

AFGEHANDELD

# waterloopkundig laboratorium

menging bij een twee-lagen-systeem  
veroorzaakt door wind

verslag modelonderzoek

---

M 1235

juni 1974

---

menging bij een twee-lagen-systeem  
veroorzaakt door wind

verslag modelonderzoek

---

M 1235

juni 1974

<u>INHOUD</u>	blz.
SYMBOLLEN	
LIJST VAN TABELLEN	
LIJST VAN FIGUREN	
REFERENTIES	
<u>1 Inleiding</u>	1
<u>2 Samenvatting modelonderzoek</u>	2
<u>3 Vooronderzoek (literatuurstudie)</u>	3
3.1 Algemene beschouwing	3
3.2 De grootte van de verticale diffusiecoëfficiënt (in de literatuur gegeven waarden)	5
3.3 Diffusie en "entrainment" in het Oosterschelde bekken	8
3.4 Bepalingen ten aanzien van de in de literatuur gevonden diffusiecoëfficiënten	8
<u>4 Voorstel tot modelonderzoek</u>	10
<u>5 Algemene beschouwingen</u>	11
<u>6 Kwantificering van de menging veroorzaakt door wind</u>	12
<u>7 Modelonderzoek</u>	15
7.1 Meetopstelling	15
7.2 Meetmethode	15
7.3 Proevenprogramma	16
7.4 Verwerking van de meetgegevens	16
<u>8 Interpretatie van de proefresultaten</u>	21
<u>9 Conclusies</u>	25
<u>10 Mogelijke toepassing van de resultaten van het modelonderzoek voor het Oosterschelde bekken voor het geval van volledige ontziltling</u>	27
TABELLEN I t/m VI	
FIGUREN	
FOTO	

## SYMBOLLEN

$c$	zoutconcentratie (massa aan zoutionen per eenheid van volume ( $\text{kg/m}^3$ ))
$c_1$	zoutconcentratie van de zoete/brakke bovenlaag
$c_2$	zoutconcentratie van de zoute onderlaag
$c_z$	schuifspanningscoëfficiënt
$g$	zwaartekrachtsversnelling
$t$	tijd
$u$	snelheidscomponent in x-richting, lokale momentane snelheid, $u = u' + \bar{u}$
$u'$	afwijking van de lokale momentane snelheid t.o.v. de tijdsgemiddelde snelheid
$\bar{u}$	tijdsgemiddelde snelheid
$u_e$	entrainment snelheid (zakkingssnelheid van het grensvlak)
$u_a^*$	windschuifspanningssnelheid
$v$	vertikale snelheidscomponent
$x$	horizontale coördinaat
$y$	vertikale coördinaat
$C_1, C_2$	evenredigheidsconstanten
$D_y$	vertikale diffusiecoëfficiënt
$E$	$E = u_e/U$ , dimensieloze entrainmentsnelheid
$F_i$	intern Froude getal
$H_1$	dikte bovenlaag tot aan grensvlak
$L$	afstand waarover het verval van bijv. het grensvlak wordt beschouwd
$Ri$	Richardson getal
$T_x$	horizontaal diffusief zouttransport
$T_y$	vertikaal diffusief zouttransport
$U$	grootheid met de dimensie van een snelheid
$W$	windsnelheid
$\Delta e_i$	verval van het grensvlak over een bepaalde afstand
$\Delta e_s$	verval van de waterspiegel over een bepaalde afstand
$\Delta H$	zakking grensvlak gedurende een bepaalde tijd
$\Delta y$	spronglaagdikte, dikte mengzone = overgangslaag tussen zoute onderlaag en zoete (brakke) bovenlaag

SYMBOLLEN (vervolg)

$\varepsilon$	$\varepsilon = \Delta\rho/\rho$
$\rho$	dichtheid
$\Delta\rho$	dichtheidsverschil; dichtheidsverschil tussen boven- en onderlaag
$\Delta\rho_t(y)$	verschil in dichtheid tussen twee tijdstippen op een gegeven niveau $y$
$\rho_a$	dichtheid lucht ( $\rho_a \stackrel{\text{def}}{=} 1,25 \text{ kg/m}^3$ )
$\tau_b$	bodemschuifspanning
$\tau_i$	grensvlakschuifspanning
$\tau_s$	schuifspanning op het grensvlak water - lucht

## LIJST VAN TABELLEN

- I Proevenprogramma .
- II Overzicht ingestelde proefomstandigheden.
- III Proefresultaten: entrainmentsnelheid ( $u_e$ ),  
diffusiecoëfficiënt ( $D_y$ ).
- IV Proefresultaten betrokken op de windsnelheid.
- V Proefresultaten betrokken op de windschuifspanningssnelheid.
- VI Proefresultaten windschuifspanningssnelheid als functie van de  
windsnelheid.

## LIJST VAN FIGUREN

- 1 Meetopstelling.
- 2 Verandering zoutverdeling bij 2-lagen systeem t.g.v. wind.
- 3 Definitie schetsen.
- 4 Voorbeeld van lokaal gemeten snelheden als functie van de tijd in de bovenlaag van het 2-lagen systeem.
- 5 Snelheidsvertikalen (tijdsgemiddeld).
- 6 Proefresultaten betrokken op de windsnelheid
$$u_e/W = f\left(\frac{\Delta\rho}{\rho} g \cdot H_1/W^2\right).$$
- 7 Verband tussen entrainmentsnelheid en het Richardsongetal betrokken op de windschuifspanningssnelheid.
- 8 Verband tussen de windsnelheid  $W$  en de windschuifspanningssnelheid  $u_a^*$ .

## REFERENTIES

1. Waterloopkundig Laboratorium, Stroomsluis Noordland in de Oosterschelde dam, Selectief afzuigen, twee dimensionaal onderzoek, verslag modelonderzoek, M1204, juli 1973.
2. Okubo, Akira "Oceanic mixing", Techn. Rep. 62, John Hopkins Univ., 1970.
3. Huber, W.D., Harleman, D.R.F., Ryan, P.J., Temperature prediction in stratified reservoirs. Journ. of the Hydraulics Division, Proc. Am. Soc. of Civil Eng., 1972.
4. Kullenberg, G., Vertical diffusion in shallow waters, Tellus XXIII 1971, 2.
5. Keulegan, G.H., Interfacial instability and mixing in stratified flows. Journ. of Research National Bureau of Standards, Res. Paper RP 2040, 43, 1949.
6. Lofquist, K., Flow and stress near an interface between stratified liquids. The Physics of Fluids, 3, 1960.
7. Phillips, O.M., The dynamics of the upper ocean, Cambridge Univ. Press, 1966.
8. Pederson, F.B., The friction factor for a two-layer stratified flow, immiscible and miscible fluids. Progress report 27, Dec. 1972. Inst. Hydrodyn. and Hydraulic Engrg. Techn. Univ. Denmark.
9. Woods, J.D., Wave-induced shear instability in the summer thermocline. J. Fluid Mech., 32, 1968.
10. Orlanski, I., On the breaking of standing internal gravity waves. J. Fluid Mech., 54, 1972.
11. Mamayev, O.I., The influence of stratification on vertical turbulent mixing in the Sea, Izv. Acad. Sci., USSR, Geoph. Ser., 870-875, 1958 (English translation p. 494-497)



REFERENTIES (vervolg)

12. Effet du vent sur deux nappes de liquides superposées et de densité différente, Laboratoire National d'Hydraulique, Chatou, Avril 1961.
13. Bengtsson, L., "Wind stress on small lakes", Bulletin Series A No. 16, Lund, 1973.
14. Tsutomu Kishi, "Possibility of the model test for the interfacial mixing of two-layered flow under wind action", Proc. of the U.S. - Japan seminar on similitude in fluid mechanics, 1967, sept.
15. Wu, "Wind - induced turbulent entrainment across a stable density interface", J. Fluid Mech. (1973), vol. 61, part 2, pp. 275-287.
16. Kato, H. and Phillips, O.M. 1969, "On the penetration of a turbulent layer into stratified fluid, J. Fluid Mech. 37, 643-655.
17. Moore, M.J. and Long, R.R., "An experimental investigation of turbulent stratified shearing flow", J. Fluid Mech. (1971), vol. 49, part 4, pp. 635-655.
18. Turner, "Buoyancy effects in fluids", Cambridge, 1973.
19. Delvigne, G.A.L., Invloed wind op snelheidsverdeling in homogene stromingen, verslag literatuur onderzoek, W152, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, februari 1974.

Nagekomen referenties

20. Long, Robert R., The influence of shear on mixing across density interfaces., The Johns Hopkins University, Technical Report No. 4 (Series C), June 1974.

N.B. Ref. 20 vormt een waardevolle bijdrage tot het onderhavige verslag.

## 1 Inleiding

Voor een snelle ontzilting van het Zeeuwse Meer na afsluiting van de Oosterschelde wordt door Rijkswaterstaat overwogen bij de spuiscuizen in de Oosterschelddedam een speciale constructie aan te leggen. Hierbij wordt gedacht aan selectief afzuigen van zout water onder een verticale wand door, zgn. zoutscherm (ref. 1). Het nut van deze constructie met betrekking tot de ontzilting hangt evenwel sterk af van de mate van gelaagdheid (zout-zoet) die in het Zeeuwse Meer verwacht mag worden. In dit verband kan men zich de vraag stellen in hoeverre bijvoorbeeld wind een dusdanige menging zou kunnen veroorzaken, dat bestaande stratificaties worden opgeheven. Op grond van deze overwegingen heeft de Waterloopkundige Afdeling van de Deltadienst van de Rijkswaterstaat aan het Waterloopkundig Laboratorium in brief nr. 8210 d.d. 18 december 1973 opdracht gegeven tot het verrichten van onderzoek naar de menging tengevolge van wind bij een twee-lagen-systeem.

Een vooronderzoek dat verricht werd door ir. J.H.G. Verhagen, omvatte een literatuurstudie, waarbij de situatie in de Oosterschelde de richtlijn vormde. Dit vooronderzoek resulteerde in een voorstel tot modelonderzoek, waarbij de menging bij een twee-lagen-systeem veroorzaakt door wind, in meer algemene zin werd bestudeerd. Dit algemene karakter van het modelonderzoek houdt in, dat de resultaten van het onderzoek niet specifiek gekoppeld zijn aan een in de Oosterschelde optredende situatie.

Tijdens het modelonderzoek is er nog een aanvullende literatuurstudie verricht. Het modelonderzoek werd uitgevoerd in de maanden december 1973 en januari/februari 1974 door J.C.A. Wenneker onder leiding van ir. A. van Mazijk in nauw overleg met ir. W.P.B.M. Lases van de Waterloopkundige Afdeling van de Deltadienst.

Het verslag werd door ir. A. van Mazijk samengesteld.

## 2 Samenvatting modelonderzoek

In een goot met een lengte van circa 10 m, waarboven zich een windtunnel bevond, is de menging onderzocht die optreedt bij een twee-lagen-systeem tengevolge van wind. De menging wordt gekwantificeerd door de erosie-snelheid, d.i. de snelheid waarmee het grensvlak zakt als gevolg van het a.h.w. eroderen van de zoute onderlaag. Het zout dat geërodeerd wordt, wordt volledig over de bovenlaag gemengd.

De resultaten van het onderzoek stemmen goed overeen met de relatie die Wu (ref. 15) gevonden heeft voor de erosiesnelheid en een Ri-getal betrokken op "overall"-grootheden:

$$u_e / u_a^* = 0,0026 (Ri)^{-1}$$

$$\text{waarbij } Ri = \Delta\rho \cdot g \cdot H_1 / \rho_a \cdot (u_a^*)^2$$

waarin  $u_e$  : erosiesnelheid

$u_a^*$  : windschuifspanningssnelheid

$\Delta\rho$  : dichtheidsverschil tussen boven- en onderlaag

$\rho_a$  : dichtheid lucht

$g$  : zwaartekrachtversnelling

Terwijl het onderzoek van Wu (ref. 15) zich beperkte tot waarden voor het Ri-getal van 70 tot 600, bestrijkt het onderhavige onderzoek een gebied van  $Ri = 40$  tot  $40.000$ , waarbij zowel het gebied van de turbulente diffusie als het gebied van de moleculaire diffusie is onderzocht.

### 3 Vooronderzoek (literatuurstudie)

#### 3.1 Algemene beschouwing

Bij een beschouwing over de mogelijk optredende menging in het Oosterscheldebekken dient de vraag gesteld te worden: Welk hydrodynamisch aspekt is dominant bij de menging in dit speciale geval? Is het alleen verticale diffusie, of spelen aanwezige variaties in het horizontale vlak bijv. in de dichtheid een overheersende rol?

Okubo (ref. 2) constateert in zijn literatuuroverzicht over menging in oceanen dat de bepaling van de verticale diffusiecoëfficiënt  $D_y$  op basis van lokale tracermetingen tot een faktor 100 kleiner kan zijn dan die gebaseerd op "overall" effecten, waarbij bijvoorbeeld temperatuursverdelingen over de gehele vertikaal worden beschouwd. De oplossing van deze paradox zou volgens Okubo kunnen liggen in het grote verschil in tijd- en ruimteschalen, die aan beide bepalingmethoden van de diffusiecoëfficiënt ten grondslag liggen. Mogelijk kan in het laatste ook het horizontale advectieve transport een bijdrage leveren in de (schijnbare) verticale diffusie.

De zout-zoet menging in het Oosterscheldebekken zal in eerste instantie slechts beschouwd worden als een proces waarin transporten uitsluitend in verticale richting plaatsvinden. Het effect van horizontale transporten door horizontaal niet uniform verdeelde concentraties wordt dus opgenomen in de verticale diffusiecoëfficiënt.

De aldus gedefinieerde diffusiecoëfficiënt is daardoor sterk projekt gebonden en volgens Okubo aanmerkelijk groter dan de werkelijke verticale diffusiecoëfficiënt.

Omdat systematische gegevens slechts aanwezig zijn voor de lokale diffusiecoëfficiënt, kunnen wij ons in deze beschouwing slechts beperken tot het bepalen van een ondergrens voor de in werkelijkheid optredende menging. Hoe groot de faktor is waarmee de werkelijke menging de aldus te bepalen ondergrens overschrijdt, is op dit moment niet te zeggen. De faktor wordt groter naarmate de concentratieverdeling van zout of temperatuur horizontaal minder uniform is.

In het geval van temperatuur stratificatie kan dit onder meer worden veroorzaakt door horizontale verschillen in opwarming t.g.v. begroeiingseffecten (lichtdoorlatendheid). Verder is menging bij oevers zowel bij zout-zoet als bij warm-koud over het algemeen groter t.g.v. de hogere turbulentiegraad ter plaatse. De variabele wind wekt oscillaties op in de spronglaag (= overgangslaag tussen zoute onderlaag en zoete bovenlaag), waardoor watersnelheden

worden geïntroduceerd die plaatsafhankelijk zijn (groter over ondiepten) en waardoor niet uniforme menging optreedt. De amplitude van de oscillatie zal bij de zout-zoetstratificatie geringer zijn dan bij een temperatuurge-laagdheid door de grotere stabiliteit van de eerstgenoemde.

In het Oosterscheldebekken is echter de mogelijkheid niet uitgesloten, dat de oscillatie van de spronglaag wordt aangeslagen in een eigenfrequentie t.g.v. de ontziltingsprocedure, die een periode heeft gelijk aan de getijperiode. Immers, een maat van de resonantie periode ( $T_{res}$ ) van de interne golf is:

$$T_{res} = \frac{2L}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot g \cdot a}}$$

waarin L een horizontale afmeting van het reservoir gemeten in de richting van de resonantiegolf is, en

$$a = \frac{\text{dikte zoete laag} \times \text{dikte zoute laag}}{\text{totaal dikte van beide lagen}}$$

Voor bepaalde realistische waarden van L en a kan deze periode samenvallen met die van de excitatie ( $T_{exc}$ )

$$T_{exc} \approx 12 \text{ uur} \quad (\text{getijperiode})$$

Bijvoorbeeld L = 15 km (breedte oscillatie)

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = 0,02$$

$$a = \frac{5 \times 5}{10} = 2,5 \text{ m}$$

$$T_{res} = \frac{30 \cdot 10^3}{\sqrt{0,5}} \text{ sec} \approx 12 \text{ uur}$$

De mogelijkheid dat de oscillatie amplitude van deze beweging extreem groot zou worden, wordt overigens beperkt, gezien de speciale bodemconfiguratie (Roompot) t.p.v. de excitatie bron.

Een duidelijke illustratie van het verschijnsel dat de lokale verticale diffusie klein kan zijn t.o.v. de schijnbare diffusie geeft de opzet van het rekenmodel van Huber, Harleman en Ryan (ref. 3) ter bepaling van de verticale temperatuurverdeling in gestratificeerde reservoirs. Dit rekenmodel verwaarloost namelijk de lokale verticale diffusie t.o.v. de verticale

menging aan de reservoirranden (in dit geval de menging bij de instroming van het koudere rivierwater in het reservoir). In dit geval blijkt het lokale mengmechanisme dus weinig te maken te hebben met het globale mengmechanisme.

Voorgaande beschouwing wijst op de beperkte van de waarde van de nu te bepalen ondergrens van de menging in het Oosterscheldebekken, gebaseerd op lokale gegevens.

### 3.2 De grootte van de verticale diffusiecoëfficiënt (in de literatuur gegeven waarden)

In de literatuur worden verschillende semi-empirische relaties gegeven tussen de diffusiecoëfficiënt  $D_y$  en het lokale Richardsongetal  $Ri$ , dat gedefinieerd wordt door:

$$Ri = - \frac{g \frac{\partial \rho}{\partial y}}{\rho \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2} \quad (3.1)$$

waarin  $\rho$  : dichtheid

$y$  : verticale coördinaat

$u$  : horizontale snelheidscomponent

$g$  : zwaartekrachtsversnelling

Het merendeel van de relaties heeft de volgende vorm:

$$D_y = D_0 (1 + \beta \cdot Ri)^{-m} \quad (3.2)$$

waarin  $D_0$  : de verticale diffusiecoëfficiënt in homogeen water

$\beta, m$  : empirisch bepaalde constanten

Een ander voorkomende relatie is (Mamayev ref. 11)

$$D_y = D_0 \cdot \exp(-0,8 Ri) \quad (3.3)$$

Bovenstaande relaties zijn meestal geverifieerd voor niet te stabiele omstandigheden, d.w.z. niet te grote waarden van het Richardsongetal. Omdat wij echter met betrekking tot het onderhavige geval (Oosterscheldebekken) meer geïnteresseerd zijn in de menging bij redelijk stabiele condities, gebruiken we voor een eerste afschatting van de verticale diffusiecoëfficiënt een semi-empirische relatie van Kullenberg (ref. 4), die gebaseerd is op o.a. tracermetingen in de natuur ter bepaling van de diffusie in een thermische spronglaag bij verschillende waarden van  $Ri$  (graden van stabiliteit).

De relatie luidt:

$$D_y = 8,9 \cdot 10^{-8} W^2 N^{-2} \left| \frac{du}{dy} \right| \quad (3.4)$$

waarin  $N^2 = - \frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dy}$

W = windsnelheid

Volgens ref. 4 is vergelijking (3.4) geldig voor  $W > 4$  m/s, terwijl voor  $W < 4$  m/sec geen duidelijke invloed van de wind op de diffusie waarneembaar is.

Voor het Oosterscheldebekken zou voor een eerste indruk t.a.v. de diffusie-coëfficiënt de volgende berekening kunnen worden gemaakt:

Daar volgens ref. 4  $D_y$  voor  $W < 4$  m/sec niet significant varieert, wordt voorgesteld:

$$W = 5 \text{ m/sec}$$

in plaats van de bij de Oosterschelde optredende tijdsgemiddelde waarde van 3 m/sec.

Stel verder dat de snelheidsvariatie  $\Delta u$  over de spronglaag in de orde van 1% van de windsnelheid W ligt, en de dikte van de spronglaag  $\Delta y = 1$  m, terwijl  $\Delta \rho / \rho$  over de spronglaag 0,02 is, dan is

$$D_y = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

Het verticale diffusieve transport door de spronglaag kan geschreven worden als (zie ook par. 6)

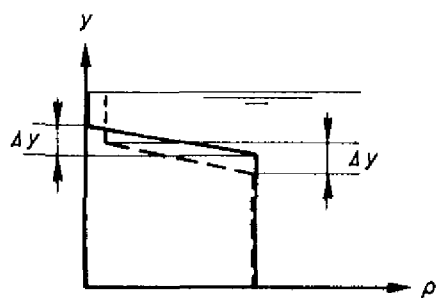
$$T_y = - D_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \quad (3.5)$$

ofwel de transportsnelheid van zout door de spronglaag is

$$u_e = \frac{T_y}{\Delta \rho} = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ cm/sec} \quad (\text{voor } \Delta y = 1 \text{ m}) \quad (3.6)$$

We nemen verder aan, dat beneden de spronglaag het verticale zouttransport verwaarloosbaar klein is, terwijl de turbulentie boven de spronglaag voldoende groot is om het naar boven getransporteerde zout homogeen over de bovenlaag te mengen. Dit betekent dat wij hiermee eigenlijk het "entrainment"-proces beschouwen, dat wil zeggen het proces van erosie door turbulentie van een niet turbulente onderlaag. De in vgl. (3.6) gedefinieerde  $u_e$  ( $= 5,6 \cdot 10^{-5}$  cm/s) is dan de "entrainment"-snelheid, dat wil zeggen van de zoute onderlaag wordt per seconde een laagje van  $5,6 \cdot 10^{-5}$  cm afgehaald en volledig met de bovenlaag opgemengd, terwijl daarbij de spronglaag qua dikte niet verandert

(zie onderstaande figuur), de dichtheid van de bovenlaag toeneemt en de dichtheid van de onderlaag ongewijzigd blijft.



figuur a

Bovenstaande schematisatie van het mengproces bij wind blijkt een redelijke benadering (zie resultaten modelonderzoek, Fig. 2 en Phillips (ref. 7)).

Door o.a. Keulegan (ref. 5) en Lofquist (ref. 6) zijn op laboratoriumschaal "entrainment"snelheden gemeten. Uitgegaan werd van een tweelagensysteem waarbij de onderste (ref. 5) of de bovenste laag (ref. 6) stilstond en de andere laag stroomde met een gemiddelde snelheid  $u$ .

De dimensieloze "entrainment"snelheid  $\frac{u_e}{u}$  werd afhankelijk gesteld van het Froudegetal betrokken op een hydraulische straal. Reeds door Lofquist werd gesteld, dat dit geen realistische grootte zou zijn. Het Froudegetal zou volgens hem betrokken moeten worden op de spronglaagdikte (vergelijk de definitie van het Richardsongetal in vgl. 3.1). Hoe het ook zij, door de geringe watersnelheden en grote lengteschaal in het Oosterscheldebekken zijn de hier voorkomende Froudegetallen veel lager dan in de experimenten van Lofquist en Keulegan. Nemen we de "entrainment"snelheden bij de laagst gemeten Froudegetallen d.w.z. de laagst gemeten "entrainment"snelheden dan vinden we: (zie Fig. 8 van ref. 6)

$$\frac{u_e}{u} \approx 1 \text{ à } 2 \cdot 10^{-5}$$

Het Froudegetal wordt gedefinieerd door

$$F_i \text{ (intern Froudegetal)} = \frac{u^2}{\epsilon g h_r}$$

waarin  $u$  : snelheid van de stromende laag (bovenlaag of onderlaag)

$\epsilon$  :  $\epsilon = \Delta\rho/\rho$

$\Delta\rho$  : dichtheidsverschil tussen boven- en onderlaag

$g$  : zwaartekrachtversnelling

$h_r$  : hydraulische straal van de stromende laag



Met  $u = 1\%$  van windsnelheid ( $W = 3$  m/sec als gemiddelde waarde) wordt

$$u_e = 3 \text{ à } 6 \cdot 10^{-5} \text{ cm/sec}$$

hetgeen vergelijkbaar is met de reeds gevonden waarde

$$u_e = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ cm/sec}$$

op basis van vergelijking (3.4) (zie boven).

### 3.3 Diffusie en "entrainment" in het Oosterschelde bekken

In par. 3.2 zijn voor de Oosterschelde significante waarden voor het verticale zouttransport gevonden, enerzijds ten gevolge van diffusie en anderzijds ten gevolge van "entrainment". Beide bijdragen tot het verticale zouttransport blijken van een gelijke orde van grootte. Nu is het "entrainment" proces alleen van belang in perioden van harde tot stormachtige wind. Door de "entrainment" wordt de spronglaagdikte gereduceerd. De "entrainment" snelheid neemt af bij toenemende dikte van de turbulente bovenlaag (ref. 7).

Tijdens perioden van redelijk windstil weer is uitsluitend het diffusieproces maatgevend. Door dit proces worden gradiënten afgevlakt waardoor de spronglaagdikte toeneemt. Omdat de transporten door beide mechanismen veroorzaakt van gelijke grootte orde zijn, behoeven we ons nu verder niet te bekommeren om meer gedetailleerde gegevens over windsterkte en windduur om te bepalen of de "entrainment" (erosie van het grensvlak), dan wel de diffusie maatgevend is.

### 3.4 Beperkingen ten aanzien van de in de literatuur gevonden diffusiecoëfficiënten

In par. 3.1 is gesteld, dat de schijnbare verticale menging van zout of warmte in een reservoir als geheel mogelijk veel groter is, dan uit de lokale verticale menging zou volgen. Hier moet nog aan toegevoegd worden, dat de gevonden lokale verticale zouttransportsnelheid slechts een schatting is, gebaseerd op materiaal van twijfelachtige waarde:

- Er is onvoldoende theoretische en experimentele kennis in de literatuur aanwezig over het "entrainment" proces in het overgangsgebied van turbulente naar laminaire stromingstoestanden (vergelijk par. 3.2: "Naar verwachting zullen in het Oosterscheldebekken veel kleinere Froudegetallen voorkomen, dan bij de experimenten van Lofquist en Keulegan")
- De in par. 3.2 bepaalde diffusiecoëfficiënt is gebaseerd op een semi-empirische relatie (vgl. 3.4), waarbij ver buiten het bereik van de meetgegevens werd geëxtrapoleerd. Deze extrapolatie kan bovendien gevaarlijk zijn, omdat :

1<sup>e</sup> de semi-empirische relatie van Kullenberg is afgeleid op basis van thermische stratificatie. Naarmate de stabiliteit van een spronglaag toeneemt, is te verwachten dat er een groter verschil optreedt tussen thermische- en zout-zoetdiffusie, omdat moleculaire effecten dan meer invloed gaan krijgen.

$$D_y \text{ mol. zout} \approx 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec} \quad D_y \text{ mol. therm.} \approx 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

2<sup>e</sup> recente literatuur (ref. 9) op basis van lokale natuurmetingen aantoonst, dat onder voornoemde stabiele omstandigheden (kleine Froude getallen o.q. grote Richardsongetallen) slechts het lokale momentane Richardsongetal ( $Ri = g \frac{\partial \rho}{\partial y} / \rho \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2$ ) van belang is voor de menging en niet het lokale Richardsongetal, gemiddeld over een korte tijd. Ter plaatse van het grensvlak is door Woods (ref. 9) een zgn. draaggolf waargenomen met een golflengte in de orde van grootte van 10 m. De "shear" (dit is de snelheidsgradient  $\partial u / \partial y$ ) ter plaatse van het grensvlak blijkt voornamelijk te worden bepaald door de amplitude en de golflengte van deze interne "draag" golf. Op deze draaggolf bevinden zich interne veel kortere golven (golflengte circa 75 cm), die breken op de toppen en dalen van de draaggolf, nl. daar waar de "shear" maximaal is, en waarbij de menging optreedt (zie verder ook ref. 10).

Anderzijds zou gesteld kunnen worden, dat de in par. 3.2 gevonden waarde van  $D_y$  nog wel praktische betekenis heeft, omdat de empirische relatie van Kullenberg (ref. 4) een goede overeenkomst geeft met zijn meetgegevens, ook bij de meest stabiele thermische stratificaties. Verder is de extrapolatie in  $D_y$  buiten het bereik van de beschikbare meetgegevens voor dit geval "slechts" een faktor 8 geweest.

#### 4 Voorstel tot modelonderzoek

Bij gestratificeerde bekkens kan wind één van de oorzaken voor de optredende menging zijn. De wind veroorzaakt nl. naast windgolven ook circulatiestromingen zowel in het horizontale als in het vertikale vlak. Beschouwen we een twee-lagen systeem (zout-zoet stratificatie) dan ontstaat er menging op het grensvlak als gevolg van genoemde stromingen, wat inhoudt, dat er een zouttransport naar boven optreedt, waardoor de zoete bovenlaag brak wordt. Zoals reeds is aangeduid in par. 3, kan de mate van menging c.q. het vertikale zouttransport gekarakteriseerd worden door de diffusiecoëfficiënt in vertikale richting  $D_y$  of de "entrainment"snelheid  $u_e$  (zie ook par. 6). Bij het onderhavige voorstel wordt de menging ten gevolge van de windgolven verder buiten beschouwing gelaten.

Ten aanzien van de vertikale diffusie-coëfficiënt  $D_y$  resp. de "entrainment"snelheid  $u_e$  kan het volgende worden gesteld:

- Uit de literatuur zijn slechts prototype gegevens bekend betreffende de diffusiecoëfficiënt voor thermische gelaagdheid als functie van de windsnelheid (ref. 4). Daar de moleculaire diffusiecoëfficiënt voor thermische stratificatie 100 x groter is dan die voor zout-zoet-stratificatie, kan niet zonder meer voor een zout-zoet-gelaagdheid gebruik worden gemaakt van deze literatuurgegevens, met name indien men naar het moleculaire gebied wil extrapoleren. (Gegevens bestrijken het gebied voor relatief kleine waarden van het Richardson getal).
- Zeer recente literatuur (ref. 15) beschrijft modelonderzoek naar de menging bij een zout-zoet-stratificatie veroorzaakt door wind. De uitgevoerde metingen bestrijken echter een gebied voor relatief kleine waarden van het Richardsongetal ( $Ri < 600$ , zie par. 8).

Uit het bovenstaande blijkt dat er nog geen informatie bestaat over de menging bij een zout-zoet-stratificatie voor grote  $Ri$ -getallen, zijnde het overgangsgedebied van turbulente diffusie naar moleculaire diffusie. Derhalve wordt modelonderzoek voorgesteld, dat tot doel heeft de menging door wind bij een twee-lagen-systeem te bestuderen met name bij grote waarden van het  $Ri$ -getal (meer stabiele situaties).

## 5 Algemene beschouwingen

Wanneer wind waait over een reservoir (bekken) dan ontstaat er in de richting van de wind een opwaaiing met als gevolg: circulatiestromingen. Indien in het bekken een zout-zoet-stratificatie aanwezig is, gaat onder invloed van de opwaaiing ook het grensvlak tussen beide lagen scheef staan en wel tegengesteld aan de richting van de opwaaiing (fig. 3). Het grensvlak gaat daarbij een faktor  $1/\epsilon$  ( $\epsilon = \Delta\rho/\rho$ ) schever staan dan de waterspiegel als gevolg van het dichtheidsverschil  $\Delta\rho$  tussen boven- en onderlaag. De opwaaiing en de daarbij optredende circulatiestromingen ontstaan doordat de wind een schuifspanning op het wateroppervlak uitoefent waarbij energie wordt overgedragen. Het is duidelijk dat één en ander ook met turbulentie gepaard gaat. Uit snelheidsmetingen, uitgevoerd bij het onderhavige modelonderzoek (zie par. 7.4) bleek, dat de fluctuatie van de lokale momentane snelheid in de orde van grootte gelijk was aan de tijdsgemiddelde snelheid, dan wel enige malen groter dan deze snelheid:

$$u' \approx \bar{u} \rightarrow u' \gg \bar{u}$$

met  $u = \bar{u} + u'$

waarin  $u$  : lokale momentane snelheid

$\bar{u}$  : tijdsgemiddelde snelheid

Op grond hiervan zou gesteld kunnen worden, dat de menging die op het grensvlak optreedt met name ook een gevolg is van de turbulentie. Zowel uit de literatuur (ref. 15) als uit de uitgevoerde proeven blijkt, dat de menging zich manifesteert door een dunner worden van de zoute onderlaag en een brakker worden van de zoete bovenlaag, terwijl het grensvlak even scherp blijft. Met andere woorden, van de zoute onderlaag wordt als het ware zout afgeschept en volledig in de bovenlaag opgemengd (zie fig. 2). Dit laatste is aannemelijk gezien de gemeten turbulentie in de bovenlaag (zie fig. 4). Deze vorm van menging wordt ook wel "erosie van de zoute onderlaag" genoemd.

6 Kwantificering van de menging veroorzaakt door wind

Voor een kwantificering van de menging bij een zout-zoet-stratificatie gaan we uit van de zoutbalans (2-dimensionale beschrijving). We beschouwen een elementje (dx, dy). Hiervoor geldt:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u\rho}{\partial x} + \frac{\partial v\rho}{\partial y} + \frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} = 0 \quad (6.1)$$

(1)   (2)   (3)   (4)   (5)

waarin  $\rho$  : dichtheid

$u$  : horizontale snelheidscomponent in x-richting

$v$  : verticale snelheidscomponent in y-richting

$T_x$  : diffusief zouttransport in x-richting

$T_y$  : diffusief zouttransport in y-richting

$x, y$  : coördinaatrichtingen: horizontaal resp. vertikaal

In vergelijking 6.1 wordt de verandering van de zoutconcentratie van het elementje (dx, dy) in de tijd (term (1)) gelijk gesteld aan de verandering van de zoutconcentratie in het elementje (dx, dy) ten gevolge van het advectioneel zouttransport (termen (2) en (3)) en het diffusieve zouttransport (termen (4) en (5)). Daar er bij een 2-lagen-systeem geen variatie in de dichtheid in x-richting optreedt, terwijl aangenomen mag worden dat de variatie in de horizontale snelheidscomponent (tijdsgemiddelde) in x-richting verwaarloosbaar klein is, kan het advectioneel zouttransport in x-richting verwaarloosbaar klein gesteld worden.

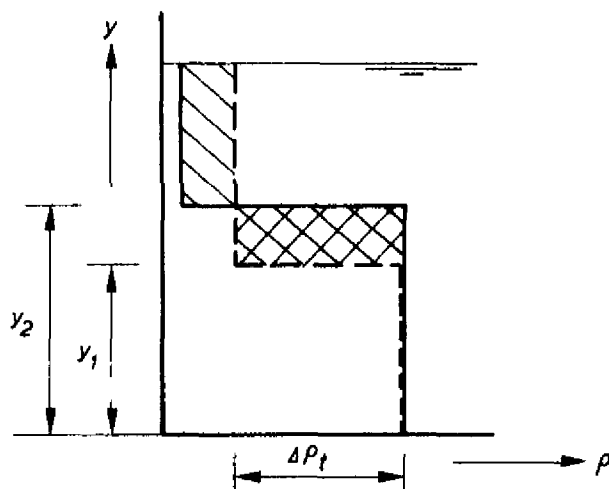
Daar verder aangenomen wordt dat de tijdsgemiddelde snelheid in verticale richting (v) bij benadering nul is, vervalt ook de term (3) in vgl. 6.1. Op grond van het feit, dat we een 2-lagen-systeem beschouwen, wordt tot slot aangenomen, dat het diffusieve zouttransport in x-richting (term (4)) verwaarloosbaar is ten opzichte van het diffusieve transport in y-richting (term (5)). Vergelijking 6.1 kan dan vereenvoudigd worden tot:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial T_y}{\partial y} = 0 \quad (6.2)$$

Integreren naar y geeft:

$$T_y = - \int \frac{\partial \rho}{\partial t} dy \quad (6.3)$$

Volgens par. 5 en ref. 15 verandert het dichtheidsverloop over de vertikaal met de tijd, als aangegeven in onderstaande figuur b. (schematische weergave)



— dichtheidsverloop op  $t = t_1$   
 --- dichtheidsverloop op  $t = t_2$

figuur b

Op tijdstip  $t_1$  bevindt zich het grensvlak op  $y_2$  en op het tijdstip  $t_2$  op  $y_1$ , terwijl de dichtheid van de bovenlaag is toegenomen (Gearceerde oppervlakken zijn gelijk). Beschouwen we het tijdsinterval

$$\Delta t = t_2 - t_1,$$

dan kan voor de afgeleide van de dichtheid naar de tijd worden geschreven:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{(\rho)_{t=t_2} - (\rho)_{t=t_1}}{\Delta t} = \frac{\Delta \rho_t(y)}{\Delta t} \quad (6.4)$$

met  $(\rho)_{t=t_2} < (\rho)_{t=t_1}$

zodat vgl. (6.3) wordt

$$T_y = - \int \frac{\Delta \rho_t(y)}{\Delta t} dy \quad (6.5)$$

Het totale zouttransport per tijdseenheid, zijnde de hoeveelheid, die van de onderlaag is opgemengd in de bovenlaag, wordt verkregen door te integreren van  $y_2$  naar  $y_1$  (zie bovenstaande figuur b).

$$T_y = - \int_{y_1}^{y_2} \frac{\Delta \rho_t(y)}{\Delta t} dy \quad (6.6)$$

De totale hoeveelheid zout die gedurende  $\Delta t$  in de bovenlaag wordt opgemengd, is dan

$$T_y \cdot \Delta t = - \int_{y_1}^{y_2} \Delta \rho_t(y) dy \quad (6.7)$$

Gaan we van de schematisatie van figuur b. uit, waarbij  $\Delta \rho_t(y)$  over het stuk  $\Delta H = y_2 - y_1$  constant is, dan schrijft men voor vgl. 6.7:

$$T_y \cdot \Delta t = | \Delta \rho_t | \cdot \Delta H \quad (6.8)$$

of

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{T_y}{\Delta \rho_t} = u_e \quad (6.9)$$

waarin  $u_e$  : zakkingsnelheid van het grensvlak, in het vervolg "entrainment"-snelheid genoemd.

Uit het bovenstaande blijkt dat men de menging bij een twee-lagen-systeem veroorzaakt door wind kan kwantificeren door de grootte  $u_e$  : "entrainment"-snelheid, die bepaald kan worden uit de zakking van het grensvlak  $\Delta H$  of uit het diffusief zouttransport in verticale richting:  $T_y$ . (zie verder par. 7.4). Een andere grootte, die bij mengingsprocessen veelal wordt gehanteerd, is de diffusiecoëfficiënt, gedefinieerd door

$$T_y = D_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \quad (6.10)$$

waarin  $D_y$  : verticale diffusiecoëfficiënt

Het verticale diffusieve zouttransport wordt daarbij rechtevenredig verondersteld met de dichtheidsgradiënt in verticale richting.

## 7 Modelonderzoek

### 7.1 Meetopstelling (zie fig. 1)

Voor het modelonderzoek is gebruik gemaakt van een goot met rechthoekige doorsnede. De goot heeft een lengte van circa 10 m en een totale diepte van 70 cm. De breedte van de goot is 50 cm.

Nadat in de goot een zoetwaterlaag was aangebracht met een dikte gelijk aan de gewenste dikte van de zoete bovenlaag, werd aan de bodem aan één van de kopse einden van de goot voorzichtig zout water onder het aanwezige zoete water ingebracht, totdat de totale waterdiepte circa 40 cm bedroeg.

Door de goot aan de bovenkant af te dekken, verkreeg men dan een windtunnel van circa 30 cm hoogte, die aan de kopse einden van de goot is aangesloten op een rondlopend circuit, waarin zich een ventilator bevond voor het opwekken van de wind. De windsnelheid werd gemeten op 15 cm boven de waterspiegel in het midden van de goot (in de gootas) met behulp van een hittedraadmeter. Op vier punten in de as van de goot werden zoutvertikalen gemeten met behulp van geleidbaarheidsmeetapparatuur. Daar voor de omrekening van geleidbaarheid naar de dichtheid van het water de temperatuur van het water bekend moet zijn, is tevens een temperatuuropnemer aangebracht. Met behulp van een laser-doppler snelheidsmeter zijn in de as van de goot snelheden gemeten.

### 7.2 Meetmethode

Na het instellen van het twee-lagen-systeem werden in de voornoemde vier punten de zoutvertikalen bepaald door de dichtheid, c.q. geleidbaarheid om de cm. te meten (meting (1)). Vervolgens werd de ventilator ingeschakeld en de windsnelheid gemeten. Het verhang van waterspiegel en grensvlak stelden zich in. Na enige tijd kon men spreken van een quasi-permanente toestand, waarbij de mate van permanentie afhankelijk was van de snelheid, waarmee het dichtheidsverloop over de vertikaal veranderde tengevolge van de optredende menging. Had zich deze quasi-permanente toestand ingesteld, dan werden opnieuw de zoutvertikalen doorgemeten (meting (2)). Vervolgens werd een bepaalde tijd gewacht, die langer of korter was al naar gelang de grootte van de snelheid, waarmee de zoute onderlaag opgemengd werd in de zoete bovenlaag. Bij de uitgevoerde proeven was dit doorgaans circa 16 uren, waarna opnieuw de zoutvertikalen werden doorgemeten (meting (3)). Daarna werd de ventilator uitgeschakeld en wachtte men circa 3 uren, totdat de waterspiegel en het grensvlak weer horizontaal stonden en de circulatiestromingen waren uitgedempt.



Een laatste meting van de zoutvertikalen volgde dan (meting (4)). De periode, gelegen tussen meting (2) en (3) werd meestal gebruikt voor het meten van snelheden met de laser-doppler.

N.B. Bij een aantal proeven zijn de metingen (2) en (3) niet uitgevoerd, terwijl anderzijds bij de proeven nr. 14 en 15 naast de metingen (2) en (3) nog meer tussentijdse metingen zijn verricht (zie de tabellen I en II).

De nauwkeurigheid van de dichtheidsmeting bedraagt:  $\pm 0,1 \text{ kg/m}^3$ .

### 7.3 Proevenprogramma

Bij het proevenprogramma zijn de volgende grootheden gevarieerd:

- de windsnelheid (W)
- de dikte van de bovenlaag ( $H_1$ )
- het dichtheidsverschil tussen boven- en onderlaag ( $\Delta\rho$ )

De instelling van de resp. proeven wordt in tabel I gegeven.

### 7.4 Verwerking van de meetgegevens

Voor de bepaling van de "entrainment" snelheid (par. 6) bij een gegeven proefinstelling worden zoutvertikalen, gemeten op twee verschillende tijdstippen, met elkaar vergeleken. De betreffende metingen zijn de metingen (1) en (4) resp. (2) en (3) (zie par. 7.2). Bij de vergelijking van meting (1) met meting (4) loopt het tijdsinterval  $\Delta t$ , nodig voor de bepaling van de "entrainment" snelheid van het moment van aanzetten tot het moment van afzetten van de ventilator. De aldus gevonden "entrainment"-snelheid kan te groot zijn, daar de menging, die optreedt vóór het aanzetten en met name ná het uitzetten van de ventilator (uitdempingsverschijnselen), niet meegenomen wordt in het tijdsinterval  $\Delta t$ , maar wel in de gemeten zoutvertikalen. De fout, die op deze manier gemaakt wordt zal relatief kleiner zijn naarmate de menging tengevolge van de wind groter is. Bij proef 2, waarbij de windsnelheid dusdanig klein was, dat die nauwelijks menging bleek te veroorzaken, is vanwege het bovenstaande voor de  $\Delta t$  een grotere waarde genomen, te weten het tijdsinterval tussen de momenten van de resp. metingen (1) en (4). Bij de vergelijking van de zoutvertikalen, bepaald uit de metingen (2) en (3), wordt

voor  $\Delta t$  het tijdsinterval tussen de resp. metingen genomen.

In par. 6. is gesteld, dat de "entrainment"-snelheid bepaald kan worden uit de zakking van het grensvlak, en ook uit het diffusieve zouttransport  $T_y$ . Dit betekent, dat per situatie meerdere meetpunten worden gevonden. Zowel uit de vergelijking van de metingen (1) en (4) als uit de vergelijking van de metingen (2) en (3) wordt de "entrainment"-snelheid bepaald uit het diffusieve zouttransport  $T_y$  en uit de gemeten zakking van het grensvlak  $\Delta H$  (zie TABEL III). Omdat de dichtheid bij de bepaling van de zoutvertikaal om de centimeter is gemeten - wat naar verhouding een zeer dichte bemonstering is - wordt de integraal uit vgl. 6.7 als volgt geschreven:

$$\int_{y_1}^{y_2} \Delta\rho_t(y) dy = \sum_{y=y_1}^{y=y_2} \Delta\rho_t(y) dy = \sum_{y=y_1}^{y=y_2} \Delta\rho_t(y) \quad (7.1)$$

met  $dy = 1$  cm.

De gemeten  $\Delta\rho_t$ -waarden (die een functie van  $y$  zijn) worden dus gesommeerd van  $y=y_1$  tot  $y=y_2$ , waar  $\Delta\rho_t(y)$  van teken omslaat (zie ook Fig. b in par. 6 en Fig. 3.b). De "entrainment"-snelheid wordt nu verkregen door de sommatie van vgl. 7.1 te delen door het dichtheidsverschil  $\Delta\rho$  tussen onder- en bovenlaag, gemeten aan het einde van het beschouwde tijdsinterval en het tijdsinterval  $\Delta t$  (zie vgl. 6.7 en 6.9):

$$u_e = \frac{\sum_{y=y_1}^{y=y_2} \Delta\rho_t(y)}{\Delta t \cdot \Delta\rho(t=t_2)} \quad (7.2)$$

waarin  $\Delta\rho_t(y)$  : verandering in de dichtheid op een bepaald niveau  $y$  gedurende het tijdsinterval  $\Delta t$ .

$\Delta\rho(t=t_2)$  : dichtheidsverschil tussen onder- en bovenlaag op  $t=t_2$ .

Voor de bepaling van het grensvlak is de volgende definitie aangehouden (Fig. 3a): Als de dichtheid van de onderlaag  $\rho_2$  is en de dichtheid van de bovenlaag  $\rho_1$ , dan wordt de positie van het grensvlak bepaald door het punt, waar de dichtheid gelijk is aan  $\frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2)$ . De "entrainment"-snelheid volgt dan direct uit de zakking van het grensvlak  $\Delta H$  en het beschouwde tijdsinterval  $\Delta t$ :

$$u_e = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (7.3)$$

Naast de "entrainment"-snelheid wordt de diffusiecoëfficiënt  $D_y$  bepaald. Deze grootte wordt betrokken op de mengzone, dit is de overgangslaag tussen de zoute onderlaag en de zoete (brakke) bovenlaag, ook wel grenslaag genoemd. Uitgaand van de definitie:

$$T_y = D_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \quad (7.4)$$

kan geschreven worden:

$$T_y = D_y \left( \frac{\Delta \rho}{\Delta y} \right)_{\text{mengzone}} \quad (7.5)$$

Het diffusieve zouttransport  $T_y$ , dat in vgl. 6.3 gegeven wordt door

$$T_y = - \int_y \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot dy$$

kan in analogie met bovenstaande afleiding voor de "entrainment"-snelheid geschreven worden als:

$$T_y = \frac{\sum_{y=y_1}^{y=y_2} \Delta \rho_t(y)}{\Delta t} = u_e \cdot \Delta \rho_{(t=t_2)} \quad (7.6)$$

(zie vgl. 7.2)

of wel: 
$$D_y = u_e \cdot \Delta \rho_{(t=t_2)} \cdot \left( \frac{\Delta y}{\Delta \rho} \right)_{\text{mengzone}} \quad (7.7)$$

Daar het diffusieve zouttransport  $T_y$  bepaald wordt uit twee metingen, gedaan op verschillende tijdstippen, wordt voor de dikte van de mengzone  $\Delta y$ , evenals voor het dichtheidsverschil over de mengzone  $\Delta \rho$  het gemiddelde van de twee metingen genomen. De  $\Delta \rho$  over de mengzone wordt als volgt bepaald: Als de dichtheid van de onderlaag  $\rho_2$  is en die van de bovenlaag  $\rho_1$ , dan is  $\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1 = (\Delta \rho)_{\text{mengzone}}$ . De dikte van de mengzone  $\Delta y$  wordt vervolgens als volgt gevonden: Bepaal de posities  $y$ , waarvoor de dichtheid  $\rho = \rho_1 + 0,1 \cdot \Delta \rho$  resp.  $\rho_1 + 0,9 \cdot \Delta \rho$ . De rechte door de aldus gevonden punten in de dichtheidsvertikaal wordt gesneden met de lijnen  $\rho = \rho_1$  en  $\rho = \rho_2$ . De posities van de snijpunten zijn  $y'$  en  $y''$ . Hieruit volgt de dikte van de mengzone  $\Delta y = y' - y''$ . (zie Fig. 3.a)

Uit de metingen (2) en (3) kan tevens het verhang van het grensvlak worden bepaald. In ref. 12 wordt een afleiding gegeven voor het verband tussen het

gemeten verhang van het grensvlak en de schuifspanning op het wateroppervlak tengevolge van de wind. De gehanteerde formule luidt: (zie ook Fig. 3.c)

$$\tau_s = g H_1 \Delta \rho \frac{\Delta e_i}{L} \quad (7.8)$$

waarin  $\tau_s$  : schuifspanning op het wateroppervlak

$g$  : zwaartekrachtsversnelling

$H_1$  : dikte zoete bovenlaag, voordat de ventilator wordt aangezet.

$\Delta \rho$  : ingesteld dichtheidsverschil tussen boven- en onderlaag.

$\Delta e_i$  : verval van het grensvlak

$L$  : lengte, waarover het verval wordt gemeten.

Hierbij zijn de volgende grootheden verwaarloosd (zie Fig. 3.c)

- verval van de waterspiegel  $\Delta e_s$  t.o.v. het verval van het grensvlak  $\Delta e_i$   
(er is een verschil van een factor  $\epsilon = \Delta \rho / \rho$ ).

- de schuifspanning op het grensvlak  $\tau_i$  t.o.v. de schuifspanning op het wateroppervlak  $\tau_s$

- de bodemschuifspanning  $\tau_b$  t.o.v. de schuifspanning op het wateroppervlak  $\tau_s$  (de zoute onderlaag staat nagenoeg stil, zie hieronder).

De met de laser-doppler gemeten snelheden zijn tijdsgemiddelden. De tijd, waarover gemiddeld is, is 4 minuten. Vanwege de variaties in de brekingsindex t.p.v. de mengzone is het niet mogelijk in dit gebied met de laser-doppler snelheden te meten. In Fig. 5 zijn enkele resultaten gegeven. Uit de metingen blijkt, dat de zoute onderlaag nagenoeg stilstaat. Metingen met kleurstof injectie hebben dit bevestigd (zie Foto). Verder heeft de kleurstof injectie aangetoond, dat het stroombeeld in de bovenlaag een driedimensionaal karakter heeft, wat een verklaring kan zijn voor het grillige verloop van de meetpunten (Fig. 5).

Vanwege dit drie-dimensionale karakter is een nauwkeurige interpolatie van de snelheid in het gebied van het grensvlak niet mogelijk. Daarnaast is tijdens het meten gebleken, dat de turbulente afwijking van de momentaan gemeten snelheid ( $u'$ ) in orde van grootte gelijk is aan de tijdsgemiddelde snelheid ( $\bar{u}$ ), dan wel enige malen groter dan deze snelheid. (Fig. 4) (De momentaan gemeten snelheid  $u$  kan gesplitst worden in een turbulente bijdrage  $u'$  en een

tijdsgemiddelde  $\bar{u}$ ). Het lijkt nu aannemelijk, dat de turbulente snelheden vooral de menging veroorzaken. Dit betekent, dat de tijdsgemiddelde snelheid  $\bar{u}$  niet zonder meer als maat kan dienen voor de energie, die de wind aan het water overdraagt in de vorm van kinetische energie en die aanleiding geeft tot menging (zie par. 5).

Bovenstaande overwegingen hebben ertoe geleid, dat de gemeten tijdsgemiddelde snelheid bij de interpretatie van de gemeten menging, veroorzaakt door de wind, verder buiten beschouwing is gebleven.

### 8 Interpretatie van de proefresultaten

In de literatuur (ref. 17) wordt de menging bij een twee-lagen systeem (die gekwantificeerd wordt door de "entrainment"-snelheid en die veroorzaakt wordt door turbulente fluctuaties) geschreven als functie van een Richardson getal:

$$E = f (Ri) \quad (8.1)$$

waarin  $E$ :  $E = \frac{u_e}{U}$

$u_e$ : entrainment snelheid

$U$ : grootheid met de dimensie van een snelheid

$Ri$ : Richardsongetal

Volgens de literatuur luidt dit verband:

$$E = C_1 (Ri)^{-1} \quad (8.2)$$

waarin  $C_1$ : evenredigheidsconstante, waarvan de grootte bepaald wordt door de definitie van het  $Ri$ -getal en de keuze van de grootheid  $U$ .

Doorgaans wordt het Richardsongetal als een "overall" grootheid gedefinieerd:

$$Ri = \frac{\Delta\rho}{\rho} g H_1 / U^2 \quad (8.3)$$

waarin  $\Delta\rho$ : dichtheidsverschil tussen onder- en bovenlaag

$\rho$ : dichtheid bovenlaag

$g$ : zwaartekrachtsversnelling

$H_1$ : dikte bovenlaag.

De relatie, gegeven in vergelijking 8.2 is als volgt in te zien. Neem aan, dat  $U$  een snelheidsgrootheid is, die evenredig is met de windsnelheid. Bij een zekere windsnelheid wordt er via de schuifspanning op het wateroppervlak een zekere hoeveelheid energie in de bovenlaag gestopt. Dit resulteert in een zekere mate van menging. Naar mate de bovenlaag dikker is, zal de hoeveelheid energie per volume-eenheid van de bovenlaag kleiner zijn en mag dienovereenkomstig een kleinere menging worden verwacht. ( $u_e \propto \frac{1}{H_1}$ ). Naarmate het dichtheidsverschil groter is, neemt de stabiliteit van het twee-lagen-systeem toe, wat betekent dat de menging afneemt ( $u_e \propto \frac{1}{\Delta\rho}$ ).

Indien echter de windsnelheid toeneemt en dus volgens bovenstaand uitgangspunt de grootheid  $U$ , dan wordt er in de bovenlaag meer energie gestopt met het gevolg dat de menging toeneemt. Energietransport is vaak evenredig met  $U^3$ , zodat  $u_e/U$  evenredig met  $Ri^{-1}$  zal zijn. Voor de interpretatie van de meetgegevens definiëren we het Richardson getal zoals aangegeven in vgl. 8.3, waaraan toegevoegd moet worden, dat de grootheden  $\Delta\rho$  en  $H_1$  bepaald zijn uit de meting voordat de ventilator wordt aangezet (meting (1), zie par. 7.2) c.q. de uitgangssituatie. De laagdikte  $H_1$  wordt gemeten vanaf het grensvlak. (Voor de definitie van het grensvlak, zie par. 7.4 en Fig. 3.a). Voor de definitie van de "entrainment"-snelheid, zoals die bij het onderhavige onderzoek is bepaald, wordt verwezen naar par. 7.4. Kiest men voor de grootheid  $U$  de windsnelheid  $W$ , dan wordt het verband, zoals weergegeven in vgl. 8.2 bevestigd. Echter voor grote waarden van  $W$  lijkt het of de lijn die de relatie van vgl. 8.2 weergeeft moet worden verschoven (Fig. 6). De oorzaak hiervan zou te wijten kunnen zijn aan de golfjes die met name bij hogere windsnelheden ontstaan.

In het bovenstaande is gesteld, dat de mate van menging bepaald wordt door de hoeveelheid energie, die de wind door middel van oppervlakte schuifspanningen aan de bovenlaag toevoert. We kunnen de oppervlakte-schuifspanning nu schrijven als (ref. 19)

$$\tau_s = c_z \cdot \rho_a \cdot W^2 \quad (8.4)$$

waarin  $\tau_s$  : schuifspanning wateroppervlak  
 $c_z$  : schuifspanningscoëfficiënt  
 $\rho_a$  : dichtheid lucht  
 $W$  : windsnelheid

Door de golven wordt nu het wateroppervlak a.h.w. "ruwer", wat een verandering van de schuifspanningscoëfficiënt  $c_z$  kan inhouden en daarmee ook van de relatie tussen de windsnelheid en de schuifspanning. Het lijkt derhalve juister om in navolging van Wu (ref. 15) voor de grootheid  $U$  de windschuifspanningssnelheid  $u_a^*$  te nemen, die gedefinieerd wordt door:

$$u_a^* = \sqrt{\frac{\tau_s}{\rho_a}} = \sqrt{c_z} \cdot W. \quad (8.5)$$

Het  $Ri$ -getal wordt dan gedefinieerd door:

$$Ri = \frac{\Delta\rho}{\rho_a} g H_1 / (u_a^*)^2 \quad (8.6)$$

waarbij dus voor de  $\rho$  uit vgl. 8.3 niet de dichtheid van de bovenlaag, maar de dichtheid van de lucht wordt genomen. Bij de uitwerking van de metingen is  $\rho = \rho_a$  gelijk 1,25 kg/m<sup>3</sup> gesteld.

Het verband tussen de schuifspanningssnelheid  $u_a^*$  en de windsnelheid  $W$ , dat bij de bewerking van de meetresultaten is gehanteerd, is bepaald uit het verhang van het grensvlak, gemeten bij een aantal proeven. Uit vgl. 8.5 volgt:

$$c_z = \frac{\tau_s}{W^2 \rho_a} \quad (8.7)$$

Dit geeft met vgl. 7.2:

$$c_z = \frac{\Delta\rho}{\rho_a} \cdot g H_1 \frac{\Delta e_j}{L} \frac{1}{W^2} \quad (8.8)$$

In Tabel VI zijn de gevonden waarden voor  $c_z$  weergegeven. Met vgl. 8.5 is vervolgens het verband tussen  $u_a^*$  en  $W$  te bepalen. Wu (ref. 15) vond voor de windschuifspanningssnelheid kleinere waarden dan gevonden bij het onderhavige onderzoek (Fig. 8). Dit verschil wordt mogelijk veroorzaakt door het feit, dat de goot van Wu slechts 2 m lang was en er een extra voorziening in zijn goot was aangebracht om eventueel opgewekte golven uit te dempen. Dit kan betekenen dat Wu geen golven kreeg en dus een "gladder" wateroppervlak, waardoor hij lagere waarden voor de windschuifspanningssnelheid vond, dan bij het in dit verslag beschreven onderzoek.

In Fig. 7 blijken de resultaten van het onderhavige onderzoek, verwerkt tot de dimensieloze grootheden

$$E = \frac{u_e}{u_a^*} \quad \text{en} \quad Ri = \frac{\Delta\rho}{\rho_a} g H_1 / (u_a^*)^2$$

een goede overeenstemming te geven met het onderzoek van Wu (ref. 15). De resultaten bestrijken een gebied, waarbij het Ri-getal varieert met een factor 1000. (Ri = order 10 tot 10.000). Dit laatste betekent een duidelijke uitbreiding van het door Wu onderzochte gebied, (de resultaten van Wu liggen in het gebied van Ri = 70 tot 600) en wel tot in het moleculaire gebied.



Dit laatste blijkt uit het feit dat bij zeer hoge  $Ri$ -getallen de dimensieloos gemaakte "entrainment" snelheid  $E$  weer toeneemt. Immers, indien de windsnelheid zo klein wordt, dat deze nauwelijks of geen menging veroorzaakt, wordt de moleculaire diffusie het maatgevende mengingsmechanisme. Daar de moleculaire diffusie een vaste waarde heeft, betekent een nog kleiner worden van de windsnelheid  $W$  een toename van de grootheid  $E$  ( $u_a^*$  wordt kleiner,  $u_p$  blijft constant). Indien dit dubbel-logaritmisch wordt uitgezet, moet men dus in het gebied voor grote waarden van het Richardson-getal een rechte vinden onder een helling 1:2 (zie Fig. 7).

N.B. In het moleculaire gebied is de diffusiecoëfficiënt  $D_y$  een constante grootheid. Definiëren we  $u_e = T_y/\Delta\rho_t$ , waarbij  $\Delta\rho_t$  het dichtheidsverschil over de mengzone is, en  $T_y = D_y (\Delta\rho/\Delta y)$  met  $\Delta\rho$  en  $\Delta y$  betrokken op de mengzone, dan geldt  $u_e = D_y/\Delta y$ . (zie ook par. 6). Het naar boven getransporteerde zout t.g.v. de moleculaire diffusie wordt vanwege de aanwezigheid van de wind en de daarbij optredende turbulentie in de bovenlaag, ook bij lage windsnelheden volledig over de bovenlaag opgemengd, zodat mag worden aangenomen, dat ook in het moleculaire gebied  $\Delta y$  bij benadering constant is en daarmee de "entrainment"-snelheid  $u_e$ .

## 9 Conclusies

Bij het onderhavige onderzoek wordt de menging bij een twee-lagen systeem tengevolge van wind gekwantificeerd door de "entrainment"-snelheid, ervan uitgaande, dat het verticale diffusieve zouttransport maatgevend is. De daarbij gemaakte verwaarlozing van de advectieve zouttransporten en van het diffusieve zouttransport in horizontale richting zal een zekere spreiding in de meetresultaten tot gevolg hebben. Een nauwkeurige schatting van de spreiding is niet te geven, maar gezien de meetopstelling is deze niet groot. Bij prototype situaties daarentegen zijn bovenstaande verwaarlozingen mogelijk niet toelaatbaar. De werkelijk optredende menging in het prototype kan groter worden, dan die men zou verwachten op grond van de meetresultaten van het onderhavige onderzoek (ref.2).

De verschillen tussen de "entrainment"-snelheden gebaseerd op het gemeten diffusieve zouttransport  $T_y$  resp. op de gemeten zakking van het grensvlak zijn grotendeels terug te voeren to het feit, dat er een mengzone tussen onder- en bovenlaag aanwezig is. Immers de formules, die gehanteerd worden voor de bepaling van de "entrainment"-snelheid uit de gemeten zoutvertikalen gaan van een scherp grensvlak uit (par. 6, vgl. 6.9).

Uit de uitgevoerde snelheidsmetingen blijkt, dat de menging niet in eerste instantie een gevolg is van de door de wind opgewekte circulatiestromingen, maar vooral van de turbulente snelheden. Op grond hiervan is de "entrainment"-snelheid  $u_e$  gerelateerd aan een Richardson-getal, dat betrokken is op "overall" grootheden en niet op lokale gradiënten. De resultaten stemmen overeen met de door Wu (ref. 15) gegeven relatie (Fig. 7):

$$u_e/u_a^* = 0,0026 (Ri)^{-1} \quad \text{voor } Ri < 3000$$
$$\text{met } Ri = \Delta\rho H_1 g / \rho_a (u_a^*)^2$$

waarin  $u_e$  : "entrainment"-snelheid  
 $u_a^*$  : windschuifspanningssnelheid  
 $\Delta\rho$  : dichtheidsverschil tussen boven- en onderlaag  
 $\rho_a$  : dichtheid lucht  
 $H_1$  : dikte bovenlaag

Voor grotere waarden van  $Ri$  (een gebied, dat in ref. 15 niet wordt bekeken) komt men in het gebied van de moleculaire diffusie. De op blz. 25 staande relatie krijgt dan de volgende vorm (Fig. 7):

$$u_e / u_a^* = C_2 \cdot (Ri)^{\frac{1}{2}}$$

waarin  $C_2$ : evenredigheidsconstante.

Voor de schuifspanning  $\tau_s$ , die de wind op het wateroppervlak aanbrengt, kan de volgende vergelijking worden gegeven (ref. 19)

$$\tau_s = c_z \cdot \rho_a \cdot W^2$$

waarin  $\tau_s$  : schuifspanning  
 $c_z$  : schuifspanningscoëfficiënt  
 $W$  : windsnelheid

Zowel uit het huidige onderzoek als uit ref. 15 blijkt dat  $c_z$  geen constante is. Met name, wanneer bij toenemende windsnelheid zich golven gaan vormen verandert de  $c_z$  sterk (zie TABEL VI en Fig. 8; Voor gegevens over  $c_z$  zie ref. 19).

10 Mogelijke toepassing van de resultaten van het modelonderzoek voor het Oosterschelde bekken voor het geval van volledige ontzilting.

In het onderstaande zal voor het Oosterschelde bekken enige globale berekeningen over de optredende menging, veroorzaakt door wind worden gegeven, daarbij gebruik makend van de resultaten van het modelonderzoek.

Een basisgegeven bij de berekeningen is, dat ten gevolge van de ontziltingsprocedure het grensvlak bij de zout-zoet-gelaagdheid 10 cm/dag zakt, indien er geen menging zou optreden. Deze waarde wordt verkregen als men uitgaat van een spuidebiet van  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  bij de Volkerakdam aan zoet water en bij de Oosterschelde dam aan zout water, terwijl voor de oppervlakte van het Oosterschelde bekken een waarde van  $2,5 \cdot 10^8 \text{ m}^2$  wordt aangehouden.

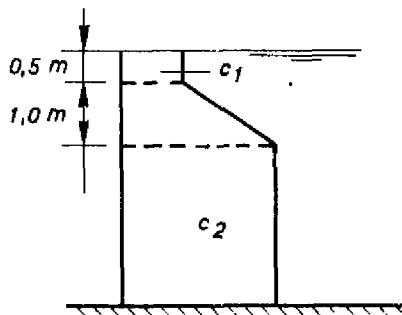
Stel de windsnelheid  $W = 6 \text{ m/s}$  (windkracht 4). Volgens vgl. 8.5 kan men dan schrijven

$$u_a^* = \sqrt{c_z} W = 0,033 W = 0,198 \text{ m/s.}$$

$$(c_z = 10^{-3}, \text{ zie ref. 19}).$$

Stel verder:

Een initiëel dichtheidsprofiel, waarvan zowel de dikte als de gemiddelde diepte onder het wateroppervlak van de mengzone op 1 m wordt gesteld. Dit



is een te verwachten situatie na een dag of tien vanaf het begin van het ontziltingsproces, indien wordt aangenomen, dat de menging in de bovenste 0,5 m voldoende groot is door directe golfinvloed om homogene menging te verkrijgen in de periode van orde 1 dag)

De laagdikte van de bovenlaag is dan :  $H_1 = 1 \text{ m}$ . Als de dichtheid van de onderlaag  $\rho_2 = 1020 \text{ kg/m}^3$  is, dan is volgens

$$\rho = 1000 + 0,75 c \quad (10.1)$$

waarin  $\rho$  : dichtheid

$c$  : zoutconcentratie

de zoutconcentratie van de onderlaag  $c_2 = 27 \text{ kg/m}^3$  en volgens een eenvoudige berekening, waarin wordt aangenomen, dat de bovenste 0,5 m volledig gemengd blijft de zoutconcentratie van de bovenlaag na 10 dagen  $c_1 = 0,1 c_2 = 2,7 \text{ kg/m}^3$ , zodat

$$\rho_1 = 1002 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{en } \Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 = 18 \text{ kg/m}^3$$

Het bij deze uitgangssituatie behorende Ri-getal wordt dan:

$$Ri = \Delta\rho \cdot g \cdot H_1 / \rho_a \cdot (u_a^*)^2 \approx 3600$$

zodat volgens Fig. 7

$$E = \frac{u_e}{u_a^*} \approx 1,5 \cdot 10^{-6} \quad \text{en } u_e = 2,55 \text{ cm/dag.}$$

Aannemende, dat het grensvlak zakt met 10cm/dag (=  $u_s$ ) en daarnaast door de "entrainment" met een snelheid  $u_e$ , dan bedraagt de laagdikte van de bovenlaag in meters op tijdstip  $t$  :

$$1,00 + (u_e + u_s)(t - 10) \quad t \geq 10 \quad (10.2)$$

waarin  $t$ : tijd in dagen.

Het zout dat t.g.v. de "entrainment" in de bovenlaag komt, wordt volledig opgemengd over de dikte van de bovenlaag. Windgolven worden verder buiten beschouwing gelaten.

Op  $t=10$  dagen heeft de bovenlaag van 1 m een concentratie van  $0,1 \cdot c_2$ , dit komt overeen met een hoeveelheid zout van  $1 \cdot 0,1 \cdot c_2$ .

De hoeveelheid zout die door entrainment in de bovenlaag komt, is

$$c_2 \cdot u_e (t - 10) \quad t \geq 10 \quad (10.3)$$

t in dagen.

Hierbij wordt verondersteld, dat de zoutconcentratie van de onderlaag niet verandert. Op tijdstip  $t=t$  is de concentratie van de geleidelijk in dikte toenemende bovenlaag  $c_1$ :

$$c_1(t) = c_2 \left\{ \frac{0,1 * 1,0 + u_e (t - 10)}{1,0 + (u_e + u_s)(t - 10)} \right\} \quad t \geq 10 \quad (10.4)$$

Indien  $u_e = 2,55$  cm/dag en  $u_s = 10$  cm/dag dan wordt bovenstaande formule:

$$c_1(t) = c_2 \left\{ \frac{10 + 2,55 (t-10)}{100 + 12,55 (t-10)} \right\}$$

$$c_1(t) = c_2 \left\{ \frac{2,55t - 15,5}{12,55t - 25,5} \right\} \quad t \geq 10 \quad (10.5)$$

Voor  $t = 20$  dagen

$$c_1(20) = 0,16 \cdot c_2$$

$$\rho_1(20) = 1003,2 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta\rho(20) = 16,8 \text{ kg/m}^3$$

$$H_1 = 2,25 \text{ m}$$

$$Ri \approx 7600$$

$$\text{en dus } u_e \approx 1,7 \text{ cm/dag}$$

Uit het bovenstaande en uit Fig. 7 blijkt, gelet op het Ri-getal, dat  $u_e$  qua orde grootte nauwelijks verandert. We bevinden ons min of meer in het gebied van de moleculaire diffusie.

Derhalve mogen we in vgl. 10.5  $t$  naar  $\infty$  laten naderen om te bepalen wat de dichtheid van de bovenlaag op den duur wordt:

$$t \rightarrow \infty \quad c_1/c_2 \approx 1/5$$

Gezien het feit, dat bij een dikte van de bovenlaag van 2 m de turbulente menging op het grensvlak reeds te verwaarlozen is, zal op den duur de aanname dat de bovenlaag volledig gemengd blijft niet meer juist zijn.

De bovenlaag zal daardoor sneller zoet worden. Anderzijds kan, gezien de in par. 6 en par. 9 genoemde verwaarlozingen van het advectioneel zouttransport en het horizontale diffusieve zouttransport, gesteld worden dat het verticale zouttransport wat groter zal zijn.

1)  
TABEL I

Proevenprogramma

Proefnr.	Windsnelheid W in m/sec.	Dichtheidsverschil $\Delta\rho$ in $\text{kg/m}^3$	Dikte bovenlaag $H_1$ in meters
1	4,50	20	0,20
2	1,50	20	0,20
3	5,50	20	0,20
4	3,00	20	0,20
5	4,50	20	0,20
6	2,00	20	0,10
7	3,00	20	0,10
8	4,00	20	0,10
9	2,00	20	0,20
10	3,00	20	0,20
11	3,00	5	0,10
12	2,00	5	0,10
13	4,00	5	0,10
14	6,00	5	0,10
15	6,00	20	0,10

1) De opgegeven waarden zijn gewenste waarden, de gerealiseerde waarden zijn vermeld in tabel II.



TABEL II

Overzicht ingestelde proefomstandigheden

Proefnr.	<sup>1)</sup> $H_1$ (m)	<sup>1)</sup> $\Delta\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	W (m/s)	Bijzonderheden t.a.v. uitgevoerde metingen, zie par. 7.2
1	0,171	23,3	4,5	geen tussenmetingen
2	0,171	19,8	1,45	geen tussenmetingen
3	0,171	19,4	5,75	geen tussenmetingen
4	0,192	22,2	3,05	geen tussenmetingen
5	0,192	22,0	4,70	geen tussenmetingen
6	0,100	21,4	2,05	
7	0,101	21,2	3,05	geen tussenmetingen
8	0,101	20,8	3,9	geen tussenmetingen
9	0,199	19,9	1,95	
10	0,200	18,9	2,95	
11	0,101	6,4	2,90	
12	0,099	5,9	1,85	
13	0,101	5,65	3,90	
14	0,100	5,55	5,95	extra tussenmetingen
15	0,104	21,0	5,95	extra tussenmetingen

1) gemiddelden van de gemeten waarden in de resp. 4 punten (vazo 1 t/m 4, zie Fig. 1), meting (1) (zie par. 7.2)

TABEL III

Proefresultaten: entrainmentsnelheid ( $u_e$ )  
diffusiecoëfficiënt ( $D_y$ )

1)

proef. nr.	$u_e$ (cm/s)		$\Delta y$ 3) (dikte mengzone) (cm)	$D_y = T_y / \frac{\partial \rho}{\partial y}$ 4) ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	gebruikte metingen (zie par. 7.2)
	uit $T_y$	uit 2) $\Delta H$			
1	$1,05 \cdot 10^{-4}$	$6,59 \cdot 10^{-5}$	6,3	$6,5 \cdot 10^{-4}$	(1) en (4)
2	$3,73 \cdot 10^{-6}$	-	14,2	$5,2 \cdot 10^{-5}$	(1) en (4)
2	$7,37 \cdot 10^{-6}$	-	13,8	$1,0 \cdot 10^{-4}$	(2) en (3)
3	$2,15 \cdot 10^{-4}$	$3,72 \cdot 10^{-4}$	12,5	$2,4 \cdot 10^{-3}$	(1) en (4)
4	$2,32 \cdot 10^{-5}$	-	3,5	$8,1 \cdot 10^{-5}$	(1) en (4)
5	$4,99 \cdot 10^{-5}$	$8,99 \cdot 10^{-5}$	5,7	$2,8 \cdot 10^{-4}$	(1) en (4)
6	$9,49 \cdot 10^{-6}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$	4,25	$3,9 \cdot 10^{-5}$	(1) en (4)
6	$7,99 \cdot 10^{-6}$	$9,68 \cdot 10^{-6}$	3,8	$3,0 \cdot 10^{-5}$	(2) en (3)
7	$2,83 \cdot 10^{-5}$	$3,42 \cdot 10^{-5}$	3,2	$8,2 \cdot 10^{-5}$	(1) en (4)
8	$5,45 \cdot 10^{-5}$	$6,96 \cdot 10^{-5}$	4,0	$1,8 \cdot 10^{-4}$	(1) en (4)
9	$7,05 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	3,5	$2,5 \cdot 10^{-5}$	(1) en (4)
9	$3,71 \cdot 10^{-6}$	-	3,4	$1,3 \cdot 10^{-5}$	(2) en (3)
10	$1,16 \cdot 10^{-5}$	$1,14 \cdot 10^{-5}$	3,1	$3,6 \cdot 10^{-5}$	(1) en (4)
10	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$9,7 \cdot 10^{-6}$	3,3	$2,2 \cdot 10^{-5}$	(2) en (3)
11	$6,49 \cdot 10^{-5}$	$6,99 \cdot 10^{-5}$	4,1	$2,2 \cdot 10^{-4}$	(1) en (4)
11	$5,93 \cdot 10^{-5}$	$6,88 \cdot 10^{-5}$	6,1	$3,1 \cdot 10^{-4}$	(2) en (3)
12	$1,41 \cdot 10^{-5}$	$1,34 \cdot 10^{-5}$	3,2	$4,4 \cdot 10^{-5}$	(1) en (4)
12	$1,43 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$	3,7	$5,2 \cdot 10^{-5}$	(2) en (3)
13	$2,23 \cdot 10^{-4}$	$2,22 \cdot 10^{-4}$	7,1	$1,0 \cdot 10^{-3}$	(1) en (4)
13	$1,83 \cdot 10^{-4}$	$2,34 \cdot 10^{-4}$	10,0	$1,4 \cdot 10^{-3}$	(2) en (3)
14	$1,62 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$	17,4	$2,0 \cdot 10^{-2}$	(1) en (4)
14	$1,75 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	10,3	$1,5 \cdot 10^{-2}$	(2) en (3)
14	$1,47 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	12,7	$1,8 \cdot 10^{-2}$	extra meting
15	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$5,05 \cdot 10^{-4}$	9,5	$2,4 \cdot 10^{-3}$	(1) en (4)
15	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$4,85 \cdot 10^{-4}$	2,7	$7,9 \cdot 10^{-4}$	(2) en (3)
15	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	2,7	$9,6 \cdot 10^{-4}$	extra meting

1) zie voor definities par. 6.

2)  $\Delta H$  is zakking grensvlak over het beschouwde tijdsinterval.

3) gemiddelde over beschouwde tijdsinterval

4)  $\partial \rho / \partial y$  betrokken op de mengzone en gemiddeld over het beschouwde tijdsinterval.

TABEL IV

Proefresultaten betrokken op de windsnelheid (U = W, zie par. 8)

Proef nr.	$u_e/W$		Ri = <sup>1)</sup>
	uit $T_y$	uit 2) $\Delta H$	$\frac{\Delta\rho}{\rho}gH_1/W^2$
1	$2,33 \cdot 10^{-7}$	$1,46 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
2	$2,57 \cdot 10^{-8}$	-	$1,6 \cdot 10^{-2}$
2	$5,08 \cdot 10^{-8}$	-	"
3	$3,74 \cdot 10^{-7}$	$6,47 \cdot 10^{-7}$	$9,8 \cdot 10^{-4}$
4	$7,61 \cdot 10^{-8}$	-	$4,5 \cdot 10^{-3}$
5	$1,06 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
6	$4,63 \cdot 10^{-8}$	$5,1 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$
6	$3,90 \cdot 10^{-8}$	$4,72 \cdot 10^{-8}$	"
7	$9,28 \cdot 10^{-8}$	$1,12 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$
8	$1,40 \cdot 10^{-7}$	$1,78 \cdot 10^{-7}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$
9	$3,6 \cdot 10^{-8}$	$2,06 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
9	$1,9 \cdot 10^{-8}$	-	"
10	$3,9 \cdot 10^{-8}$	$3,85 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
10	$2,3 \cdot 10^{-8}$	$3,29 \cdot 10^{-8}$	"
11	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$
11	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$	"
12	$7,6 \cdot 10^{-8}$	$7,3 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
12	$7,75 \cdot 10^{-8}$	$6,3 \cdot 10^{-8}$	"
13	$5,72 \cdot 10^{-7}$	$5,7 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-4}$
13	$4,68 \cdot 10^{-7}$	$5,98 \cdot 10^{-7}$	"
14	$2,72 \cdot 10^{-6}$	$1,85 \cdot 10^{-7}$	$1,54 \cdot 10^{-4}$
14	$2,94 \cdot 10^{-6}$	$3,74 \cdot 10^{-6}$	"
14	$2,47 \cdot 10^{-6}$	$3,51 \cdot 10^{-6}$	"
15	$6,73 \cdot 10^{-7}$	$8,49 \cdot 10^{-7}$	$6,05 \cdot 10^{-4}$
15	$7,56 \cdot 10^{-7}$	$8,15 \cdot 10^{-7}$	"
15	$7,04 \cdot 10^{-7}$	$7,54 \cdot 10^{-7}$	"

1) Ri betrokken op de ingestelde situatie (meting (1)) vermeld in tabel II  
( $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ )

2)  $\Delta H$  is zakking grensvlak over het beschouwde tijdsinterval.

TABEL V

Proefresultaten betrokken op de windschuifspanningssnelheid ( $U = u_a^*$ , zie par.8)

Proef nr.	$u_e / u_a^*$		Ri = $\frac{\Delta\rho}{\rho_a} gH_1 / (u_a^*)^2$ <sup>1)</sup>
	uit $T_y$	uit $\Delta H$ <sup>2)</sup>	
1	$5,25 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	780
2	$1,5 \cdot 10^{-6}$	-	42.510
2	$2,9 \cdot 10^{-6}$	-	"
3	$7,2 \cdot 10^{-6}$	$1,24 \cdot 10^{-5}$	290
4	$2,2 \cdot 10^{-6}$	-	3.030
5	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$	750
6	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	6.720
6	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$	"
7	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$3,26 \cdot 10^{-6}$	1.520
8	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	690
9	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-7}$	12.430
9	$7,4 \cdot 10^{-7}$	-	"
10	$1,16 \cdot 10^{-6}$	$1,14 \cdot 10^{-6}$	2.970
10	$6,7 \cdot 10^{-7}$	$9,7 \cdot 10^{-7}$	"
11	$6,5 \cdot 10^{-6}$	$7,0 \cdot 10^{-6}$	510
11	$5,9 \cdot 10^{-6}$	$6,9 \cdot 10^{-6}$	"
12	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$3,35 \cdot 10^{-6}$	2.865
12	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	"
13	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	185
13	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	"
14	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$	43
14	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$6,9 \cdot 10^{-5}$	"
14	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$	"
15	$1,25 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	167
15	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	"
15	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	"

1) Ri betrokken op de ingestelde situatie (meting (1)) vermeld in tabel II ( $\rho_a^{\text{def}} = 1,25 \text{ kg/m}^3$ )

2)  $\Delta H$  is zakking grensvlak over beschouwde tijdsinterval.

TABEL VI

Proefresultaten windschuifspanningssnelheid als functie van de windsnelheid.

Proef nr.	W (m/s)	$\Delta e_i$ (m)	L (m)	$H_1$ (m)	$\Delta \rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_z$	$u_a^*$ (m/s)
11	2,9	0,016	7,2	0,111	5,7	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,105
11	2,9	0,012	7,2	0,150	4,25	$1,0 \cdot 10^{-3}$	0,09
12	1,85	0,001	7,2	0,101	5,85	$1,9 \cdot 10^{-4}$	0,025
12	1,85	0,004	7,2	0,107	5,6	$7,6 \cdot 10^{-4}$	0,051
13	3,90	0,046	7,2	0,125	4,3	$1,8 \cdot 10^{-3}$	0,164
13	3,90	0,032	7,2	0,256	2,55	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,151
14	5,95	0,033	2,4	0,1945	4,425	$2,6 \cdot 10^{-3}$	0,30
14	5,95	0,037	2,4	0,2135	3,875	$2,8 \cdot 10^{-3}$	0,32
14	5,95	0,038	2,4	0,232	3,500	$2,85 \cdot 10^{-3}$	0,32
14	5,95	0,029	2,4	0,2615	3,075	$2,15 \cdot 10^{-3}$	0,28
15	5,95	0,011	2,4	0,1305	19,85	$2,6 \cdot 10^{-3}$	0,305
15	5,95	0,015	2,4	0,1615	16,0	$3,6 \cdot 10^{-3}$	0,36
15	5,95	0,014	2,4	0,199	11,75	$3,0 \cdot 10^{-3}$	0,33
15	5,95	0,014	2,4	0,231	9,8	$2,9 \cdot 10^{-3}$	0,32

W : windsnelheid

$\Delta e_i$  : verval grensvlak over afstand L

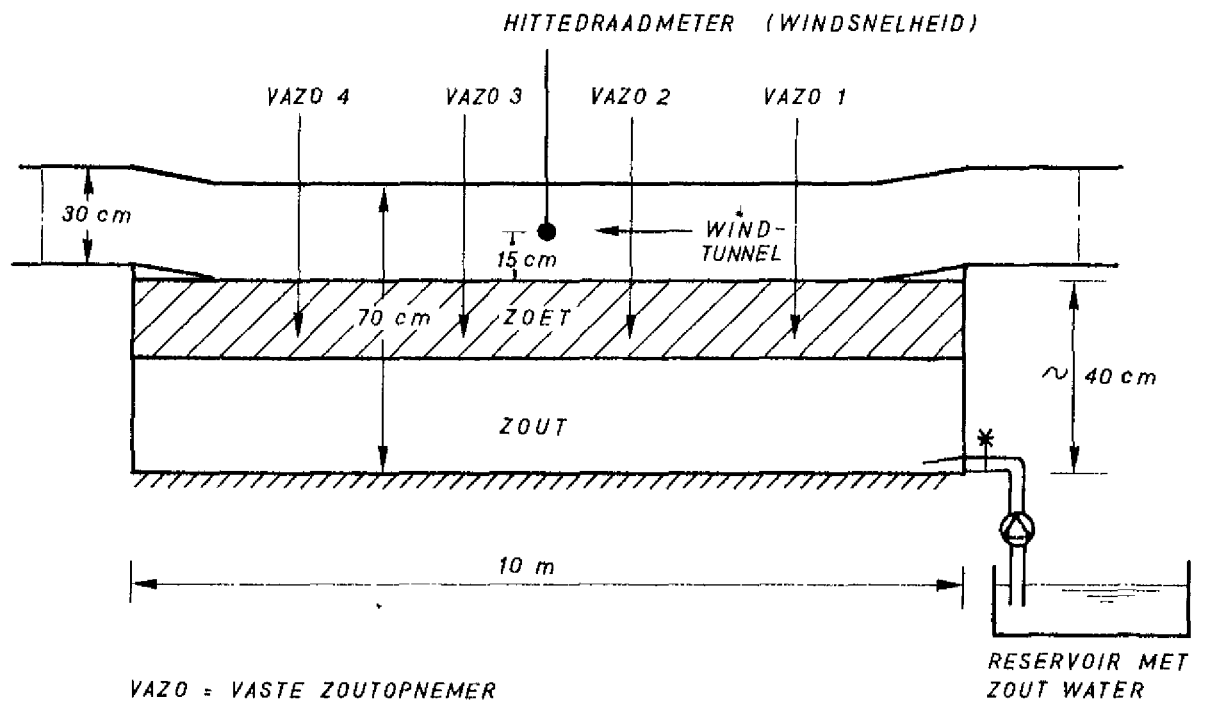
$H_1$  : dikte bovenlaag

$\Delta \rho$  : aanwezige dichtheidsverschil tussen boven- en onderlaag

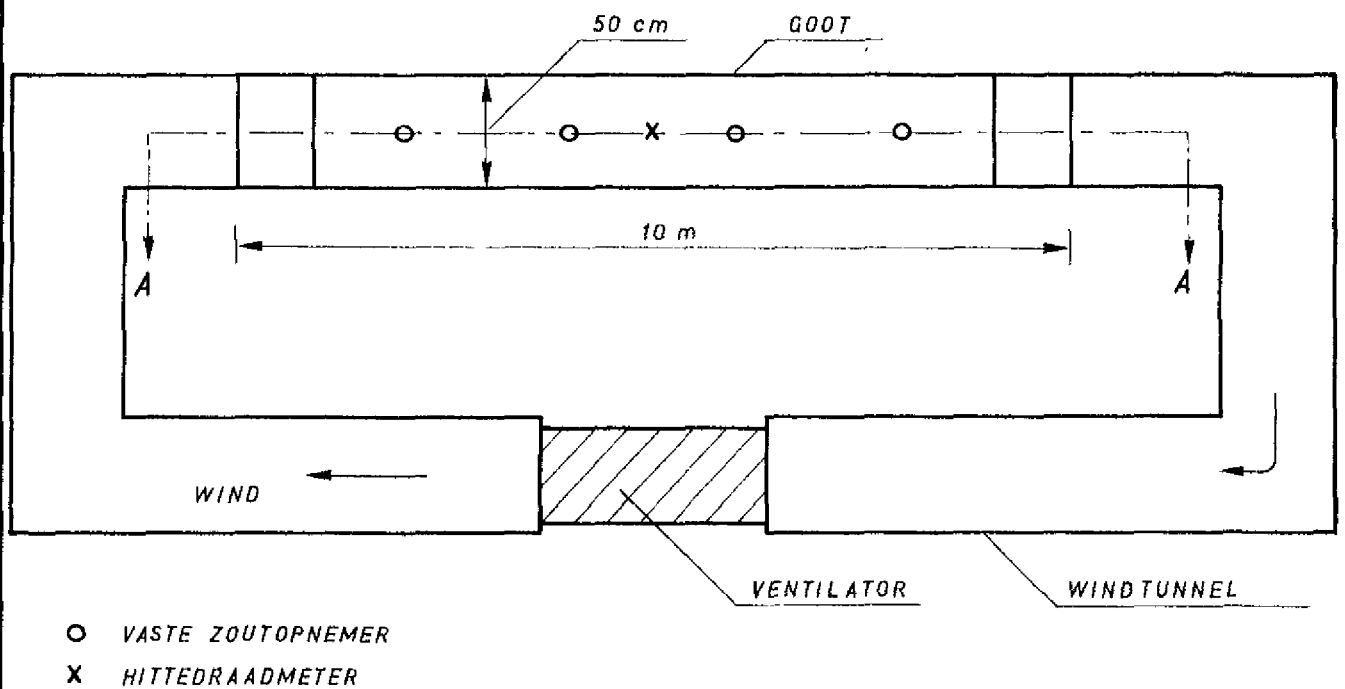
$c_z$  : schuifspanningscoëfficiënt

$u_a^*$  : windschuifspanningssnelheid

(zie par. 8)

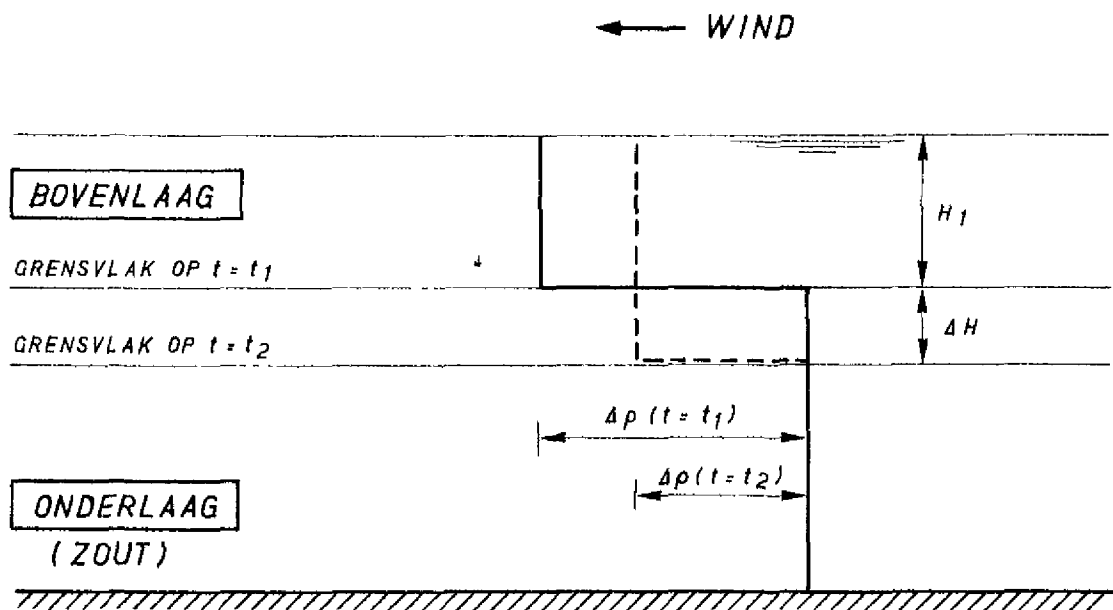


DOORSNEDE GOOT ( DSN. A-A )

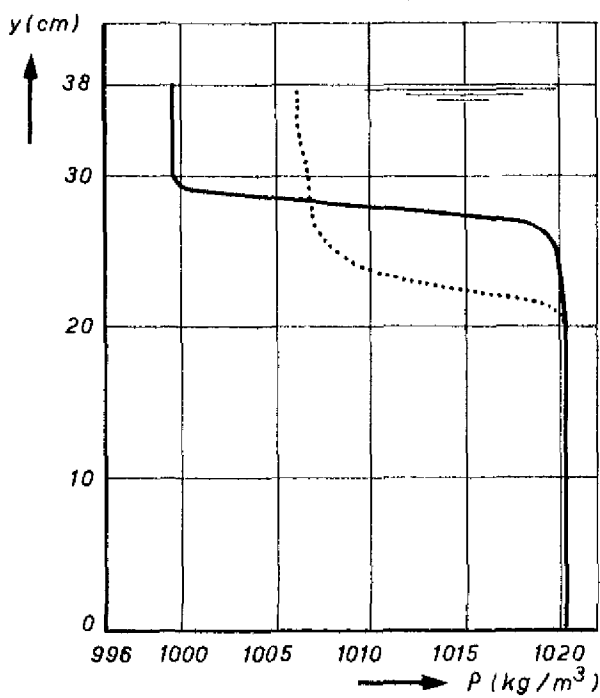


BOVENAANZICHT

<b>MEET OPSTELLING</b>	JM
	A4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M.1235 - 1001 FIG.1

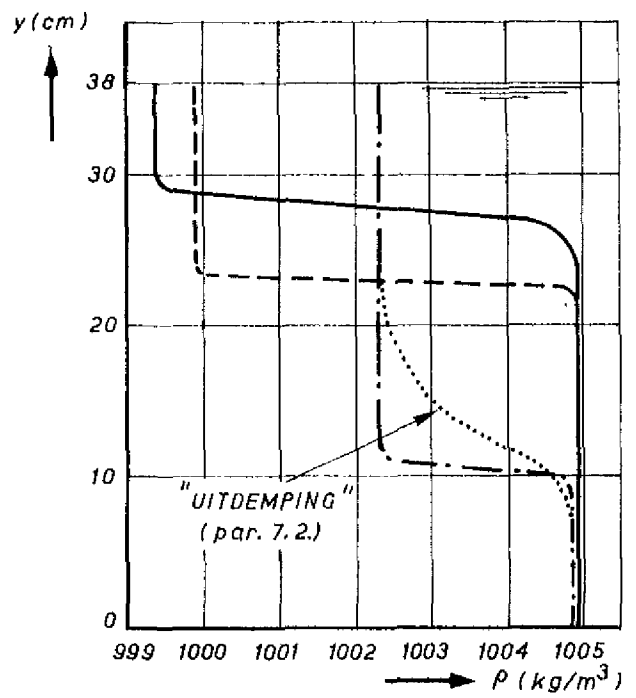


SCHEMATISCHE BENADERING VAN DE ZOUTVERTIKALEN



PROEF NO 8 (VAZO 4)

$W = 4$  m/s  
 $\Delta \rho = 20$  kg/m<sup>3</sup>  
 $H_1 = 10$  cm



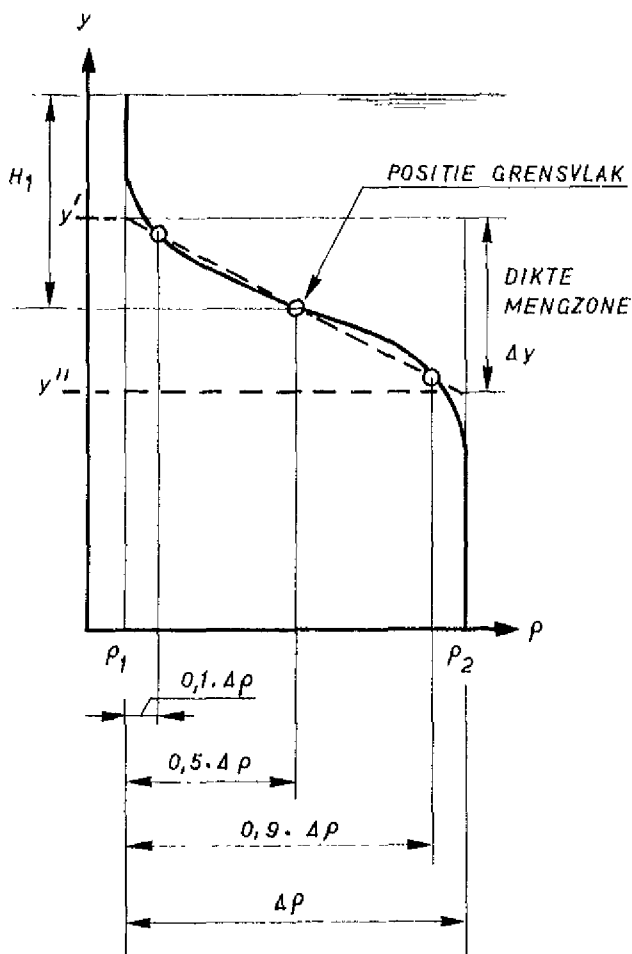
PROEF NO 13 (VAZO 4)

$W = 4$  m/s  
 $\Delta \rho = 5$  kg/m<sup>3</sup>  
 $H_1 = 10$  cm

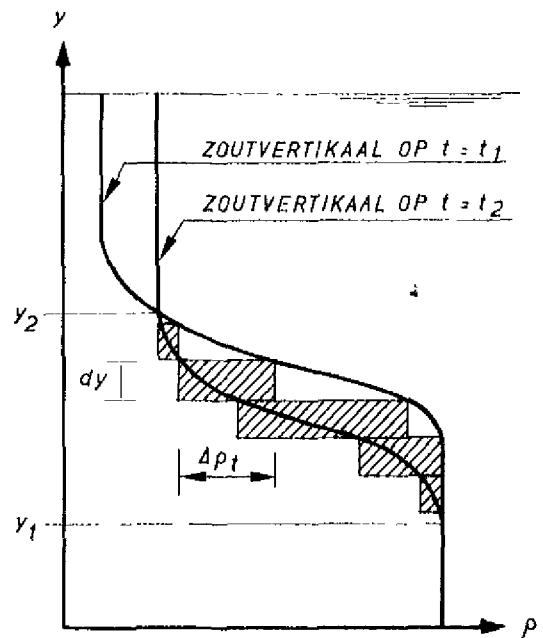
GEMETEN ZOUTVERTIKALEN

VERANDERING ZOUTVERDELING BIJ  
2-LAGEN SYSTEEM t.g.v. WIND

—	METING 1	} ZIE PAR 7.2	JM
- - -	METING 2		
- · - · -	METING 3		
· · · · ·	METING 4		
			A4



(a) DEFINITIE GRENSVLAK EN MENGZONE



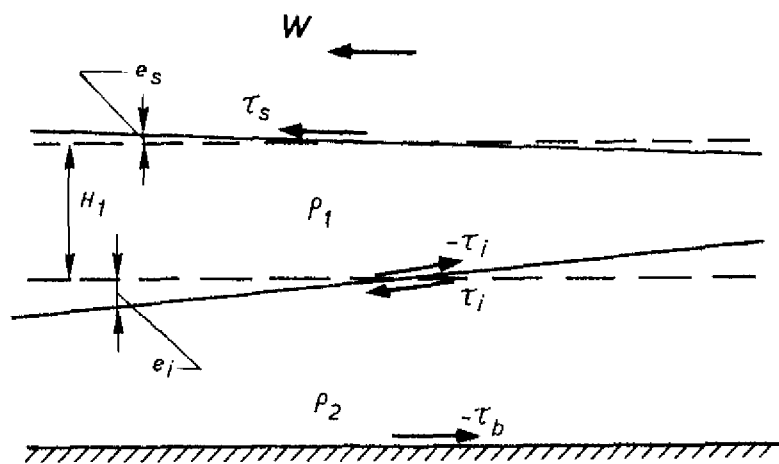
$$T_y = - \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial \rho}{\partial t} dy \Rightarrow$$

$$T_y = - \frac{1}{\Delta t} \sum \Delta \rho_t \cdot dy$$

GEARCEERDE  
OPPERVLAK

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

(b) BEPALING DIFFUSIEF ZOUTTRANSPORT  $T_y$



$\tau$  : SCHUIFSPANNING  
 $\tau_s$  : WATEROPPERVLAK  
 $\tau_i$  : GRENSVLAK  
 $\tau_b$  : BODEM

(c) DEFINITIESCHETS 2-LAGEN SYSTEEM

DEFINITIE SCHETSEN

JM

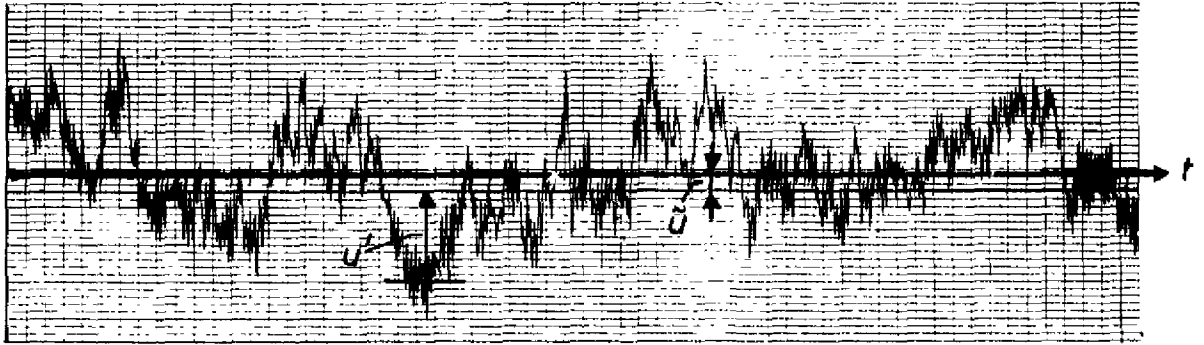
A4



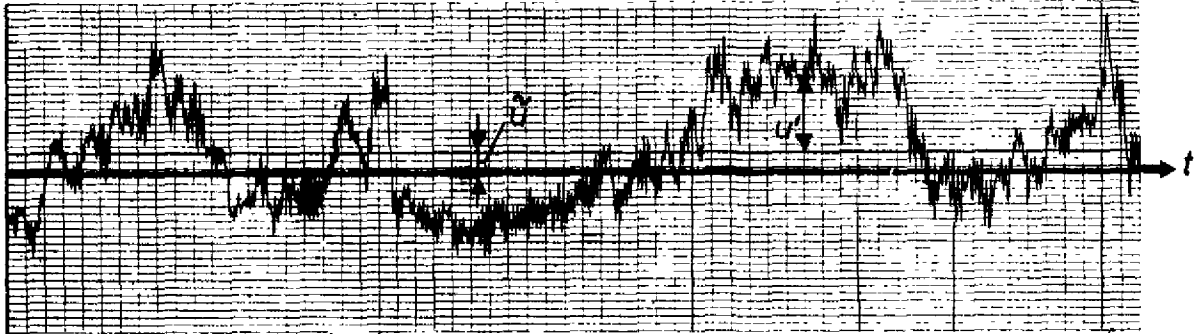
MOMENTANE SNELHEID  $u$

↑

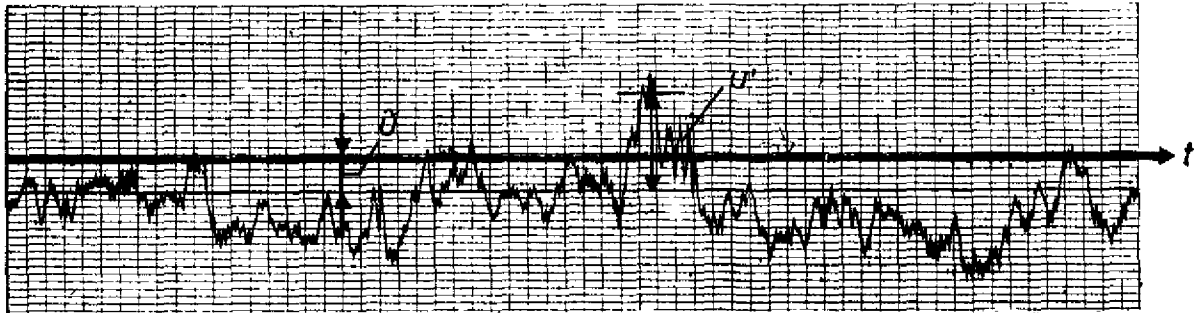
MEETPUNT : WATERSPIEGEL - 1 cm



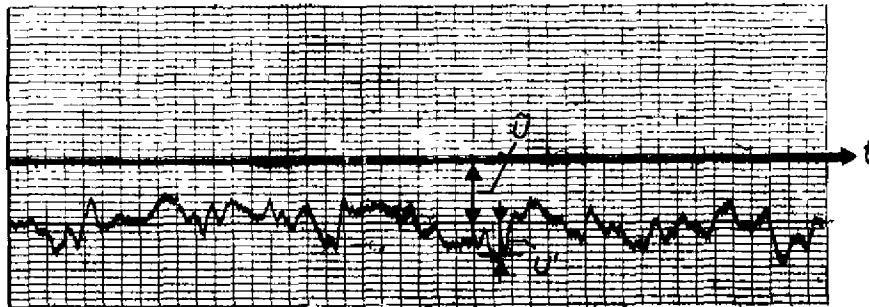
MEETPUNT : WATERSPIEGEL - 3 cm



MEETPUNT : WATERSPIEGEL - 5 cm



MEETPUNT : WATERSPIEGEL - 9 cm



SCHALEN

TJD  $t$

1 cm  $\hat{=}$  4 s

SNELHEID  $u$

1 cm  $\hat{=}$  3 cm/s

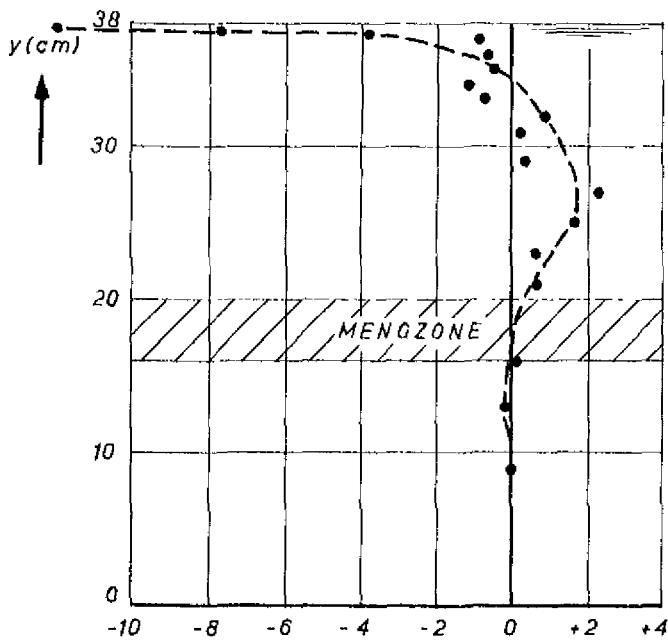
POS. SNELHEID  $\hat{=}$   
WINDRICHTING.

VOORBEELD VAN LOKAAL GEMETEN SNELHEDEN  
ALS FUNCTIE VAN DE TJD IN DE BOVENLAAG  
VAN HET 2-LAGENSYSTEEM

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

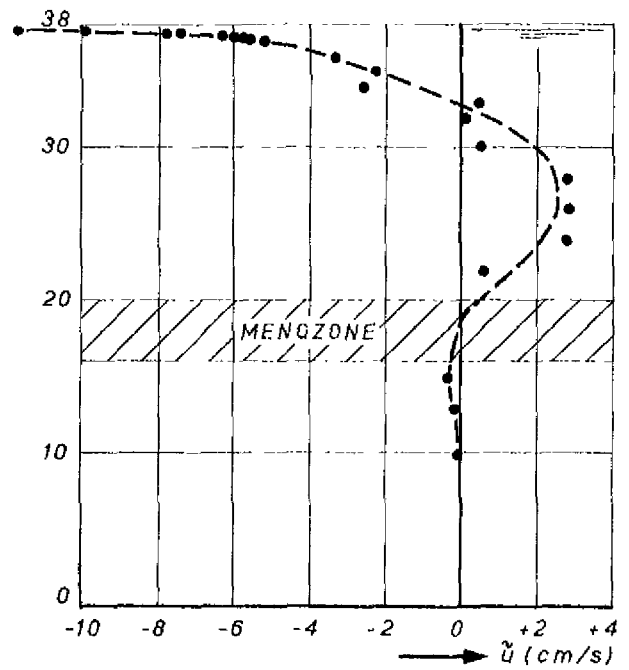
M.1235 - 1004 FIG. 4

A4



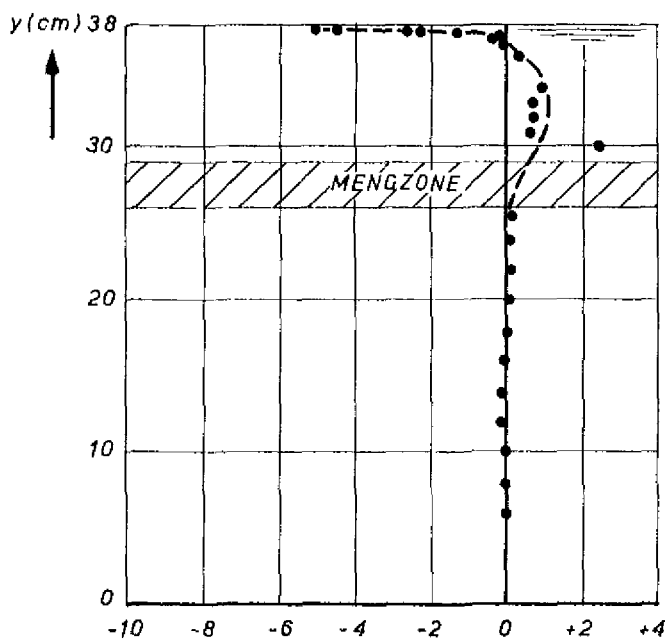
PROEF N° 9

$W = 2 \text{ m/s}$   
 $\Delta\rho = 20 \text{ kg/m}^3$   
 $H_1 = 20 \text{ cm}$



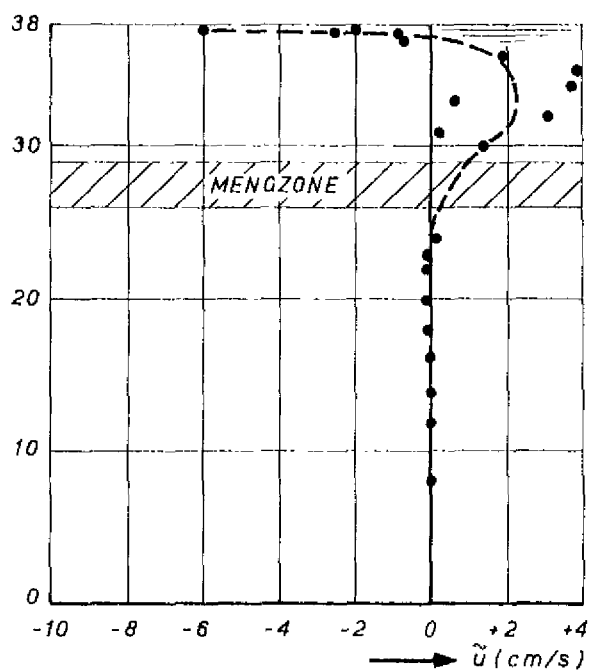
PROEF N° 10

$W = 3 \text{ m/s}$   
 $\Delta\rho = 20 \text{ kg/m}^3$   
 $H_1 = 20 \text{ cm}$



PROEF N° 7

$W = 3 \text{ m/s}$   
 $\Delta\rho = 20 \text{ kg/m}^3$   
 $H_1 = 10 \text{ cm}$



PROEF N° 8

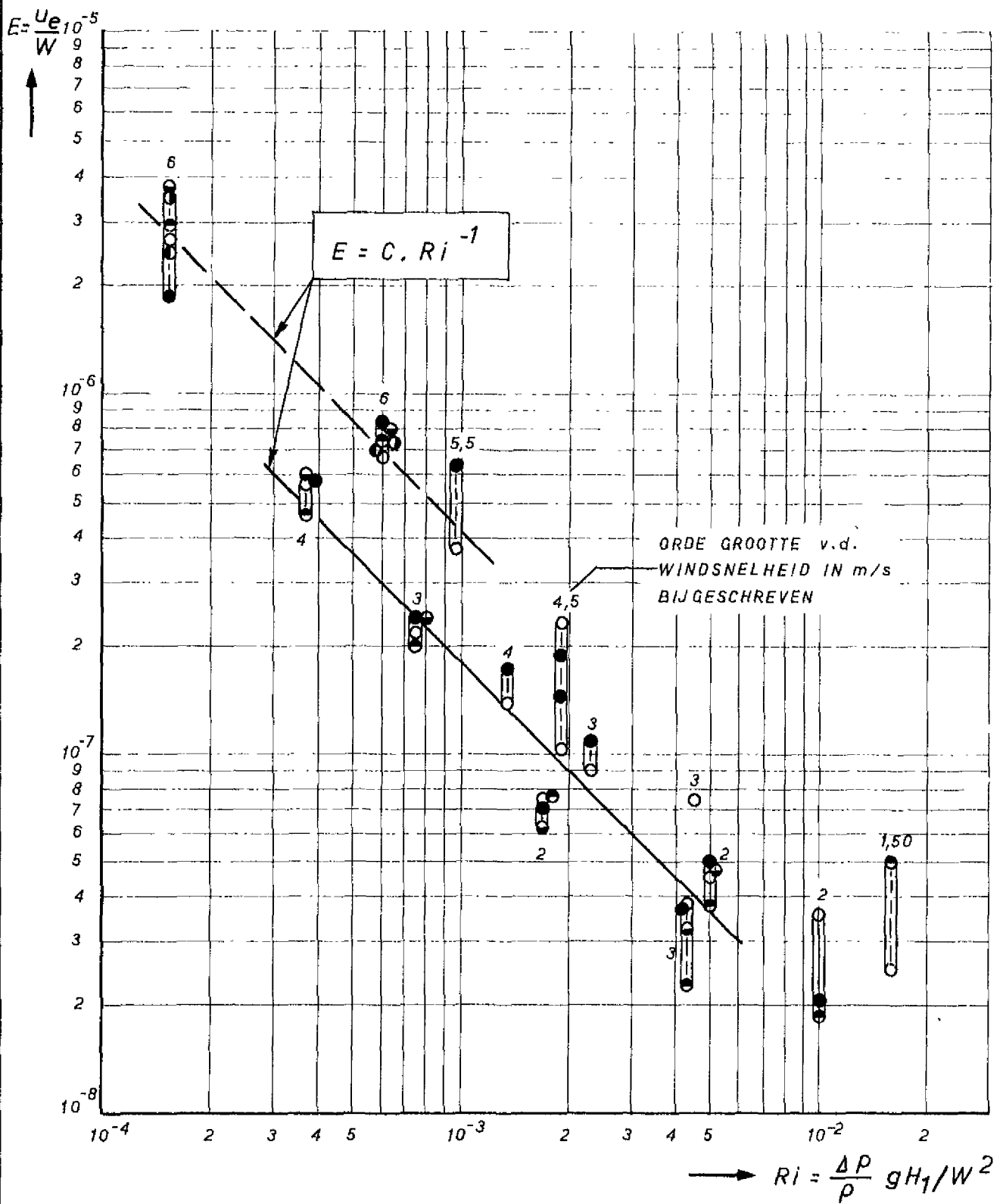
$W = 4 \text{ m/s}$   
 $\Delta\rho = 20 \text{ kg/m}^3$   
 $H_1 = 10 \text{ cm}$

SNELHEIDSVERTIKALEN (TIJDSGEMIDDELD)

• MEETPUNTEN  
 - - - - - BENADERD PROFIEL

JM

A4



**LEGENDA :**

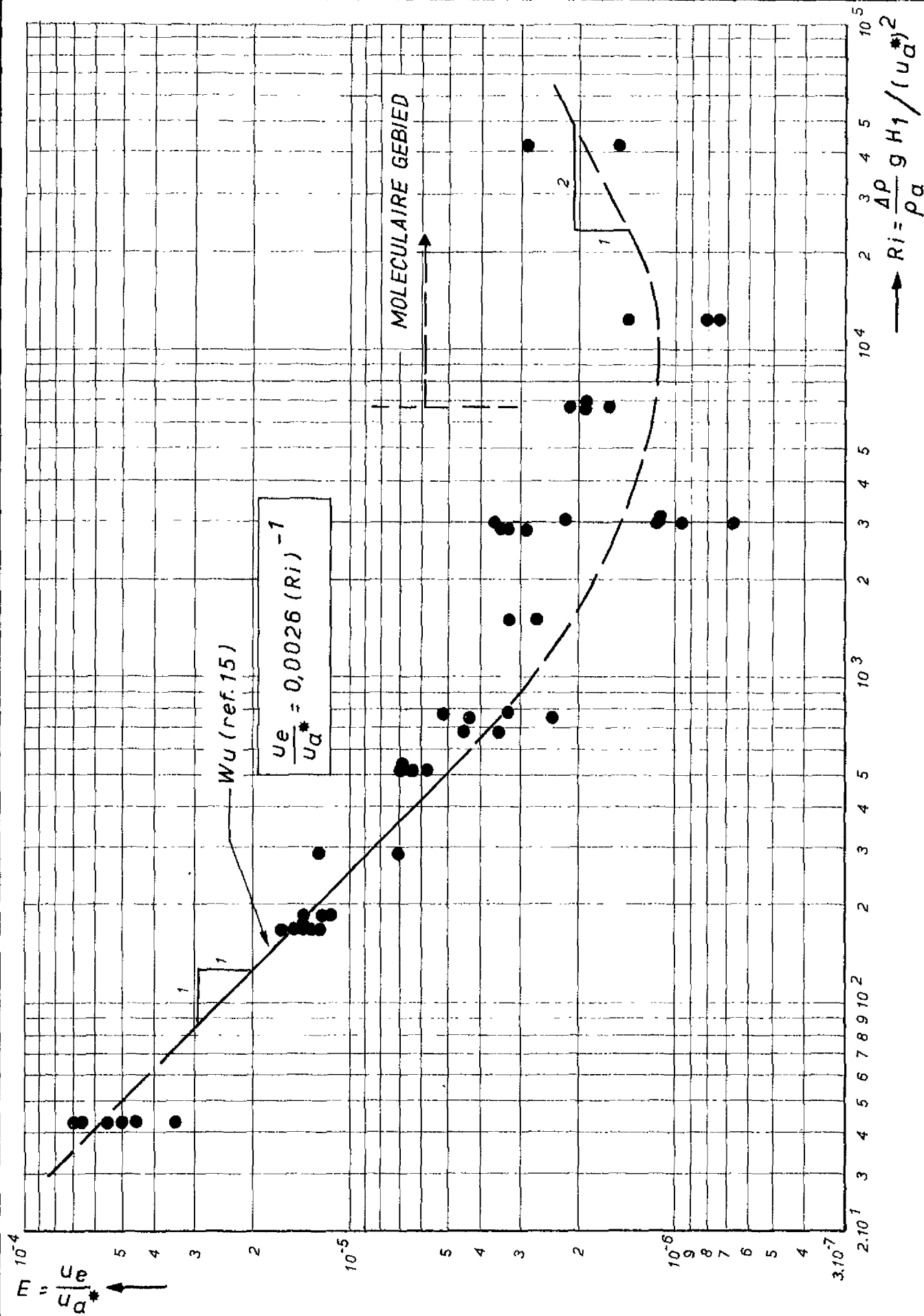
- UIT  $T_y$  ; METING 1 EN 4
- ◐ UIT  $\Delta H$  ; METING 1 EN 4
- ◑ UIT  $T_y$  ; METING 2 EN 3
- ◒ UIT  $\Delta H$  ; METING 2 EN 3
- ◓ UIT  $T_y$  ; EXTRA METING
- ◔ UIT  $\Delta H$  ; EXTRA METING

ZIE par 7.4 EN TABEL III

PROEFRESULTATEN BETROKKEN OP DE WINDSNELHEID :  $\frac{u_e}{W} = f \left( \frac{\Delta P}{\rho} gH_1/W^2 \right)$

JM

A4



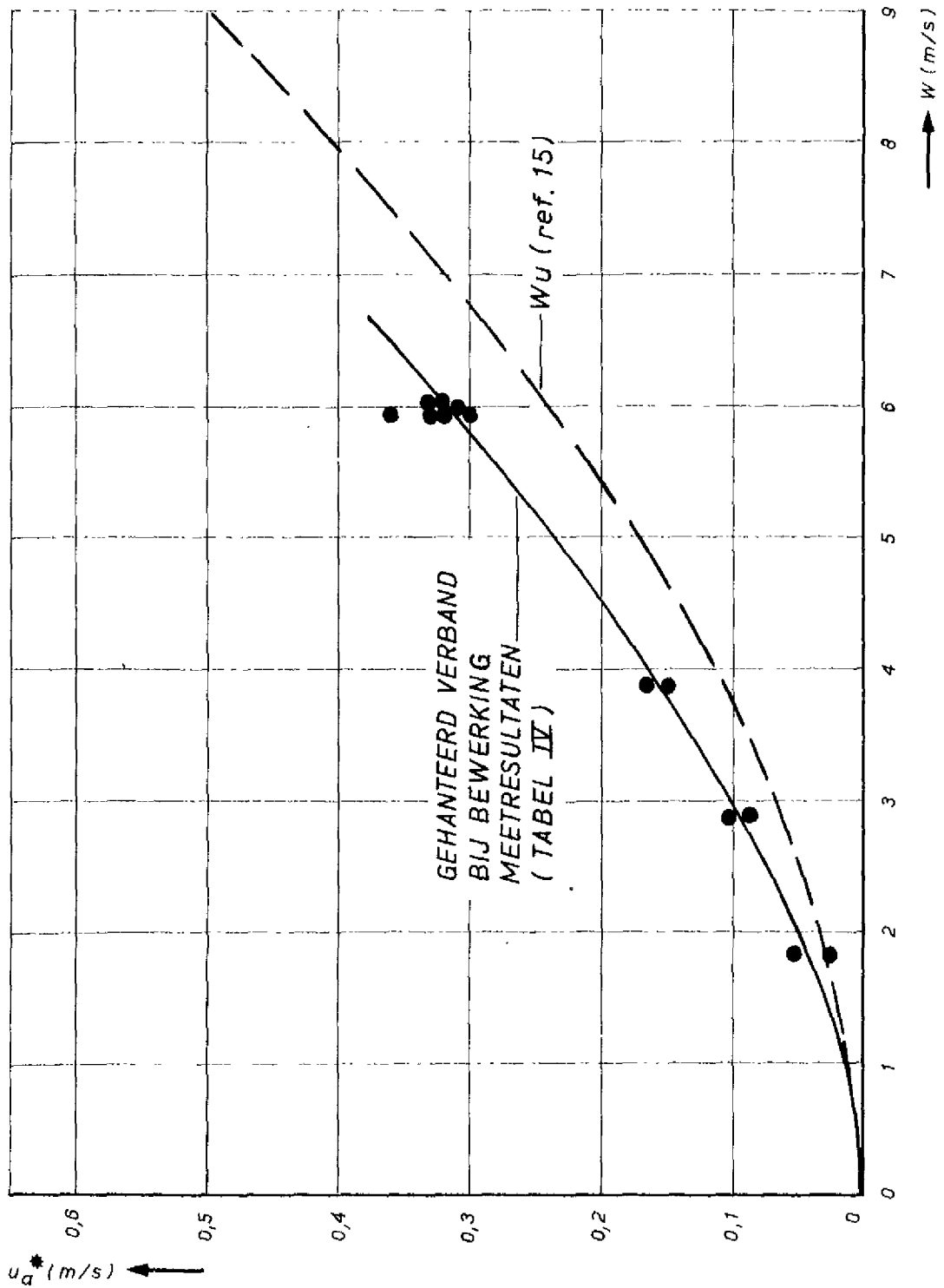
VERBAND TUSSEN "ENTRAINMENT"SNELHEID  
 EN HET RI-GETAL BETROKKEN OP DE  
 WINDSCHUIFSPANNINGSSNELHEID

● MEETPUNTEN  
 TABEL IV JM

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1235 - 1007 FIG. 7

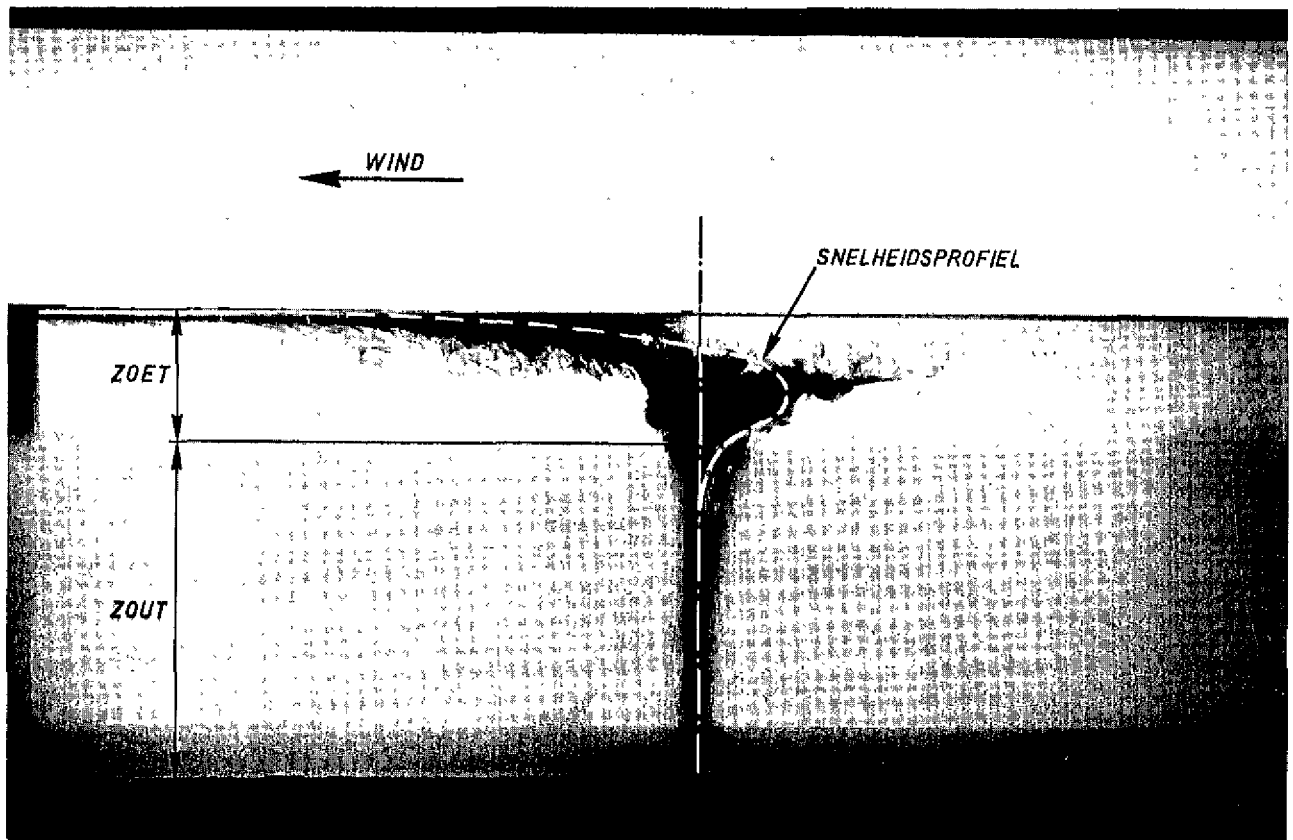


VERBAND TUSSEN DE WINDSNELHEID  $W$   
 EN DE WINDSCHUIFSPANNINGSSNELHEID  $u_d^*$

● MEETPUNTEN  
 (TABEL IV)

JM

A4



Bepaling snelheidsprofiel d.m.v. kleurstofinjectie

$$W \approx 3 \text{ m/s}$$

$$H_1 \approx 10 \text{ cm}$$

$$\Delta\rho \approx 20 \text{ kg/m}^3$$

} proef nr. 7

waterloopkundig laboratorium postbus 177 delft