2433

FIG. 2

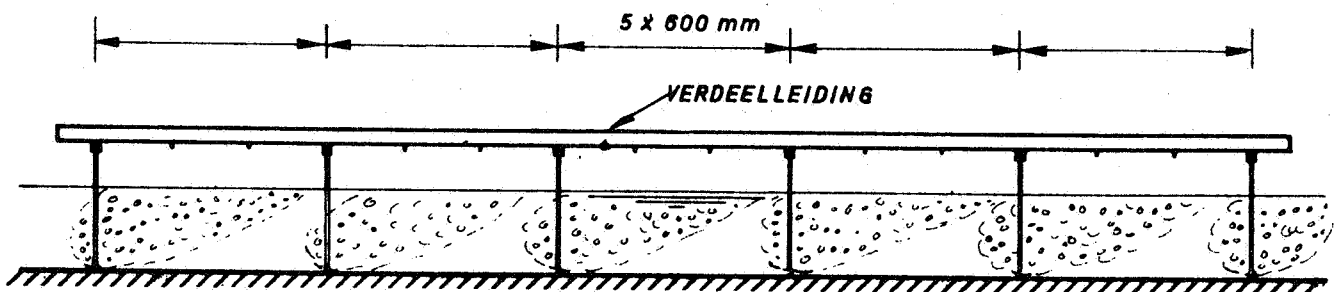
ELEMENT VOOR LUCHTINJEKTIE



BOVENAANZICHT GOOT



LANGSDOORSNEDE GOOT



ELEMENTEN 800 mm h.o.h., AANSLUITMOGELIJKHEID 200 mm h.o.h.

DETAILS LUCHTINJEKTIESYSTEEM

JM

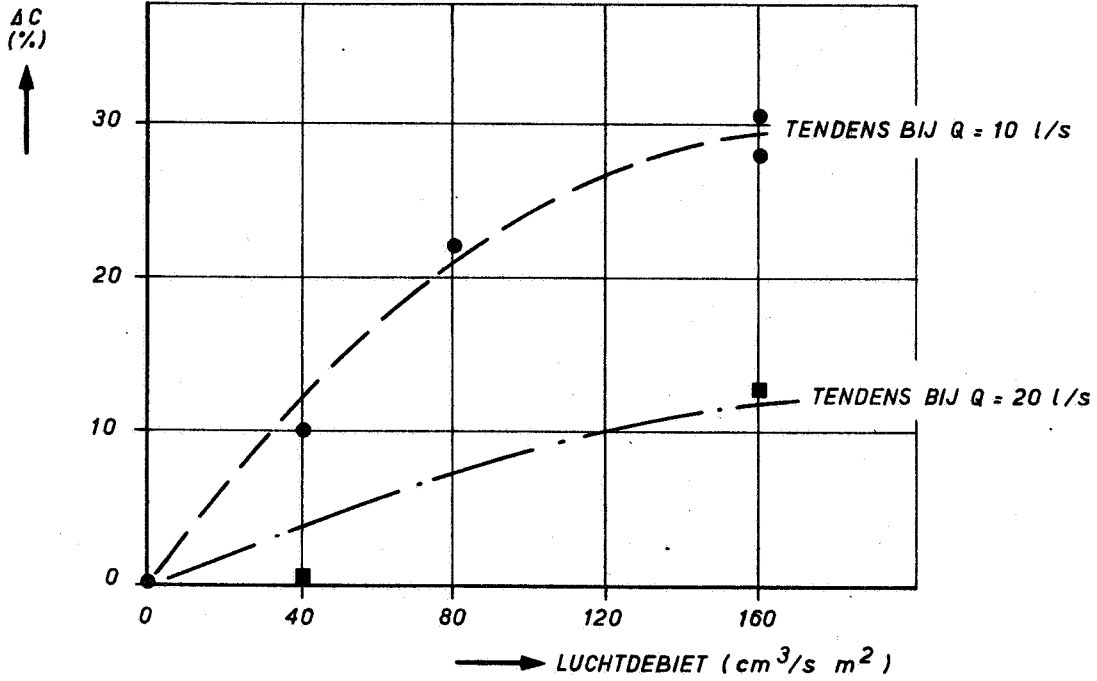
SCHALEN 1:5; 1:20

A4

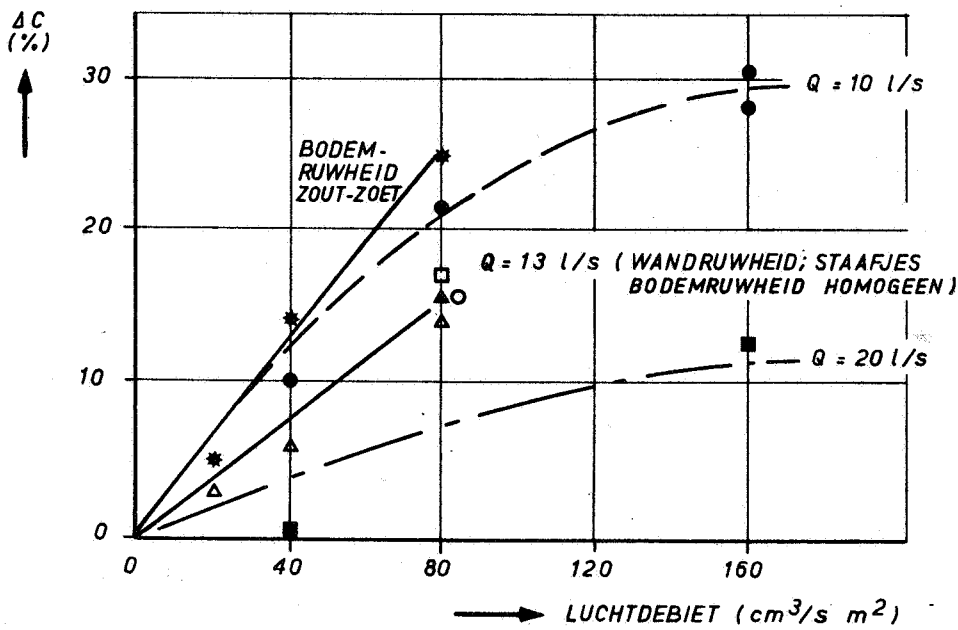
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896-2434

FIG. 3



a) PERMANENTIE PROEVEN



b) PERMANENTIE- EN GETIJPROEVEN

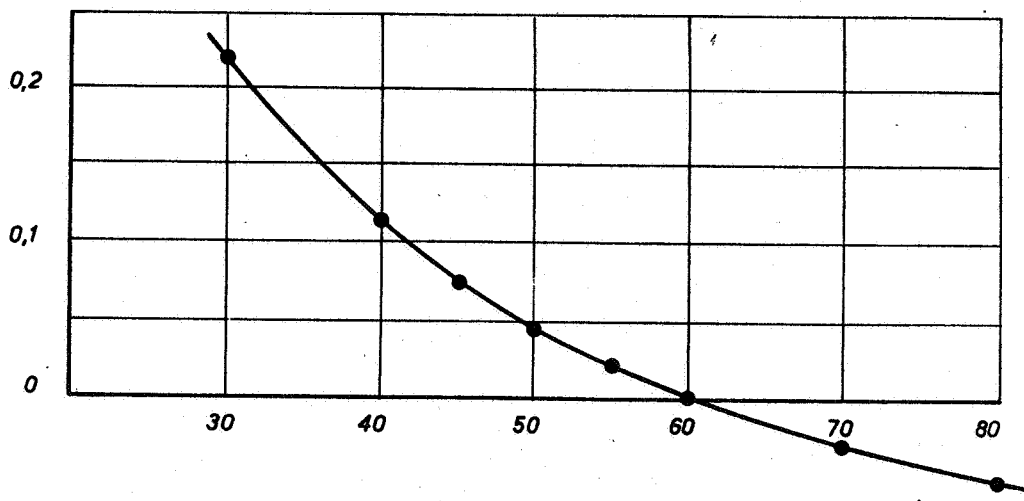
- GETIJ/WANDRUWHEID/HOMOGEEN
- " /BODEMRUWHEID/ "
- PERMANENTIE : $Q = 10 \text{ l/s}$
- PERMANENTIE : $Q = 20 \text{ l/s}$
- ▲ GETIJ/STAAFJES/ZOUT-ZOET
- △ GETIJ/WANDRUWHEID/ZOUT-ZOET
- * GETIJ/BODEMRUWHEID/ZOUT-ZOET

VERANDERING VAN CHEZY-WAARDE t.g.v. LUCHTDEBIET

JM

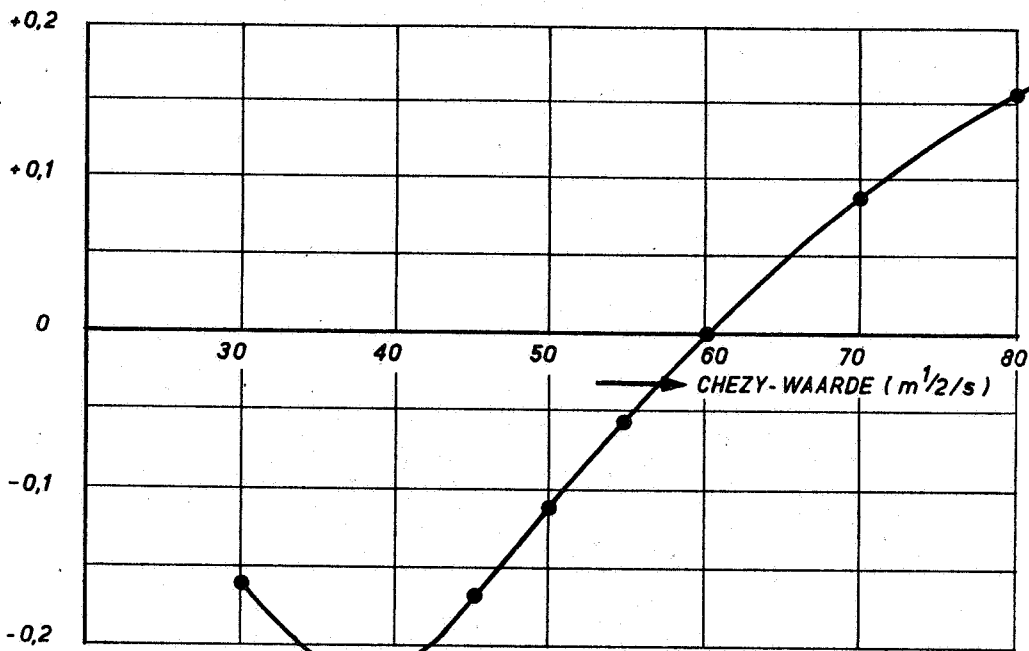
A4

ΔA_0
(m)



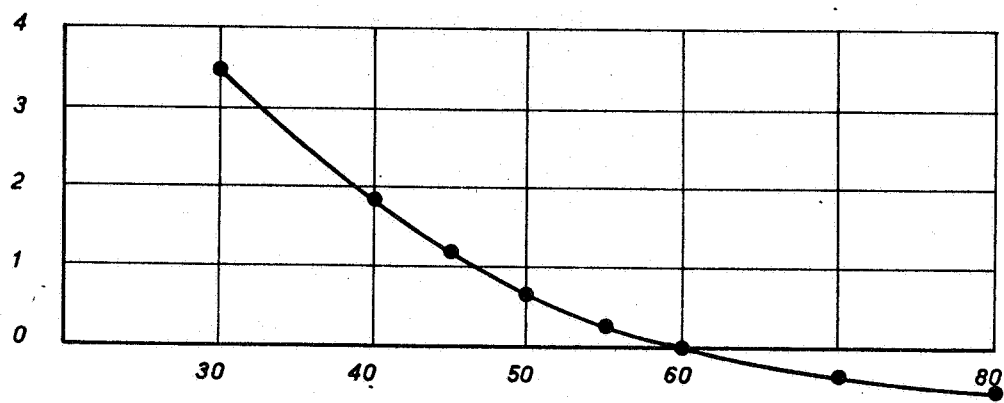
→ CHEZY-WAARDE ($m^{1/2}/s$)

ΔA_1
(m)



→ CHEZY-WAARDE ($m^{1/2}/s$)

$\Delta \psi_1$
(uren)



→ CHEZY-WAARDE ($m^{1/2}/s$)

RELATIE CHEZY-WAARDE EN FASE/AMPLITUDEVERSCHILLEN
BIJ DE HOMOGENE GETIJBEREKENINGEN

JM

A4

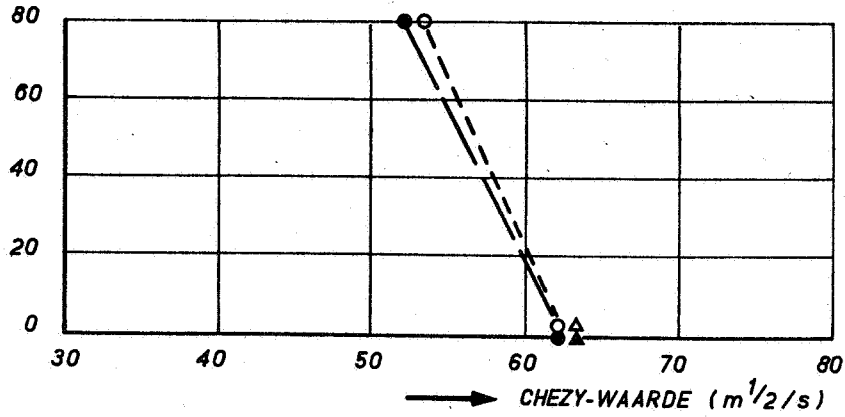
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M896 - 2436

FIG.5

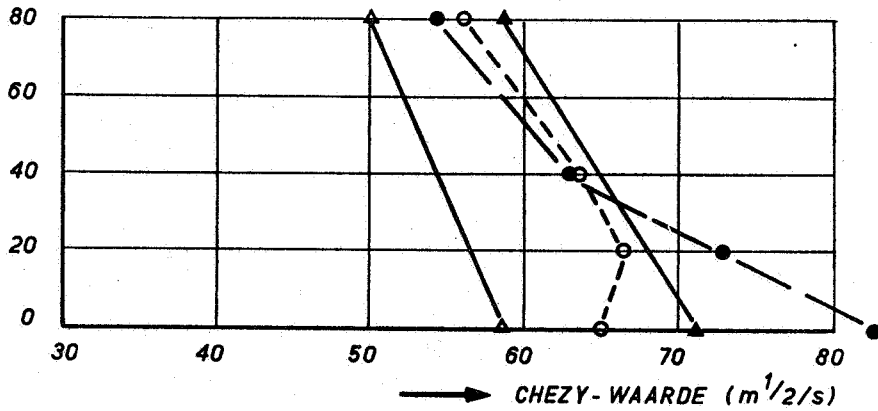
STAAFJES

LUCHTDEBIET
($\text{cm}^3/\text{s m}^2$)



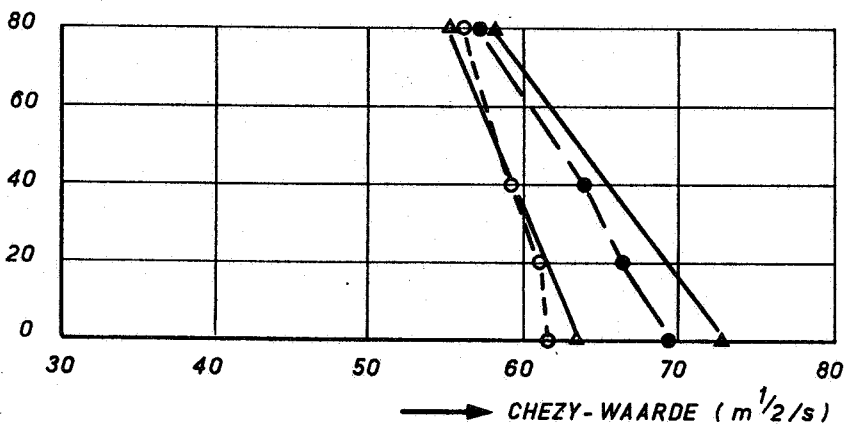
BODEMRUWHEID

LUCHTDEBIET
($\text{cm}^3/\text{s m}^2$)



WANDRUWHEID

LUCHTDEBIET
($\text{cm}^3/\text{s m}^2$)



● ΔA_1 } ZOUT / ZOET PROEF
○ $\Delta \psi_1$ }

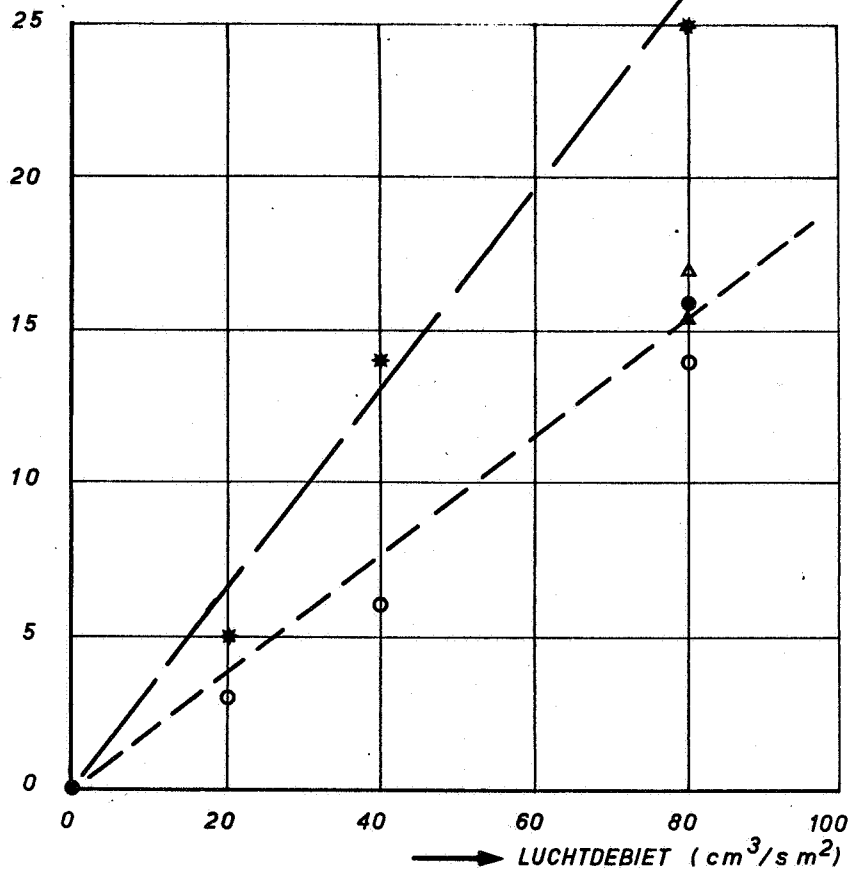
▲ ΔA_1 } HOMOGENE PROEF
△ $\Delta \psi_1$ }

VERANDERING VAN CHEZY-WAARDE TEN GEVOLGE
VAN LUCHTINBLAZEN

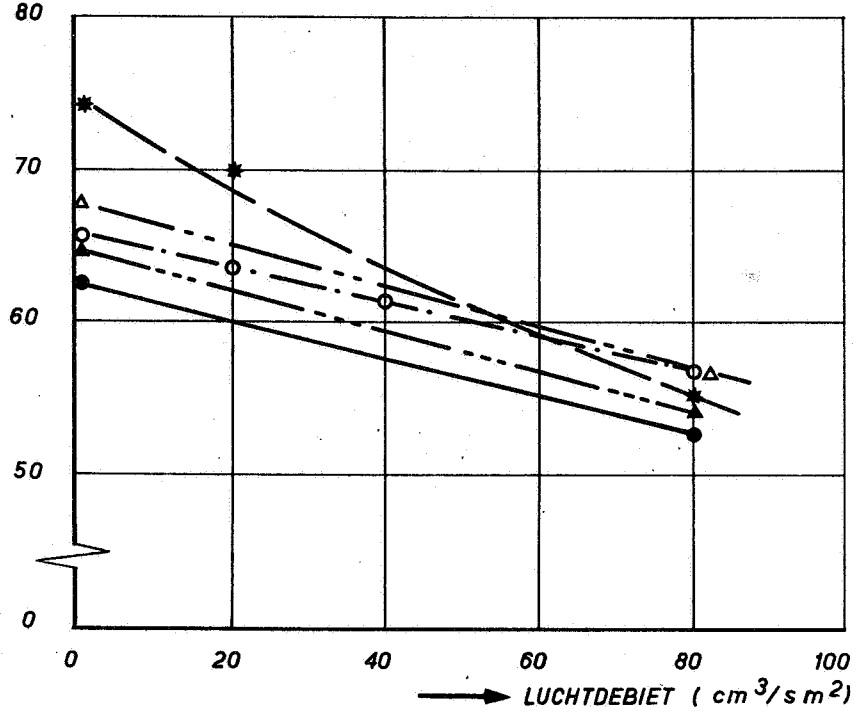
JM

A4

ΔC
(%)
↑



C
(m^{1/2}/s)
↑



- ZOUT/ZOET {
- * BODEMPLAATJES
 - STAAFJES
 - WANDSTRIPS
- △ WANDSTRIPS HOMOGEEEN
 - ▲ BODEMPLAATJES HOMOGEEEN

VERANDERING VAN CHEZY-WAARDE (C)
t.g.v. LUCHTINBLAZEN

JM

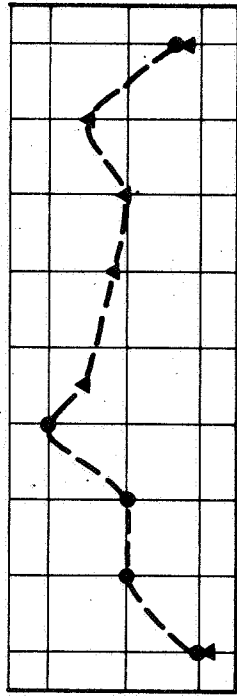
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

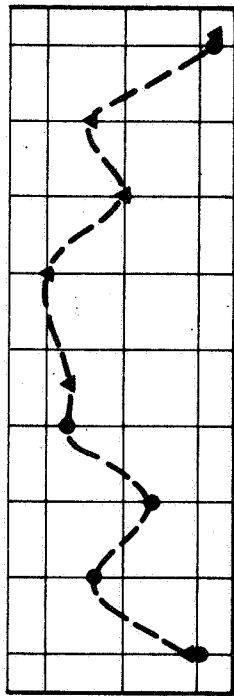
M 896 - 2438

FIG. 7

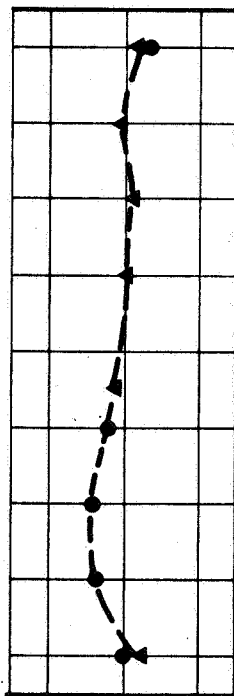
80 cm³/s m² LUCHT (T126 C/D)



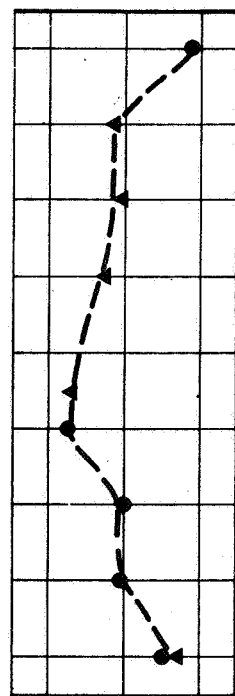
1/3 Li_{max}
MVS



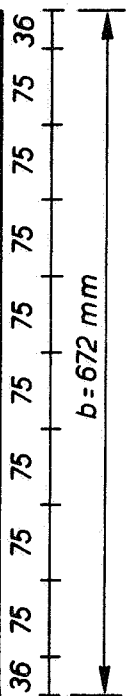
1/3 Li_{max}
MES



2/3 Li_{max}
MVS



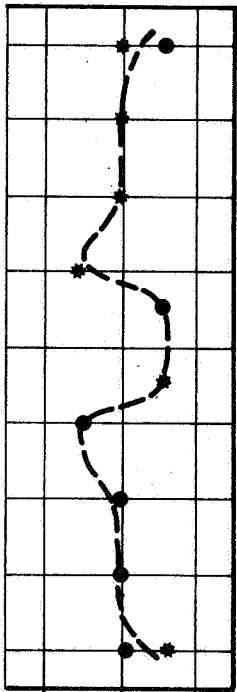
2/3 Li_{max}
MES



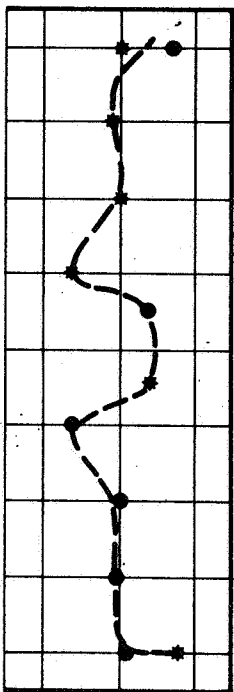
b)

b = 672 mm

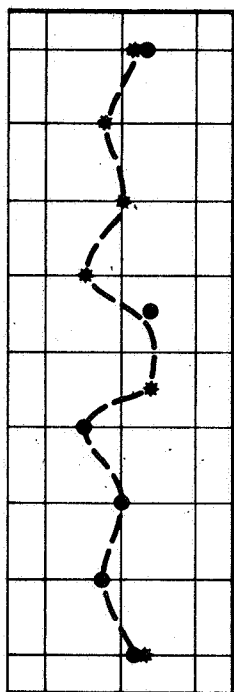
ZONDER LUCHT (T3F)



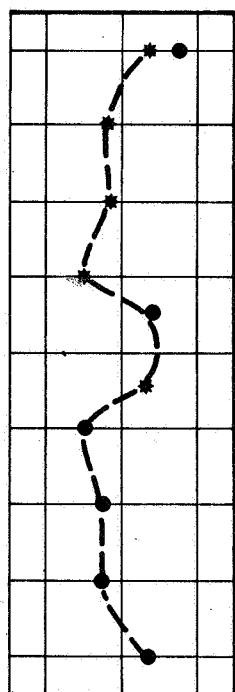
1/3 Li_{max}
MVS



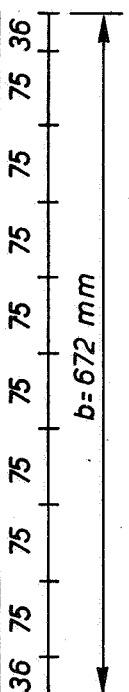
1/3 Li_{max}
MES



2/3 Li_{max}
MVS



2/3 Li_{max}
MES



a)

b = 672 mm

HORIZONTAAL SNELHEIDSPROFIEL GEMIDDELD
OVER DE VERTIKAAL BIJ STAAFJES

- 1^e METING
- ▲ 2^e METING
- * OP GROND VAN SYMMETRIE

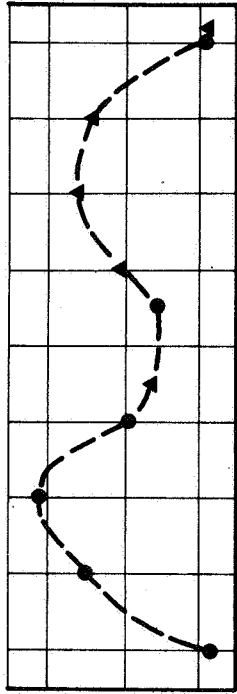
Li_{max} = MAX. ZOUT-
INDRINGING

JM

MVS = MAX. VLOEDSNELH.
MES = MAX. EBSNELH.

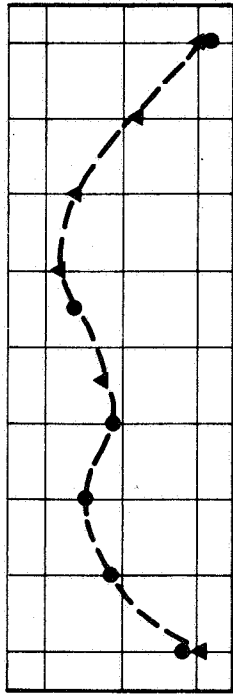
A4

80 cm³/s m² LUCHT (T163 C/D)



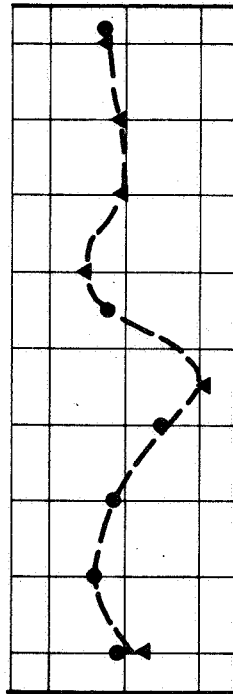
1/3 Li_{max}

MVS



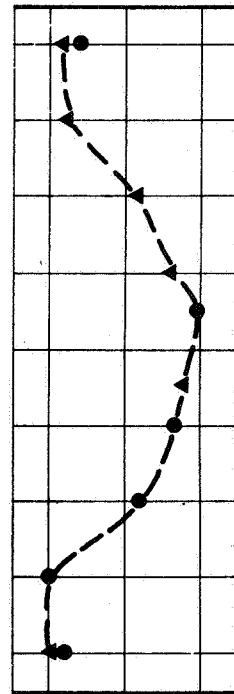
1/3 Li_{max}

MES



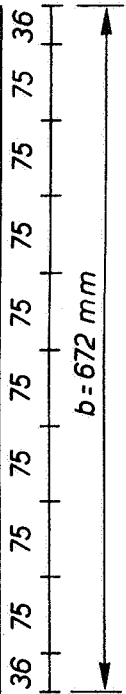
2/3 Li_{max}

MVS



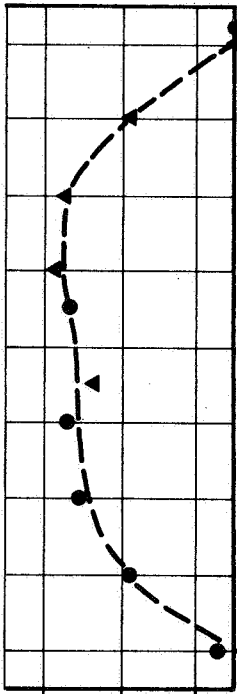
2/3 Li_{max}

MES



b)

ZONDER LUCHT (T161 D/E)

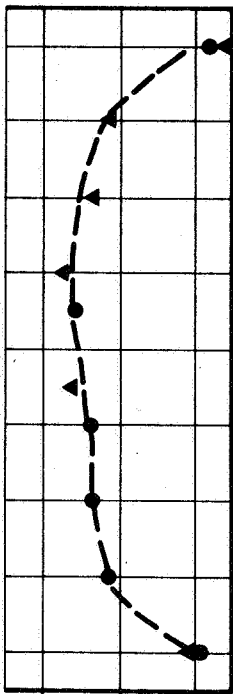


1,2

1,0

0,8

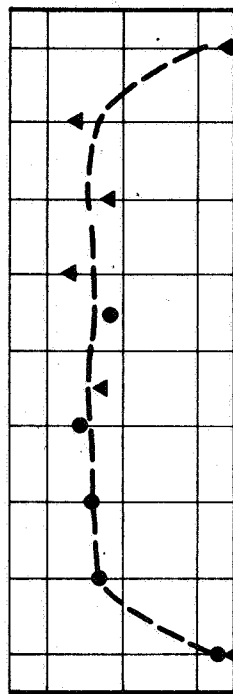
$\frac{v_y}{U} = \frac{v_z}{U}$



1,2

1,0

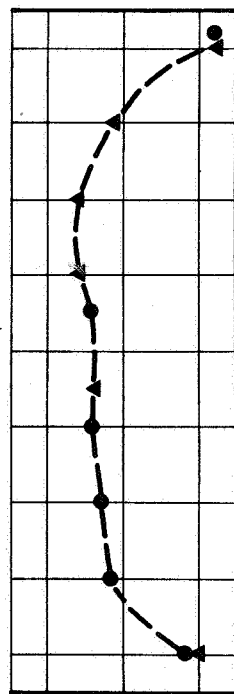
0,8



1,2

1,0

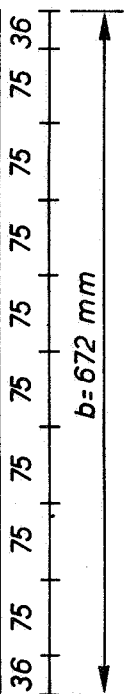
0,8



1,2

1,0

0,8



a)

HORIZONTAAL SNELHEIDSPROFIEL GEMIDDELD
OVER DE VERTIKAAL BIJ BODEMPLAATJES

- 1^e METING
- ▲ 2^e METING
- * OP GROND VAN SYMMETRIE

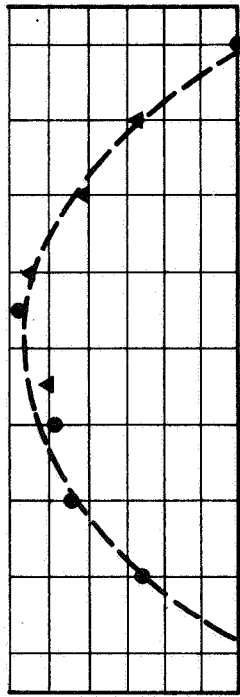
Li_{max} = MAX. ZOUT-
INDRINGING

JM

MVS = MAX. VLOEDSNELH.
MES = MAX. EBSNELH.

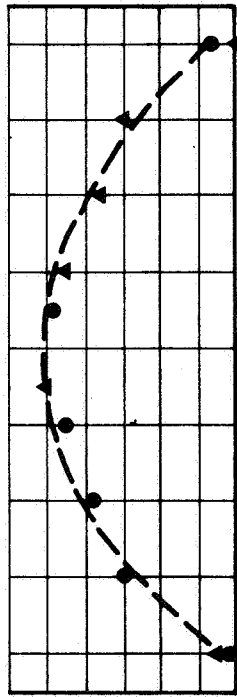
A4

80 cm³/s m² LUCHT (T 606 F/G)



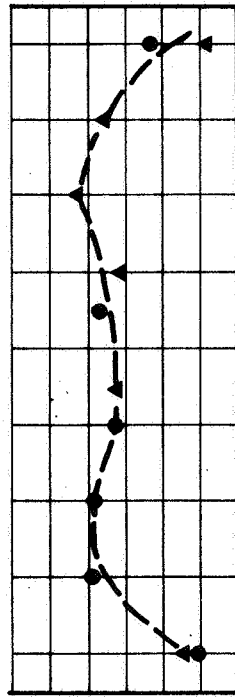
1/3 Li_{max}

MVS



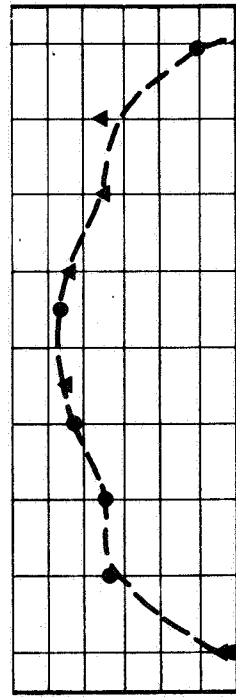
1/3 Li_{max}

MES



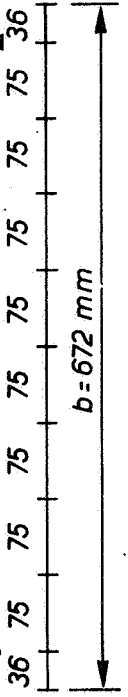
2/3 Li_{max}

MVS



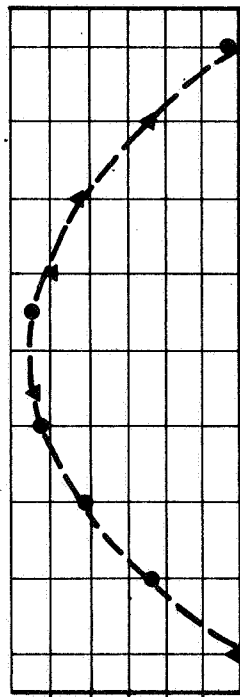
2/3 Li_{max}

MES



b)

ZONDER LUCHT (T 606 H/I)



1,4

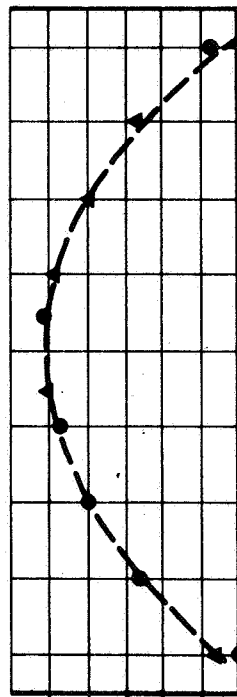
1,2

1,0

0,8

0,6

$\frac{v}{U} = \frac{z}{y}$



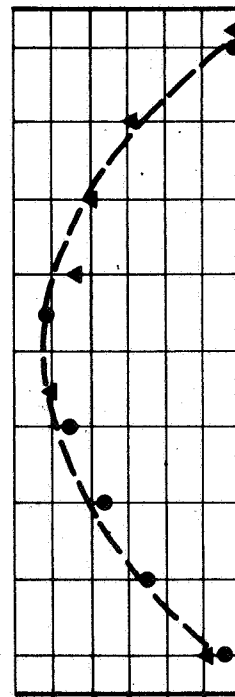
1,4

1,2

1,0

0,8

0,6



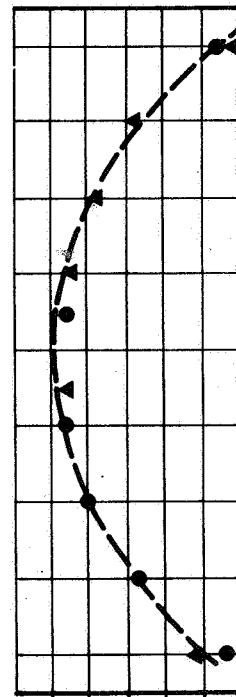
1,4

1,2

1,0

0,8

0,6



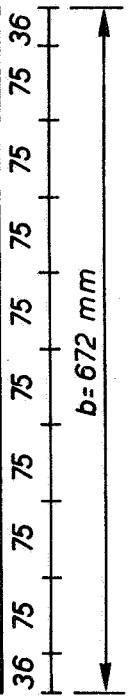
1,4

1,2

1,0

0,8

0,6



a)

HORIZONTAAL SNELHEIDSPROFIEL GEMIDDELD
OVER DE VERTIKAAL BIJ WANDSTRIPS

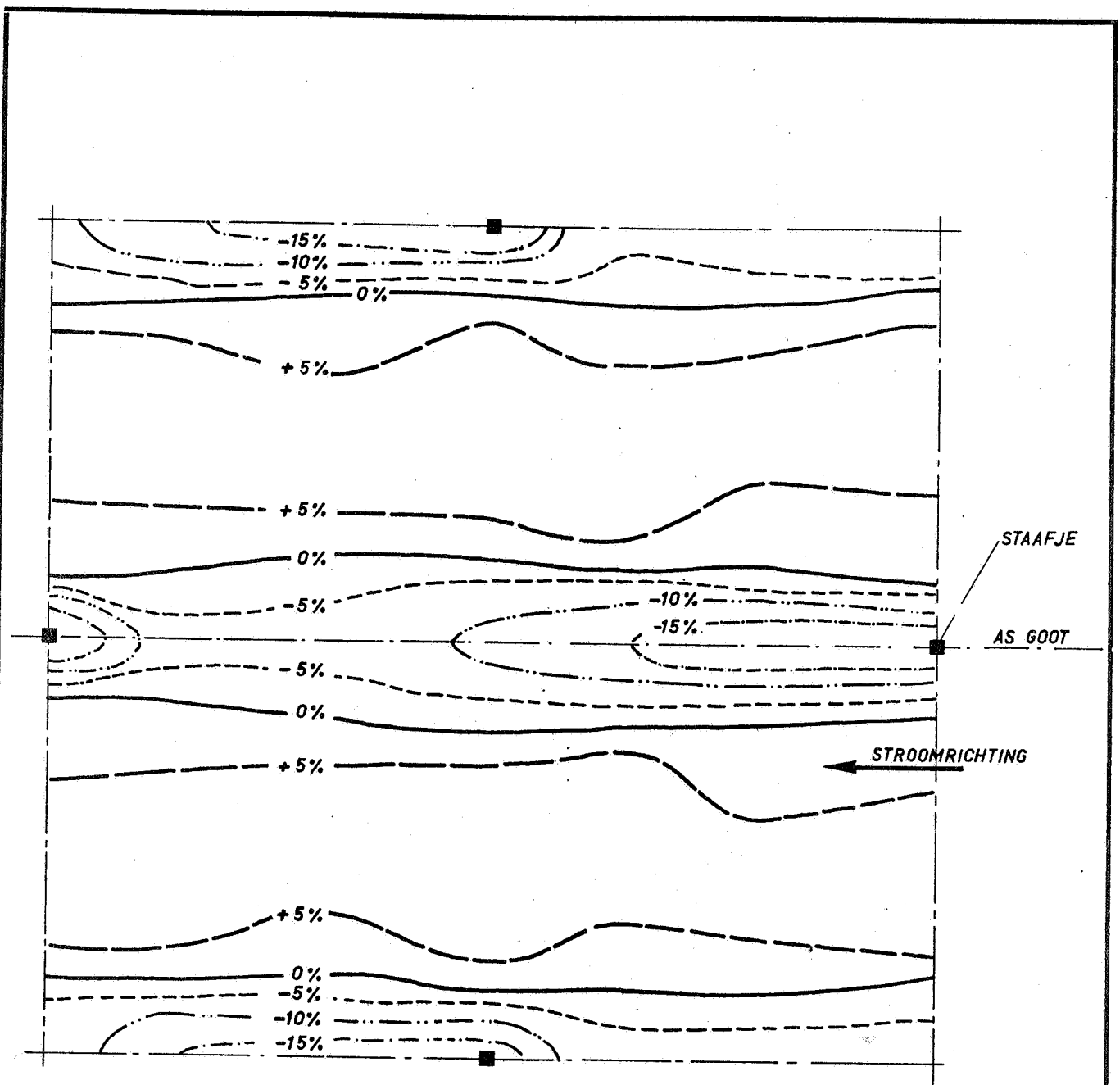
- 1^e METING
- ▲ 2^e METING
- * OP GROND VAN SYMMETRIE

Li_{max} = MAX. ZOUT-
INDRINGING

JM

MVS = MAX. VLOEDSNELH.
MES = MAX. EBSNELH.

A4

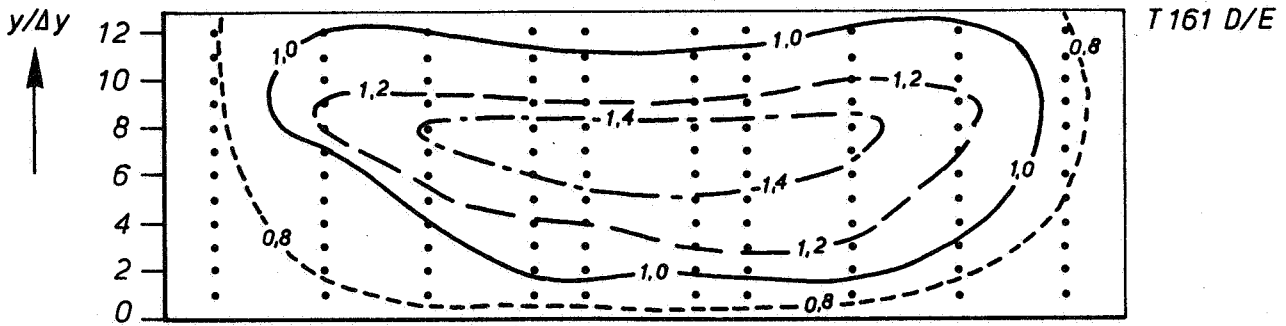


PROCENTUELE AFWUKING VAN DE GEMIDDELDE SNELHEID \bar{U} ($= 10,8 \text{ cm/s}$)
 T.G.V. VERT. WEERSTANDSSTAAFJES.
 (aantal staafjes per $1,34 \text{ m}^2$ gootbodem : 35)

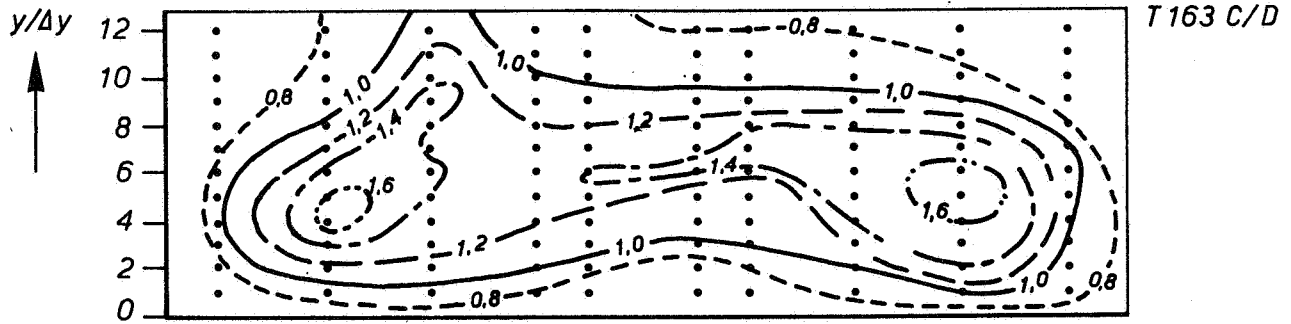
SNELHEIDSPATROON ROND VERTIKALE WEERSTANDS-
 STAAFJES IN EEN HOMOGENE PERMANENTE STROMING

ϕM

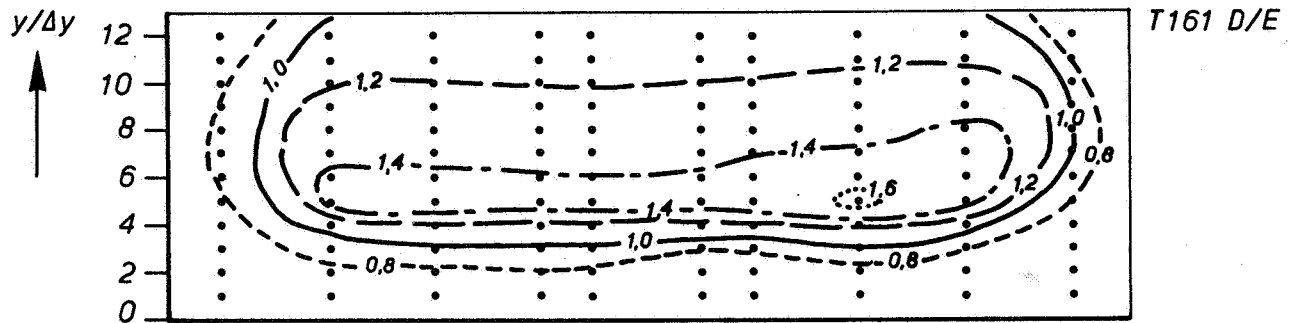
A4



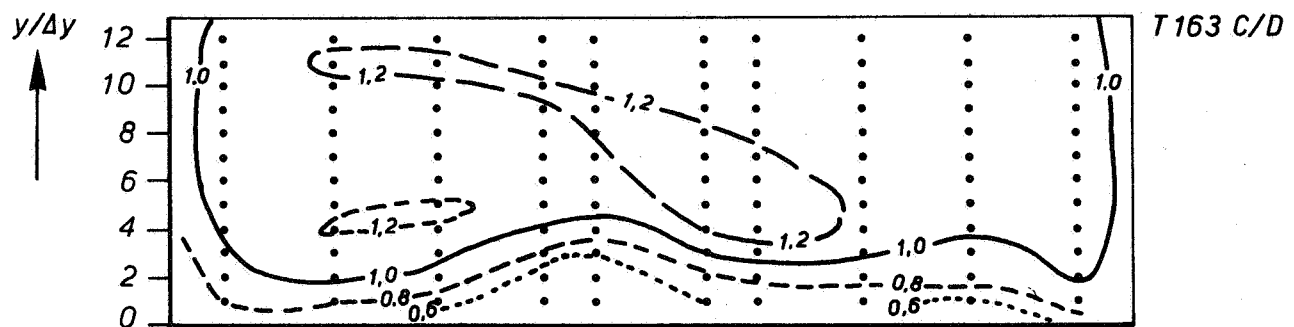
a) STATION 1, ZONDER LUCHT



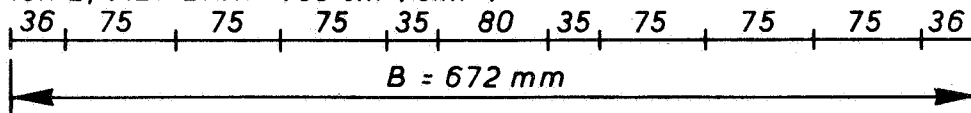
b) STATION 1, MET LUCHT ($80 \text{ cm}^3/\text{s m}^2$)



c) STATION 2, ZONDER LUCHT



d) STATION 2, MET LUCHT ($80 \text{ cm}^3/\text{s m}^2$)



LIJNEN VAN GELIJKE SNELHEID BIJ RUWHEID
d.m.v. BODEMPLAATJES

MAX. VLOEDSNELHEID

JM

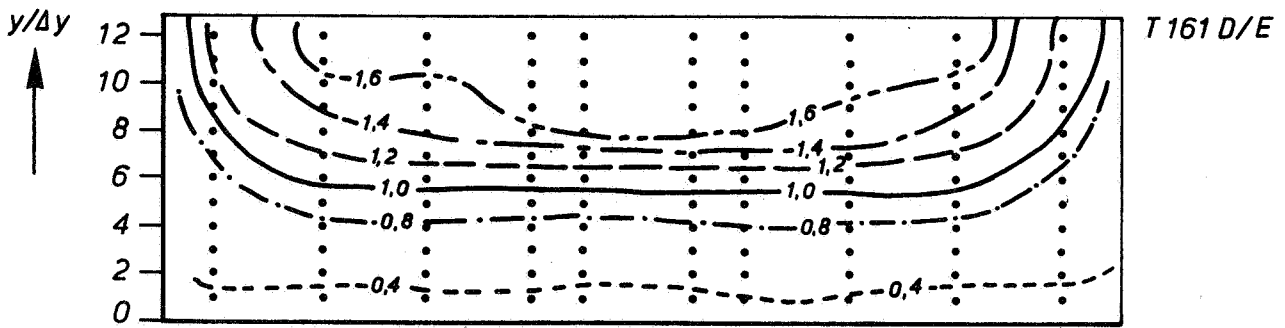
$t/\Delta t = 6$

A4

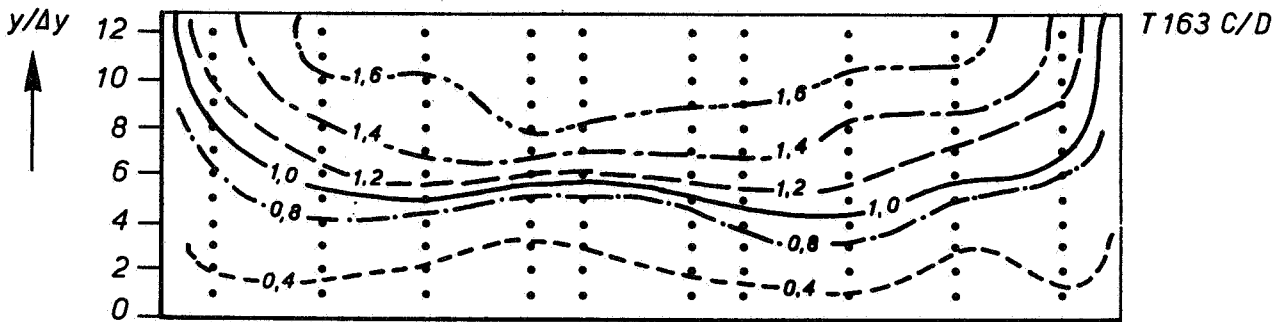
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 896 - 2448

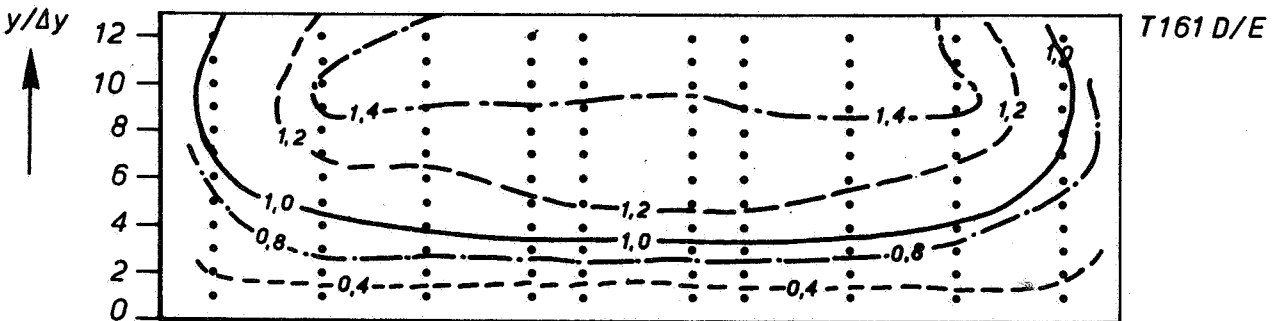
FIG. 12



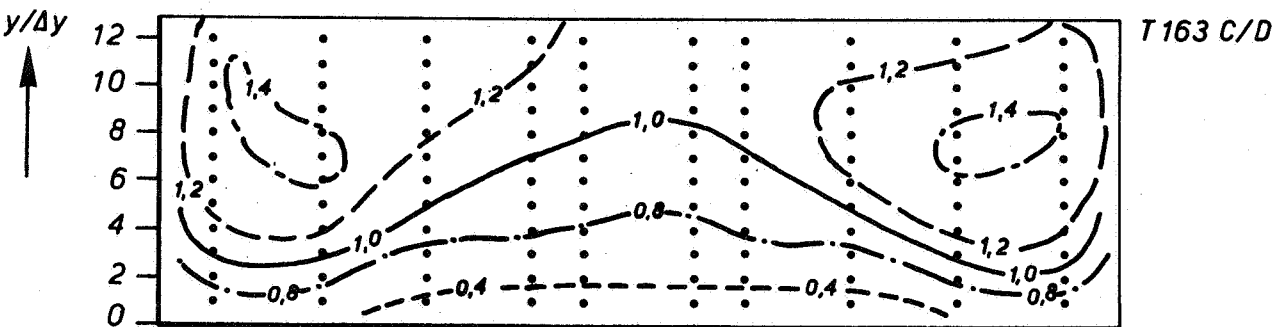
a) STATION 1, ZONDER LUCHT



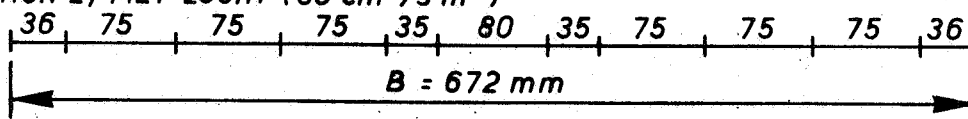
b) STATION 1, MET LUCHT ($80 \text{ cm}^3/\text{s m}^2$)



c) STATION 2, ZONDER LUCHT



d) STATION 2, MET LUCHT ($80 \text{ cm}^3/\text{s m}^2$)



LIJNEN VAN GELIJKE SNELHEID BIJ RUWHEID
d.m.v. BODEMPLAATJES

MAX. EBSNELHEID

JM

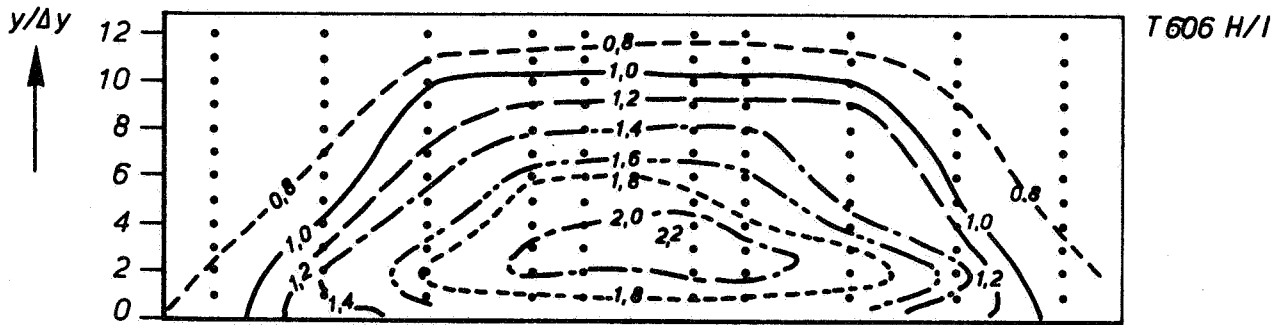
$t/\Delta t = 18$

A4

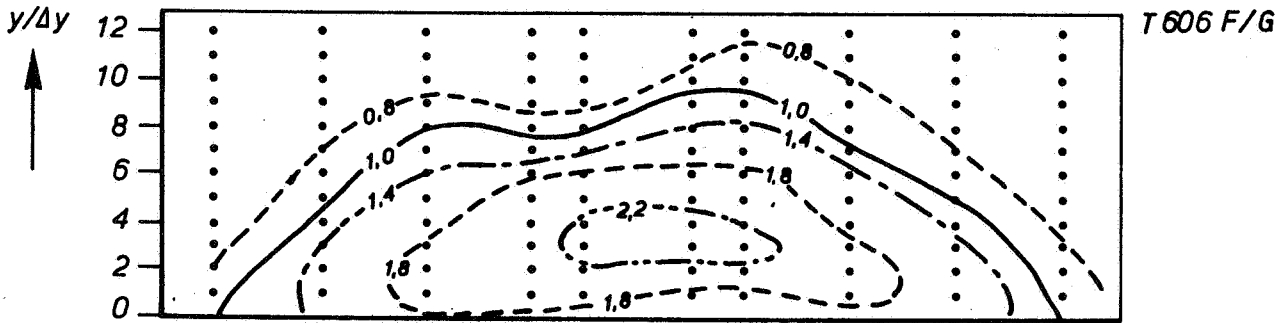
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 896 - 2449

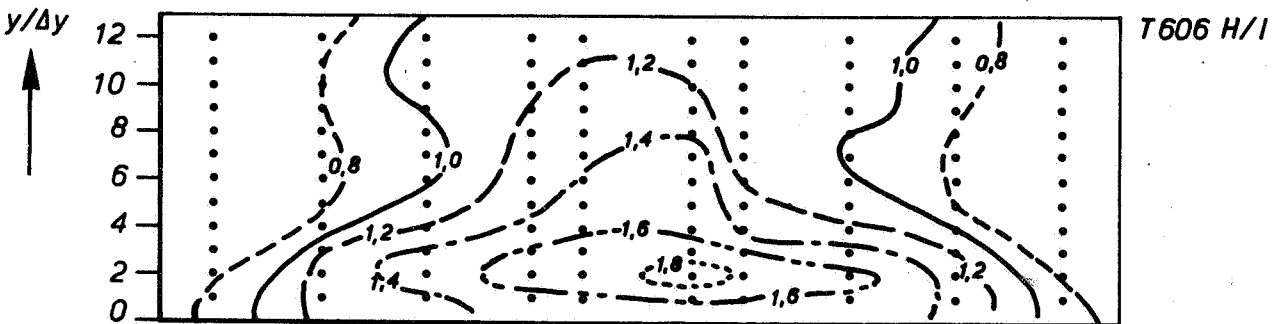
FIG. 13



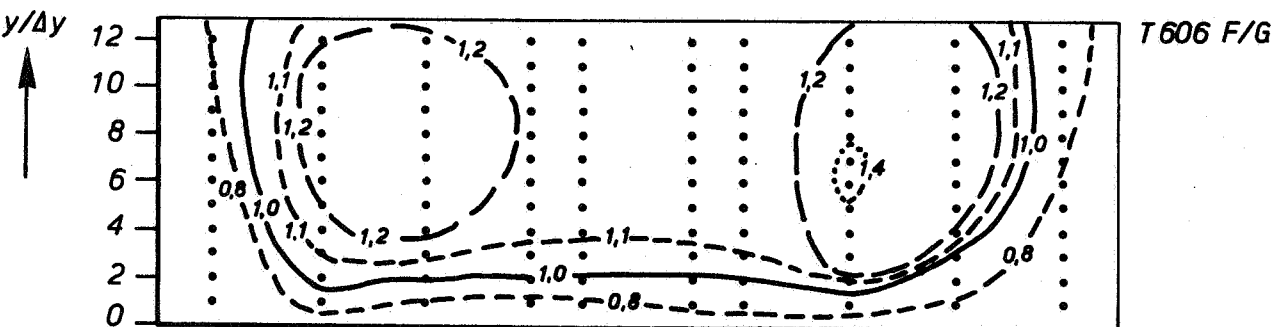
a) STATION 1, ZONDER LUCHT



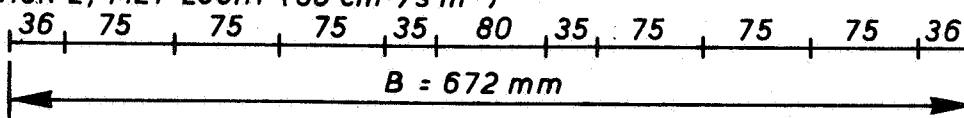
b) STATION 1, MET LUCHT ($80 \text{ cm}^3/\text{s m}^2$)



c) STATION 2, ZONDER LUCHT



d) STATION 2, MET LUCHT ($80 \text{ cm}^3/\text{s m}^2$)



LIJNEN VAN GELIJKE SNELHEID BIJ RUWHEID
d.m.v. WANDSTRIPS

MAX. VLOEDSNELHEID

JM

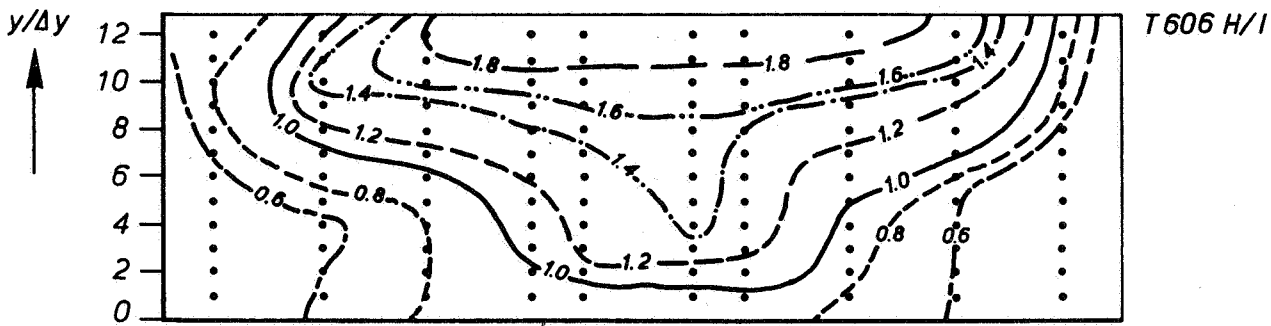
$t/\Delta t = 6$

A4

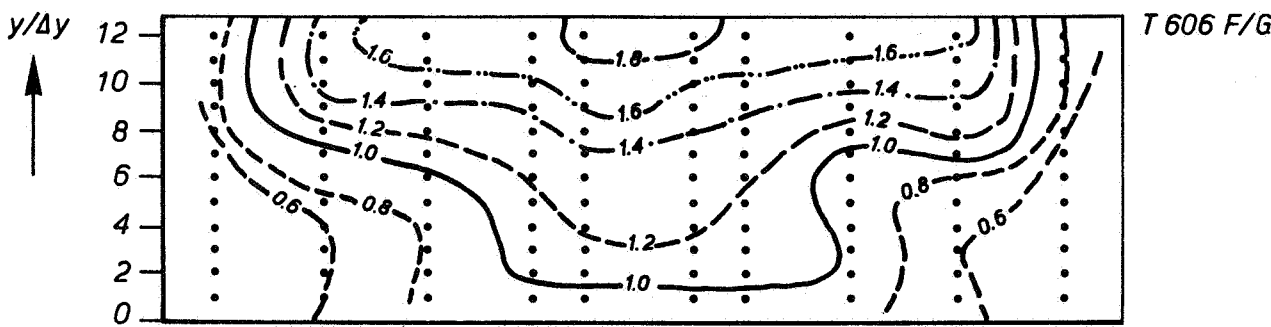
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 896 - 2450

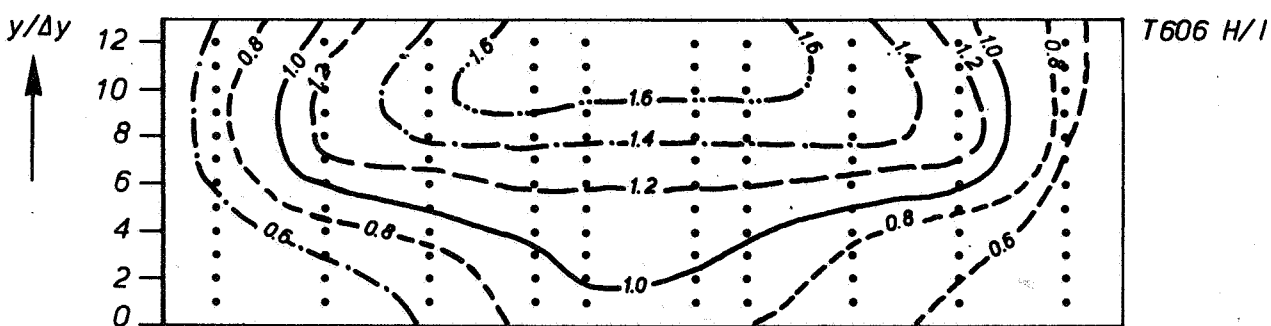
FIG. 14



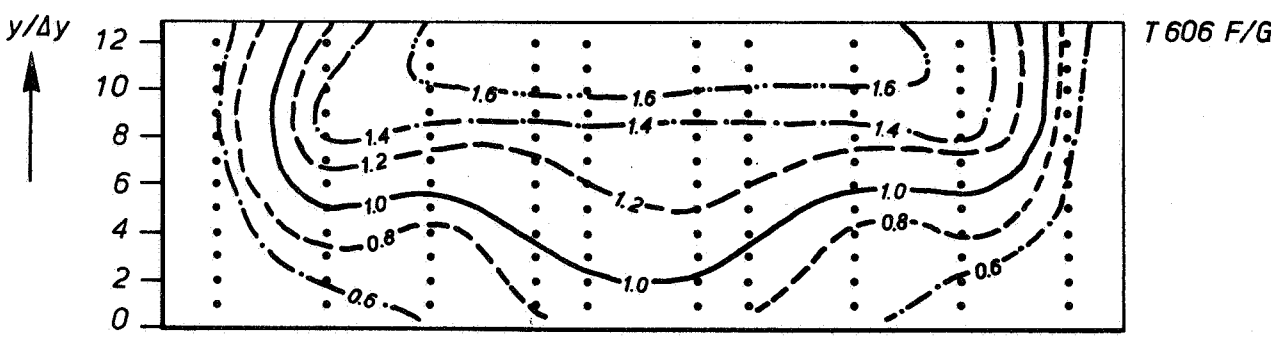
a) STATION 1, ZONDER LUCHT



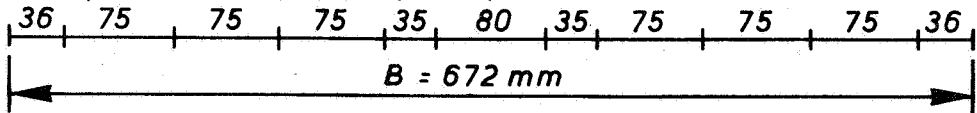
b) STATION 1, MET LUCHT (80 cm³/s m²)



c) STATION 2, ZONDER LUCHT



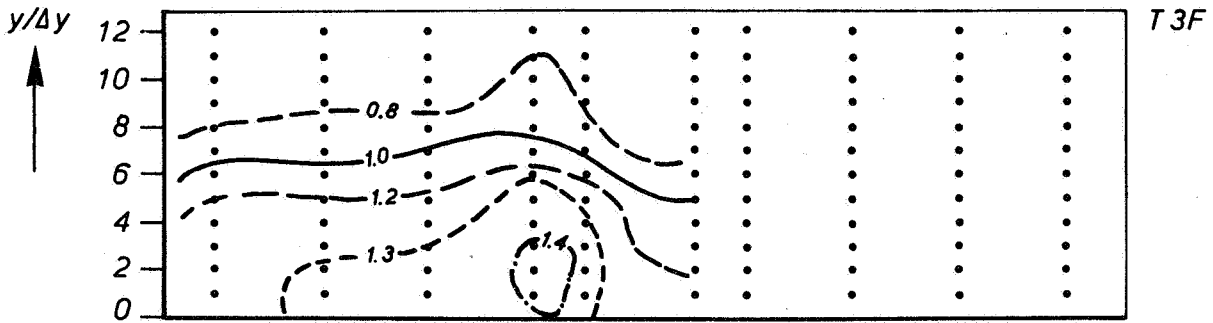
d) STATION 2, MET LUCHT (80 cm³/s m²)



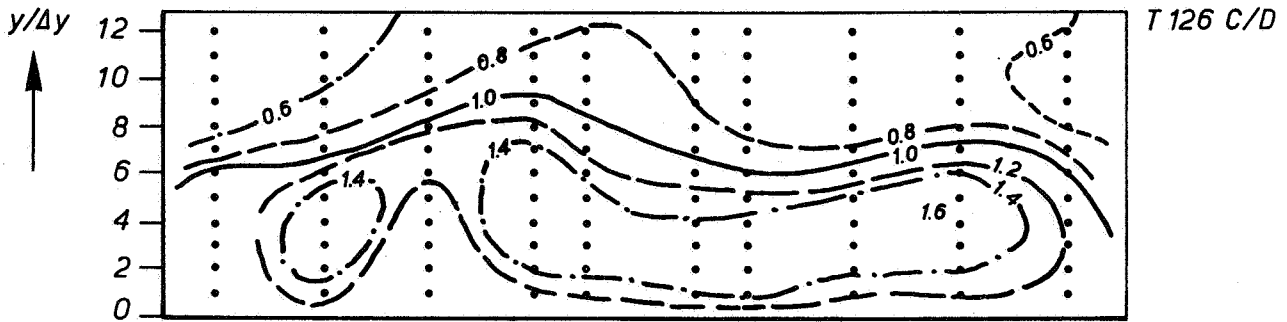
LIJNEN VAN GELIJKE SNELHEID BIJ RUWHEID
d.m.v. WANDSTRIPS

MAX. EBSNELHEID
t/Delta t = 18

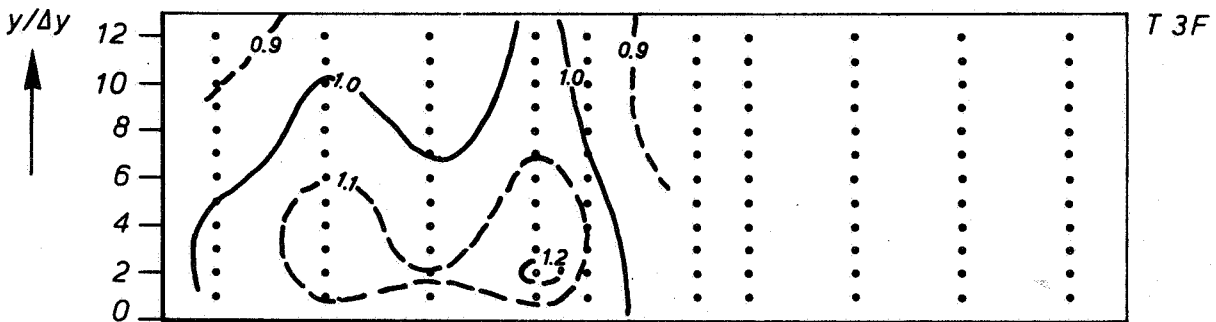
JM
A4



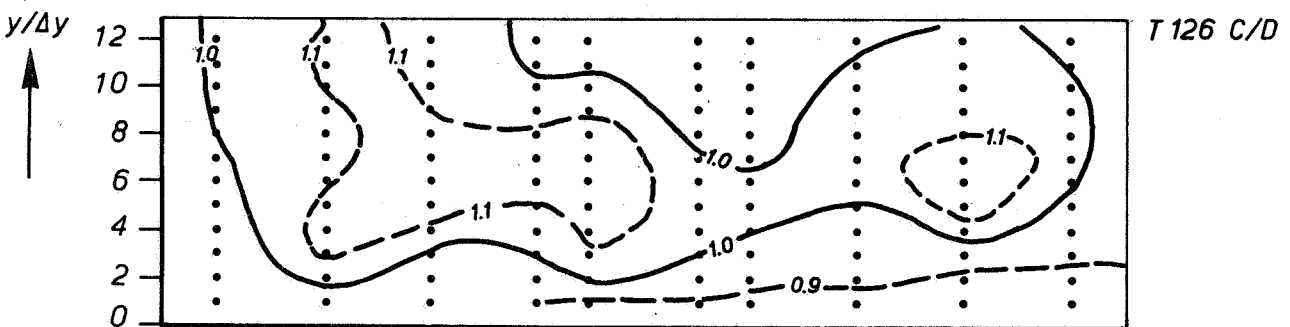
a) STATION 1, ZONDER LUCHT



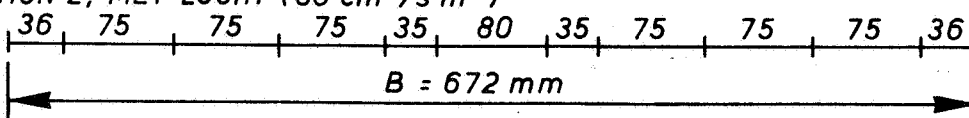
b) STATION 1, MET LUCHT ($80 \text{ cm}^3/\text{s m}^2$)



c) STATION 2, ZONDER LUCHT



d) STATION 2, MET LUCHT ($80 \text{ cm}^3/\text{s m}^2$)



LIJNEN VAN GELIJKE SNELHEID BIJ RUWHEID
d.m.v. STAAFJES

MAX. EBSNELHEID

JM

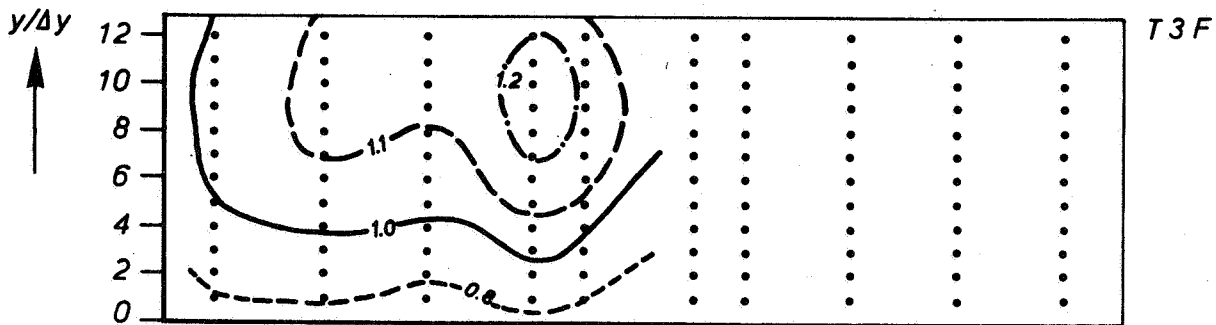
$t/\Delta t = 6$

A4

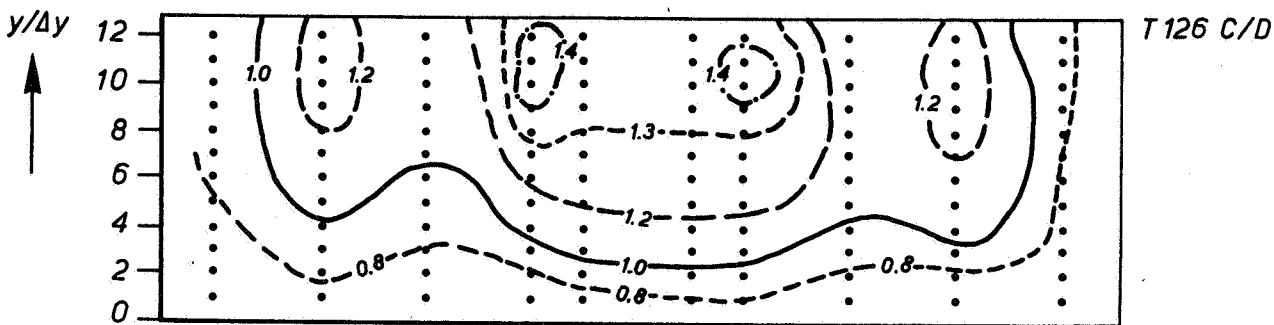
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 896 - 2452

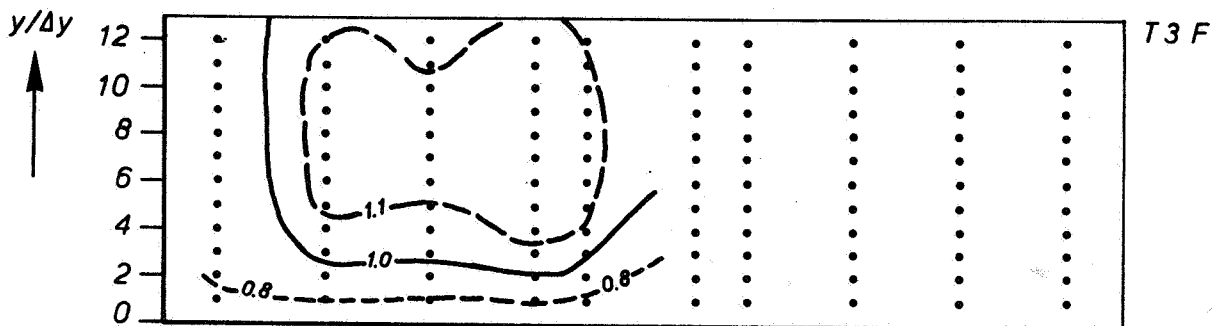
FIG. 16



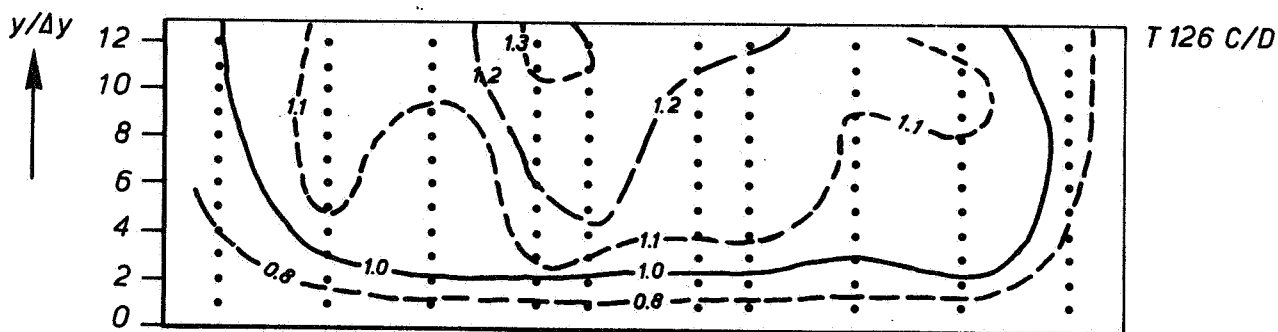
a) STATION 1, ZONDER LUCHT



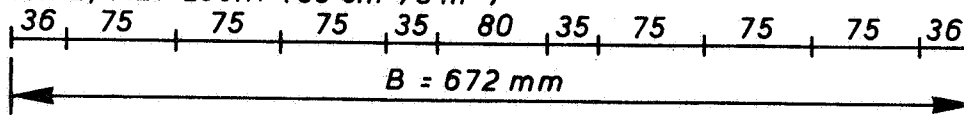
b) STATION 1, MET LUCHT (80 cm³/s m²)



c) STATION 2, ZONDER LUCHT



d) STATION 2, MET LUCHT (80 cm³/s m²)



LIJNEN VAN GELIJKE SNELHEID BIJ RUWHEID
d.m.v. STAAFJES

MAX. EBSNELHEID

JM

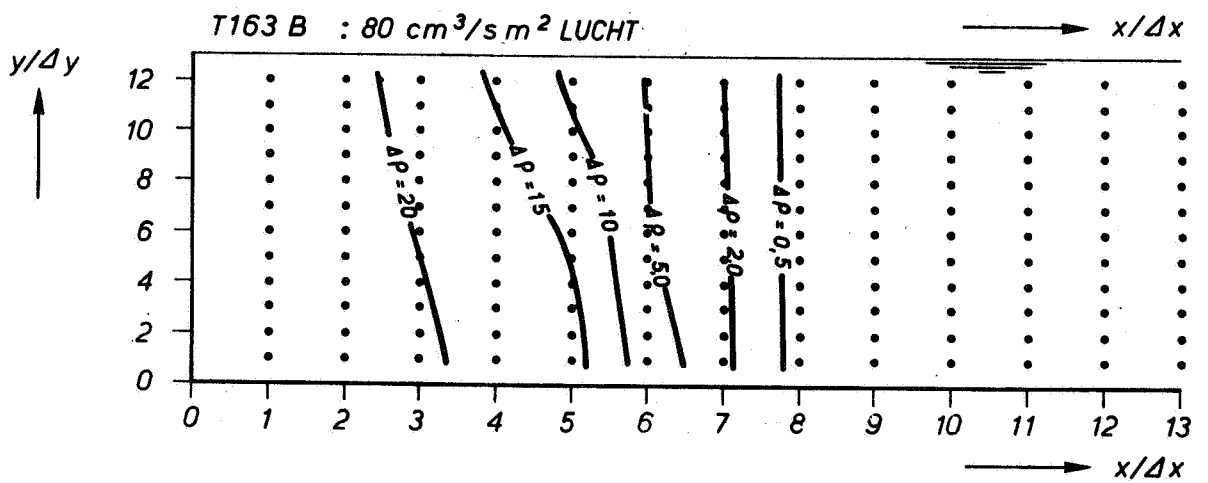
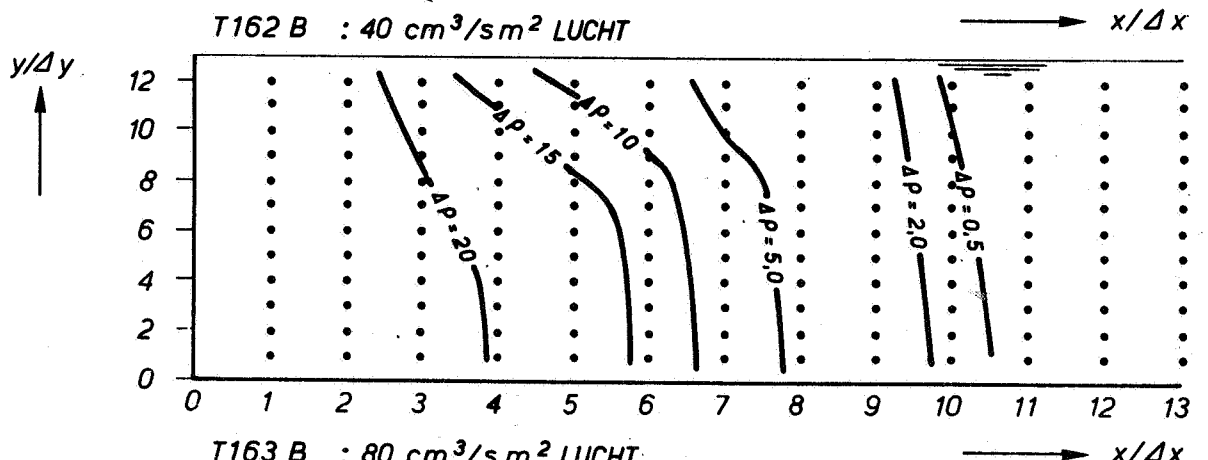
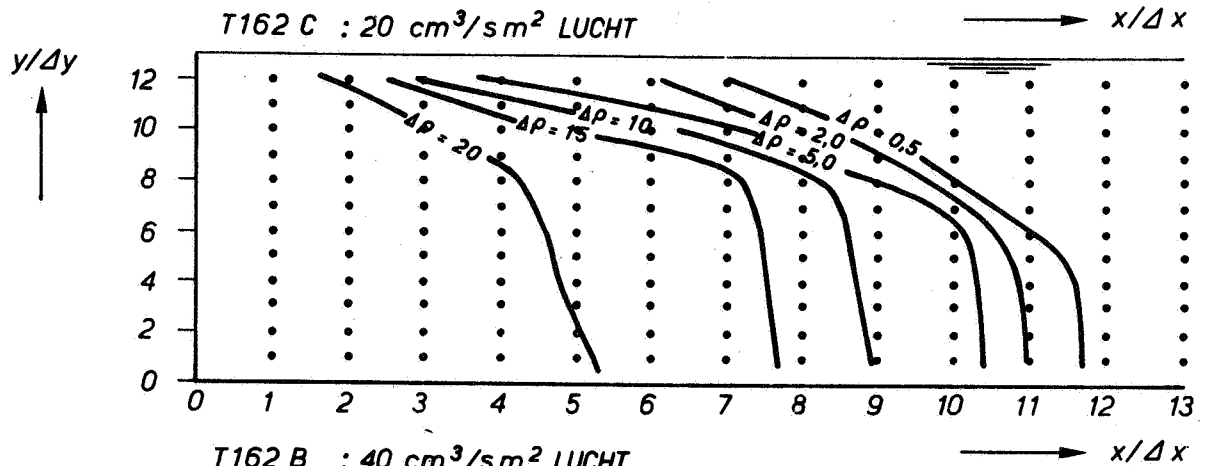
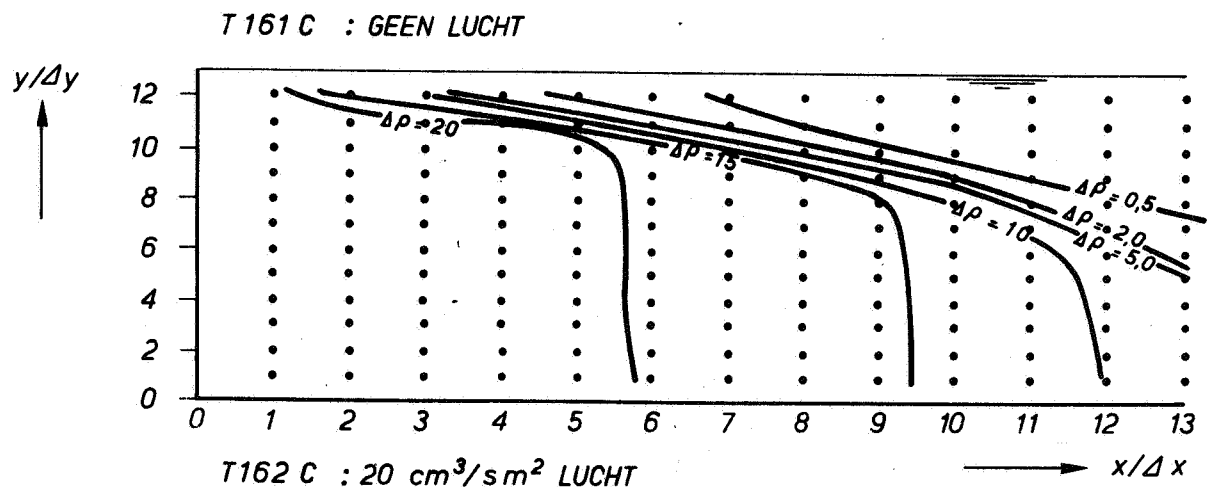
t/Δt = 18

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 896 - 2453

FIG.17

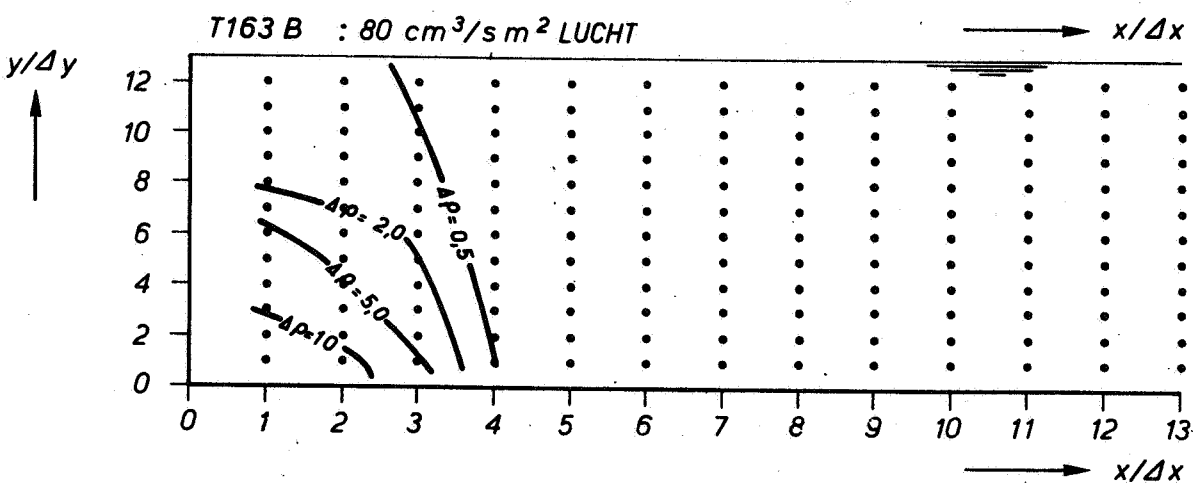
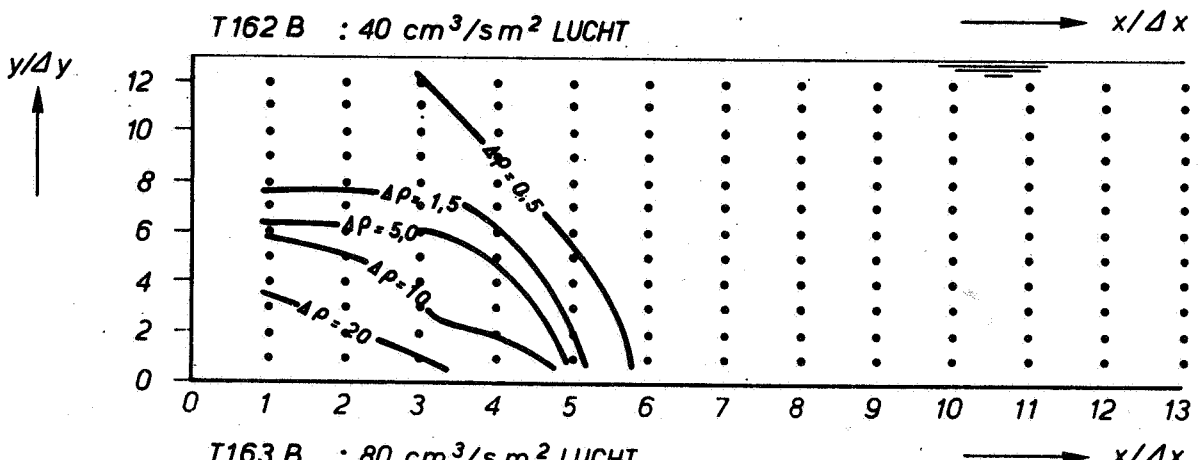
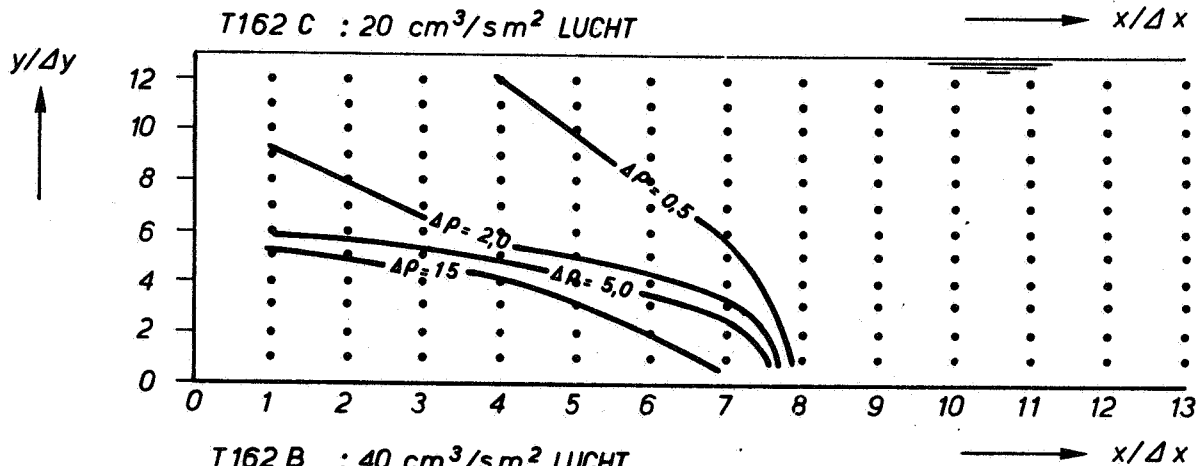
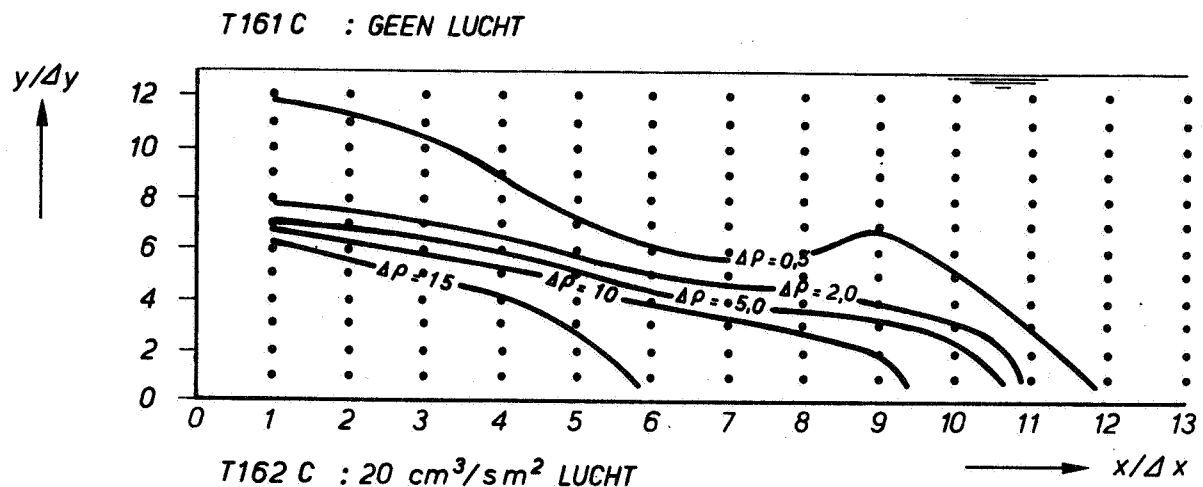


LJNEN VAN GELJK DICHTHEIDSVERSCHIL BIJ RUWHEID
d.m.v. BODEMPLAATJES (2x2 cm) (ΔP IN kg/m³)

ZOUTINDRINGING (MAX.)
 $t/\Delta t = 12$

JM

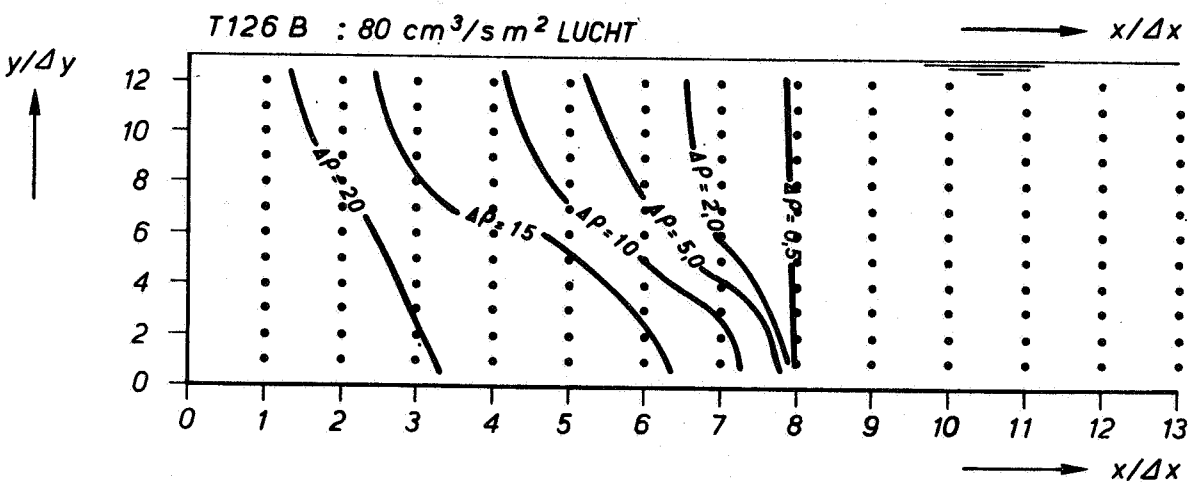
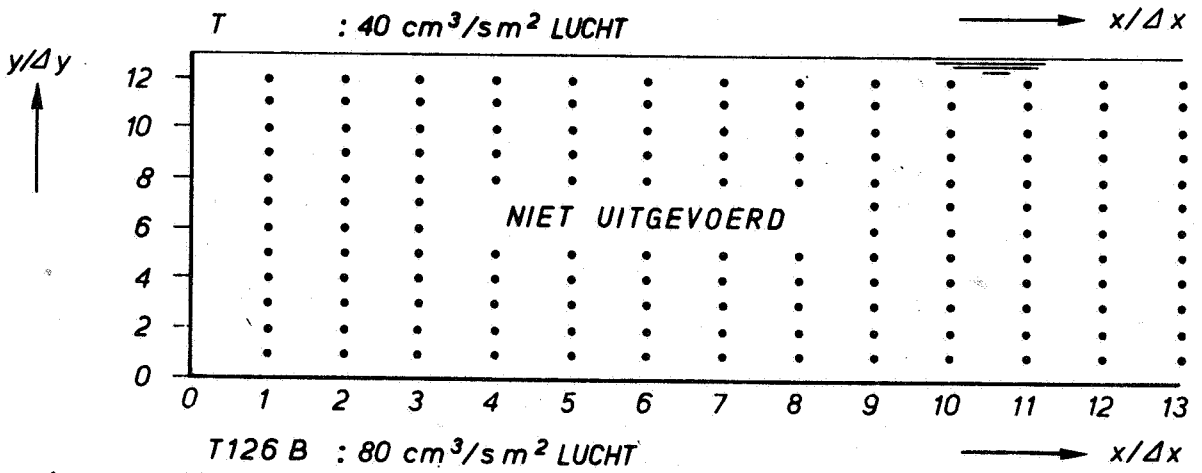
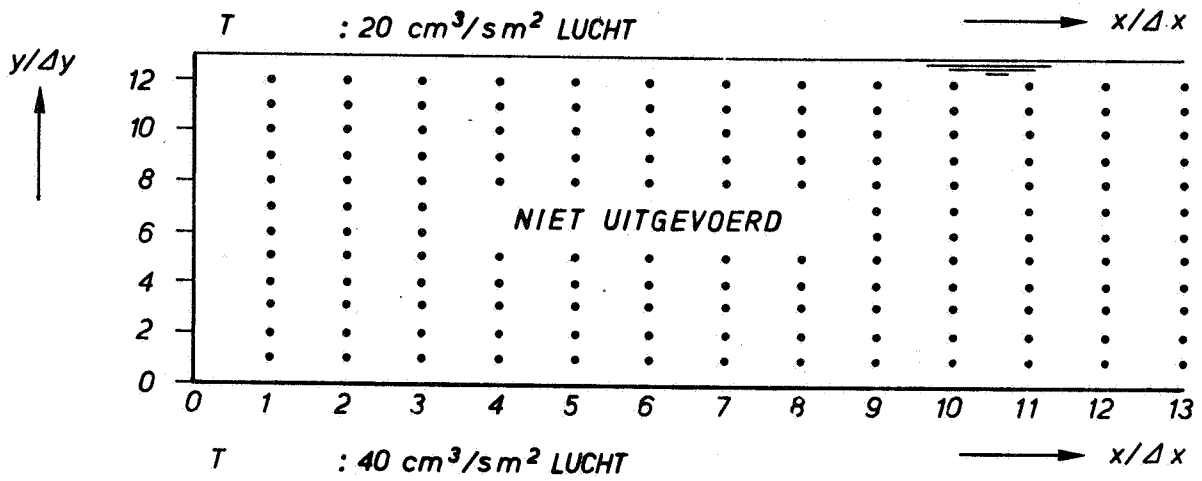
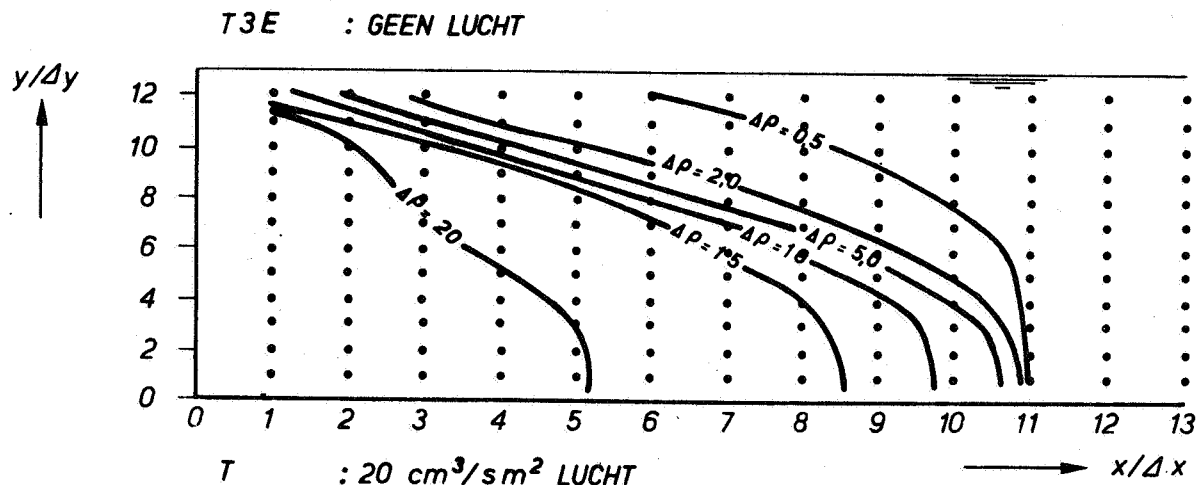
A4



LJNEN VAN GELJK DICHTHEIDSVERSCHIL BIJ RUWHEID
 d.m.v. BODEMPLAATJES (2x2 cm) (ΔP IN kg/m³)

ZOUTINDRINGING (MIN.)
 $t/\Delta t = 23$

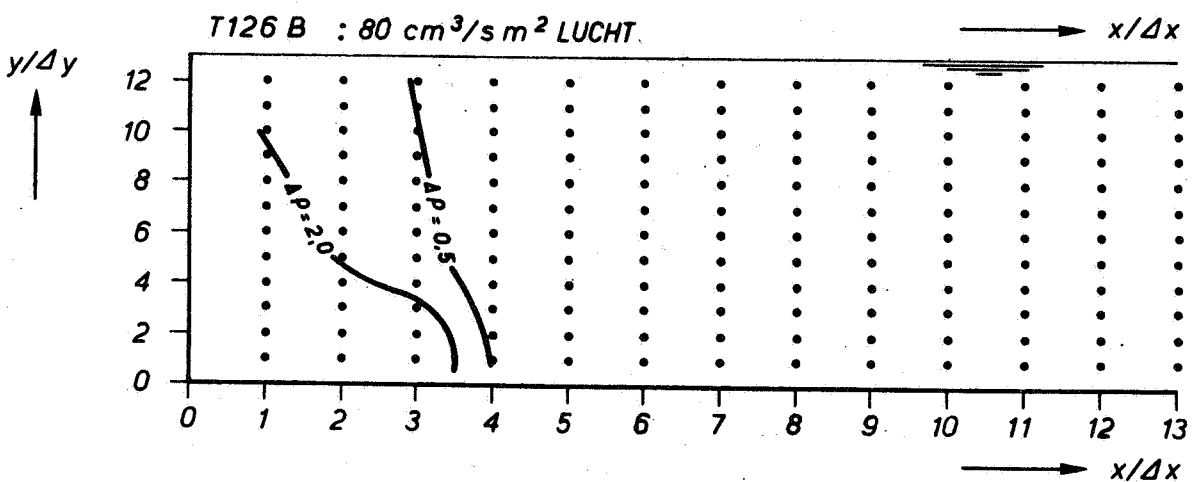
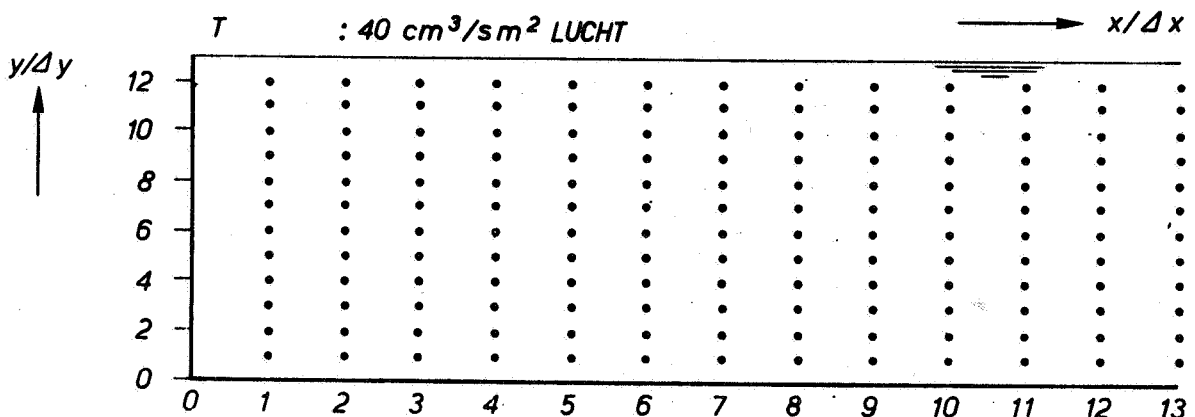
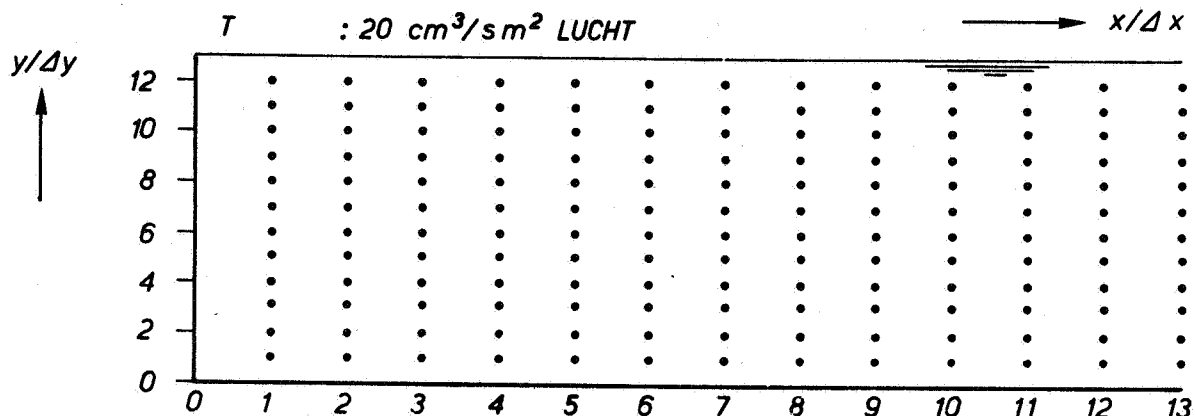
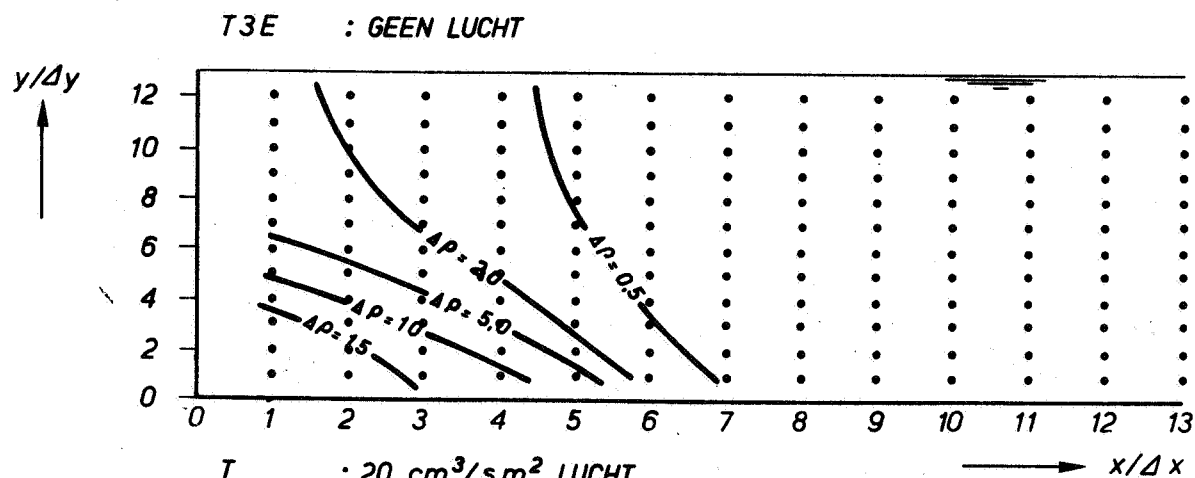
JM
 A4



LJNEN VAN GELJK DICHTHEIDSVERSCHIL BIJ RUWHEID
 d.m.v. STAAFJES (0,5 x 0,5 cm) (ΔP IN kg/m³)

ZOUTINDRINGING (MAX)
 $t/\Delta t = 12$

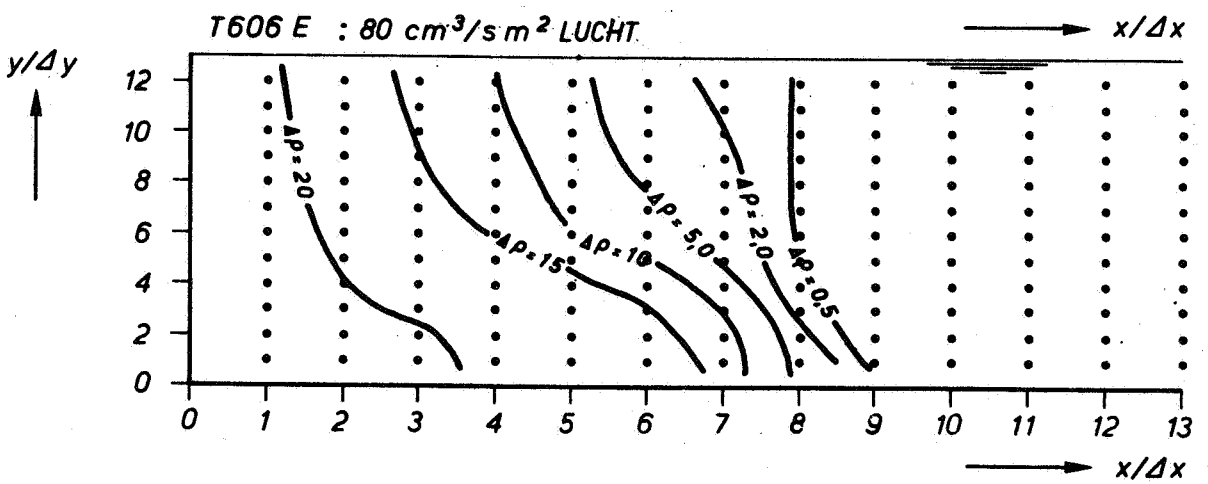
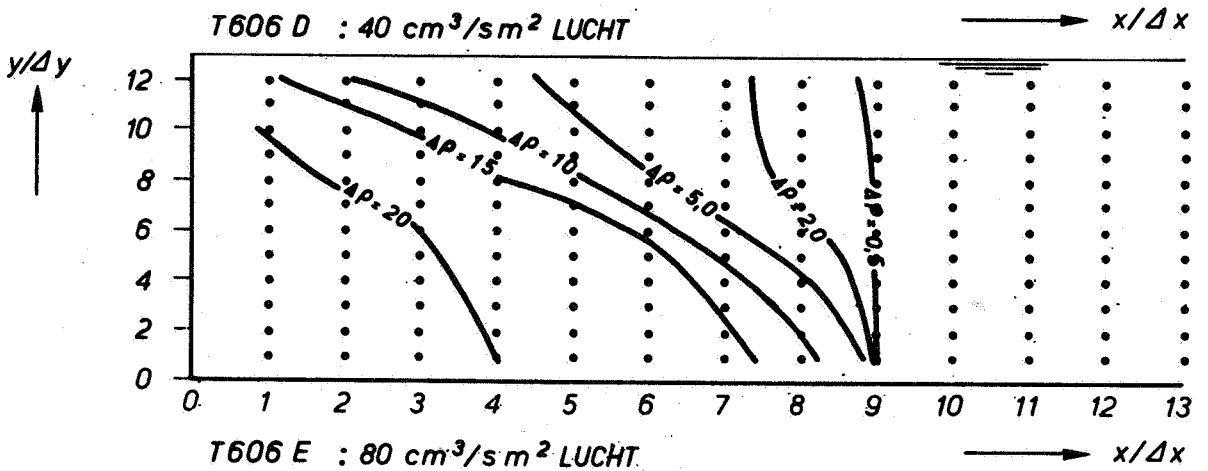
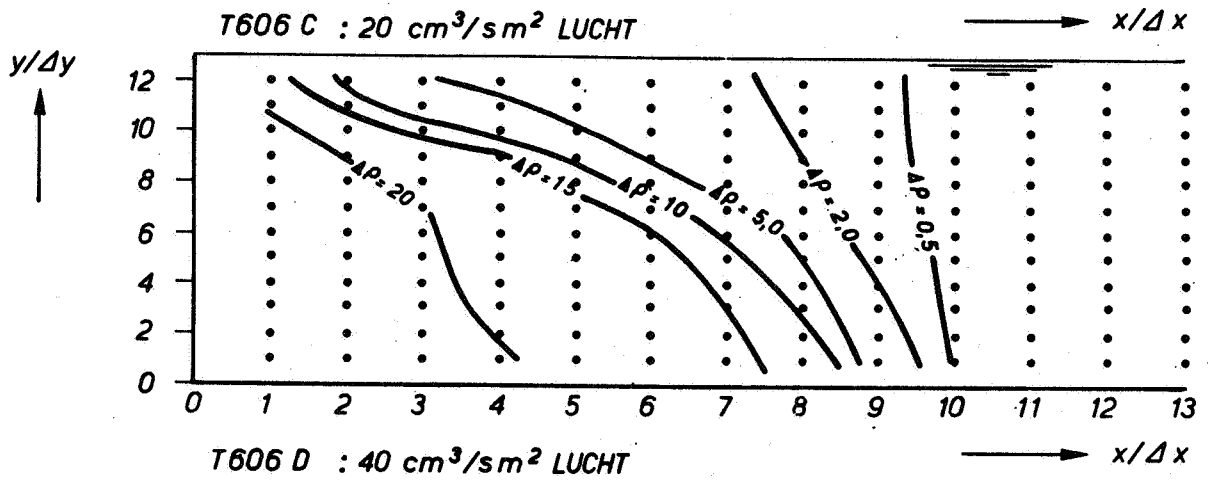
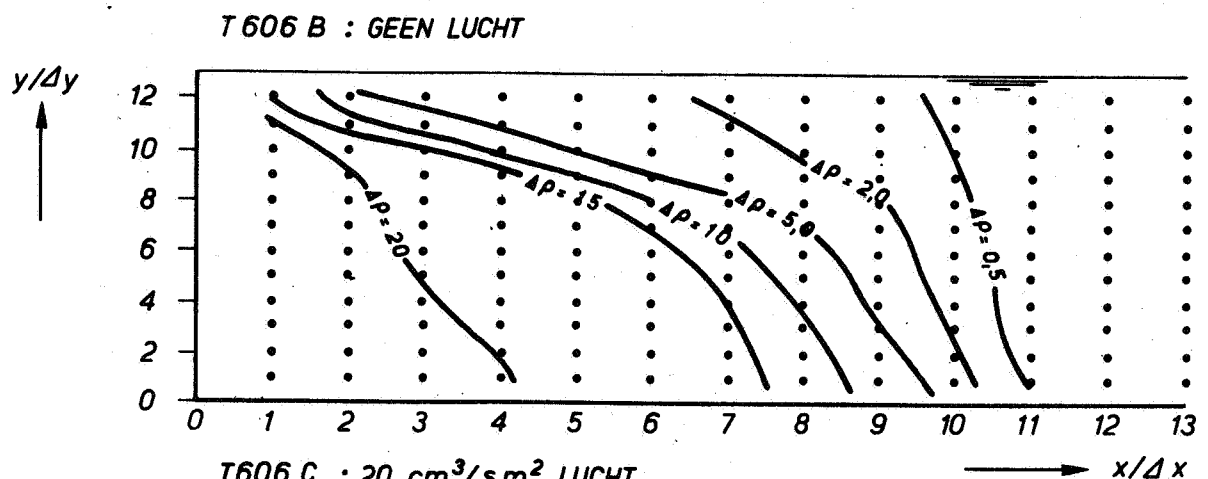
JM
 A4



LJNEN VAN GELJK DICHTHEIDSVERSCHIL BIJ RUWHEID
d.m.v. STAAFJES (0,5 x 0,5 cm) (ΔP IN kg/m³)

ZOUTINDRINGING (MIN.)
t/ Δt = 23

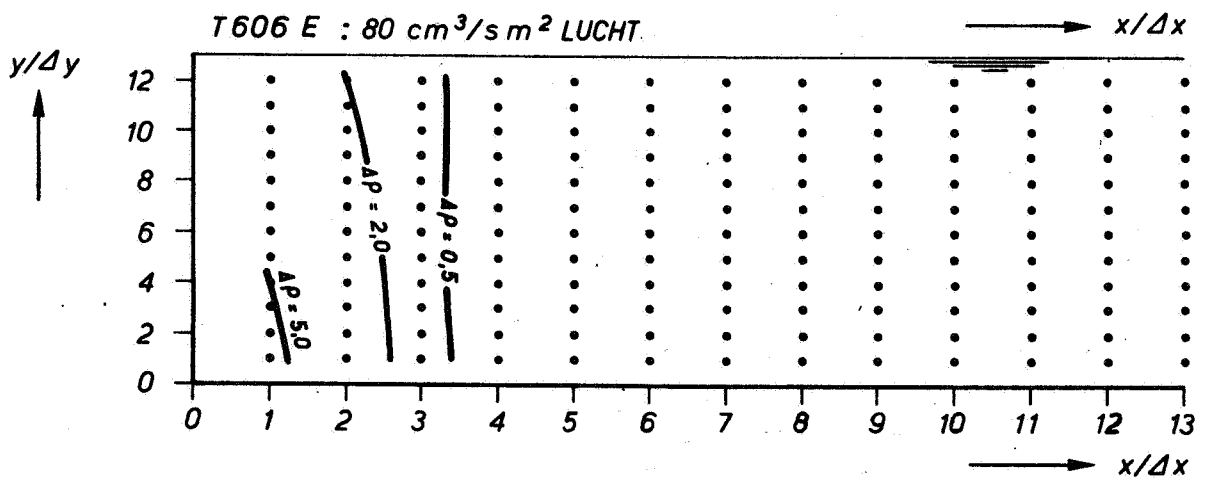
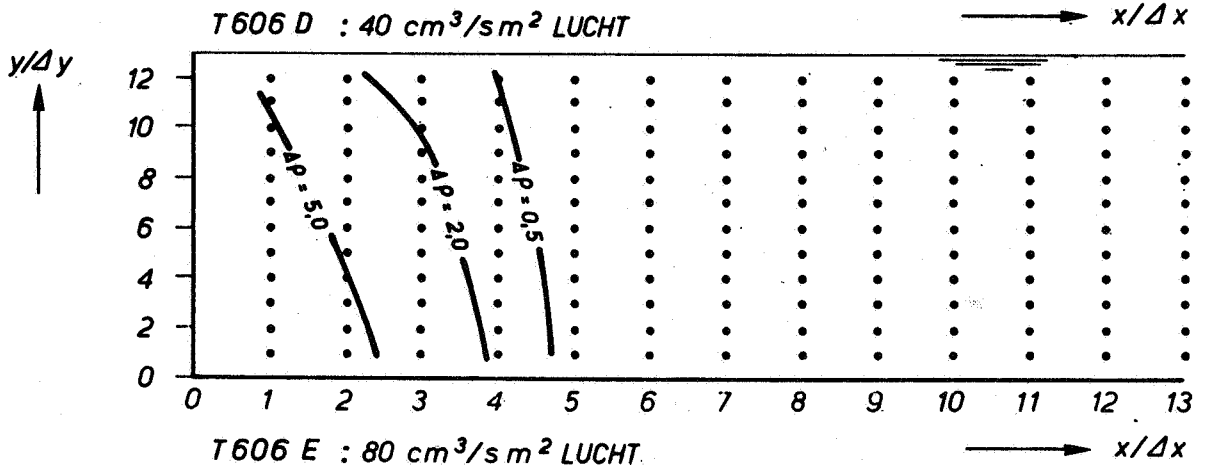
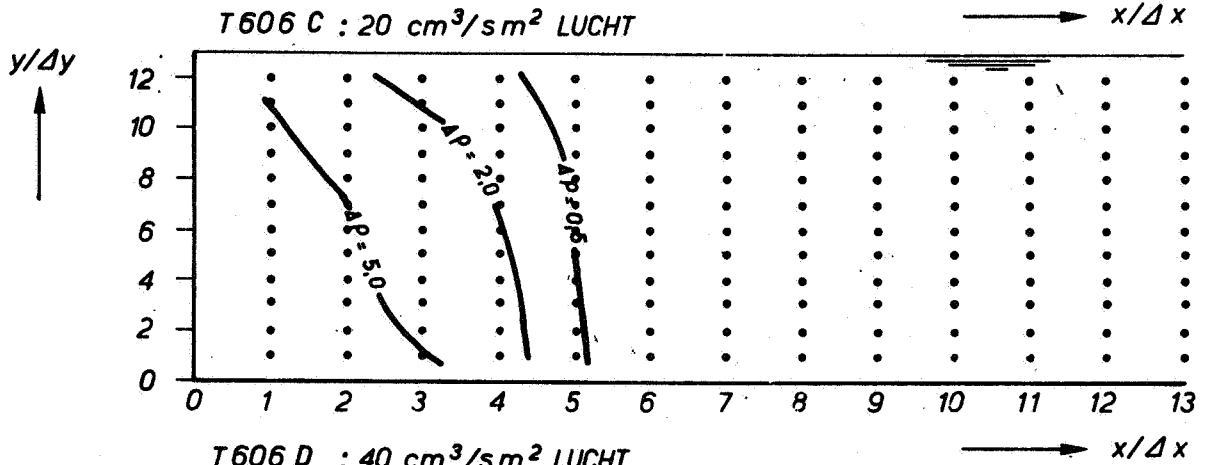
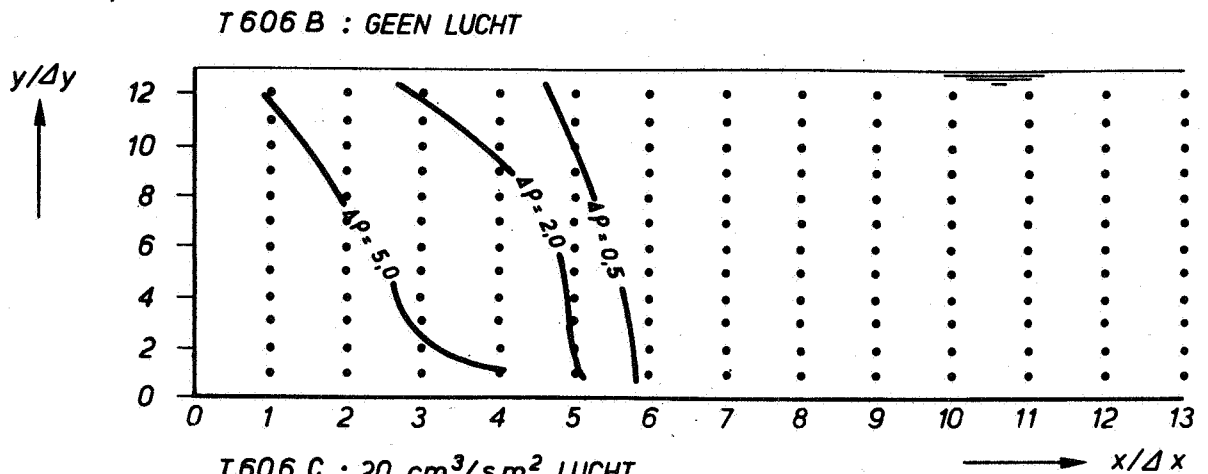
JM
A4



LJNEN VAN GELJK DICHTEIDSVERSCHIL BIJ RUWHEID
d.m.v. WANDSTRIPS (3 cm) (ΔP IN kg/m³)

ZOIJTINDRINGING (MAX.)
 $t/\Delta t = 12$

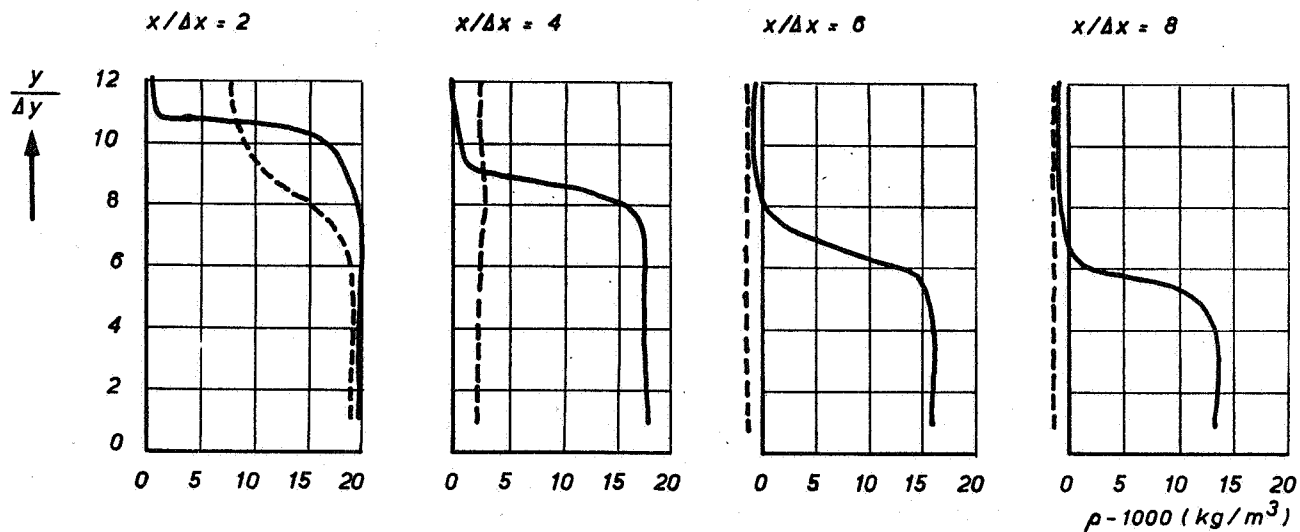
JM
A4



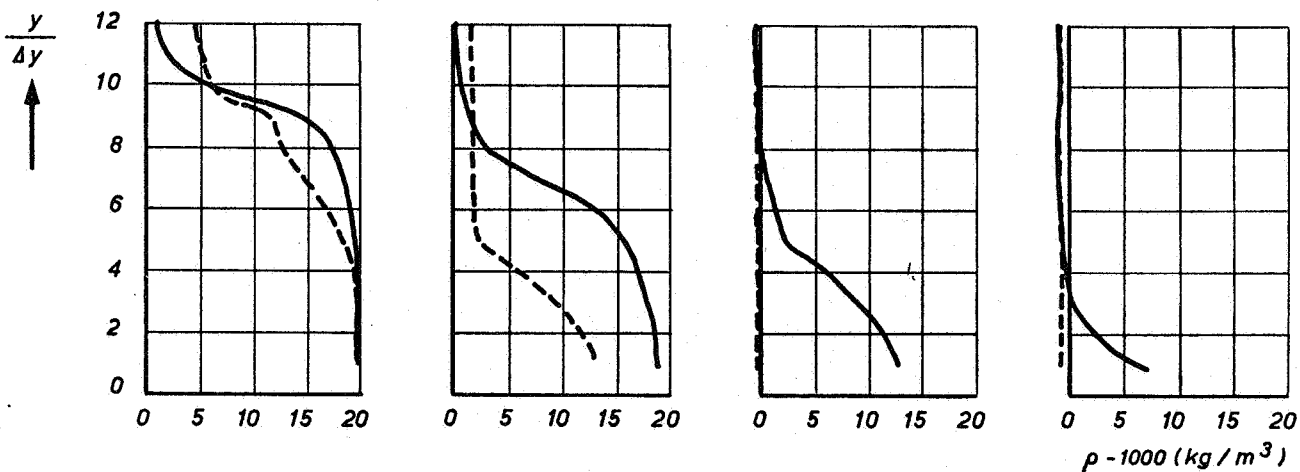
LJNEN VAN GELJK DICHTHEIDSVERSCHIL BIJ RUWHEID
d.m.v. WANDSTRIPS (3 cm) (Δp IN kg/m³)

ZOUTINDRINGING (MIN.)
 $t/\Delta t = 23$

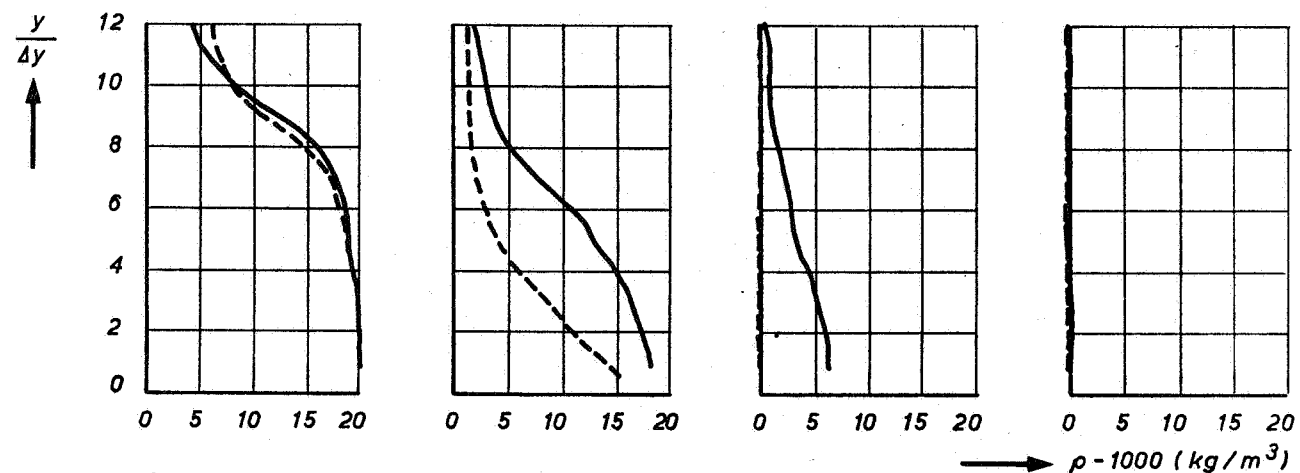
JM
A4



a) BODEMPLAATJES (2x2 cm)



b) STAAFJES (0,5 x 0,5 cm)



c) WANDSTRIPS (3 cm)

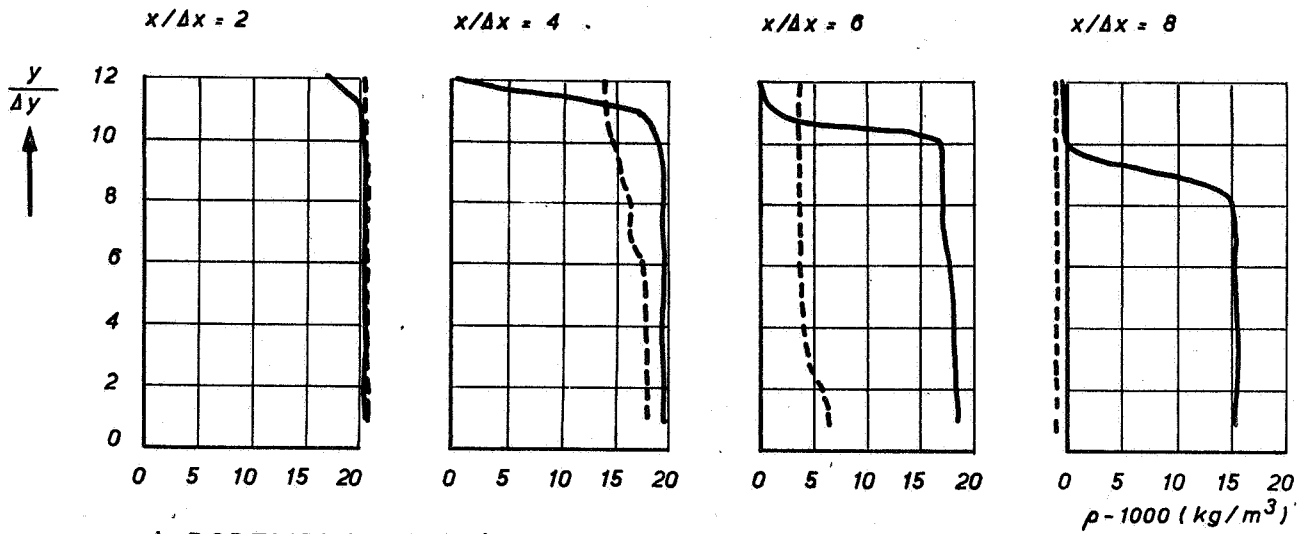
DICHTHEIDSVERTIKALEN MET EN ZONDER LUCHT
BIJ VERSCHILLENDE RUWHEIDSTYPES

$t/\Delta t = 6$

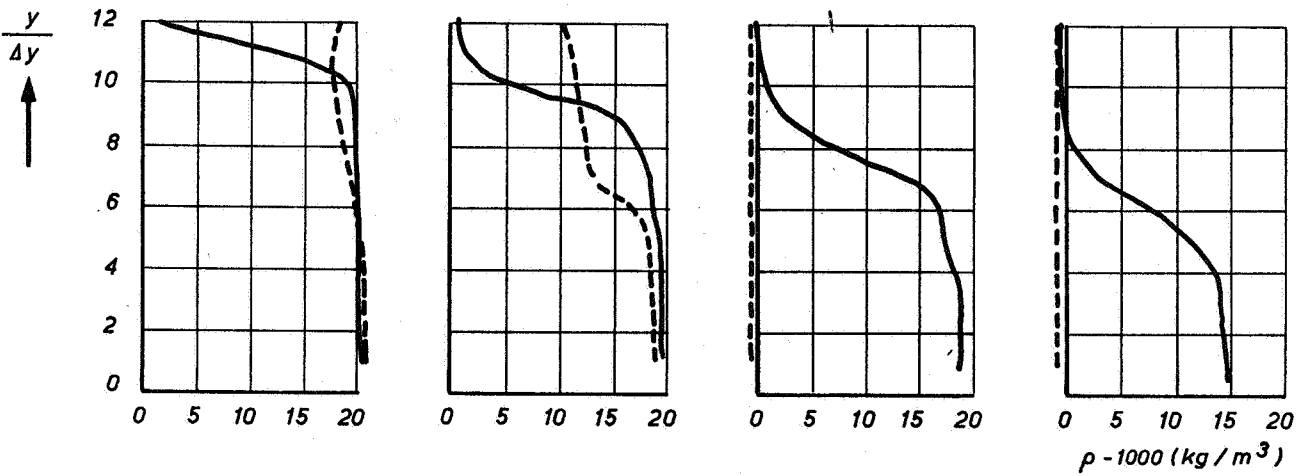
JM

— ZONDER LUCHT
- - - 80 cm³/s m² LUCHT

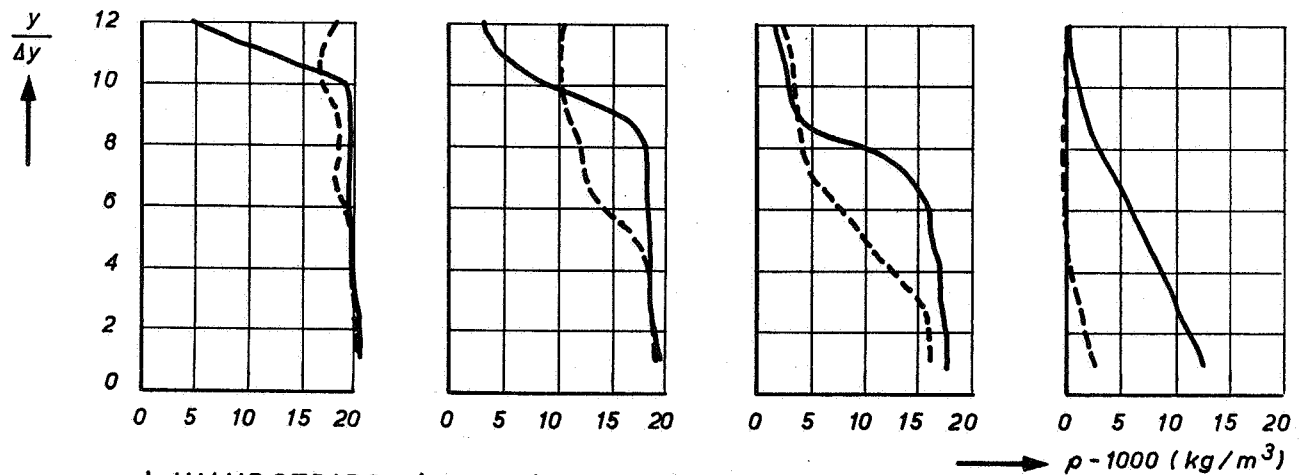
A4



a) BODEMPLAATJES (2x2 cm)



b) STAAFJES (0,5 x 0,5 cm)



c) WANDSTRIPS (3 cm)

DICHTHEIDSVERTIKALEN MET EN ZONDER LUCHT
BIJ VERSCHILLENDE RUWHEIDSTYPES

$t/\Delta t = 12$

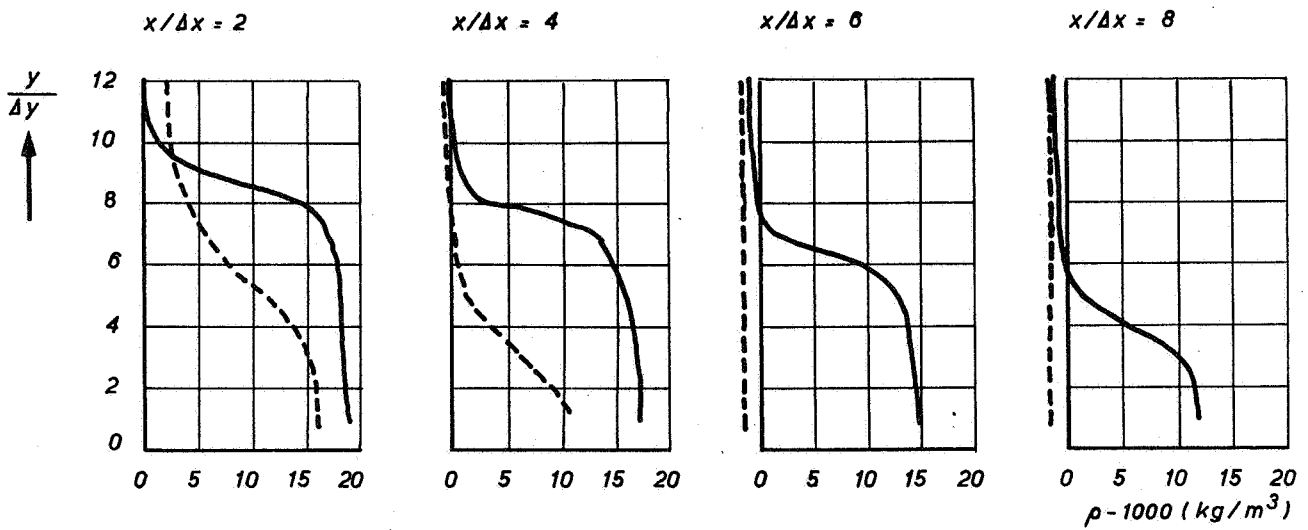
JM

— ZONDER LUCHT
- - - 80 cm³/s m² LUCHT

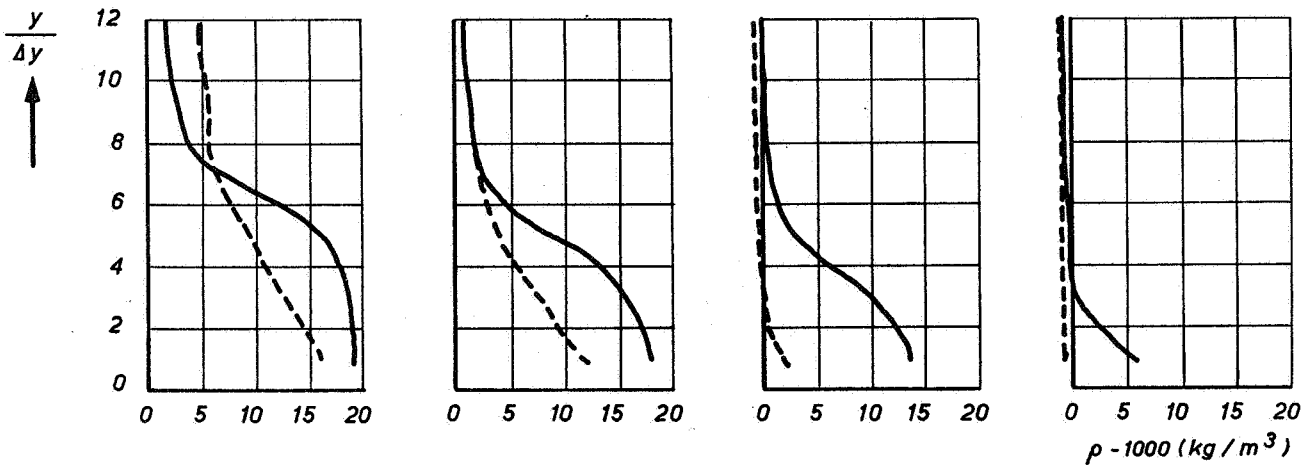
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

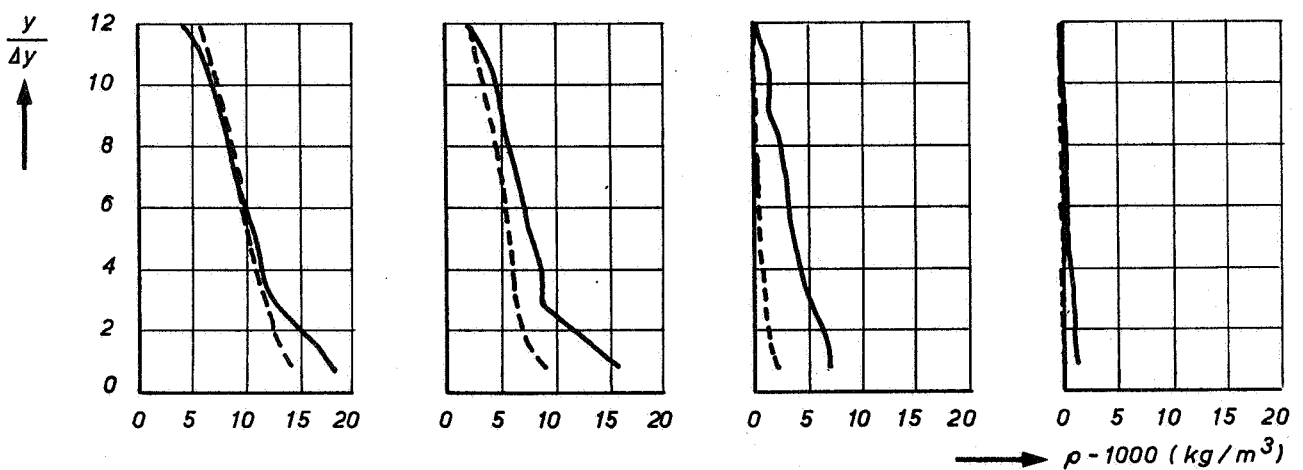
M 896 - 2457 FIG.25



a) BODEMPLAATJES (2x2 cm)



b) STAAFJES (0,5 x 0,5 cm)



c) WANDSTRIPS (3 cm)

DICHTHEIDSVERTIKALEN MET EN ZONDER LUCHT
BIJ VERSCHILLENDE RUWHEIDSTYPES

$t/\Delta t = 18$

JM

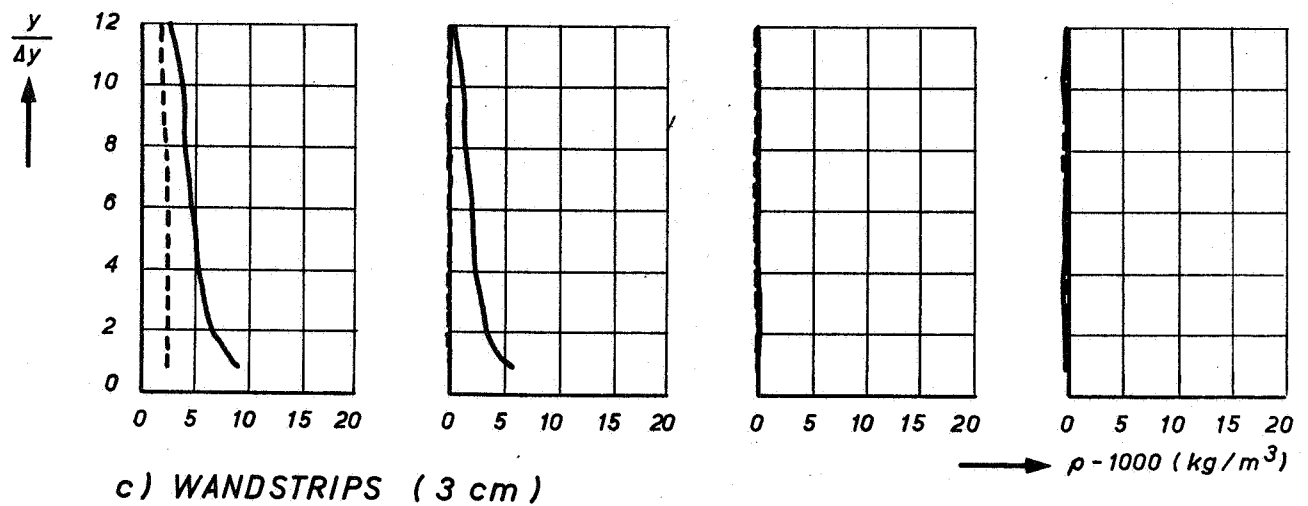
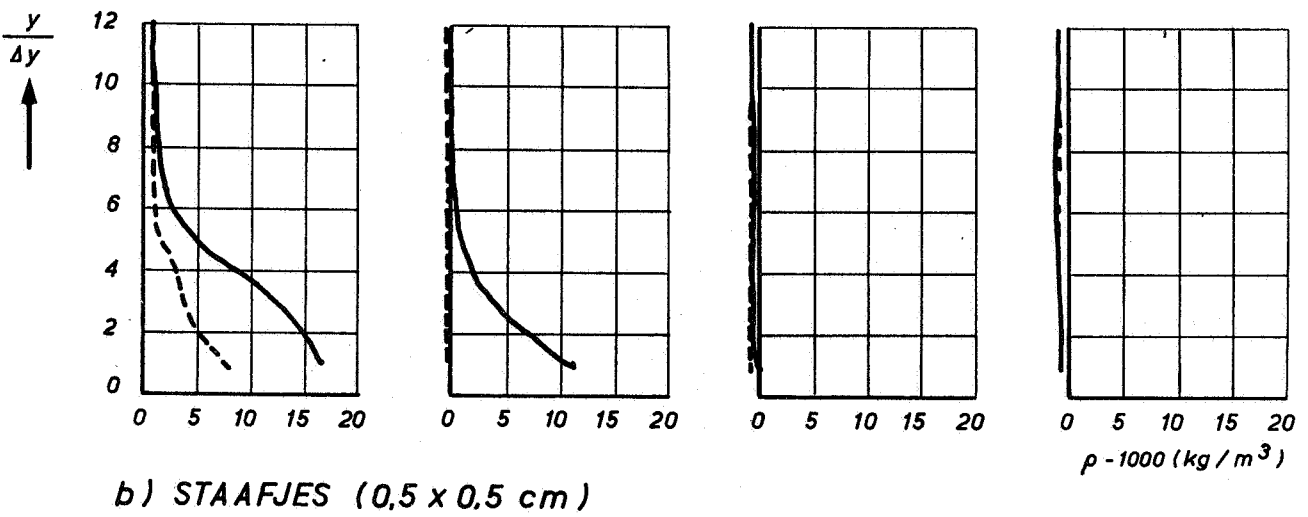
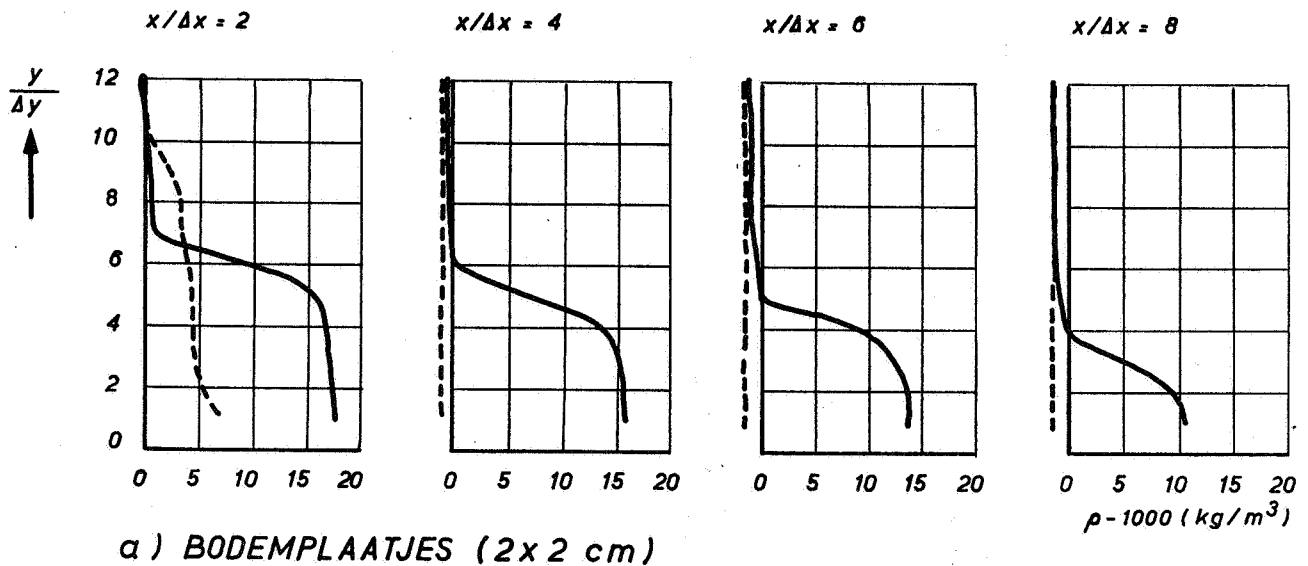
— ZONDER LUCHT.
- - - 80 cm³/s m²LUCHT

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

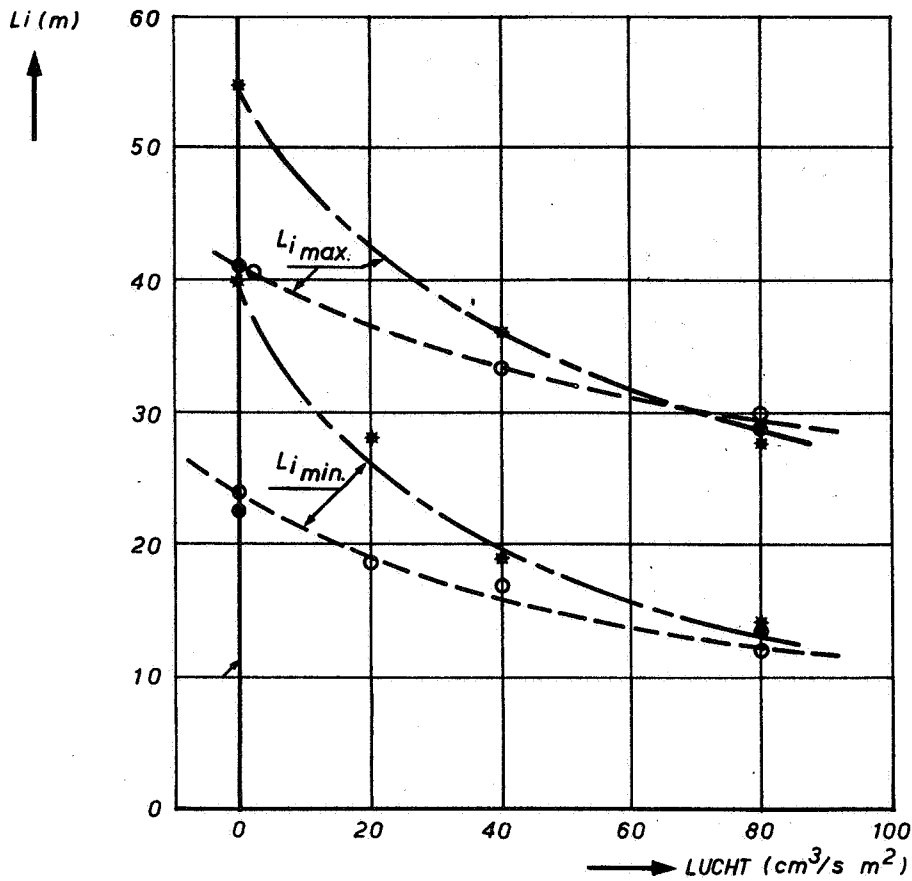
M 896 - 2458

FIG. 26

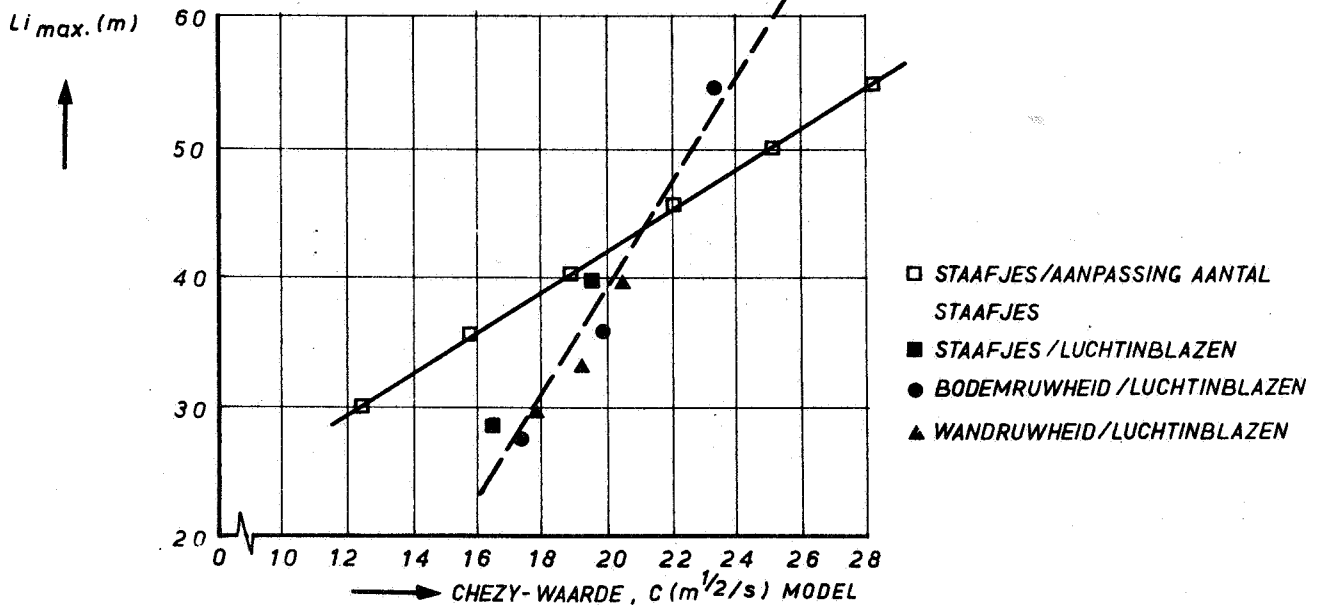


DICHTHEIDSVERTIKALEN MET EN ZONDER LUCHT
BIJ VERSCHILLENDE RUWHEIDSTYPES

$t/\Delta t = 24$	JM
— ZONDER LUCHT	A4
- - - 80 cm ³ /s m ² LUCHT	
M 896 - 2459	FIG.27



a.) VERANDERING ZOUTINDRINGING (L_i) BIJ LUCHTINBLAZEN

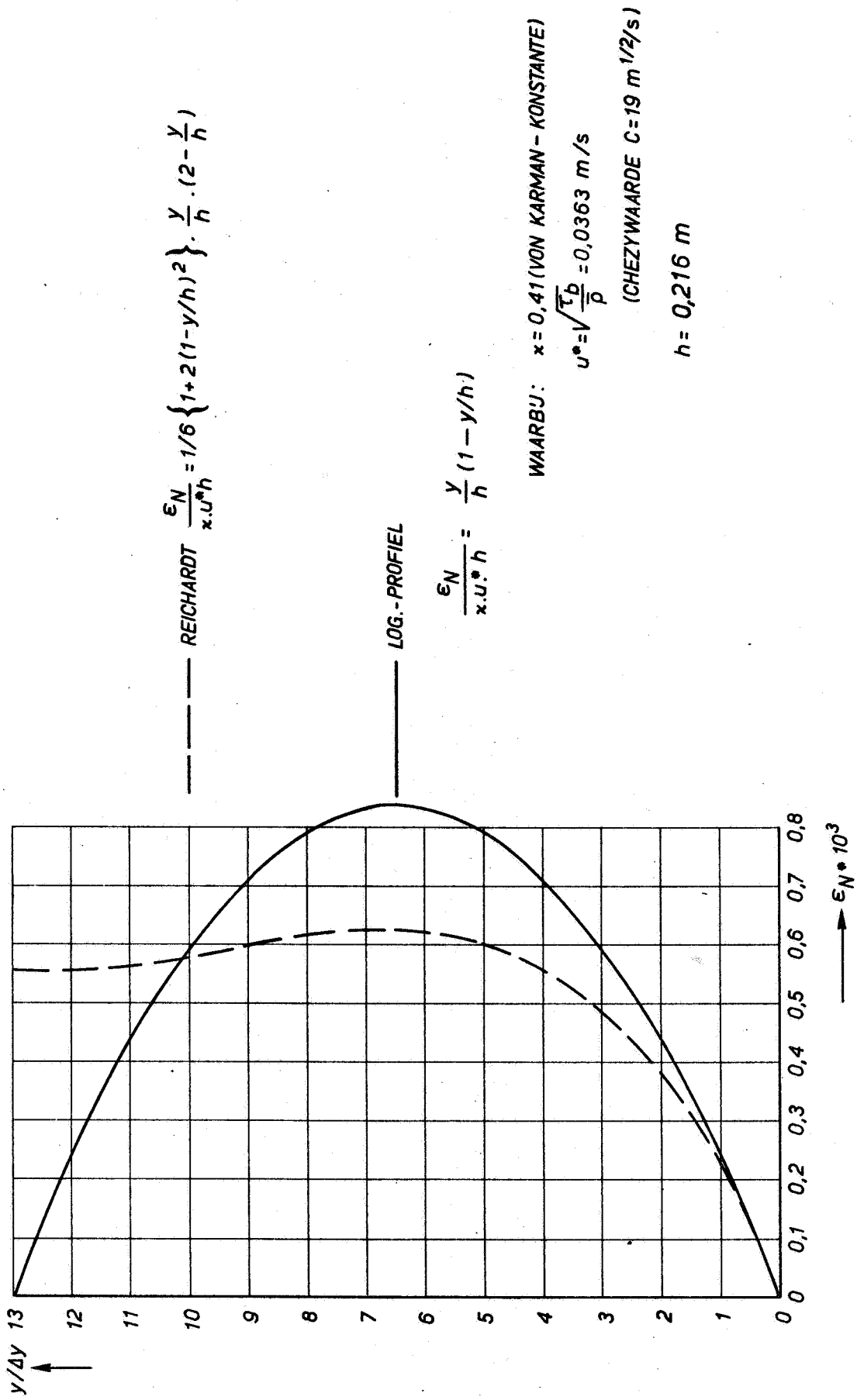


b.) VERANDERING ZOUTINDRINGING BIJ VARIATIE CHEZY-WAARDE

ZOUTINDRINGING ALS FUNKTIE VAN LUCHTDEBIET
EN VARIATIE CHEZY-WAARDE

R.R.

A4



$\Delta y = 16,6 \text{ mm}$

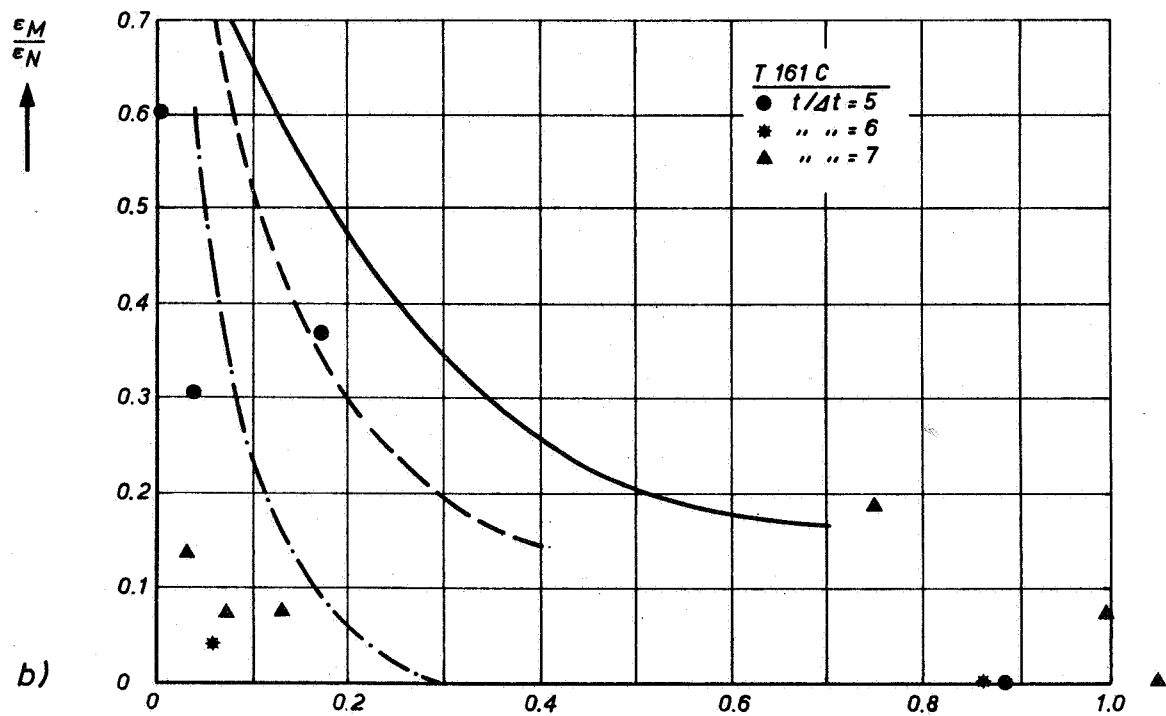
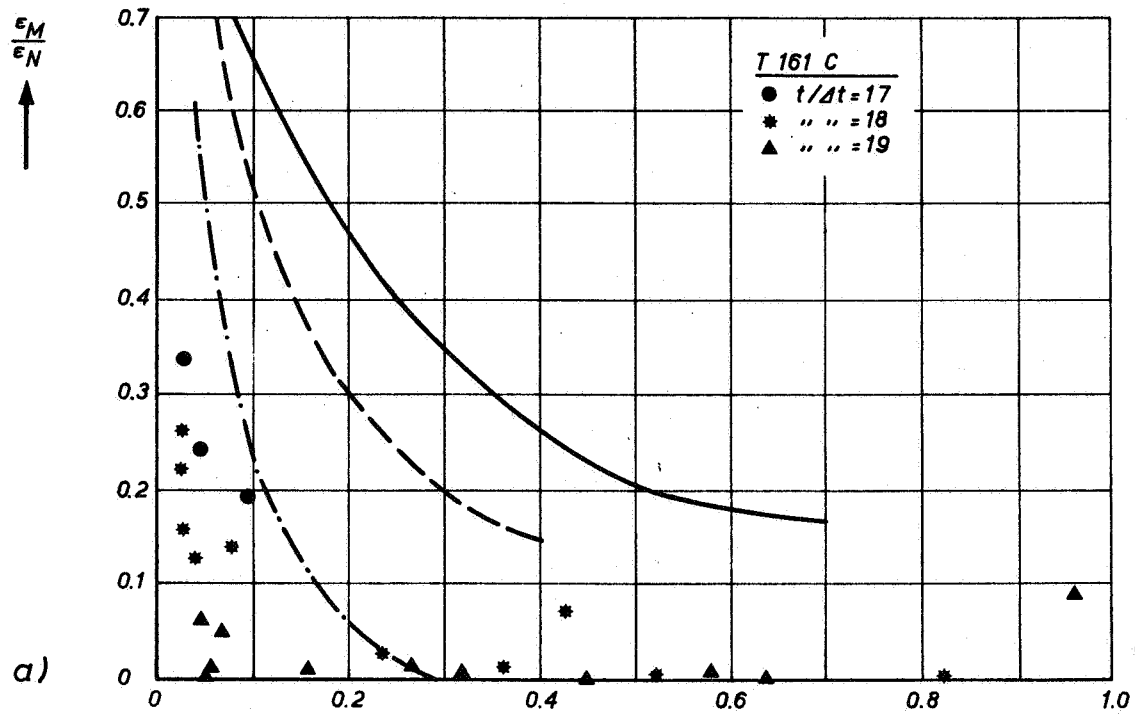
VERLOOP DIFFUSIE - KOEFFICIENT IN HOMOGENE STROMING

WK
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 2440

FIG. 29



$$\epsilon_M = - \frac{T_y}{\partial c / \partial y} = - \frac{\overline{v'c'}}{\partial c / \partial y} = - \frac{\overline{v'\rho'}}{\partial \rho / \partial y}$$

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

$$\epsilon_N = \alpha u^* y \left(1 - 11/6 y/h + 4/3 y^2/h^2 - 1/3 y^3/h^3 \right) \text{ (REICHARDT)}$$

— MUNK/ANDERSON

- - - VREUGDENHIL

- · - · - TENDENS UIT M896-XI

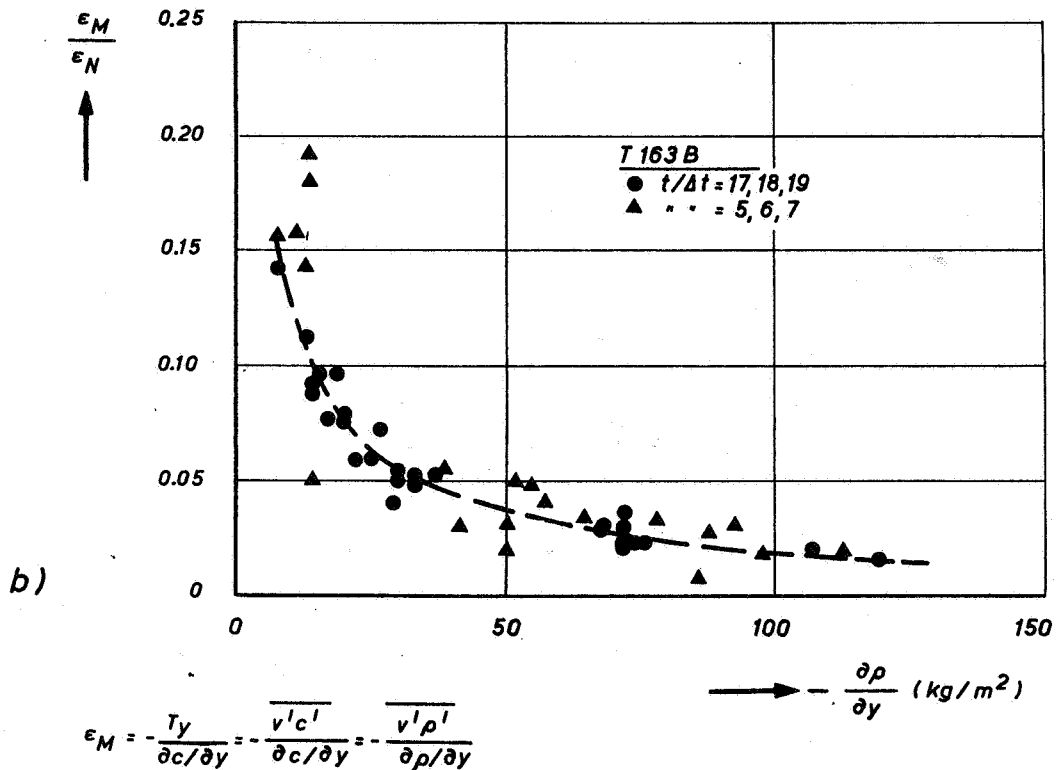
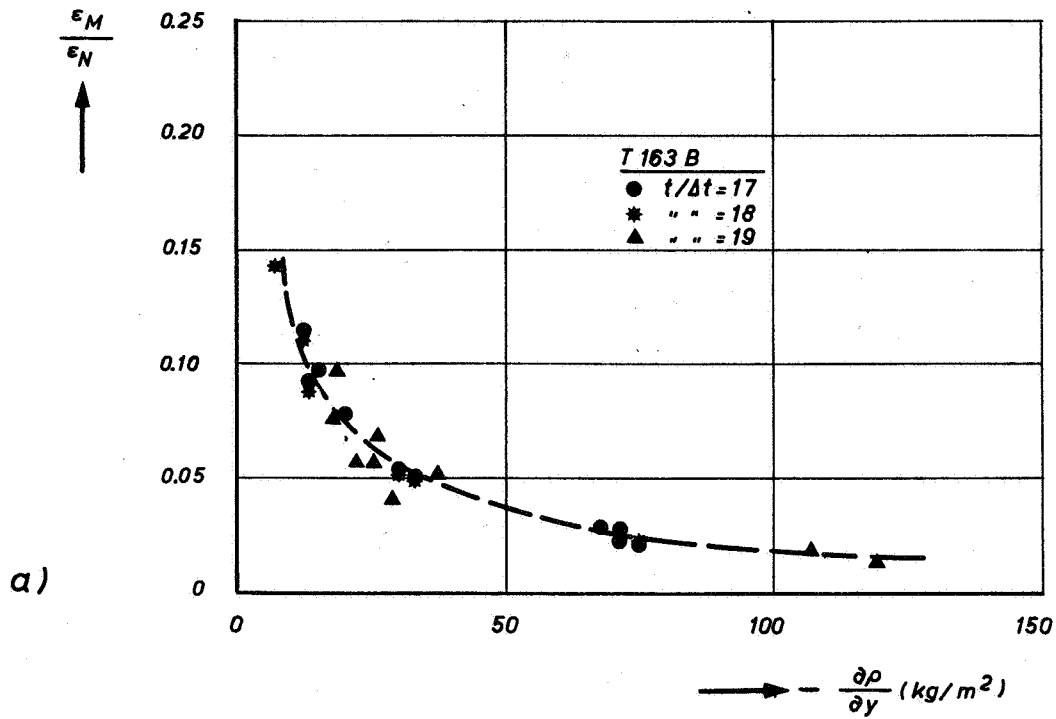
VERTIKALE DIFFUSIE-KOËFFICIËNTEN

a.) TIJDSTIPPEN ROND MAXIMALE EBSTROMING

b.) TIJDSTIPPEN ROND MAXIMALE VLOEDSTROMING

K_M

A4

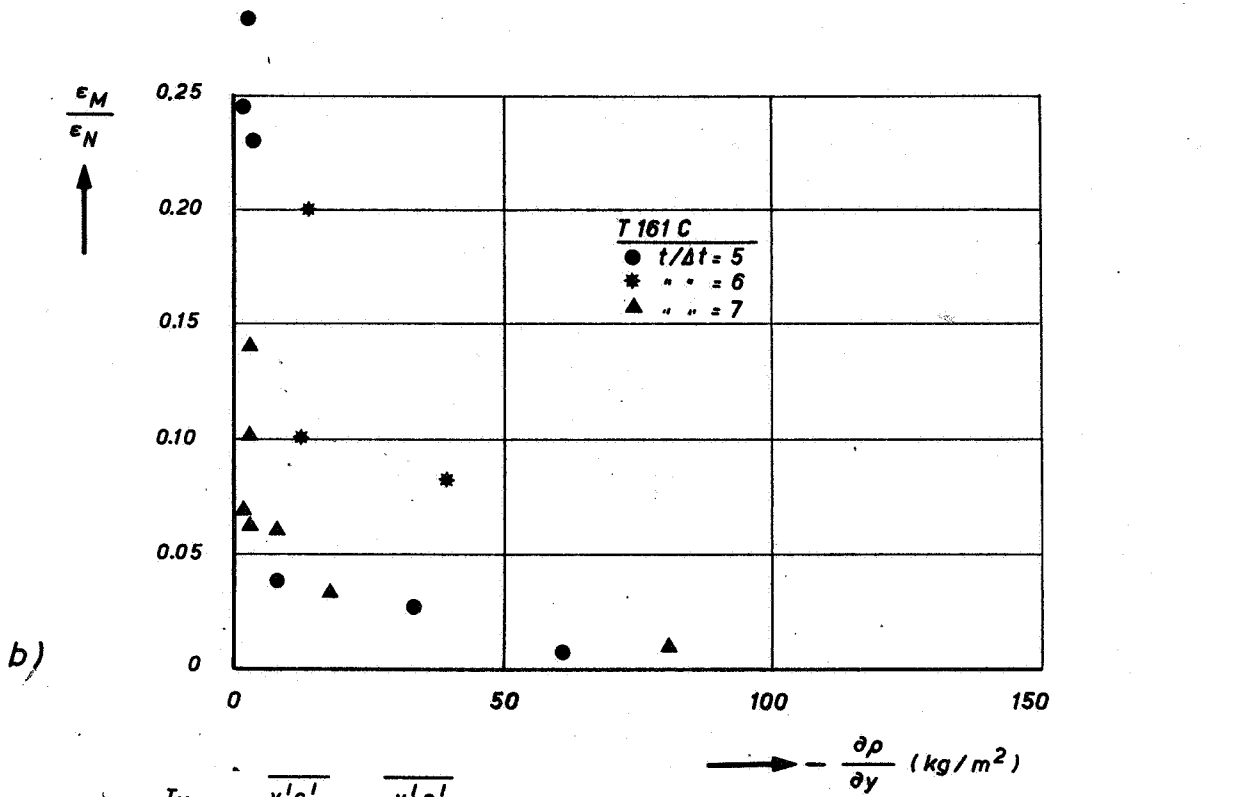
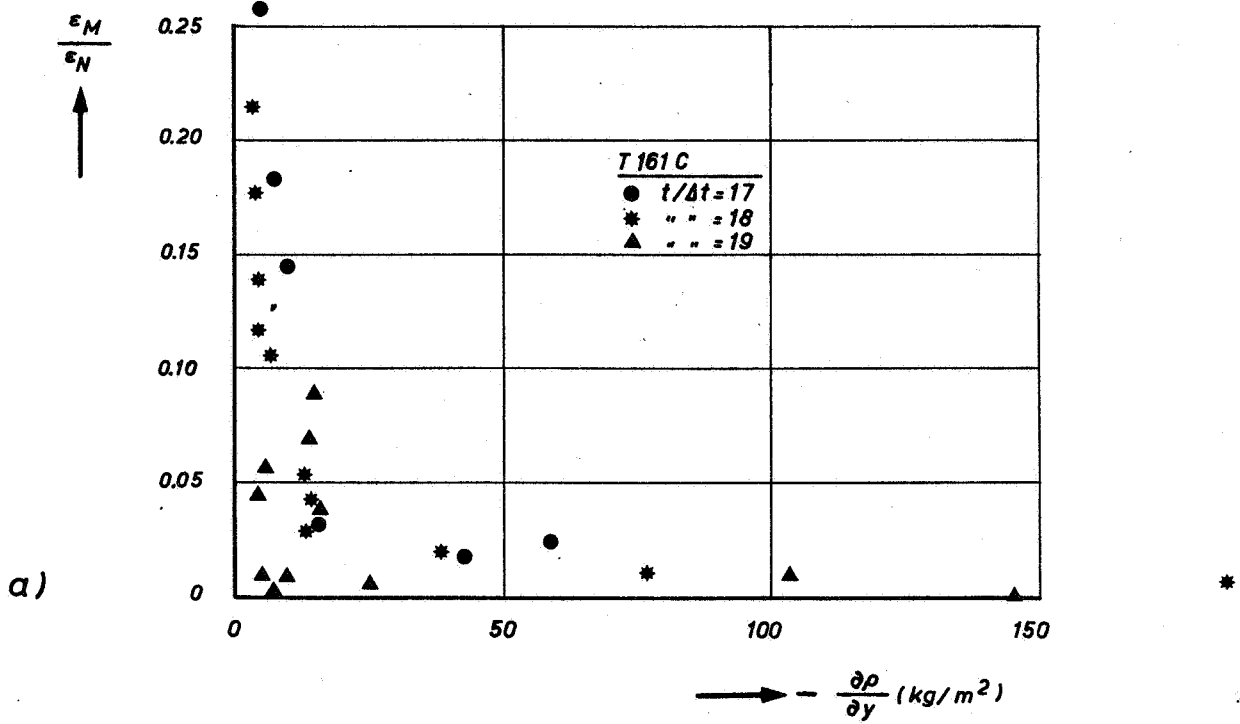


$$\epsilon_N = \alpha u * h \cdot y/h (1 - y/h) \text{ (LOG. PROFIEL)}$$

VERTIKALE DIFFUSIEKOEFFICIËNTEN BIJ BODEMRUWHEID MET LUCHT
 a) BIJ MAXIMALE EBSTROMING
 b) BIJ MAXIMALE VLOEDSTROMING + MAX. EBSTROMING

JM

A4

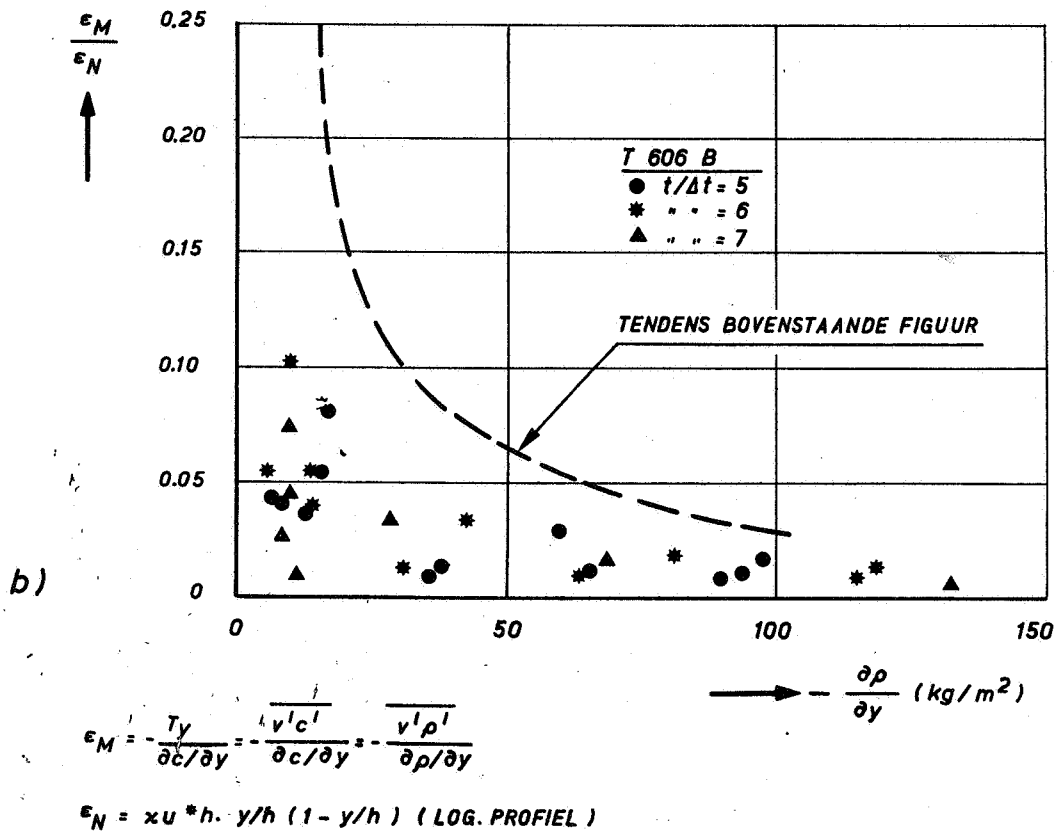
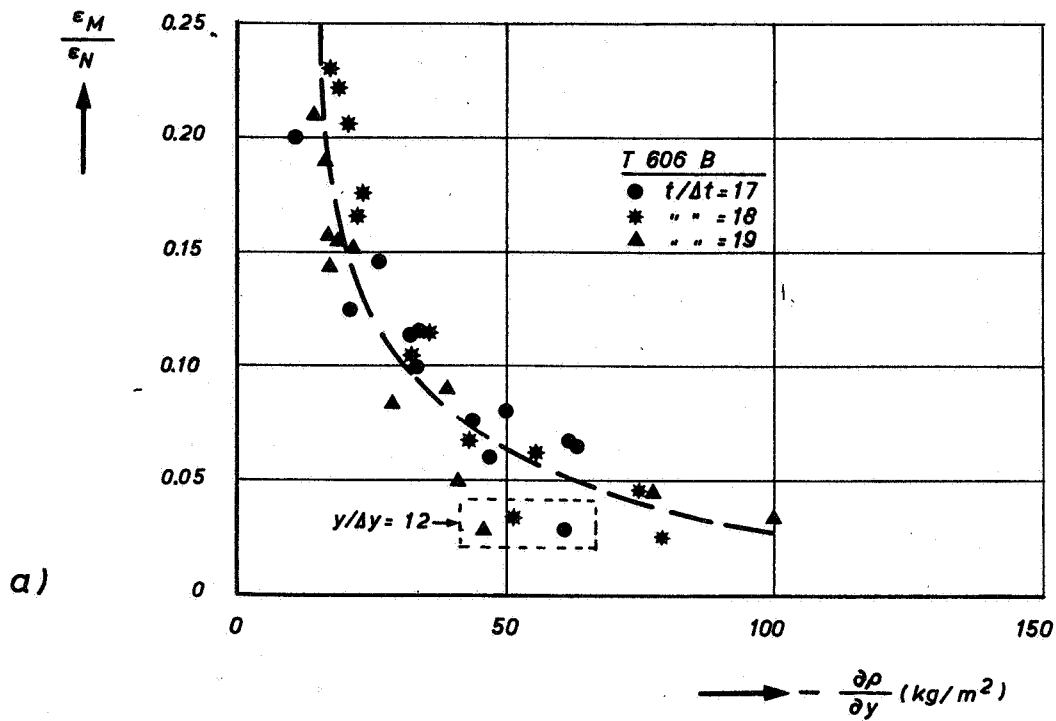


$$\epsilon_M = -\frac{\tau_y}{\frac{\partial c}{\partial y}} = -\frac{\overline{v'c'}}{\frac{\partial c}{\partial y}} = -\frac{\overline{v'\rho'}}{\frac{\partial \rho}{\partial y}}$$

$$\epsilon_N = \alpha u_* h \cdot y/h (1 - y/h) \text{ (LOG. PROFIEL)}$$

VERTIKALE DIFFUSIEKOEFFICIËNTEN BIJ BODEMRUWHEID
 a) BIJ MAXIMALE EBSTROMING
 b) BIJ MAXIMALE VLOEDSTROMING

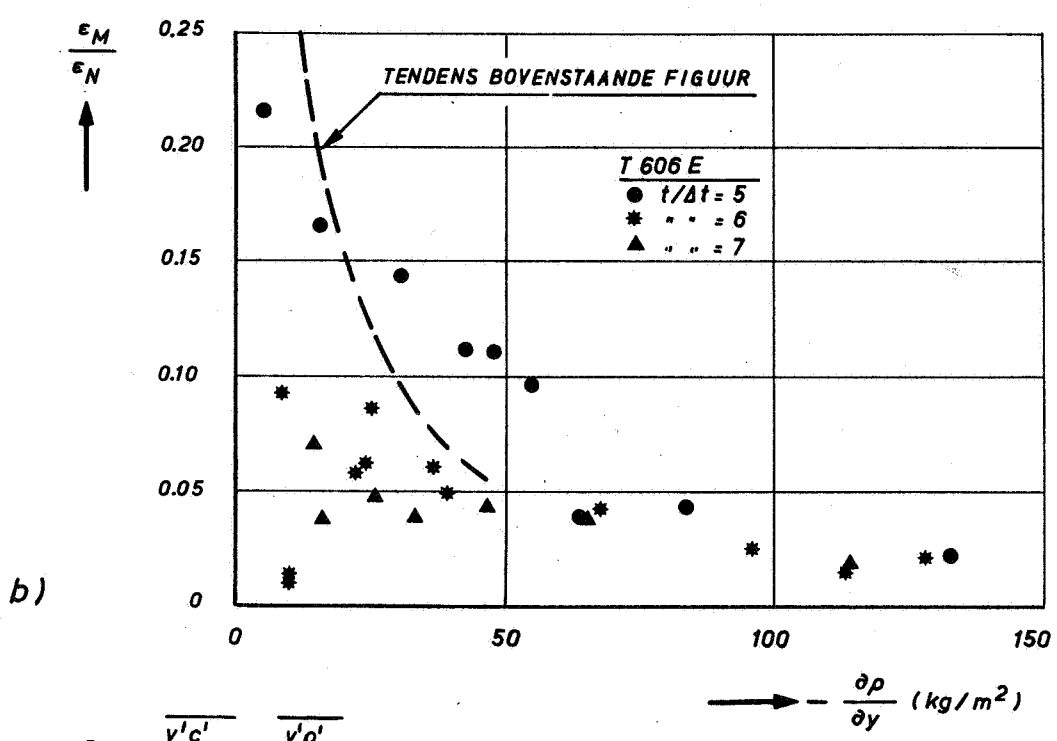
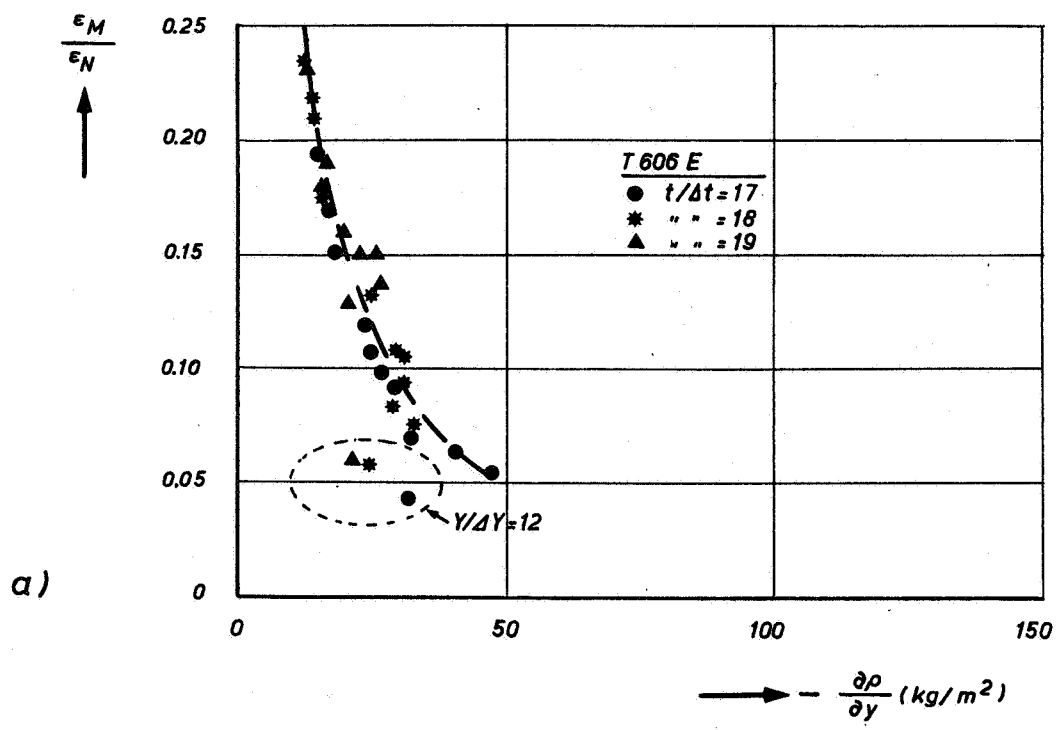
JM
 A4



VERTIKALE DIFFUSIEKOEFFICIËNTEN BIJ WANDRUWHEID
 a) BIJ MAXIMALE EBSTROMING
 b) BIJ MAXIMALE VLOEDSTROMING

JM

A4



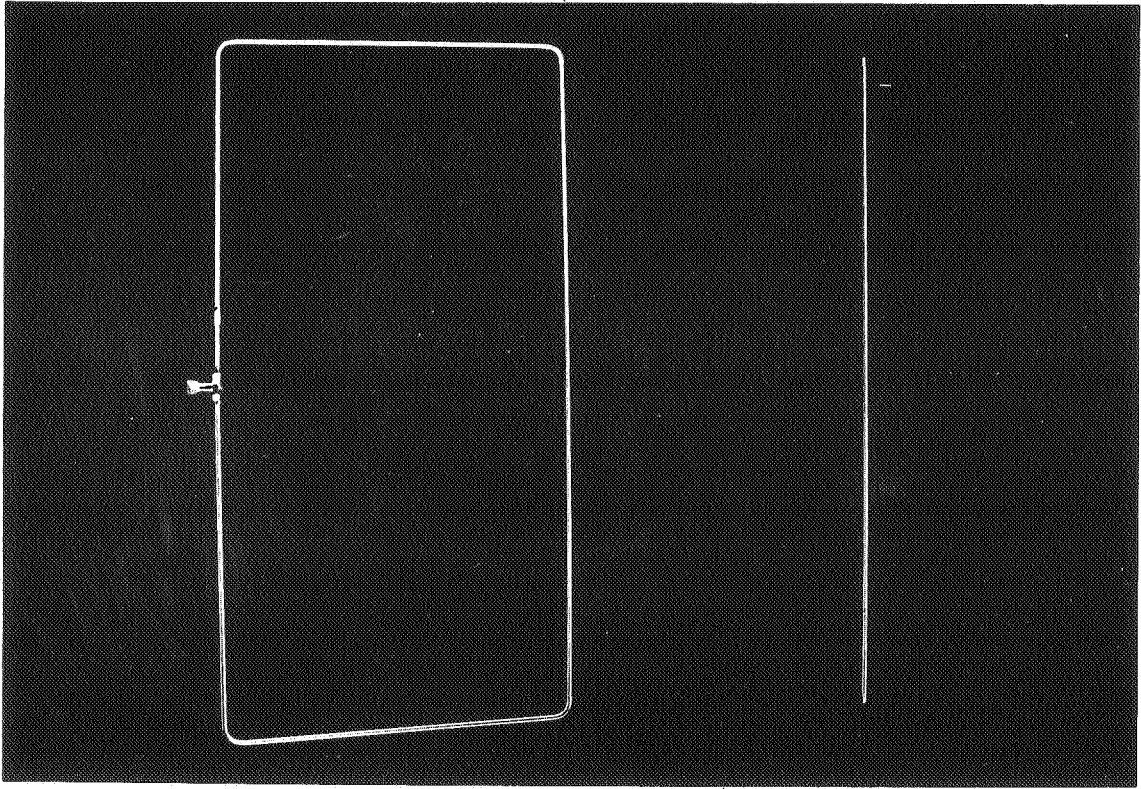
$$\epsilon_M = -\frac{\overline{v'c'}}{\partial c/\partial y} = -\frac{\overline{v'\rho'}}{\partial \rho/\partial y}$$

$$\epsilon_N = \alpha u_* h \cdot y/h (1 - y/h) \text{ (LOG. PROFIEL)}$$

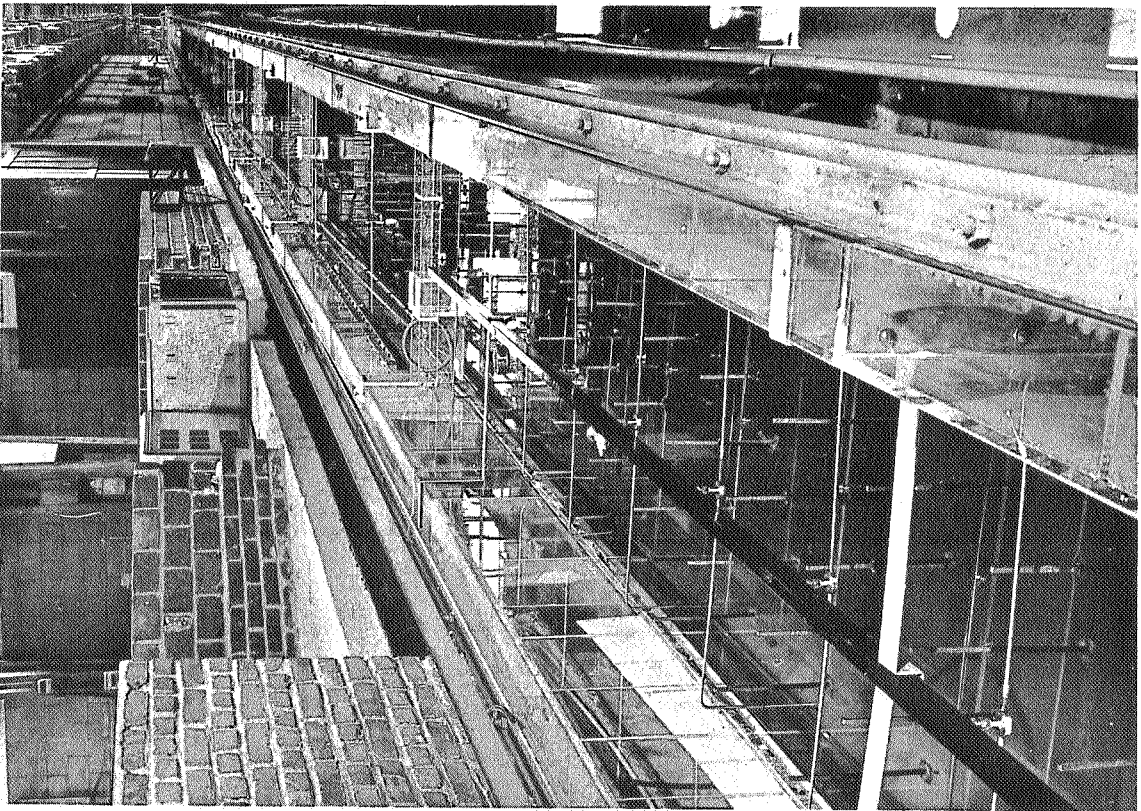
VERTIKALE DIFFUSIEKOEFFICIËNTEN BIJ WANDRUWHEID MET LUCHT
 a) BIJ MAXIMALE EBSTROMING
 b) BIJ MAXIMALE VLOEDSTROMING

JM

A4



ELEMENT VOOR LUCHTINJEKTIE



OPSTELLING IN GETIJGOOT

1. LUCHTINJEKTIESYSTEEM

p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands