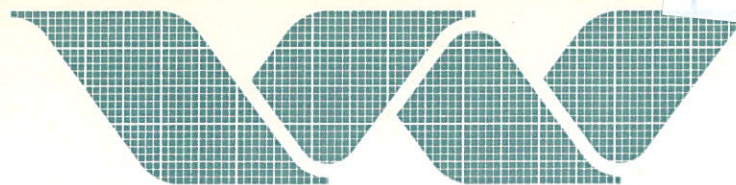


I R 706



2e versiejaar

waterloopkundig laboratorium

diffusiemetingen bij permanente stroming
in een vertrokken Waalmodel

AFGEHANDELD

verslag onderzoek

R 706

augustus 1973

20 SEP. 1973

BIBLIOTHEEK
Waterloopkundig Laboratorium
Postbus 177 - DELFT



diffusiemetingen bij permanente stroming
in een vertrokken Waalmodel

verslag onderzoek

R 706

augustus 1973

INHOUDSOPGAVE

blz.

NOTATIES

LIJST VAN FIGUREN

LIJST VAN TABELLEN

<u>1</u>	<u>Inleiding</u>	1
1.1	Omschrijving opdracht	1
1.2	Doel van de proeven	1
1.3	Inhoud rapport	2
<u>2</u>	<u>Analytische beschrijving verwerkingsmodel</u>	2
2.1	Basisvergelijkingen	3
2.2	Mechanismen welke de dwarsdispersie beïnvloeden	4
2.3	Dwarsdiffusie in kanaal met rechthoekige doorsnede	6
2.4	Dwarsdispersie in een rivier	8
<u>3</u>	<u>Beschrijving proeven in Waalmodel</u>	10
3.1	Algemene beschrijving Waalmodel M 959	10
3.2	Koncentratiemetingen	13
<u>4</u>	<u>Analyse meetgegevens</u>	17
4.1	Gaussische concentratieverdeling	17
4.2	Algemene momentengradiënt methode	18
<u>5</u>	<u>Vergelijking model-prototype</u>	22
5.1	Modifikatie prototypresultaten	22
5.2	Schaalregels voor dispersie mechanismen	24
5.3	Vergelijking model- en prototypresultaten	27
<u>6</u>	<u>Samenvatting en konklusies</u>	30

FIGUREN

TABELLEN

NOTATIES

A, B	waarden van z korresponderend met de linker- en rechteroever
B	breedte van de rivier
C	Chézy-koëfficiënt
c	over de waterdiepte gemiddelde concentratie
e_z	dwarsdispersiekoëfficiënt
F, f, G, g	funkties in de algemene momentengradiëntmethode gebruikt (§ 2.4)
g	zwaartekrachtsversnelling
H	over de dwarsdoorsnede gemiddelde diepte
h	lokale diepte
K	dimensieloze dispersiekoëfficiënt
K_j	K bepaald uit de helling $(\sigma_3^2 - G)$ tegen x_j
k_z	turbulente diffusiekoëfficiënt in dwarsrichting
L	horizontale lengtemaat
n_i	verhouding van model tot prototypewaarde van de grootheid aangeduid met index
Q	rivierdebiet
Q_m	totale massastroom merkstof
QR	verhouding van werkelijk rivierdebiet tot berekend rivierdebiet
Q_p	partieel debiet (verg. 3.2)
R	kromtestraal van rivierbocht
T_z	dispersief transport in dwarsrichting
U	over de dwarsdoorsnede gemiddelde snelheid
U^*	schuifspanningssnelheid
u, w	over waterdiepte gemiddelde snelheid in lengte- en breedterichting
x, y, z	koördinaat in lengte-, vertikale- en breedterichting
x_{inj}, z_{inj}	koördinaat van het injectiepunt
x_o	afstand tot het injectiepunt in lengterichting
x_t	getransformeerde afstand in lengterichting
z_o	waarde van z ten opzichte waarvan momenten genomen worden
z_1	$z - z_o$

Δ_G	parameter, die de mate van overeenstemming tussen meet- en rekengegevens aanduidt
n	dieptevariabele (verg. 2.8)
σ_1^2	variantie van de concentratieverdeling
$(\sigma_1^2)_G$	waarde van σ_1^2 verkregen door de meetgegevens zo goed mogelijk met een Gauss-verdeling te benaderen
σ_3^2	variantie van de massastroom (per breedte-eenheid)-verdeling
Φ	funktie die variantie van e_z met x en z aanduidt.

LIJST VAN FIGUREN

- 3.1 Overzicht Waalmodel M 959
- 3.2 Dwarsprofielen en snelheidsmetingen in het Waalmodel
- 3.3 Dwarsprofielen en snelheidsmetingen in het Waalmodel
- 3.4 Dwarsprofielen en snelheidsmetingen in het Waalmodel
- 3.5 Dwarsprofielen en snelheidsmetingen in het Waalmodel
- 3.6 Dwarsprofielen en snelheidsmetingen in het Waalmodel
- 3.7 Vervalmeting in Waalmodel
- 3.8 Berekende stroomlijnen in Waalmodel
- 3.9 Vergelijking meetmethoden; flessenmethode en kuvettenmethode
- 3.10 Proef WM 4 - invloed van tijdstip van meten
- 3.11 Vergelijking meetmethoden; kuvettenmethode en automaatmethode
- 4.1 Koncentratieverdelingen, proef WM 1
- 4.2 Koncentratieverdelingen, proef WM 2
- 4.3 Koncentratieverdelingen, proef WM 3
- 4.4 Koncentratieverdelingen, proef WM 4
- 4.5 Koncentratieverdelingen, proef WM 5
- 4.6 Algemene momentengradiëntmethode, linksinjectie, proef WM 1
- 4.7 Algemene momentengradiëntmethode, linksinjectie, proef WM 2
- 4.8 Algemene momentengradiëntmethode, linksinjectie, proef WM 1 en WM 2
- 4.9 Algemene momentengradiëntmethode, rechtsinjectie, proef WM 3
- 4.10 Algemene momentengradiëntmethode, rechtsinjectie, proef WM 3
- 4.11 Invloed van meetdichtheid op aangepaste variantie
- 4.12 Algemene momentengradiëntmethode, rechtsinjectie, proef WM 5
- 4.13 Algemene momentengradiëntmethode, rechtsinjectie, proef WM 5
- 4.14 Algemene momentengradiëntmethode, middeninjectie, proef WM 4
- 4.15 Algemene momentengradiëntmethode, middeninjectie, proef WM 4
- 5.1 Vergelijking van model- en prototype-koncentratieverdelingen
- 5.2 Vergelijking van model- en prototype-koncentratieverdelingen
- 5.3 Vergelijking van model- en prototype-koncentratieverdelingen
- 5.4 Model-prototypevergelijking van resultaten Waal

LIJST VAN TABELLEN

tabel 1	modelgegevens en concentratie-meetraaien
tabel 2	resultaten algemene momentengradiëntmethode
tabel 3	resultaten algemene momentengradiëntmethode voor proef WM 3 met andere meetdichtheid
tabel 4	resultaten algemene momentengradiëntmethode - Waalrivier
tabel 5	reproductie van dwarsdispersie
tabel 6	overzicht van model- en prototypereultaten

1 Inleiding

1.1 Omschrijving opdracht

In de zomer van 1971 zijn diffusiemetingen uitgevoerd in de Waal. Deze metingen zijn in samenwerking verricht door de Studiedienst Bovenrivieren van Rijkswaterstaat, het Rijksinstituut voor de Zuivering van Afvalwater en het Waterloopkundig Laboratorium. Per brief nr. 2987/K 495 d.d. 4 mei 1971 is door het Waterloopkundig Laboratorium aan de Directie Waterhuishouding en Waterbeweging van Rijkswaterstaat voorgesteld het bovenomschreven onderzoek voort te zetten met een diffusiemeting in het model M 959. In het model M 959 is het deel van de Waal, waarin in de zomer van 1971 is gemeten weergegeven op een schaal 1/100 horizontaal en 1/40 vertikaal. Dit voorstel is overgenomen door de Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, blijkens de aan het Waterloopkundig Laboratorium gezonden brief nr. 4852 d.d. 4 oktober 1971.

De modelmetingen zijn in de zomer van 1972 verricht in samenwerking tussen de Directie Waterhuishouding en Waterbeweging van Rijkswaterstaat en het Waterloopkundig Laboratorium. Rijkswaterstaat stelde een aantal fluorimeters en deskundig personeel ter beschikking voor het uitvoeren van de concentratiemetingen.

1.2 Doel van de proeven

Het doel van de metingen in het vertrokken model was het mechanisme voor de menging van merkstoffen in dwarsrichting in permanent stromende rivieren nader te leren kennen. Daartoe is de grootte van de dispersiecoëfficiënt voor de dwarsmenging experimenteel bepaald. Daarnaast is de verspreiding van merkstoffen in het vertrokken model met die in de rivier vergeleken. De mogelijk optredende mengmechanismen geven een verschillende verhouding tussen de grootte van de dwarsdispersie in de rivier en die in het model, zodat uit de model-prototypevergelijking het dominerende mengmechanisme bekend kan worden.

Voor de bewerking van de meetresultaten was een rekenprogramma beschikbaar, dat was ontwikkeld voor de interpretatie van in de IJssel (model en prototype) verrichte metingen (ref. 1).

De prototypemetingen in de Waal zijn eveneens met behulp van dit rekenprogramma geanalyseerd (ref. 1). Tijdens de interpretatie van de metingen in het Waalmodel bleek echter het op de IJssel geënte rekenprogramma voor de Waal enige nadelen te hebben, die pas bij de interpretatie van de modelmetingen aan het licht konden komen, doordat bij de modelmetingen de meetdichtheid groter was dan bij de prototypemetingen. Daarom was het nodig veranderingen aan te brengen in het interpretatie-rekenprogramma. Naast de Waalmodelmetingen zijn ook de Waalriviermetingen met het gemodificeerde rekenprogramma geanalyseerd.

1.3 Inhoud rapport

In hoofdstuk 2 is een korte beschrijving gegeven van de mogelijke interpretatiemethoden. In hoofdstuk 3 zijn de metingen beschreven, terwijl deze in hoofdstuk 4 geanalyseerd zijn. In hoofdstuk 5 zijn de modifikaties die in het oorspronkelijke interpretatie-rekenprogramma aangebracht zijn in het kort omschreven. De met dit nieuwe programma geïnterpreteerde gegevens van zowel Waalrivier als Waalmodel zijn met elkaar vergeleken. In hoofdstuk 6 is een samenvatting van het onderzoek gegeven met de belangrijkste conclusies.

Dit onderzoek werd verricht onder leiding van drs. M. Karelse die ook dit rapport samenstelde.

2 Analytische beschrijving verwerkingsmodel

De verspreiding van merkstoffen in een rivier is afhankelijk van

- de mate waarin de totale hoeveelheid merkstof, opgelost in water, afneemt tengevolge van absorptie door wanden en bodem en door afbraak van de opgeloste stof
- de opdrijvende effecten tengevolge van dichtheidsverschillen
- de initiële menging bij het lozingspunt
- het meeslepend (of konvektief) transport van stof met de waterbeweging mee
- het diffusief transport van merkstof van een watermassa met hogere concentratie naar één met lagere concentratie tengevolge van turbulente waterbewegingen (moleculaire diffusie verwaarloosd).

In het vervolg wordt de verspreiding van conservatieve merkstof (geen absorptie, geen afbraak) in een permanent stromende rivier behandeld alleen tengevolge van konvektief en diffusief massatransport; de invloed van dichtheidsverschillen wordt verwaarloosbaar gesteld, terwijl de initiële menging uit de meetresultaten geëlimineerd wordt. De stroming in de rivier wordt als twee-dimensionaal beschouwd, de snelheden en concentraties worden gemiddeld over de waterdiepte. Behalve dicht bij de bodem is de snelheid nagenoeg konstant over de vertikaal, terwijl de concentratie tengevolge van de wijze van injecteren (vertikale lijnbron) en de kleine diepte-breedte-verhouding weinig varieert in vertikale richting.

Injekteert men in een rivier merkstof dan volgt deze stof in eerste benadering de stroomlijn (dit is de lijn waarvoor geldt dat de raaklijn in elk punt van de lijn de richting van de over de waterdiepte gemiddelde snelheid aangeeft) welke door het lozingspunt gaat. Tengevolge van turbulente diffusie in dwarsrichting en dispersie in dwarsrichting o.a. door sekundaire stromen, vindt er echter een verspreiding in een richting loodrecht op de stroomlijn plaats. Omdat in een rivier in het algemeen de stroomlijnen niet evenwijdig lopen, er dus netto dwarssnelheden optreden, is er ook een dwarskonvektief transport aanwezig, dat de verspreiding in dwarsrichting beïnvloedt.

2.1 Basisvergelijkingen

Bij gelijkmatige en continue lozing van een merkstof via een verticale lijnbron in een permanent stromende rivier verkrijgt men een twee-dimensionale stationaire concentratieverdeling. Omdat in dit geval de longitudinale dispersieterm in de balansvergelijking verwaarloosd mag worden (ref. 1) wordt de massabalansvergelijking

$$h\bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + h\bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} (h\bar{T}_z) = 0 \quad (2.1)$$

waarin:

x = koördinaat in lengterichting van de rivier

z = koördinaat in dwarsrichting van de rivier

h = diepte

\bar{u} , \bar{w} = snelheidskomponent in x- respectievelijk in z-richting

\bar{T}_z = dispersief transport in z-richting

\bar{c} = concentratie.

- een streep boven een grootheid duidt aan dat de grootheid een over de waterdiepte gemiddelde waarde aangeeft.

Het is gebruikelijk om de diffusieve en dispersieve transporten als gradiënt-type transporten te beschouwen:

$$T_z = -e_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = + \overline{(w - \bar{w})(c - \bar{c})} - k_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \quad (2.2)$$

waarin k_z = dwarsdiffusiecoëfficiënt

e_z = dwarsdispersiecoëfficiënt

Het dispersieve transport wordt volgens verg. (2.2) gesplitst in een transportterm $\overline{(w - \bar{w})(c - \bar{c})}$ tengevolge van de niet gelijkmatige verdeling van de dwarsnelheid en de concentratie over de waterdiepte, en het diffusieve transport $-k_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z}$ tengevolge van het turbulent zijn van de stroming. Via substitutie van verg. (2.2) in verg. (2.1) volgt:

$$\bar{u}h \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{w}h \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (h e_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z}) \quad (2.3)$$

2.2 Mechanismen welke de dwarsdispersie beïnvloeden

In een rivier met een onregelmatige geometrie zal de dispersiecoëfficiënt in het algemeen een functie van de geometrie en de stromingscondities zijn

$$e_z = K \Phi(u, x, z) \quad (2.4)$$

waarin K = dimensieloze dispersiecoëfficiënt

Φ = dispersierelatie met dimensies van een lengte maal een snelheid.

De vorm van het functionele verband $\Phi(u, x, z)$ is afhankelijk van het dominerende mechanisme voor de dwarsdispersie en dient door interpretatie van metingen te worden bepaald. De in par. 2.4 beschreven algemene momenten-gradiëntmethode is een middel hiertoe, omdat bij de juiste keuze van de functie Φ bij toepassing van deze methode een lineair verband tussen de maatgevende grootheden wordt verkregen.

Voor rechte kanalen met een rechthoekige dwarsdoorsnede geldt bij overheersende invloed van de bodemruwheid (ref. 1 en 8):

$$e_z = K_1^* U^* H \quad (2.5)$$

hierin is $U^* = \sqrt{\frac{g}{C^2}}$. U = schuifspanningssnelheid

U = over de dwarsdoorsnede gemiddelde snelheid

C = Chézy-koëfficiënt

g = gravitatie konstante

H = gemiddelde diepte (::: mengweglengte)

Via de transformatie $K_1 = \sqrt{g/C^2} K_1^*$ wordt verg. (2.5)

$$e_z = K_1 U H \quad (2.6)$$

Voor de interpretatie van de metingen in één rivier maakt het niets uit of men verg. (2.5) dan wel verg. (2.6) gebruikt. Voor de vergelijking van metingen in een rivier en in het vertrokken hydraulische model daarvan is het wel belangrijk welke relatie men aanneemt. Immers de verg. (2.5) en (2.6) voorspellen een verschillende verhouding voor de grootte van de dispersie-koëfficiënt e_z in het prototype en in het model bij in model en prototype gelijke K_1^* respectievelijk gelijke K_1 . Voor rivieren met een onregelmatige geometrie werd door Holley (ref. 1 en 8) aangenomen

$$e_z = K_2 u \cdot h = K_2 q \quad (2.7)$$

waarin u en h de lokale snelheid en diepte zijn en q het lokale debiet per eenheid van breedte is.

Voor de interpretatie van modelmetingen is in ref. 1 ook gebruikt

$$e_z = K_5 U \eta \quad (2.8)$$

waarin η de plaatselijke waterdiepte is, behalve voor het gebied tussen de verbindingslijn van de kribtenen en de verbindingslijn van de snijpunten van waterlijn en krib, waar η gelijk wordt gesteld aan de diepte ter plaatse van de kribteen. Dit laatste om de invloed van de kribben op de dispersie beter weer te geven.

Een ander mogelijk functioneel verband voor de dwarsdispersiecoëfficiënt kan zijn

$$e_z = K_6 U L \quad (2.9)$$

waarin L een horizontale karakteristieke lengte voorstelt. Deze vorm van de dispersiecoëfficiënt moet gebruikt worden indien een horizontale karakteristieke lengte maatgevend is voor de dwarsdispersie.

Voor rechte kanalen met een bijna rechthoekige doorsnede wordt de mate van dwarsverspreiding van de merkstof (en daarmee de grootte van K) voornamelijk bepaald door de turbulente stroming tengevolge van de aanwezige bodemschuifspanning (ref. 9 en 10). De relatie (2.5) wordt dan gebruikt. In rivieren zijn er echter extra mechanismen, die bijdragen aan de dwarsdispersie. In de eerste plaats veroorzaken de aanwezige kribben een wervelpatroon (wervels met verticale as) achter de kribben. In het scheidingsvlak hoofdstroom-neerstream ontstaan turbulente wervels en tevens sekundaire (dwars)stromen (aan oppervlak naar hoofdstroom toe, aan bodem van hoofdstroom af). In de tweede plaats treedt er in rivierbochten een z.g. spiraalstroming op: behalve de netto dwarssnelheden (gemiddeld over de waterdiepte) treden er sekundaire (dwars)stromen op. Aan het wateroppervlak is de sekundaire stroom naar de buitenbocht toe gericht, terwijl aan de bodem deze stroom juist naar de binnenbocht gericht is (ref. 1).

2.3 Dwarsdiffusie in kanaal met rechthoekige doorsnede

In het geval van een recht kanaal met oneindige breedte B ($B/H \rightarrow \infty$) met een uniforme snelheid U en diepte H (geen dwarssnelheid, konstante diffusiecoëfficiënt k_z) resulteert uit verg. (2.3)

$$U \frac{\partial c}{\partial x} = k_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (2.10)$$

met als analytische oplossing

$$c(x, z) = \frac{Q_m}{2H \sqrt{\pi k_z U x_1}} \exp - \frac{U z_1^2}{4 k_z x_1} \quad (2.11)$$

waarin:

$$\begin{aligned}x_1 &= x - x_{inj} \\z_1 &= z - z_{inj} \\(x_{inj}, z_{inj}) &= \text{koördinaten van het injectiepunt} \\Q_m &= \text{massalozing per sekonde}\end{aligned}$$

De in verg. (2.11) gegeven verdeling is een Gauss-verdeling met maximale concentratie

$$c_{\max} = \frac{Q_m}{2H\sqrt{\pi k_z U x_1}} \quad (2.12)$$

en variantie

$$\sigma^2 = \frac{2k_z x_1}{U} \quad (2.13)$$

Uit verg. (2.12) blijkt dat de afname van de concentratie in de lengterichting afhangt van de verspreiding in dwarsrichting. Omgekeerd is in bovenvermeld geval uit de afname van de maximale concentratie in de lengterichting de grootte van de dwarsdiffusiecoëfficiënt k_z te bepalen.

Uit de verspreiding in de dwarsrichting in één station is volgens verg. (2.13) de diffusiecoëfficiënt k_z ook te bepalen. Deze laatste methode geeft uitkomsten welke niet van ijkfouten in de concentratiemetingen afhankelijk zijn. Via een niet lineaire kleinste kwadraten methode is uit de gemeten concentratieverdeling in een station direkt de variantie σ^2 en dus ook k_z te bepalen. Via differentiatie van verg. (2.13) volgt

$$\frac{d\sigma^2}{dx} = \frac{2k_z}{U} \quad (2.14)$$

Als de diffusiecoëfficiënt k_z een konstante is, is de gradiënt van de variantie ook konstant. De invloed van initiële menging op grootte van k_z wordt via verg. (2.14) geëlimineerd, terwijl deze methode tevens ongevoelig is voor ijkfouten in de concentratiebepaling, mits de onderlinge verhouding tussen de concentraties in de verschillende punten van een meetraai juist is gemeten.

In een kanaal van eindige breedte wordt veelal de variantie onafhankelijk van de vorm van de verdeling gedefinieerd:

$$\sigma^2 = \frac{\int_A^B c (z - z_0)^2 dz}{\int_A^B c dz} \quad (2.15)$$

waarin z_0 bij middeninjeکتie (injeکتie midden in de rivier) op de stroomlijn door het lozingspunt en bij zij-injeکتie (injeکتie vanaf de oever) als de plaats van de oever aangenomen wordt. Bij lozing in het midden is verg. (2.14) alleen toepasbaar indien $c = 0$ in de riviergrenzen $z = A$ en $z = B$. Bij lozing aan de oever is verg. (2.14) alleen toepasbaar indien $c = 0$ aan de andere oever.

2.4 Dwarsdispersie in een rivier

In ref. 1 geeft Holley een generalisering van de in verg. (2.14) gegeven methode, die het mogelijk maakt om uit de gemeten concentratieverdelingen in rivieren met een onregelmatige geometrie de dispersiekoëfficiënt te bepalen. Deze methode wordt in dit rapport als de algemene momentengradiëntmethode aangeduid (in ref. 1, 7 en 8: generalized change of moments method, kortweg g.c.m.). In plaats van de variantie van de concentratieverdeling c wordt in deze methode de variantie van de massastroom per eenheid van breedte $T = uch$ genomen. (u en w zijn in het vervolg over de waterdiepte gemiddelde waarden.)

$$\sigma_3^2 = \frac{\int_A^B huc z_1^2 dz}{\int_A^B huc dz} \quad (2.16)$$

waarin:

$$z_1 = z - z_0$$

z_0 : bij middeninjeکتie de koördinaat van de stroomlijn door het lozingspunt en bij zij-injeکتie de koördinaat van de oever waaraan geïnjekteerd wordt.

De normering van deze variantie geschiedt met de totale massastroom door een dwarsdoorsnede. Deze variantie wordt gekorrigeerd met

$$G = 2 \int_{x_{inj}}^x \left[\frac{\int_A^B h w c z_1 dz}{\int_A^B h u c dz} \right] dx \quad (2.17)$$

welke de invloed van de over de waterdiepte gemiddelde dwarssnelheden op de verspreiding van de merkstof bevat, zodat $(\sigma_3^2 - G)$ de variantie van de massastroom T is, welke slechts door de dwarsdispersie veroorzaakt wordt. Met gebruikmaking van verg. (2.4) levert de algemene momentengradiëntmethode de waarde van de dimensieloze grootheid K via

$$\frac{d(\sigma_3^2 - G)}{d x_t} = 2 K H_R \quad (2.18)$$

waarin

H_R = gemiddelde diepte van riviergedeelte waarin gemeten is,

x_t = getransformeerde lengteschaal welke er aldus uitziet:

$$x_t = \frac{1}{H_R} \int_{x_{inj}}^x \left[\frac{\int_A^B h \phi \frac{\partial c}{\partial z} z_1 dz}{\int_A^B h u c dz} \right] dx \quad (2.19)$$

Een lineair verband tussen $(\sigma_3^2 - G)$ enerzijds en x_t anderzijds duidt erop dat de gekozen functie $\phi(u, x, z)$ in iedere meetsektie mag worden toegepast met dezelfde waarde van de konstante K (zie verder ref. 7). De afleiding van verg. (2.17) t/m (2.19) (ref. 1 en 7) is gebaseerd op een integratieproces dat ook geldig is indien de concentratieverdeling door de oevers wordt beïnvloed.

Volgens de bovenstaande vergelijkingen is deze methode om de konstante K te bepalen ongevoelig voor ijkfouten in de concentratiebepaling, mits de onderlinge verhouding tussen de verschillende concentraties in één meetstation goed gemeten is. De invloed van de initiële menging wordt in deze methode geëlimineerd.

De waarden van de dwarssnelheden w worden verkregen via de continuïteitsvergelijking

$$w = - \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \int_s^z u h dz \quad (2.20)$$

waarin s op de stroomlijn ligt welke door het injectiepunt gaat.

3 Beschrijving proeven in Waalmodel

3.1 Algemene beschrijving Waalmodel M 959

a. Het model

Het model M 959 is een vertrokken model van een gedeelte van de Waal in de nabijheid van Zaltbommel (km 1029 tot km 1036, zie fig. 3.1). Het model is gebouwd ten behoeve van de studie van het stroombeeld en het sediment transport bij plaatsing van brugpijlers in de rivier. De bodem van het model is ten behoeve van de diffusieproeven bedekt met splitsteen ter grootte van 3 à 4 cm om de volgens Froudeschaal berekende ruwheid in het model te verkrijgen (zie onder b.). De dieptepeilingen in het model reproduceren de peilingen van Rijkswaterstaat in de Waal van juni/juli 1971.

Het model werd gebouwd met een horizontale schaal van 1/100 en een verticale schaal van 1/40 (vertrekking 2.5). De snelheidsschaal is volgens de Froudeschaal $1/\sqrt{40}$. Voor de diffusieproeven werd een konstant debiet van 39.9 l/sec. ingesteld, hetgeen correspondeert met $1010 \text{ m}^3/\text{sec.}$ in het prototype (als bij de prototypemetingen, zie ref. 5). De gemiddelde diepte van het model was 0.112 m en de gemiddelde breedte 2.615 m. Deze waarden zijn gevonden door als breedte de afstand tussen de punten halverwege de teenkriblijn en de riviergrenslijn te nemen. De riviergrenslijn is gedefinieerd als de lijn, die de snijpunten van kriblijn (uiterste begrenzing van krib naar midden van de rivier toe) en het wateroppervlak met elkaar verbindt. De kribteenlijn is de lijn, die de kribtenen (snijpunten van kriblijn en rivierbodem) met elkaar verbindt. Aldus verkrijgt men voor elke meetraai een fiktieve riviergrens en een fiktieve plaats van de kribteen.

De waterstand was in het model zodanig hoog dat enkele kribkoppen onder water stonden; de snelheid van het water boven de ondergelopen kribben was gering, zodat op deze plaatsen de riviergrenslijn gelijk genomen werd aan de lijn, welke de kribkoppen met elkaar verbindt (normaallijn).

De diepteverdelingen in de dwarsdoorsneden om de 2.5 m worden getoond in fig. 3.2 t/m fig. 3.5. De diepteverdeling in 3 z.g. scheve, van kribkop tot kribkop lopende, raaien wordt getoond in fig. 3.6. De stippellijnen in de dwarsdoorsneden geven de, eventueel fiktieve, kriblijnen aan.

In dit rapport worden steeds modelmaten gebruikt, behalve als de longitudinale positie van de meetstations gebruikt wordt. In dit laatste geval wordt de prototype kilometer aanduiding gebruikt.

b. Ruwheid model

Het verhang in het model werd bepaald met behulp van 6 peilnaalden, die zich bij kmr. 929.965 en 931.550 op de rechteroever en bij kmr. 929.965, 933.395, 934.790 en 935.540 op de linkeroever bevonden. Met de peilnaalden werd tot op 0.1 mm nauwkeurig gemeten. Het resultaat wordt getoond in fig. 3.7.

De hydraulische straal van het model werd berekend met behulp van een geschematiseerd rechthoekig kanaal met een breedte en diepte gelijk aan de onder par. 3.1.a. vermelde gemiddelde grootheden. De hieruit berekende Chézy-koëfficiënt was gelijk aan $28.5 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{sec}$. In ref. 1 wordt voor het prototype een Chézy-koëfficiënt in de orde van $45 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{sec}$. gegeven. Vanwege de vertrekking van 2.5 moet de ruwheid in het model groter zijn dan in het prototype nl.

$$n_C^2 = \frac{n_L}{n_H} = 0.4 \quad (3.1)$$

waarin

n = verhouding model- tot prototypewaarde van de grootheid aangeduid met de index

n_L = horizontale lengteschaal

n_H = verticale lengteschaal

De eerder gegeven waarden van de Chézy-koëfficiënt in model en prototype voldoen aan bovenvermelde schaalregel (3.1).

c. Snelheden

De snelheidsmetingen in het model werden verricht met mikromolens, welke ongeveer 4 cm onder het wateroppervlak de watersnelheid gedurende 100 sekonden registreerden in een richting evenwijdig aan de as van de rivier. In de fig. 3.2 t/m 3.6 zijn de snelheidsverdelingen gegeven.

In het verwerkingsprogramma zijn per doorsnede de debieten berekend. Het meetniveau is zo gekozen dat de gemeten snelheden bij een logaritmisch snelheidsprofiel bij benadering als de over de diepte gemiddelde snelheden genomen kunnen worden. Via de vermenigvuldiging met de diepte verkrijgt men het debiet per breedte-eenheid in een punt van de dwarsdoorsnede. Het totale debiet door de doorsnede wordt verkregen via numerieke integratie met behulp van de trapeziumregel. Het resultaat is gegeven in tabel 1. De aldus berekende debieten wijken veelal af van het via een V-stuw ingebrachte debiet. Afwijkingen tot 20% van het werkelijke debiet komen voor. Het snelheidsprofiel wordt vervolgens zodanig aangepast dat het berekende debiet identiek wordt aan het werkelijke rivierdebiet. Daartoe worden alle snelheden met een faktor QR vermenigvuldigd waarbij

$$QR = \frac{Q(\text{werkelijk})}{Q(\text{gemeten})}$$

De partiële debieten in een dwarsdoorsnede worden berekend met

$$Q_p = \int_s^z uhdz \quad (3.2)$$

waarin de riviergrenslijn s als stroomlijn beschouwd wordt en waarbij de gemeten snelheid is omgerekend naar de snelheid u door vermenigvuldiging met de faktor QR. Indien men in opeenvolgende stations de partiële debieten op een konstante afstand (z - s) van de oever berekent dan kan men uit het verschil de dwarssnelheden bepalen (zie verg. 2.20).

In fig. 3.8 zijn de stroomlijnen getrokken als lijnen, die punten met een even groot partieel debiet met elkaar verbinden. Hoewel het meetgedeelte van het model slechts in geringe mate gekromd is, treden er volgens fig. 3.8 toch belangrijke dwarssnelheden op. In raai 930.000 passeert het grootste gedeelte van het debiet rechts van het midden. Aan het linker-oever (binnenbocht) is de rivier ondiep en is de watersnelheid gering.

Aan de rechteroever (buitenbocht) is de rivier diep en is de watersnelheid groot. In het eerste deel van het rivierstuk (kmr. 930.000 tot kmr. 932.500) is duidelijk de tendens van zich naar de linkeroever verplaatende stroomlijnen waarneembaar, zodat de dwarsnelheden in dit gedeelte naar de linkeroever toegericht zijn. In raai 932.500 passeert het grootste gedeelte van het debiet links van het riviermidden. Van kmr. 932.500 tot kmr. 935.000 is de tendens aanwezig dat de stroomlijnen naar de rechteroever toe verplaatst worden, dus treden daar dwarsnelheden naar de rechteroever toegericht op. Wel zijn er plaatselijke afwijkingen van deze gemiddelde tendens aanwezig. In het laatste rivierstuk vanaf kmr. 935.000 worden de stroomlijnen weer naar de linkeroever verplaatst.

3.2 Koncentratiemetingen

Als merkstof werd in deze metingen Rhodamine-BF-extra gebruikt. De concentraties van deze merkstof in het water werden gemeten met fluorimeters. Tussen de concentratie van in water opgeloste Rhodamine en de fluorescentie (schaaluitslag) bestaat een lineair verband, indien de temperatuur van het water konstant is. De ijking van een fluorimeter is slechts geldig voor de opgegeven ijktemperatuur. Wordt er bij andere temperaturen gemeten dan moeten de concentraties een temperatuurcorrectie ondergaan ($\pm 2\%$ per $^{\circ}\text{C}$, zie tabel in ref. 13).

De metingen werden verricht op 6 juni 1972 (WM 1, inspeelproef) en in de week van 17 t/m 21 juli 1972. In deze laatste periode heersten er in Nederland zeer hoge temperaturen. Doordat het model M 959 een zg. openluchtmodel was, had dit tot gevolg dat de temperatuur van het water in de loop van de dag opliep. Daarnaast kon de temperatuur in de ruimte, waarin de fluorimeters waren opgesteld 's middags ondanks de ventilatoren tot boven de 35°C oplopen. Tijdens de middagmetingen (in tabel 2 met n.m. aangeduid) kon de temperatuur van een watermonster tussen tijdstip van monsternamen en tijdstip van meting in de orde van 5°C oplopen, hetwelk de concentratie-ijking met 10 à 15% doet afnemen. In totaal werden er 5 proeven gedaan (zie tabel 1). In de eerste proeven WM 1 en WM 2 werd er bij kribkop 930.335 L.O. geïnjecteerd, in de proeven WM 3 en WM 5 aan de rechteroever bij kribkop 930.000 R.O.; dit alles omdat tijdens de prototypemetingen ook op deze plaatsen geïnjecteerd is. In proef WM 4 werd er in het midden van raai 930.000 geïnjecteerd. De merkstof werd onder water geïnjecteerd via een buisje, waarin aanvankelijk 2 gaatjes ($\varnothing \approx 1 \text{ mm}$) op 7.5 cm afstand zaten, doch ter verkrijging van een betere verdeling over de diepte

is vanaf proef WM 2 nog een derde gat toegevoegd midden tussen de overige twee. Deze buis werd afhankelijk van de plaatselijke waterdiepte zoveel mogelijk vertikaal geplaatst, zodat er sprake was van een lijnbron. Via een overstortvat werd een konstant injektiedebiet van 5 cc/sec. Rhodamine oplossing in het model geïnjecteerd. De geïnjecteerde massastroom Q_m was in de eerste twee proeven in de orde van $1.20 \cdot 10^{-7}$ kg/sec., in de proeven WM 3 en WM 4 in de orde van $1.25 \cdot 10^{-7}$ kg/sec. en in proef WM 5 in de orde van $3.50 \cdot 10^{-7}$ kg/sec.

Vanwege de grote stroomsnelheden aan de rechterzijde van de injectieraai kmr. 930.000 was er bij de proeven met injectie aan de rechter oever sprake van een niet verwaarloosbare initiële menging. Ook in proef WM 4 was er sprake van initiële menging.

De Rhodamine-koncentratie werd bepaald door het doormeten van genomen watermonsters met de fluorimeters. Daar er in het model grote fluktuaties van de concentraties in de tijd optraden was het noodzakelijk meerdere monsternamen per meetpunt te doen. Om een groot aantal monsters tegelijkertijd te kunnen nemen werd een zg. monsterlat gekonstrueerd. Aan deze monsterlat kon op iedere willekeurige plaats een klem bevestigd worden waarin de kuvetten met een inhoud van ≈ 5 cc water geklemd konden worden. Aldus was het mogelijk een meetraai met 15 à 20 meetpunten in één keer te bemonsteren. De kuvetten werden gevuld met water uit de bovenste 5 cm. Per meetraai werd aanvankelijk elk punt 10 maal bemonsterd, doch 5 maal bemonsteren gaf reeds een goede benadering van de gemiddelde waarden, zodat in de laatste proeven met 5 maal bemonsteren volstaan is. De hierboven beschreven bemonsteringsmethode zal verder met de kuvettenmethode worden aangeduid (kuv in tabel 2). Het nadeel van deze methode is dat het mogelijk is dat er een temperatuursverloop ontstaat tussen tijdstip van monsternamen en tijdstip van meting van Rhodamine-koncentratie in de fluorimeter. Dit nadeel was tijdens de proeven WM 2 t/m WM 5 duidelijk merkbaar vanwege de hoge temperaturen in de meetruimte.

Tijdens de metingen was ook een geautomatiseerde fluorimeter aanwezig, waarmee elk meetpunt gedurende een periode van ongeveer 3 minuten om de 5 seconden bemonsterd werd. Via een slangetje werd het water dat ter plaatse van het meetpunt ongeveer isokinetisch afgezogen werd naar de fluorimeter gevoerd waar automatisch geregistreerd en naar verschillende schaalbereiken geschaald werd. Per periode is uit de registratie een gemiddelde waarde bepaald.

Op plaatsen waar er een grote concentratiegradiënt aanwezig was, werkte deze automatische fluorimeter niet nauwkeurig omdat er voortdurend naar een ander schaalbereik geschakeld werd (passerende wervels) en daardoor de registratie verward werd.

Een derde meetmethode, welke slechts in proef WM 1 gebruikt is ter controle, is de zg. flessenmethode. Een litervat wordt gedurende 3 à 4 minuten gevuld met modelwater dat in een bepaald meetpunt passeert. Nadat het water in het vat goed gemengd is wordt uit het vat een kuvetje gevuld dat in een fluorimeter doorgemeten wordt.

De keuze van de kuvettenmethode stond reeds na proef WM 1 vast, omdat alleen met deze meetmethode een groot aantal metingen op een dag verricht kon worden. Dit werd o.a. veroorzaakt door het feit dat er slechts één geautomatiseerde fluorimeter werkzaam was, terwijl daarnaast 5 fluorimeters ter beschikking stonden voor de kuvettenmethode.

De in tabel 2 gegeven maximale concentratie en de totale massastroom zijn berekend met naar de temperatuur van het modelwater omgerekende ijkkurven voor de fluorimeters. De temperatuur van de watermonsters nam, vanwege de bijzondere hoge luchttemperaturen tijdens de metingen, toe tussen het tijdstip van monsternamen en het tijdstip van doormeting. Hoe groot deze temperatuurstijging was, kon niet exakt bepaald worden vanwege praktische bezwaren (temperatuurstijging kleiner dan 5°C), zodat een juiste correctie van de concentraties onmogelijk was.

In de week van 17 t/m 21 juli (proeven WM 2 t/m WM 5) zijn geen betrouwbare ijkkurven van de fluorimeter bepaald. De temperatuurverandering van de ijkkurven tijdens het doormeten maakte betrouwbare ijkingen onmogelijk. De ijkkurven voor de fluorimeters zijn bepaald uit ijkingen welke voor- en na deze meetperiode verricht zijn (op dagen met een konstante luchttemperatuur).

De absolute grootte van de concentraties en de grootte van de totale massastroom zijn niet nauwkeurig bepaald vanwege de temperatuurtoename van de watermonsters tussen tijdstip van monsternamen en het tijdstip van doormeten, welke toename niet verdisconteerd is in de ijkkurven (de concentraties kunnen daardoor een orde 10% te klein zijn) en vanwege de onzekerheid in de ijking van de fluorimeters (tot op 10% nauwkeurig). Alle watermonsters in een be-

paald station genomen werden direct na elkaar met dezelfde fluorimeter doorgemeten, zodat de invloed van de onzekerheid in de ijkcurven voor alle watermonsters hetzelfde is en de temperatuurverschillen tussen de verschillende watermonsters (tijdens het doormeten in de fluorimeters) gering geacht mogen worden (bij middagmetingen maximaal 2°C verschil).

De volgorde van doormeten van de kuvetten was gericht van kuvetten met hoge naar die met lage concentraties. Bij middeninjectie van de merkstof in het model werden allereerst de watermonsters, die aan de linkeroever genomen waren, doorgemeten.

De vorm van de concentratieverdeling in de dwarsrichting werd op grond van het voorgaande juist bepaald. Daar er voor de analyse van de meetgegevens slechts de vorm van de concentratieverdeling in de dwarsrichting belangrijk is, heeft de onnauwkeurigheid in de bepaling van de absolute grootte van de concentraties geen invloed op de resultaten van de algemene momentengradiëntmethode.

Een vergelijking van de gemeten concentratieverdelingen met de verschillende meetmethodes zijn gegeven in de fig. 3.9 en 3.11. In fig. 3.9 valt op dat er in kmr. 931.855 - 931.900 een duidelijk verschil optreedt tussen de verdelingen gemeten volgens flessen- en kuvettenmethode. In de andere twee meetraaien is de overeenstemming redelijk. De oorzaak van het verschil is niet meer te achterhalen. Gedacht wordt aan een verschuiving van de monsterlat naar de linkeroever toe, waardoor aan de gemeten concentratie een verkeerde plaatscoördinaat is toegekend. De invloed van dit verschil op de analyse is gegeven in tabel 2 waaruit blijkt dat de invloed gering is.

In fig. 3.10 is een voorbeeld gegeven van de invloed van tijdstip van bemonsteren. 's Morgens was de temperatuur in de meetkabine redelijk d.w.z. niet veel hoger dan de temperatuur van het modelwater. 's Middags echter kon de temperatuur in de meetkabine, ondanks alle voorzorgen tot 35°C oplopen. Het verschil in de concentraties in fig. 3.10 is in de orde van faktor 1.2. Stel dat 's middags de temperatuurooploop in de orde van 5°C was dan volgt daaruit dat de middagmeting een faktor 1.14 hogere concentratie moet krijgen, zodat het verschil inderdaad hoofdzakelijk aan het temperatuurverloop toegeschreven kan worden.

Het verschil in de gemeten concentraties volgens de automaatmethode en de

kuvettenmethode is uitgebeeld in fig. 3.11, doch ook in tabel 2 blijkt uit de berekende totale massastroom dat er een groot verschil aanwezig is. De berekende totale massastroom benadert voor metingen volgens de automaatmethode het beste de geïnjecteerde totale massastroom. Uit fig. 3.11 blijkt dat de gemeten concentraties in de orde van een faktor 1.7 hoger zijn als we de automaatmethode gebruiken, terwijl uit de temperatuurtoename slechts een faktor van 1.15 verklaard kan worden. Het verschil moet derhalve aan andere oorzaken toegeschreven worden, wellicht is een verschil in de ijkingen de oorzaak.

De concentratieverdeling in de dwarsrichting is voor beide methoden identiek wat vorm betreft, zodat er geen grote invloed op de resultaten van de analyse met de algemene momentengradiëntmethode te verwachten valt. De concentratieverdelingen, in verschillende meetraaien en proeven gemeten, zijn niet alleen relatief (wat vorm betreft) te vergelijken doch ook absoluut als men de concentraties normeert met de berekende totale massastroom Q_m van de bijbehorende dwarsdoorsnede. In hoofdstuk 5 zullen de aldus genormeerde prototype en modelconcentratieverdelingen met elkaar vergeleken worden.

4 Analyse meetgegevens

4.1 Gaussische concentratieverdeling

Met behulp van een niet lineair kleinste kwadraten programma zijn enkele gemeten concentratieverdelingen zo goed mogelijk met een Gaussverdeling benaderd (zie fig. 4.1 t/m 4.5 en tabel 2):

$$c = c_{\max} \exp - \frac{(z - z_0)^2}{2(\sigma^2)_G} \quad (4.1)$$

waarin:

z_0 = plaats maximum

$(\sigma^2)_G$ = variantie van de Gaussverdeling

Voor elke verdeling volgt dus de beste $(\sigma^2)_G$. Vervangt men in verg. 2.14 k_z door e_z dan zou men via deze vergelijking uit de variantie van de Gaussverdeling $(\sigma^2)_G$ de grootte van de dwarsdispersiecoëfficiënt e_z kunnen bepalen, mits de invloed van de optredende netto dwarssnelheden op de concentratieverdeling gering zou zijn.

Om de gemeten en berekende verdelingen te kunnen vergelijken is een objectieve parameter nodig die de mate van overeenstemming aangeeft (zie ref. 1):

$$\Delta_G = \frac{\frac{1}{n} \left\{ \sum_{p=1}^n \left[(c_c)_p - (c_m)_p \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}{\frac{1}{n} \sum_{p=1}^n (c_m)_p} \quad (4.2)$$

waarin:

c_c = berekende concentratie

c_m = bijbehorende gemeten concentratie

n = aantal meetpunten in raai

Voor de proeven met injectie aan de oever blijkt dat de meetgegevens redelijk met een Gaussverdeling te benaderen zijn. Voor de proef WM 4, injectie in het midden, geldt hetzelfde voor de meetraaien op minder dan 20 m afstand van de injectiebron. Doordat de merkstof het eerst de linkeroever bereikt, stijgt aan de linkeroever de concentratie het snelst, zodat er een a-symmetrische verdeling ontstaat. De verdelingen in meetraaien op meer dan 20 m afstand van de injectiebron zijn daarom niet Gaussisch meer.

4.2 Algemene momentengradiëntmethode

Onder par. 3.1.c. werd reeds beschreven dat er ondanks de vrij rechte loop van het model toch belangrijke dwarssnelheden optraden. Daardoor is het belangrijk dat de variantie van de massastroom zo goed mogelijk gecorrigeerd wordt op dwarsverplaatsingen van de stroomlijnen t.o.v. de stroomlijn door het injectiepunt. Voor elke proef is naast de variantie σ_3^2 zelf, de correctiegrootte G en de aangepaste variantie $(\sigma_3^2 - G)$ in een figuur weergegeven. De belangrijkste resultaten van de analyse zijn in tabel 2 weergegeven.

4.2.1 Linksinjectie

In de inspeelproef WM 1 en in proef WM 2 is er Rhodamine geïnjecteerd aan de linkeroever ter plaatse van de binnenbocht waar weinig debiet passeerde. Na deze bocht wordt het debiet weer gelijkmatiger over de doorsnede verdeeld, zodat de stroomlijnen naar de linkeroever toegericht zijn (fig. 3.8). Aanvankelijk wordt daardoor de Rhodaminewolk door de optredende dwarssnel-

heden naar de linkeroever gedrukt. In fig. 4.6 en 4.7 blijkt dit duidelijk uit het, de eerste tientallen meters, klein blijven van de variantie σ_3^2 en uit het negatief zijn van G. Rond kmr. 934.000 neemt G met toenemende x toe en wordt dus de Rhodaminewolk weer van de linkeroever af verplaatst, hetgeen ook uit de stroomlijnenfiguur blijkt. Bekijken we de aangepaste variantie $(\sigma_3^2 - G)$ dan blijkt dat de resultaten redelijk met een rechte, d.w.z. met een konstante, koëfficiënt K_t te benaderen zijn in proef WM 2. In de inspeelproef WM 1 is de $(\sigma_3^2 - G)$ tegen x-lijn nog enigszins gekromd, doch in deze proef is $\Delta x \approx 10\text{m}$.

De helling van de rechte $(\sigma_3^2 - G)$ tegen x_t hangt behalve van de grootte van K_t ook van de gemiddelde diepte H af. De diepte is in WM 1 anders dan in WM 2 vanwege het kleiner aantal meetraaien. De lijnen met een konstante K_t zijn dus voor proef WM 1 en proef WM 2 niet identiek, het verschil is echter gering.

Uit fig. 4.8 blijkt dat vanwege de spreiding in de berekende punten het weinig verschil maakt welke getransformeerde lengte x_t (vergl. 2.19) gekozen wordt ter verkrijging van een rechte $(\sigma_3^2 - G)$ tegen x_t -lijn. Als resultaat volgt voor linksinjectie

$$K_1 = 0.030 \pm 0.005$$

$$K_2 = 0.030 \pm 0.005$$

4.2.2 Rechtsinjectie

Voor de proeven met rechtsinjectie WM 3 en WM 5 blijkt de korrektieterm G bijzonder belangrijk te zijn. Bij rechtsinjectie treden er de eerste tientallen meters na het injectiepunt dwarsnelheden van de rechteroever af op, welke de Rhodaminewolk verbreden, zodat σ_3^2 sterk toeneemt met x en G ook met x toeneemt. Rond kmr. 933.500 neemt de korrektieterm G weer af, d.w.z. de wolk wordt naar de rechteroever toe verplaatst. In de σ_3^2 tegen x_0 kurve, (fig. 4.9) ziet men dan ook een afname van de variantie optreden. Vergelijkt men de variantie in WM 3 en WM 5 dan blijkt dat σ_3^2 redelijk gereproduceerd wordt in beide proeven. Wat de term G betreft is de reproductie slechter. Het effect van de correctie van de variantie is zodanig dat er voor proef WM 3 een licht gebogen kurve ontstaat terwijl in WM 5 de kromming veel sterker is. De korrektiegrootte G is bij rechtsinjectie zodanig belangrijk dat

het niet recht zijn van de $(\sigma_3^2 - G)$ tegen x_t kurven aan de onnauwkeurigheid in de geïntegreerde grootheid G toegeschreven zou kunnen worden. Dit laatste wordt geïllustreerd in fig. 4.11 (zie ook tabel 3) waarin de resultaten van proef WM 3 verwerkt zijn op drie verschillende manieren:

- 1e gegevens van alle 22 concentratiemeetraaien gebruikt ($\Delta x = 2.5$ m)
- 2e gegevens van slechts 11 meetraaien gebruikt ($\Delta x = 5$ m)
- 3e gegevens van slechts 6 meetraaien gebruikt ($\Delta x = 10$ m).

Vooraf uit het verloop van G met x_0 blijkt duidelijk dat er een systematisch verschil optreedt. Hoe groter de meetdichtheid in x -richting is, des te beter worden de lokale invloeden meegenomen en des te beter zal de $(\sigma_3^2 - G)$ tegen x_t kurve met een rechte te benaderen zijn. Een lichte mate van kromming is te verklaren via de aanwezigheid van kribben bij de oevers, welke de menging en daarmee K_t aan de oevers groter doen zijn dan in het midden van een raai.

Als resultaat van de proeven met rechtsinjectie wordt fig. 4.10 gebruikt

$$K_1 = 0.030 \pm 0.005$$

$$K_2 = 0.025 \pm 0.005$$

Opgemerkt kan nog worden dat via rechtlijnige extrapolatie naar $x_t = 0$ toe er in dit punt een positieve $(\sigma_3^2 - G)$ gevonden wordt. Dit betekent dat er, zoals onder par. 3.2 vermeld, een niet verwaarloosbare initiële menging bij de proeven met rechtsinjectie is opgetreden.

4.2.3 Middeninjectie

In proef WM 4 is Rhodamine in het midden van kmr. 930.000 geloosd. Tengevolge van de dwarssnelheden naar de linkeroever toe, bereikt de Rhodaminewolk reeds snel de oever (vanaf kmr. 931.500), zodat de concentratie aan de linkeroever met toenemende x hoger is dan zonder de aanwezigheid van de oever het geval zou zijn (zie fig. 4.4). De concentratieverdeling kan in eerste benadering bepaald worden uit de superpositie van de concentratieverdeling, welke bij afwezigheid van de oever gevonden zou worden en de spiegelbeeld-concentratieverdeling welke ten opzichte van de oever gespiegeld wordt. Door de aanwezigheid van kribben is de dwarsdispersie aan de oever groter dan in het midden, zodat nabij de oever de concentratiegradiënt snel in grootte afneemt. Omdat

de Rhodaminewolk snel de oever bereikt, mag verwacht worden dat er in het eerste gedeelte van het model een grotere dispersiecoëfficiënt gevonden wordt dan over het laatste gedeelte van het model, waarin de wolk over de gehele breedte van het model zich verspreid heeft.

Naast de vervorming van de concentratieverdeling tengevolge van de aanwezigheid van oevers met kribben is er nog een andere moeilijkheid, namelijk de definitie van het punt $z = z_0$. Dit punt is namelijk een karakteristiek punt van de massastroomverdeling (eerste moment) doch wordt in de metingen genomen als het punt waar de stroomlijn door het injectiepunt de desbetreffende meetraai snijdt.

Het resultaat van de analyse is gegeven in fig. 4.14 en fig. 4.15. De kurven $(\sigma_3^2 - G)$ tegen x_t zijn gekromd; op het eerste gedeelte van het riviermodel tot kmr. 933.500 zijn de meetgegevens redelijk te benaderen met $K_1 = .03$ of $K_2 = .028$, echter op het laatste gedeelte worden de waarden van de aangepaste variantie slechts in geringe mate groter, zodat de dispersiecoëfficiënt afneemt. De oorzaak hiervan is de afname van de dwarsdispersie naarmate de Rhodaminewolk breder wordt (afnemende invloed van kribben) en daarnaast de onzekerheid in de definitie van z_0 en de vervorming van de concentratieverdeling nabij de oevers. Laten we de meetgegevens over het laatste gedeelte van het riviermodel buiten beschouwing dan is het resultaat

$$K_1 = .030$$

$$K_2 = .028$$

In het bovenstaande zijn geen K_5 -waarden gegeven alhoewel in tabel 2 wel x_5 -waarden gegeven zijn. De $(\sigma_3^2 - G)$ tegen x_5 rechten zijn niet uitgezet, omdat de invloed van deze wijzigingen van de dispersiecoëfficiënt aan de oevers klein zal zijn (in deze proeven is immers de concentratiegradiënt aan de rivieroevers $\partial c / \partial z$ ook klein). Bovendien wordt in verg. (2.8) de gemiddelde snelheid U gebruikt, zodat x_5 een tussenvorm tussen x_1 en x_2 is (als er aan de oevers weinig invloed is). Formeel lijkt een andere modifikatie zinvoller

$$e_z = K_6 u \eta \quad (4.3)$$

waarin:

η = plaatselijke waterdiepte, zie definitie bij verg. (2.8)

u = lokale snelheid

welke vorm een combinatie van de relaties (2.7) en (2.8) is.

4.2.4 Konklusies

- Uit de algemene momentengradiëntmethode toegepast op de diffusiemetingen in het Waalmodel volgt dat voor

linksinjectie	$1000 K_1 = 30 \pm 5$	$1000 K_2 = 30 \pm 5$
rechtsinjectie	$1000 K_1 = 30 \pm 5$	$1000 K_2 = 25 \pm 5$
middeninjectie	$1000 K_1 = 30 \pm 5$	$1000 K_2 = 28 \pm 5$

Omdat geldt dat $x_1 < x_5 < x_2$ (zie tabel 2) geldt $K_2 < K_5 < K_1$.

- Tengevolge van de aanzienlijke dwarsnelheden welke in dit riviermodel optreden is het noodzakelijk dat de meetdichtheid in de x-richting in de orde van grootte van de breedte van het model ligt, opdat de algemene momentengradiëntanalyse zinvol toepasbaar wordt (de aangepaste variantie $(\sigma_3^2 - G)$ is een lineaire functie van de getransformeerde afstand x_t bij de juiste keuze van $\phi(x,u,z)$).
- De optredende kromming in de $(\sigma_3^2 - G)$ tegen x_t -kurven is voor de proeven met injectie aan de rechteroever niet via een geschikte keuze van de getransformeerde afstand x_t (d.w.z. keuze van dispersierelatie ϕ_t) te elimineren, doch slechts via een nauwkeurige berekening van de noodzakelijke korrektiegrootte G .
- Bereikt de Rhodaminewolk een oever, waaraan niet geïnjecteerd wordt dan is het gebruik van de algemene momentengradiëntmethode formeel juist, doch kan deze bij uitvoering moeilijkheden geven vanwege het gebruik van een dispersierelatie $\phi(u,x,z)$, welke lokale invloeden niet in voldoende mate in rekening brengt en vanwege de invloed van de keuze van z_0 bij injectie in het midden van de rivier.

5 Vergelijking model-prototype

5.1 Modifikaties prototypesresultaten

Het rekenprogramma dat voor de interpretatie van in de IJssel (model en rivier) verrichte metingen was ontwikkeld is tevens gebruikt voor de analyse van de veldmetingen in de Waal. De resultaten hiervan zijn gegeven in ref. 1. Later is het rekenprogramma algemeen toepasbaar gemaakt, waarbij echter bij de interpretatie van de metingen in het Waalmodel enige nadelen van de bestaande rekenmethode naar voren kwamen. Deze konden pas aan het licht komen

bij de interpretatie van de Waalmodelmetingen doordat de meetdichtheid bij de Waalmodelmetingen groter was dan bij de prototypemetingen, waardoor een scherpere analyse van de Waalmodelmetingen mogelijk was.

Op grond van het bovenstaande zijn enige modifikaties in het rekenprogramma aangebracht, terwijl de veldmetingen in de Waal met het gemodificeerde programma nogmaals zijn geanalyseerd. Hierbij werden resultaten voor de veldmetingen in de Waal verkregen, die afweken van de in ref. 1 gegeven resultaten. De overige in ref. 1 gegeven resultaten (model en prototype IJssel) werden door de modifikaties in zo geringe mate beïnvloed dat de in ref. 1 gegeven konklusies kunnen worden gehandhaafd.

Bij de model-prototypevergelijking kwam aan het licht dat de Waal-prototypegegevens niet optimaal benut waren. (Mede als gevolg van het feit dat de interpretatie van de Waal-veldmetingen door Holley aan het einde van zijn verblijf in Delft verricht moest worden met het voor de IJssel geschreven programma.) Bij nauwkeuriger benadering van de snelheidsverdeling in dwarsrichting ontstaan andere prototypere resultaten.

De eerste verandering hield een modifikatie van de bepaling van de dwars-snelheid in een meetstation in. De dwarssnelheden worden bepaald met verg. (2.21). Daar de snelheden en diepten slechts in de meetstations gemeten zijn, zijn de dwarssnelheden (vanwege de differentiatie naar x) slechts op een vak tussen twee meetstations te bepalen. In ref. 1 zijn de dwarssnelheden, welke in het bovenstroomse vak berekend zijn, als de waarden van de dwarssnelheid in het meetstation aangenomen, terwijl in de nieuwe bepalingwijze er een lineaire interpolatie plaatsvond van de waarden van de dwarssnelheden in het boven- en benedenstroomse vak (genomen in het midden van het vak). Deze verandering bleek noodzakelijk in de Waalmodel-proeven met injectie van Rhodamine aan de rechteroever, omdat de bepalingwijze uit ref. 1 een faseverschuiving in de korrektieterm G veroorzaakt, waardoor er uit de analyse geen konstante dimensieloze dispersiecoëfficiënt bepaald kon worden in deze proeven.

De tweede verandering hield een betere benadering van de werkelijk aanwezige snelheidsverdeling over een dwarsdoorsnede in. Voor de resultaten van ref. 1 zijn slechts de snelheidsmetingen van 1 dag gebruikt, welke een afstand van 200 m, van de oever van injectie af, bestreken en over de resterende 60 à 100 m van de dwarsdoorsnede werd er lineair geïnterpoleerd naar de andere oever

($U = 0$) toe. De nieuwe resultaten welke in tabel 4 gegeven zijn, zijn verkregen door de snelheidsmetingen van beide meetdagen te gebruiken (de rivierdebiëten op beide meetdagen verschilden slechts enkele procenten), zodat over de volle breedte van de rivier snelheden bekend waren. De berekende debiëten volgens de laatste snelheidsverdeling zijn groter, zodat de korrektiefactoren QR (zie par. 3.1.c.) kleiner worden. De gekorrigeerde snelheden worden dus ook kleiner zodat ook de totale massastroom Q_m kleiner wordt.

Meer informatie over de modifikaties in het rekenprogramma is te vinden in ref. 4. De nieuwe resultaten van de algemene momentengradiëntmethode voor de Waal zijn vermeld in tabel 4.

5.2 Schaalregels voor dispersiemechanismen

Het Waalmodel is een vertrokken hydraulisch model van een gedeelte van de Waalrivier nabij Zaltbommel, waarin de prototypemetingen verricht zijn, zodat de mate van reproductie van de dwarsdispersie in een vertrokken model onderzocht kan worden. Het model is gebouwd volgens de Froudeschaal, volgens welke de snelheidsschaal n_u de wortel uit de diepteschaal n_H is

$$n_u = n_H^{\frac{1}{2}} \quad (5.1)$$

waarin:

n = verhouding model- tot prototypewaarde van de grootheid aangeduid met index.

In een goed gekonstrueerd vertrokken model wordt de snelheid in lengte- en breedterichting goed gereproduceerd, volgens de schaalregel (5.1). De sekundaire stroming tengevolge van de aanwezigheid van rivierbochten en het optreden van neerstromen achter de kribben worden in een vertrokken model niet volgens dezelfde schaal gereproduceerd. Immers Rozovskii (ref. 12) leidde voor een vereenvoudigd geval af dat voor de sekundaire stroming tengevolge van een rivierbocht geldt (zie ook ref. 11):

$$(w - \bar{w}) :: \bar{u} \frac{H}{R} F\left(\frac{y}{H}, \frac{g}{c^2}\right) \quad (5.2)$$

waarin:

een streep boven een grootheid duidt op de middeling van deze grootheid over

over de waterdiepte

R = kromtestraal van de rivierbocht

y/H = relatieve verticale coördinaat.

Tengevolge van de vertrekking ($n_h/n_L = 2.5$ in Waalmodel) wordt, omdat H/R groter wordt, de sekundaire stroming in het model relatief groter, echter de functie F wordt door zijn Chézy-afhankelijkheid vervormd bij vertrekking, zodat de juiste schaal voor de sekundaire stroming, gezien ook de vereenvoudigde uitgangssituatie van Rozovskii, niet exakt vast te leggen is.

Opdat de concentratieverdeling in dwarsrichting goed gereproduceerd zal worden moet gelden

$$n_{\sigma}^2 = n_L^2 \quad (5.3)$$

waarin:

n_L = horizontale lengteschaal

n_{σ}^2 = schaal voor variantie

Gaat men uit van verg. (2.13) met e_z i.p.v. k_z dan volgt daaruit

$$n_{\sigma}^2 = n_{e_z} n_L n_u^{-1} = n_{e_z} n_L n_H^{-\frac{1}{2}} \quad (5.4)$$

zodat met verg. (5.3) volgt

$$n_{e_z} = n_L n_H^{+\frac{1}{2}} \quad (5.5)$$

welke schaalregel ook volgt door uitgaande van verg. (2.3) te stellen, dat de verschillende termen van deze balansvergelijking dezelfde verhouding in model en prototype moeten hebben. De verg. (5.3) en (5.5) zijn de vereiste schaalregels voor de juiste reproductie van de concentratieverdeling in dwarsrichting en dus ook voor de juiste reproductie van de dwarsdispersie.

In de literatuur wordt aangenomen dat als de dwarsdispersie hoofdzakelijk door de bodemschuifspanning veroorzaakt wordt de dispersierelatie de vorm van verg. (2.5) heeft zodat daaruit volgt

$$n_{e_z} = n_H n_u^{\#} = n_H^2 n_L^{-\frac{1}{2}} \quad (5.6)$$

waarbij aangenomen is dat $n_{K_1^{\#}} = 1$.

Samen met verg. (5.4) volgt dan

$$n_{\sigma}^2 = n_L^{\frac{1}{2}} n_H^{3/2} \quad (5.7)$$

dat wil zeggen dat de variantie in het model een faktor

$$\left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{3/2} = (2.5)^{3/2} \approx 4$$

groter wordt dan volgens verg. (5.3) vereist is.

Voor een rivier met kribben gaf Holley (ref. 1) de voorkeur aan de relatie (2.6) waaruit volgt

$$n_{e_z} = n_H n_u = n_H^{3/2} \quad (5.8)$$

(waarbij aangenomen is dat $n_{K_1} = 1$)

Samen met verg. (5.4) volgt hieruit

$$n_{\sigma}^2 = n_L n_H \quad (5.9)$$

dat wil zeggen dat de variantie in het model een faktor

$$n_H/n_L = 2.5 \text{ te groot zal zijn.}$$

In verg. (2.9) is een relatie aangegeven, die mogelijk geldt als een wervelpatroon met verticale as het dominerende dispersiemechanisme vormt. Daaruit volgt

$$n_{e_z} = n_L n_H^{\frac{1}{2}} \quad (5.10)$$

en voor de variantie

$$n_{\sigma}^2 = n_L^2 \quad (5.11)$$

zodat dit mechanisme de dwarsdispersie op de vereiste schaal in een vertrokken model weergeeft.

In tabel 5 is het voorgaande samengevat.

5.3 Vergelijking model- en prototypesresultaten

In fig. 5.1 t/m 5.3 worden de concentratieverdelingen in model en prototype vergeleken. Daarbij is uitgegaan van de prototypeverdelingen en de prototypematen, de modelconcentraties in elk station zijn vermenigvuldigd met de verhouding van de totale massastroom Rhodamine in prototype en in model, waarbij tevens de schaalregel voor het debiet gebruikt is

$$c_{\text{norm}} = \frac{(Q_m)_{\text{proto}}}{(Q_m)_{\text{model}}} \cdot c_{\text{model}} \cdot n_Q \quad (5.12)$$

waarin:

- n_Q = debietenschaal
- $(Q_m)_{\text{proto}}$ = totale massastroom in prototype
- $(Q_m)_{\text{model}}$ = totale massastroom in model
- c_{model} = gemeten concentratie in model
- c_{norm} = genormeerde concentratie in model.

De verspreiding in dwarsrichting blijkt in het Waalmodel duidelijk groter te zijn dan in het prototype en de maximale concentraties zijn in het algemeen 60 à 70% van de prototypewaarden. Alleen in kmr. 931.855-931.900 is het verschil niet zo duidelijk voor het geval van linksinjectie. Dit kan toegeschreven worden aan kleine verschillen in de diepten en snelheden in model en prototype en aan de onnauwkeurigheid in de metingen.

Gedetailleerder volgt het hierboven geschetste uit vergelijking van de resultaten van de algemene momentengradiëntmethode. Wat de prototypegegevens betreft moet vanwege de kleine meetdichtheid in de x-richting ($\Delta x \approx 2$ km) het resultaat als aanduiding voor de orde van grootte aangemerkt worden. De beste benadering van de prototypegegevens (ref. 1, ook geldig voor de gemodificeerde resultaten) levert

$$K_1 = 0.035 \pm 0.005$$

terwijl we voor de modelmetingen (par. 4.2.4) vonden

$$K_1 = 0.030 \pm 0.005$$

zodat

$$n_{e_z} = (0.85 \pm 0.20) n_H^{3/2}$$

Hieruit volgt voor

$$n_{e_z} / n_{eis} \approx 2.1 \pm 0.5 \quad (5.13)$$

hetgeen als volgt dient te worden geïnterpreteerd. Bij een waarde gelijk aan één van de verhouding n_{e_z} tot n_{eis} ($n_{eis} = n_L n_H^{1/2}$ volgens verg. (5.5)) zou e_z de volgens de schaalregels vereiste waarde in het model hebben. Omdat de schaal n gedefinieerd is als de waarde van de beschouwde grootte in het model gedeeld door de waarde in het prototype duidt $n_{e_z} / n_{eis} \approx 2.1$ op een 2.1 maal te grote waarde van e_z in het model. In tabel 5 wordt dit resultaat vergeleken met de via de verschillende dispersierelaties voorgeschreven verhouding. De uit de metingen gevonden verhouding ligt in tussen de voor de juiste reproductie vereiste waarde, 1, en de waarde 2.5, welke uit relatie (2.6) volgt.

In fig. 5.4 is de aangepaste variantie ($\sigma_3^2 - G$) uitgezet tegen de afstand tot het injectiepunt x_0 , beide in modelmaten. De rechte welke de beste aanpassing aan de prototypresultaten geeft is volgens 3 schaalregels overgebracht naar modelmaten in fig. 5.4. Ook hieruit volgt het eerder gegeven resultaat. De hellingen van de lijnen met dezelfde K_1 -waarde voor prototype en model zijn verschillend, omdat de diepte in het prototype 0.123 m was (4 stations) in modelmaat, terwijl in het model de diepte 0.112 m was (22 stations). Daardoor ligt de $K_1 = 0.035$ rechte voor het prototype buiten de band $0.025 < K_1 < 0.035$, die voor de modelresultaten gegeven is.

De dwarsdispersiecoëfficiënt e_z is in het vertrokken model groter dan vereist is voor de goede reproductie van de dwarsdispersie. De mate waarin deze coëfficiënt groter is hangt af van het dominerende dispersiemechanisme.

Indien alleen de bodemruwheid bepalend zou zijn voor de dwarsdispersie dan zou gelden

$$\frac{n_{e_z}}{n_{eis}} = 4 \quad (\text{verg. 5.5 en 5.6})$$

De uit model-prototype vergelijking volgende verhouding is echter

$$\frac{n_{e_z}}{n_{eis}} = 2.1$$

Dit duidt erop dat andere invloeden, dan de bodemruwheid, belangrijk zijn:
invloed van de aanwezigheid van kribben,
invloed van de sekundaire stromen tengevolge van rivierbochten.

Uit de vergelijking van de dwarsdispersie in het IJsselmodel en in de goot welke als een rechtgetrokken IJsselmodel beschouwd mocht worden (zie ref. 1) volgde dat de invloed van de bocht veel minder belangrijk was voor de dwarsdispersie dan de invloed van de kribben. Daar in het Waalmodel de kromming van de rivier gering is mag aangenomen worden dat ook in het Waalmodel de kribinvloed de invloed van de bochten op de dwarsmenging zal domineren.

Tengevolge van de kribinvloed ontstaat er aan de riviergrenzen een wervelpatroon met verticale as, hetgeen een horizontale karakteristieke lengte in dispersierelatie betekent en dus een juiste reproductie van de dwarsdispersie in het model doet verwachten.

$$\frac{n_{e_z}}{n_{eis}} = 1$$

Tengevolge van de vertrekking van het model valt echter te verwachten dat $n_{e_z} / n_{eis} > 1$ wordt. De volgende factoren zijn hiervoor verantwoordelijk:

- a. Holley (ref. 1, Hd 3) vond uit vergelijking van de resultaten van proeven met injectie in het midden t.o.v. proeven met injectie aan de oever van de rivier dat de dwarsdispersiecoëfficiënt e_z varieerde over de dwarsdoorsnede, de grootste waarde werd aan de riviergrenzen aangetroffen (kribinvloed) en de kleinste in het midden van de rivier. Uit de analyse van metingen volgt per doorsnede een gemiddelde dwarsdispersiecoëfficiënt, waarvan de grootte afhankelijk was van de breedte van de merkstofwolk in die doorsnede. Dit houdt in dat als de diepte-breedteverhouding toeneemt (smallere rivier) de gemiddelde dispersiecoëfficiënt, welke uit de metingen volgt, ook zal toenemen. In het vertrokken Waalmodel neemt ten opzichte van het prototype de diepte-breedteverhouding met een factor 2.5 toe, zodat een relatief te grote dwarsdispersiecoëfficiënt in het model te verwachten valt.
- b. De dwarsdispersie tengevolge van de sekundaire stroming in een rivierbocht is volgens Fischer (ref. 11) evenredig met het kwadraat van de diepte-kromteschaal verhouding. Vertrekking doet deze verhouding toenemen

en daarom valt te verwachten dat relatief in het model de dwarsdispersie te groot zal zijn.

- c. Het gebruik van de lokaal extra ruwe bodem (splitsteen van 3 à 4 cm) om de juiste Chézy-koëfficiënt in het model te verkrijgen, veroorzaakt nabij de bodem extra menging.

Rekening houdend met bovenstaande factoren valt als konklusie te trekken dat de invloed van de aanwezigheid van kribben op de dwarsmenging groter is dan de invloed van de bodemruwheid. Alleen door het uitvoeren van een serie systematische proeven (bijvoorbeeld in een rechte goot bij dezelfde kribkonfiguratie en dezelfde breedte-diepteverhouding, doch verschillende bodemruwheden) kan hier een kwantitatieve uitspraak over worden gedaan.

6 Samenvatting en konklusies

Door Holley is een uitgebreid onderzoek verricht naar de dwarsmenging in rivieren (ref. 1). Naast de metingen in een rechte goot en in een IJsselmodel, zijn er door hem veldmetingen in de IJssel en Waal geanalyseerd.

Van het riviergedeelte van de Waal, waarin deze metingen zijn verricht was een vertrokken model ($n_L = 1/100$, $n_H = 1/40$) beschikbaar. Als afronding van het onderzoek is in dit rapport het onderzoek naar de dwarsmenging van merkstof in het vertrokken Waalmodel behandeld. De resultaten zijn vergeleken met de uitkomsten van de metingen in de rivier zelf.

De rivier wordt beschouwd als een twee-dimensionaal stromingsmodel (middelen over de waterdiepte). Door deze integratie over de waterdiepte moet men in plaats van met diffusieve transporten gaan werken met dispersieve transporten. De verspreiding van de merkstof in dwarsrichting is het gevolg van netto dwarssnelheden en van dwarsdispersief transport. De grootte van de dwarsdispersiekoëfficiënt wordt beïnvloed door tenminste drie mechanismen:

- a. turbulentie tengevolge van bodemschuifspanning,
- b. turbulentie en sekundaire stromen tengevolge van de aanwezigheid van kribben,
- c. sekundaire stromen tengevolge van bochten in de rivier.

In het algemeen is de dwarsdispersiekoëfficiënt afhankelijk van een lokale diepte en snelheid en van de positie in de dwarsdoorsnede.

De algemene momentengradiëntmethode (zie par. 2.4) analyseert de meetgegevens dusdanig dat bij de juiste keuze van de dispersierelatie ϕ (vergl. 2.4) de gradiënt van de aangepaste variantie naar de (bij ϕ behorende) getransformeerde afstand tot de injectiebron konstant is (dimensieloze dispersiecoëfficiënt is konstant). De mate waarin uit de analyse een konstante gradiënt volgt, is een maat voor de juistheid van de geïntroduceerde dispersierelatie ϕ .

De diffusiemetingen in het Waalmodel zijn uitgevoerd met een konstant rivierdebiet van $1010 \text{ m}^3/\text{sec.}$ in prototypemaat uitgedrukt, hetgeen overeenkomt met het rivierdebiet tijdens de veldmetingen in de Waalrivier. De analyse met de algemene momentengradiëntmethode leverde geen duidelijke voorkeur op voor één van de dispersierelaties (2-5) t/m (2-7). Indien de korrektieterm G (voor de momentengradiënt), welke de invloed van de netto dwarssnelheden bevat, zo goed mogelijk berekend wordt, volgt er zowel een konstante K_1 , K_2 als K_5 uit de analyse. Om de korrektieterm G goed te berekenen zijn zeer veel meetgegevens nodig. Bij de in deze proeven gebruikte meetdichtheid in de longitudinale richting was een nauwkeuriger berekening van de dwarssnelheden in een meetstation nodig dan in ref. 1 gebruikelijk was. In tabel 6 is een overzicht gegeven van de resultaten van het voorgaande onderzoek van Holley (ref. 1) en van de resultaten van de diffusiemetingen in het Waalmodel. Er blijkt geen duidelijke afhankelijkheid tussen de dimensieloze dispersiecoëfficiënt K_1 en de breedte-diepte-verhouding te bestaan.

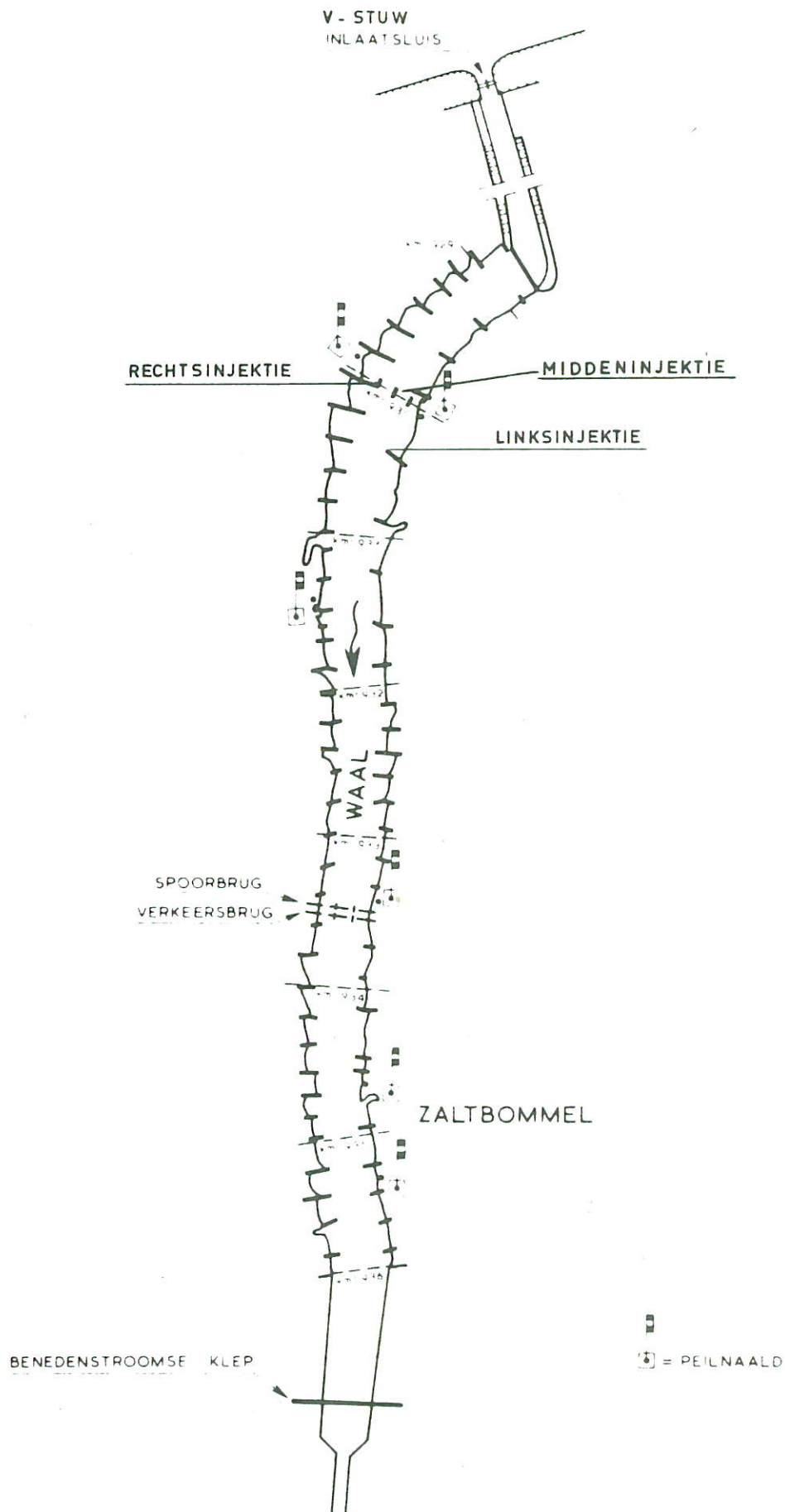
Uit de vergelijking van de model- en prototypesresultaten volgde dat in het vertrokken model, dat volgens Froudeschaal gebouwd is, de dwarsdispersie aanzienlijk groter is dan vereist is voor de juiste reproductie van de dwarsdispersie in het prototype (zie fig. 5.4). Daar de verschillende dispersiemechanismen ieder volgens een eigen schaalregel naar het vertrokken model vertaald moeten worden, is het mogelijk om het dominerende dispersiemechanisme te vinden uit deze model-prototypevergelijking. Daarbij bleek de bijdrage aan de dwarsdispersie tengevolge van de aanwezigheid van kribben in de rivier belangrijker te zijn dan de bijdrage door de turbulentie tengevolge van de bodemschuifspanning. De invloed van de sekundaire stroming tengevolge van de rivierbochten kon niet apart vastgelegd worden in de Waalmodelproeven. Uit de proeven in het IJsselmodel (ref. 1) bleek deze invloed van de rivierbochten ten opzichte van de invloed van de kribben geringer, doch niet verwaarloosbaar te zijn. Zolang de kromming van de rivier gering is mag verondersteld worden dat de menging tengevolge van de aanwezigheid van kribben de grootste bijdrage aan de dwarsdispersie levert.

REFERENTIES

- 1 HOLLEY, E.R. "Transverse mixing in rivers". S 132, Intern rapport. Waterloopkundig Laboratorium, december 1971.
- 2 FISCHER, H.B. en HOLLEY, E.R. "Analysis of the use of distorted hydraulic models for dispersion studies", Water Resources Research, Vol. 7, no. 1, February 1971.
- 3 HOLLEY, E.R. en KARELSE, M. "Model-prototype comparisons for transverse mixing in rivers", paper A40, XV-th IAHR Congress, Istanbul, 1973.
- 4 Waterloopkundig Laboratorium, Programmabeschrijving GCM, juli 1973.
- 5 Waterloopkundig Laboratorium, "Diffusiemetingen Waal", Interim rapport. R 706, januari 1972.
- 6 HOLLEY, E.R. en ABRAHAM, G. "Field tests on transverse mixing in rivers", Journal Environmental Engineering Division, ASCE, opgezonden ter publicatie.
- 7 HOLLEY, E.R., SIEMONS, H. and ABRAHAM, G. "Some aspects of analyzing transverse mixing in rivers", Journal of Hydraulic Research, Vol. 10, no. 1, pp. 27-57, 1972.
- 8 HOLLEY, E.R. and ABRAHAM, G. "Laboratory Studies on transverse mixing in rivers", aangeboden ter publicatie aan Journal of Hydraulic Research.
- 9 ELDER, J.W. "The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 5, pp. 544-560, 1959.
- 10 OKOYE, J.K. "Characteristics of transverse mixing in open channel flows", Rept. KH-R-23, W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, U.S.A., 1970.
- 11 FISCHER, H.B. "The effect of bends on dispersion in streams", Water Resources Research, Vol. 5, no. 2, pp. 496-506, 1969.

- 12 ROZOVSKII, I.L. "Flow of water in bends in open channels", Academy of Sciences of the Ukrainian SSR (Translation no. OTS 60-51133, Office of Technical Services, U.S. Dept. of Commerce, Washington, 1957).

- 13 HILBERTS, B. "Pompdebietmetingen door middel van Rhodamine-B", Waterloopkundig Laboratorium, informatieblad H10, code 53.46, november 1967.



OVERZICHT WAAL-MODEL M.959

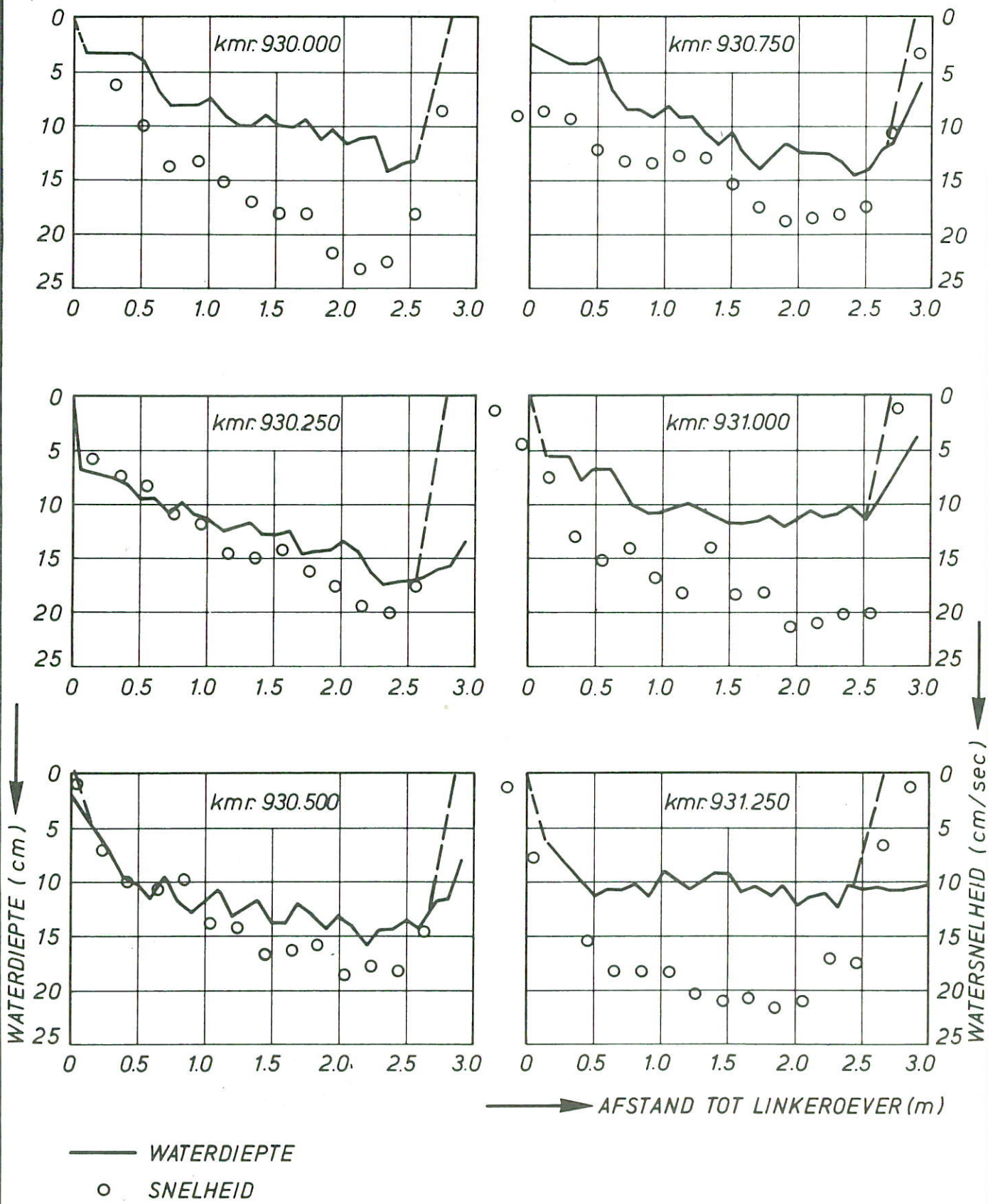
JM

SCHAAL 1 : 40.000 prot.
1 : 400 model

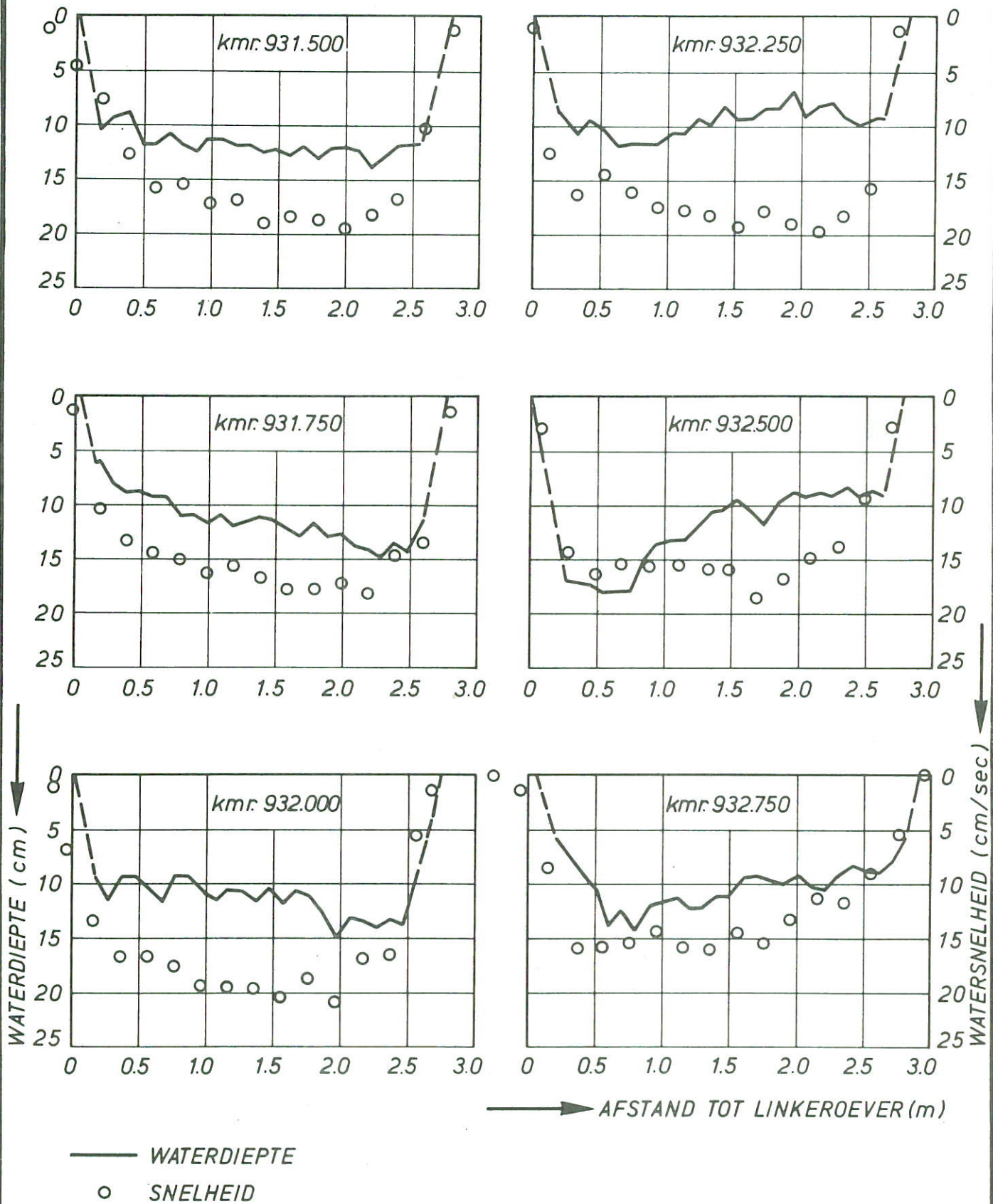
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R. 706 - 1010

FIG. 3.1



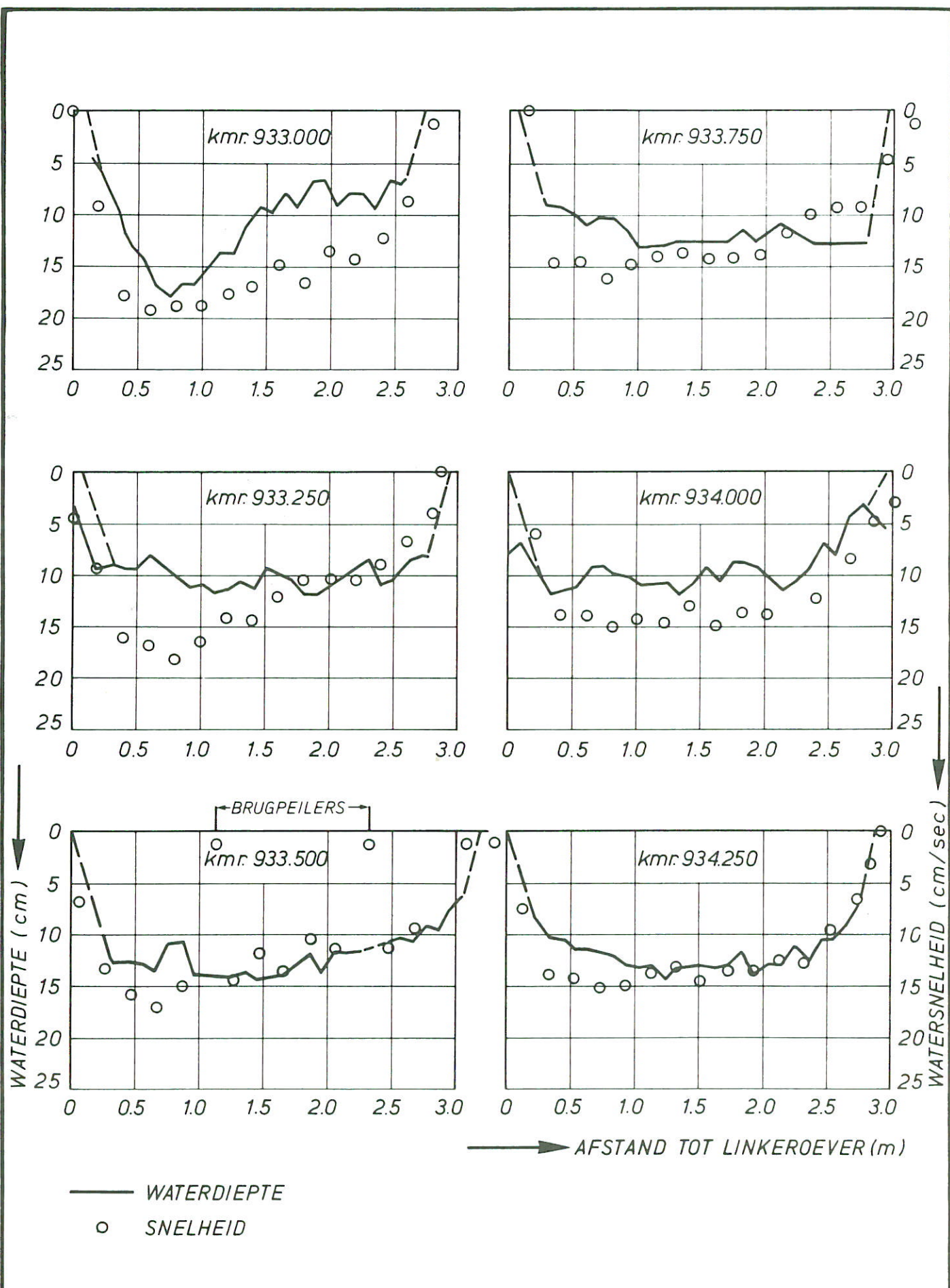
DWARSPROFIELEN EN SNELHEIDSMETINGEN IN WAALMODEL M. 959		JM
		A 4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM		R. 706 - 1012 FIG. 3.2.



DWARSPROFIELEN EN SNELHEIDSMETINGEN
IN WAALMODEL M. 959

JM

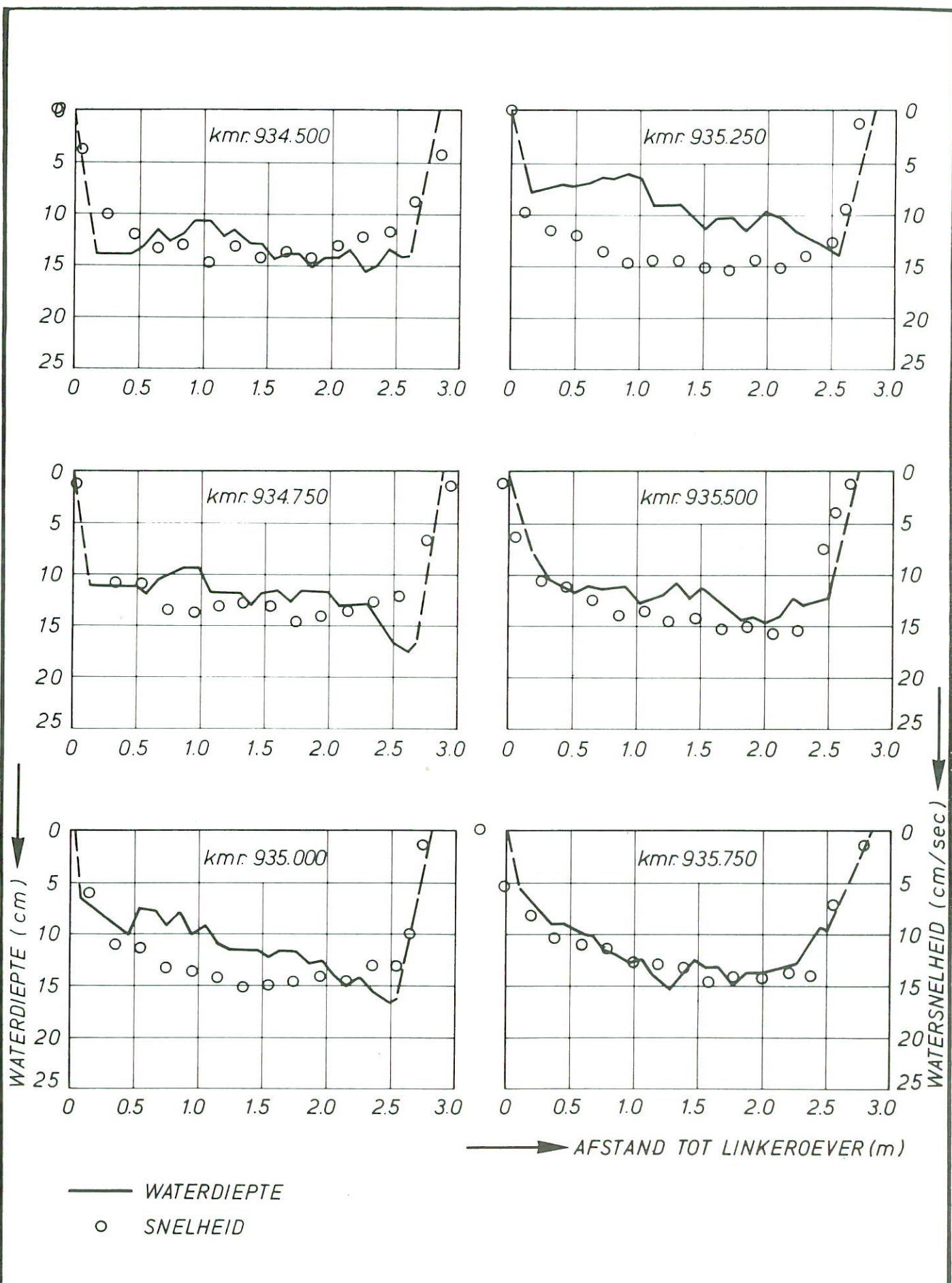
A 4



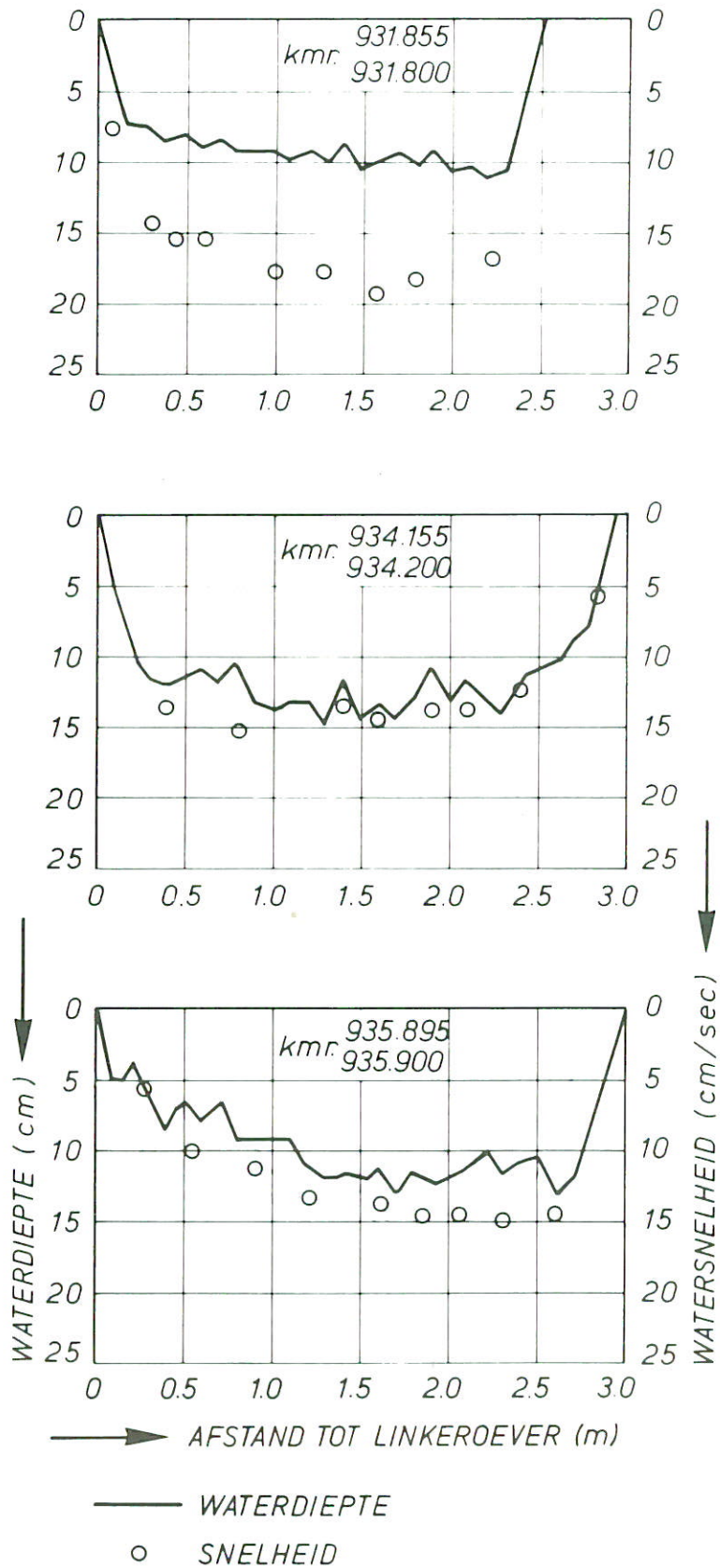
DWARSPROFIELEN EN SNELHEIDSMETINGEN
IN WAALMODEL M. 959

JM

A 4



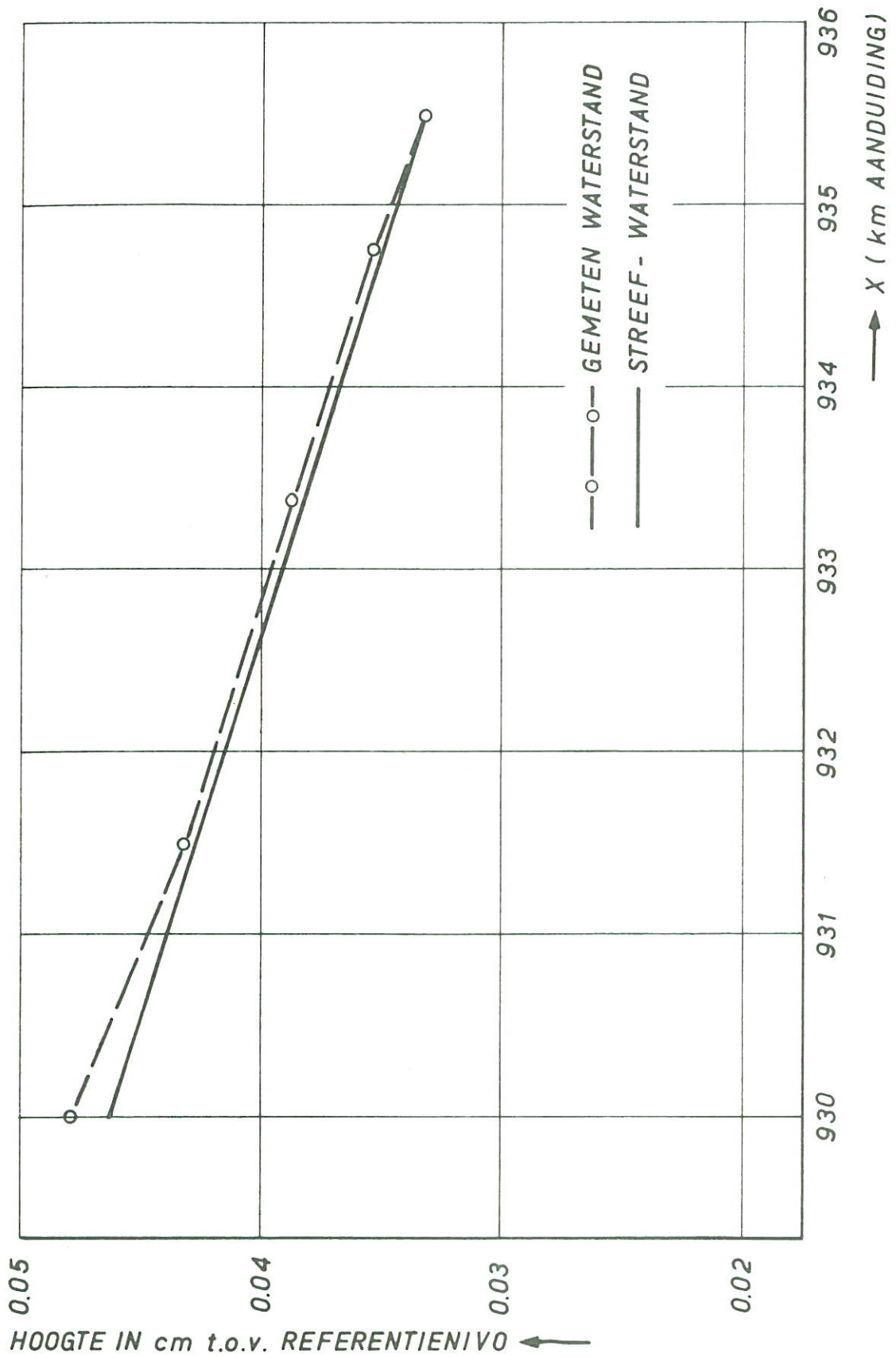
DWARSPROFIELEN EN SNELHEIDSMETINGEN IN WAALMODEL M. 959		JM
		A 4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM		R. 706 - 1013 FIG. 3.5.



DWARSPROFIELEN EN SNELHEIDSMETINGEN
IN WAALMODEL M.959

JM

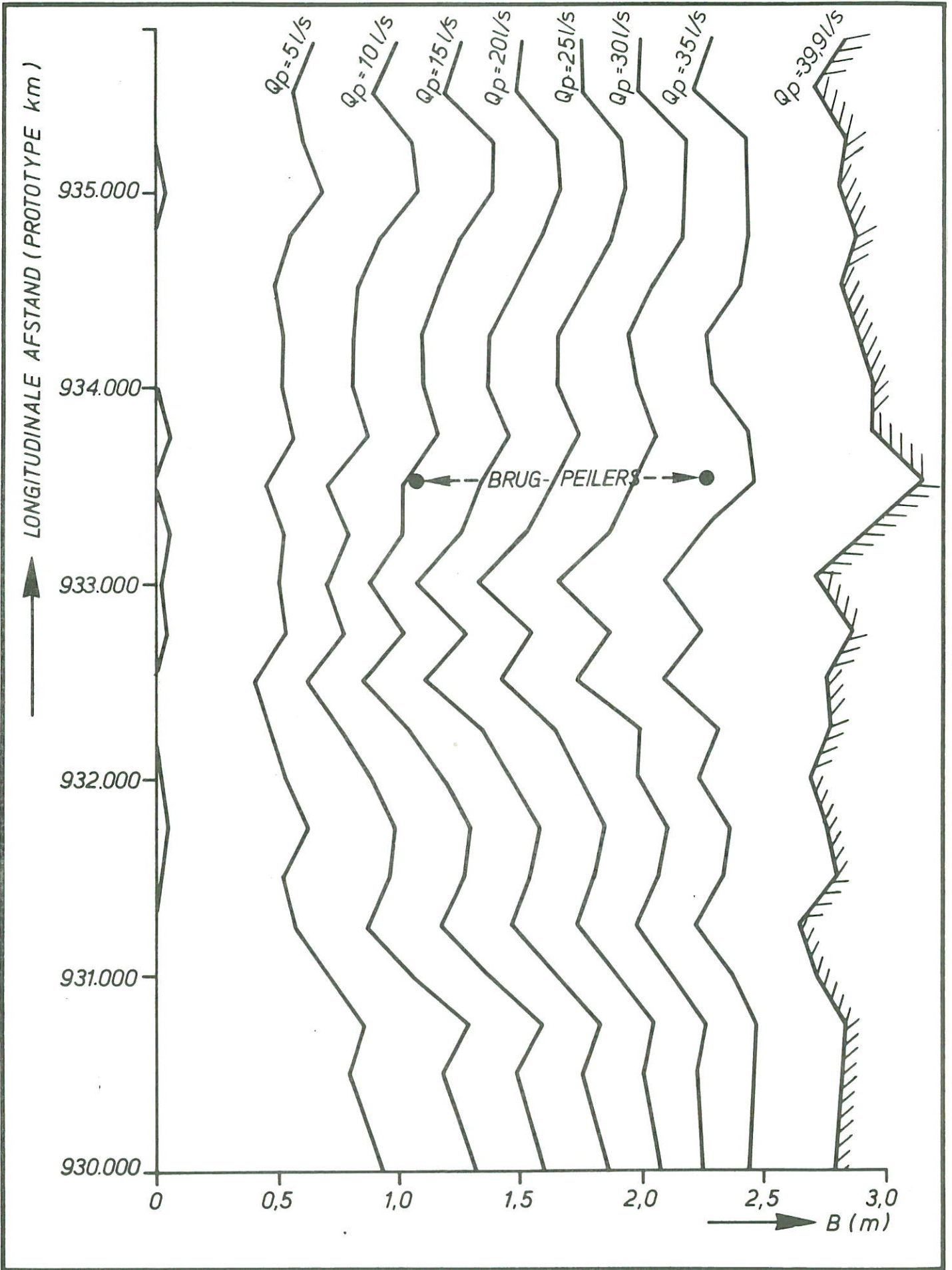
A 4



VERVALMETING IN MODEL M. 959

JM

A4



BEREKENDE STROOMLIJNEN IN WAALMODEL M 959

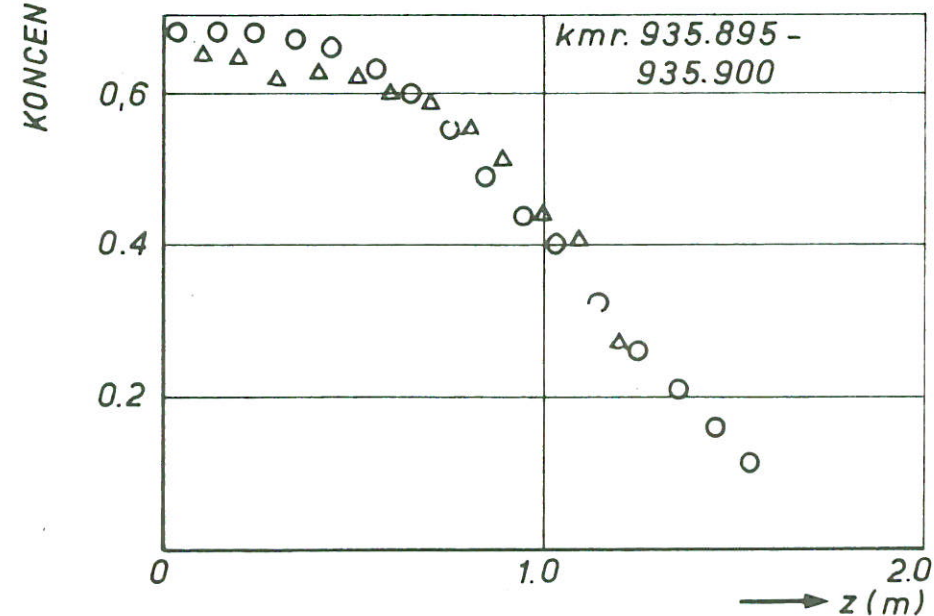
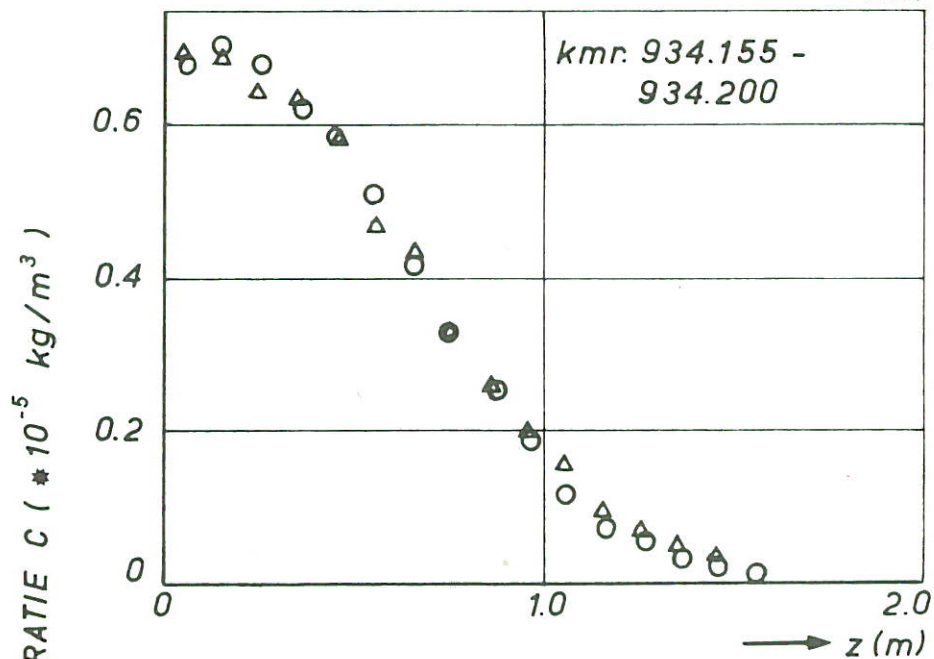
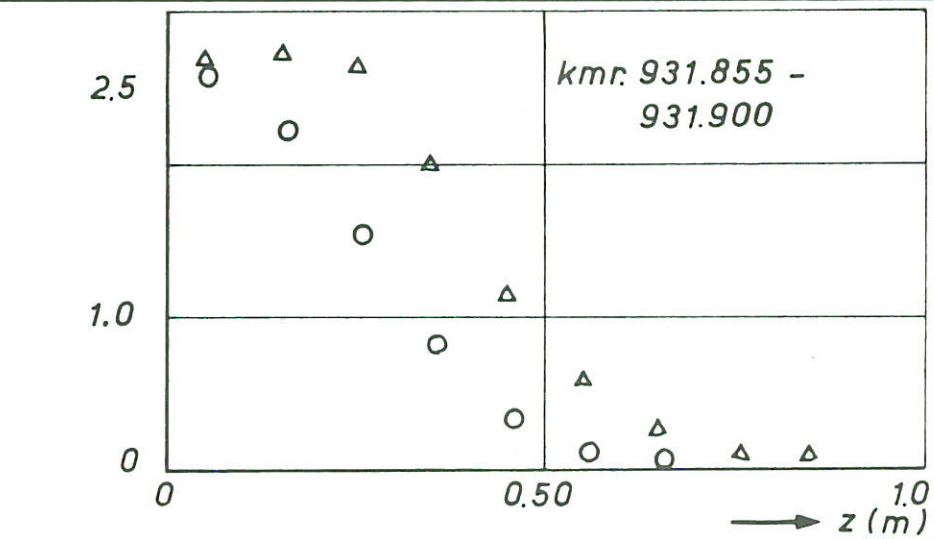
JM

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R.706 - 1034

FIG.3.8



○ KUVETTEN METHODE

△ FLESSEN METHODE

VERGELIJKING MEETMETHODEN
FLESSENMETHODE EN KUVETTENMETHODE

PROEF WM 1

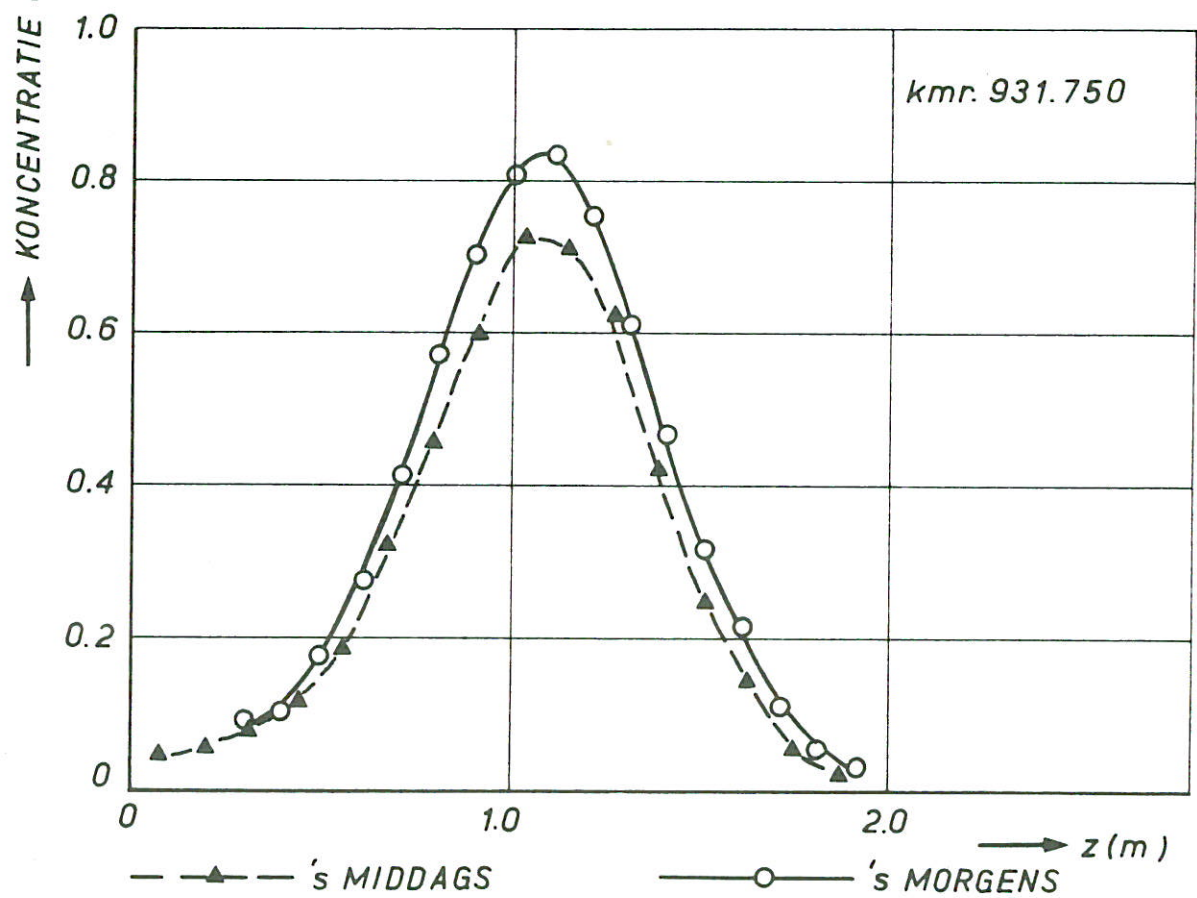
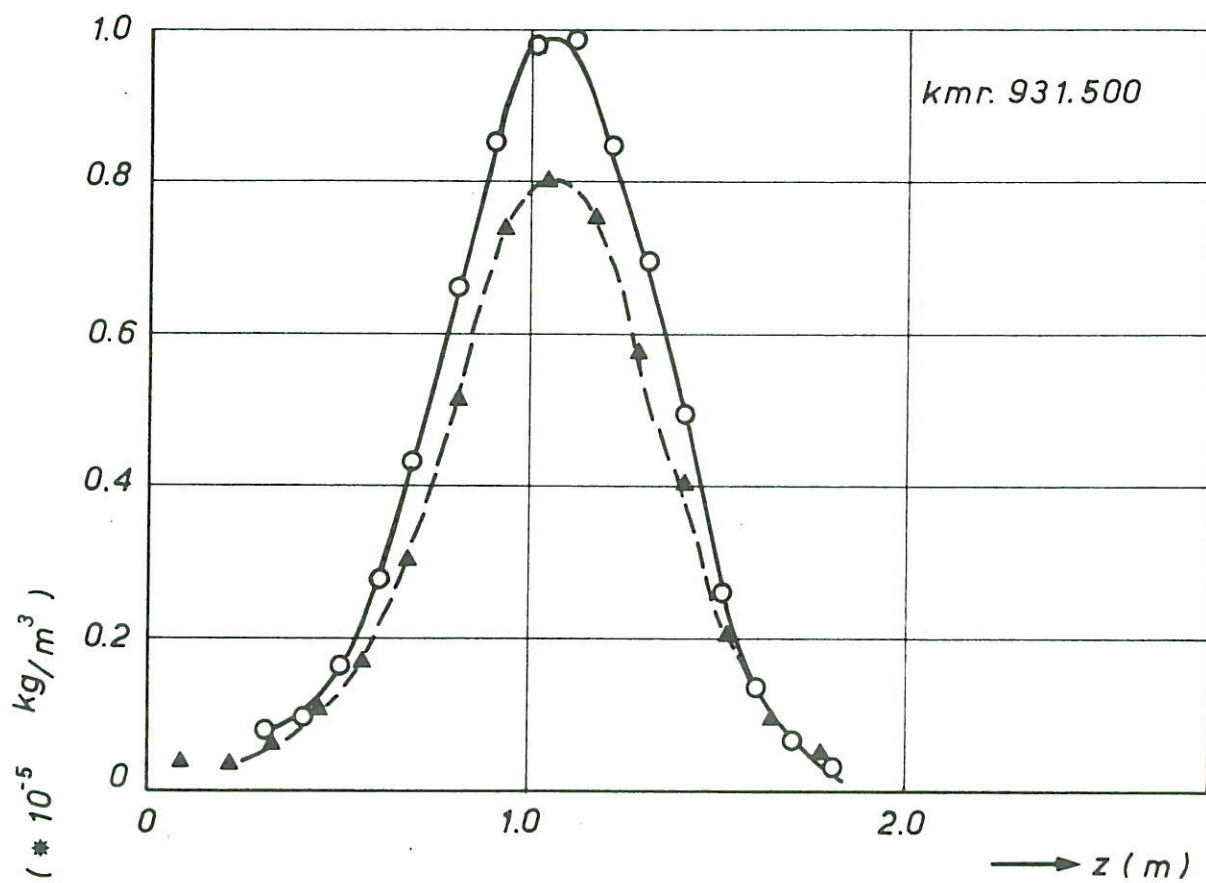
JM

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 706 - 1007

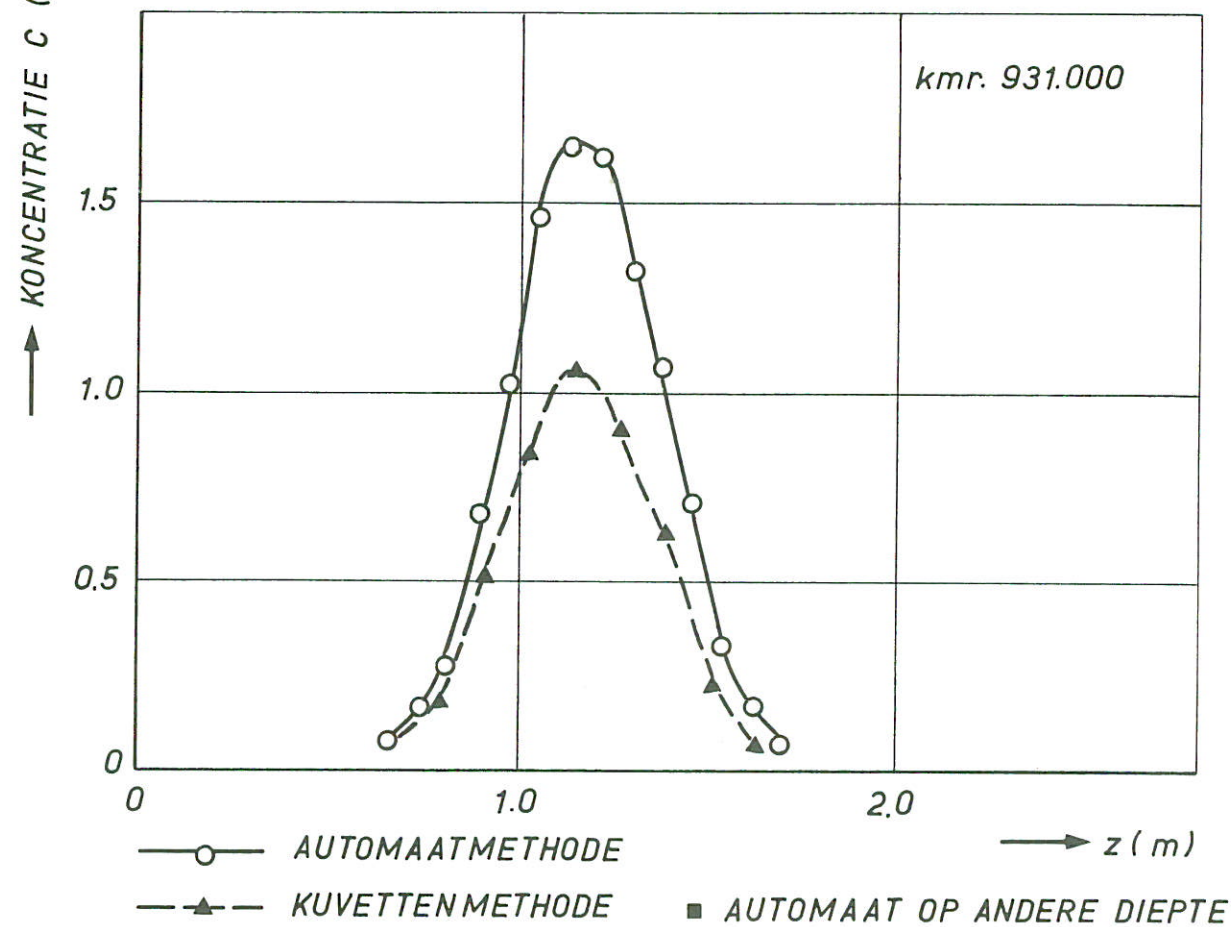
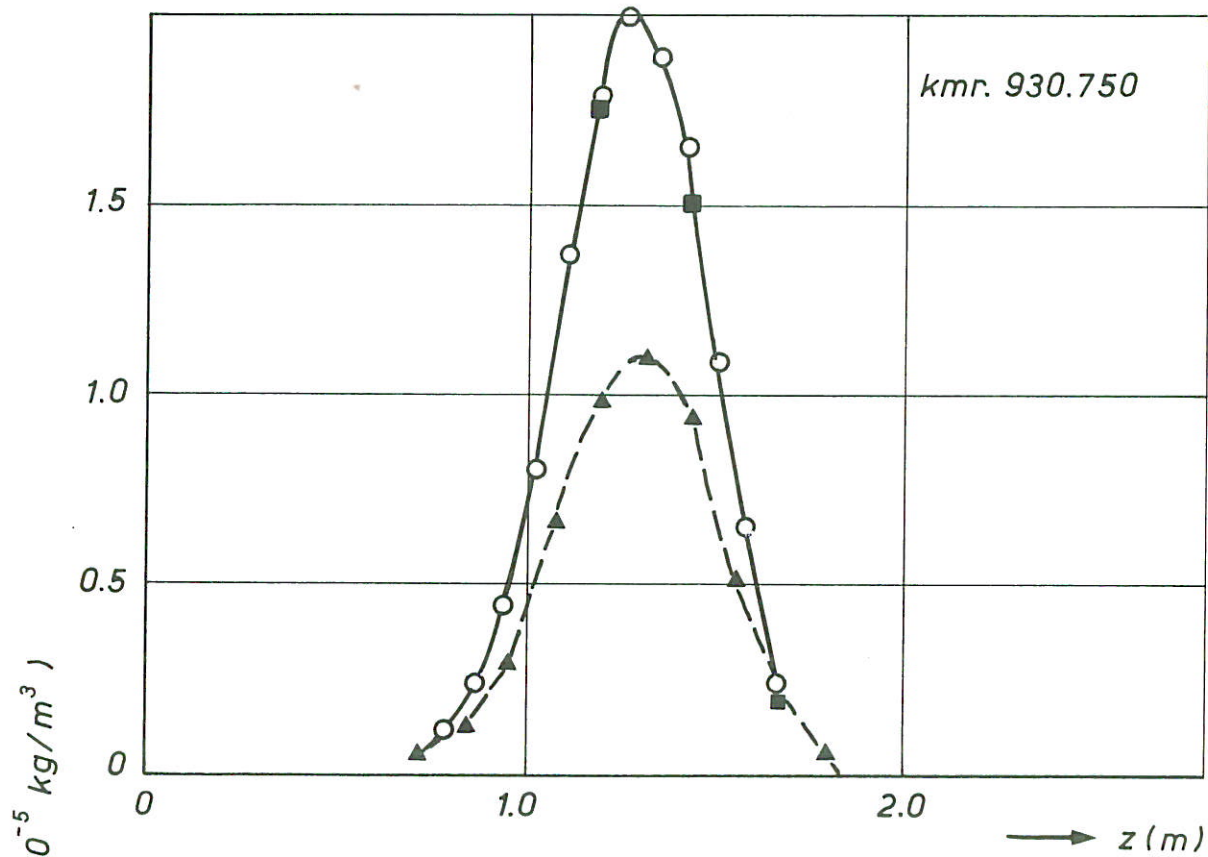
FIG.3.9



PROEF WM 4. - INVLOED VAN TIJDSTIP VAN METEN

JM

A4



VERGELIJKING MEETMETHODEN
KUVETTENMETHODE + AUTOMAATMETHODE

PROEF WM4

JM

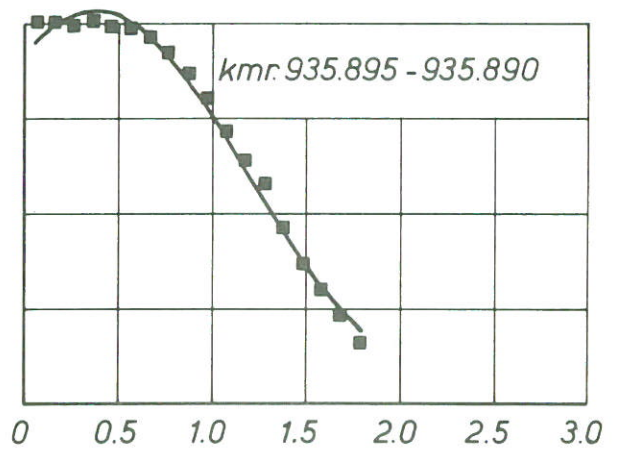
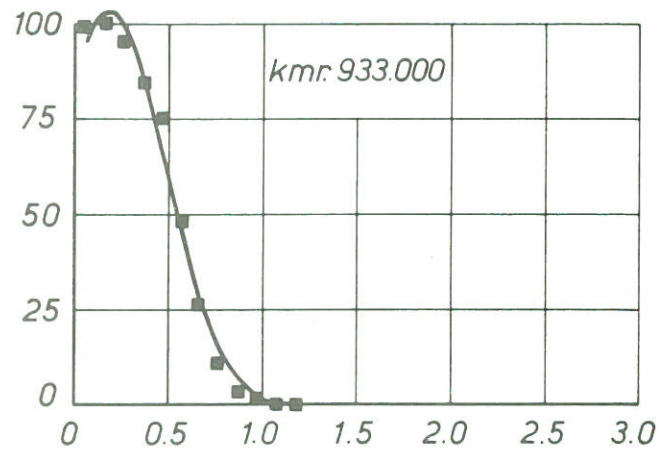
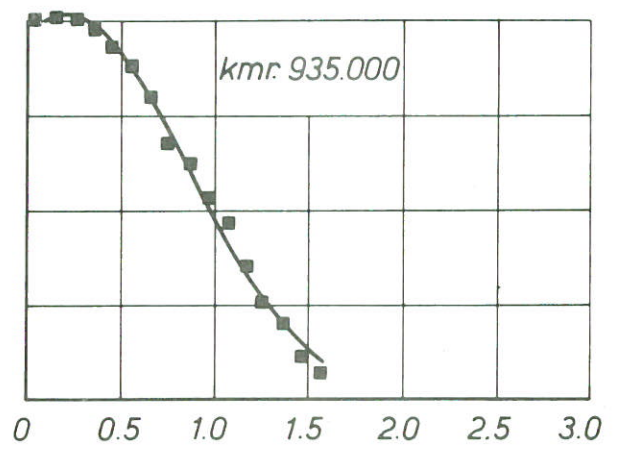
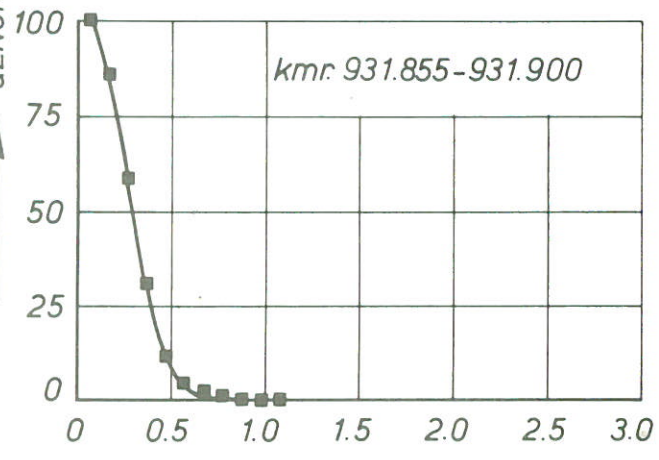
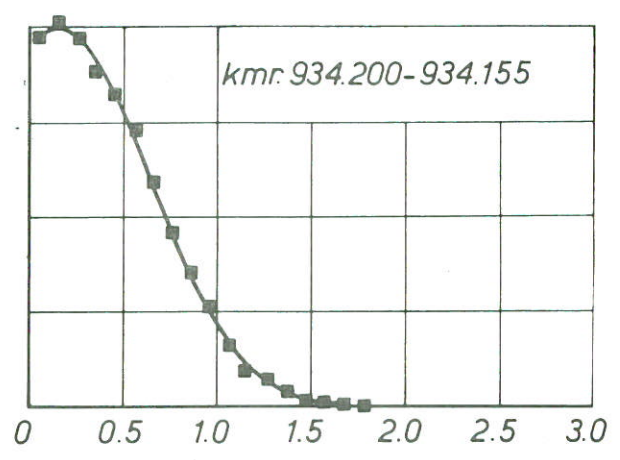
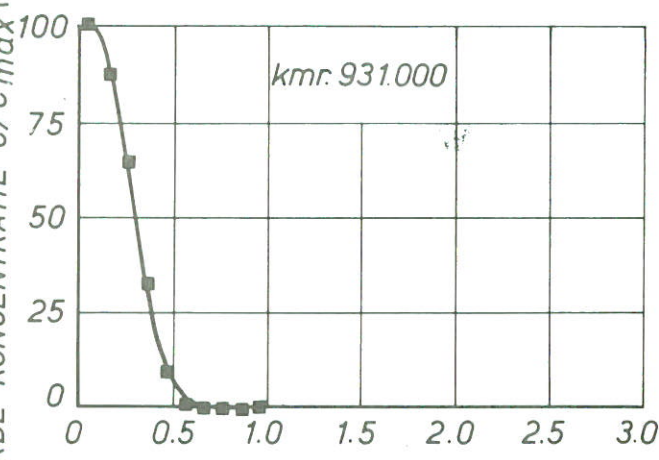
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R.706 - 1009

FIG.3.11

GENORMEERDE KONCENTRATIE C/C_{max} (%)



→ AFSTAND TOT DE LINKEROEVER (m)

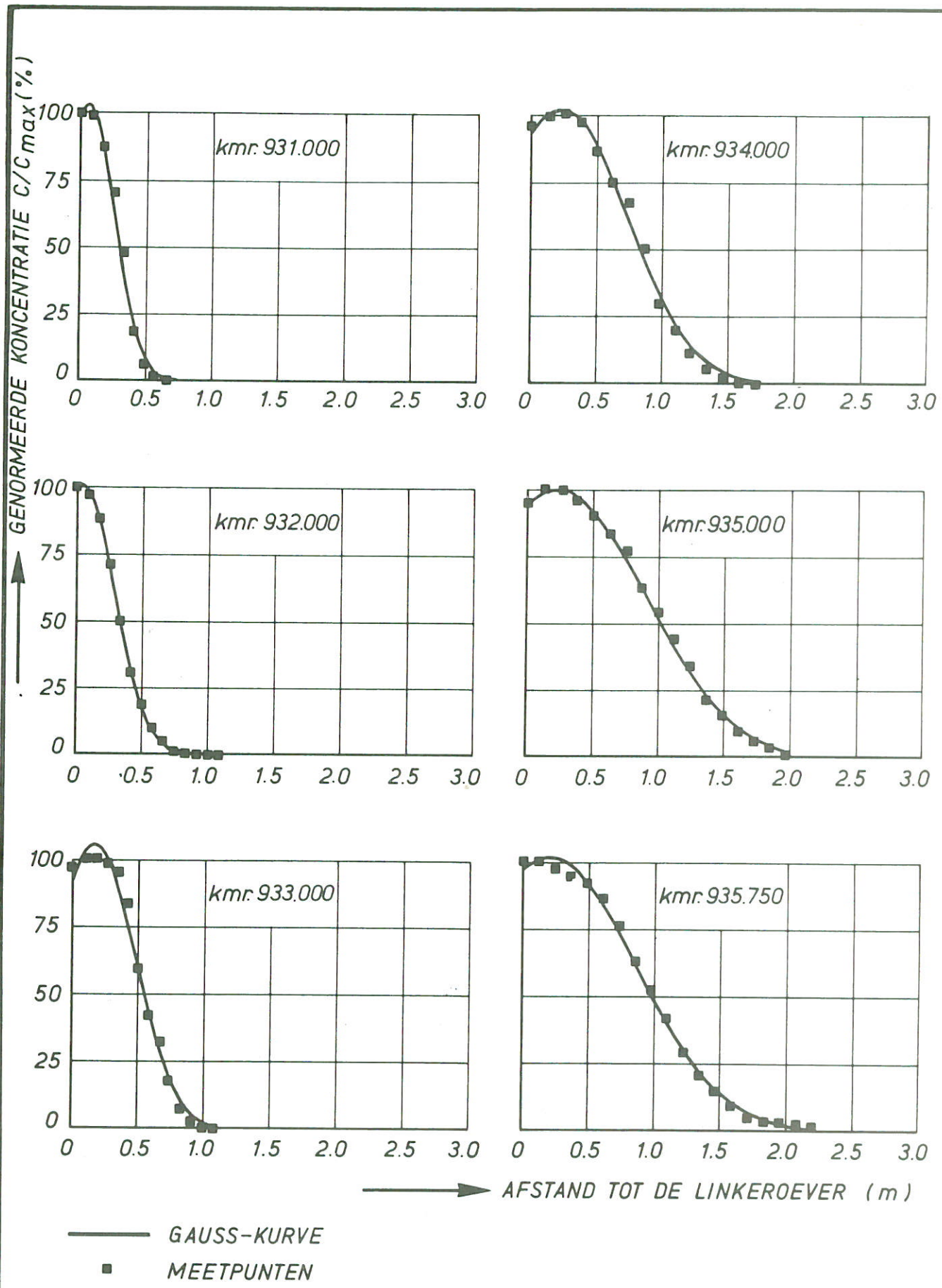
— GAUSS-KURVE
 ■ MEETPUNTEN

KONCENTRATIEVERDELINGEN PROEF WM 1
 RHODAMINEMETINGEN IN WAALMODEL M.959

JM
 A 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R. 706 - 1035 FIG. 4.1



KONCENTRATIEVERDELINGEN PROEF WM 2
 RHODAMINEMETINGEN IN WAALMODEL M.959

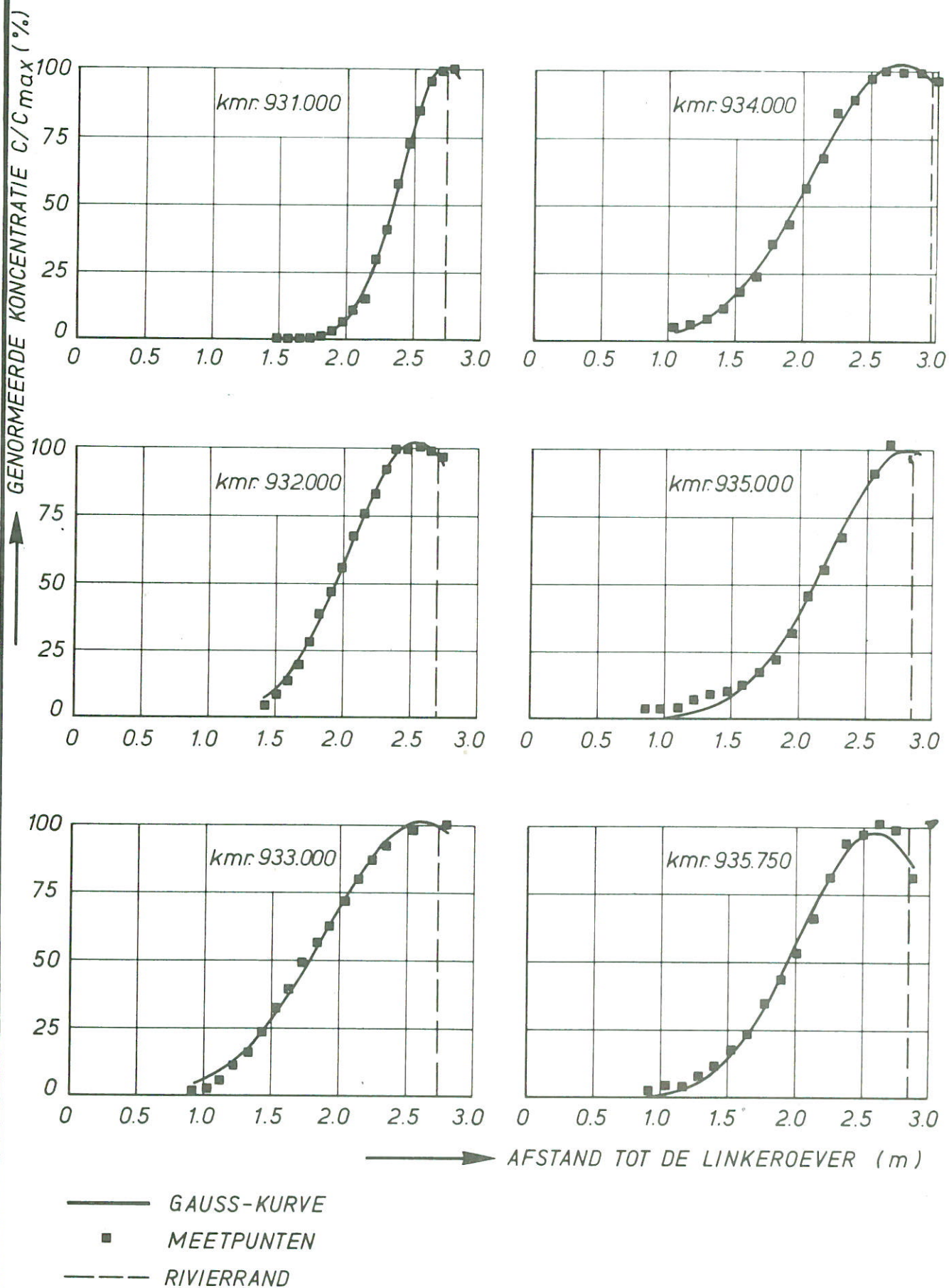
JM

A 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R. 706 - 1020

FIG. 4.2



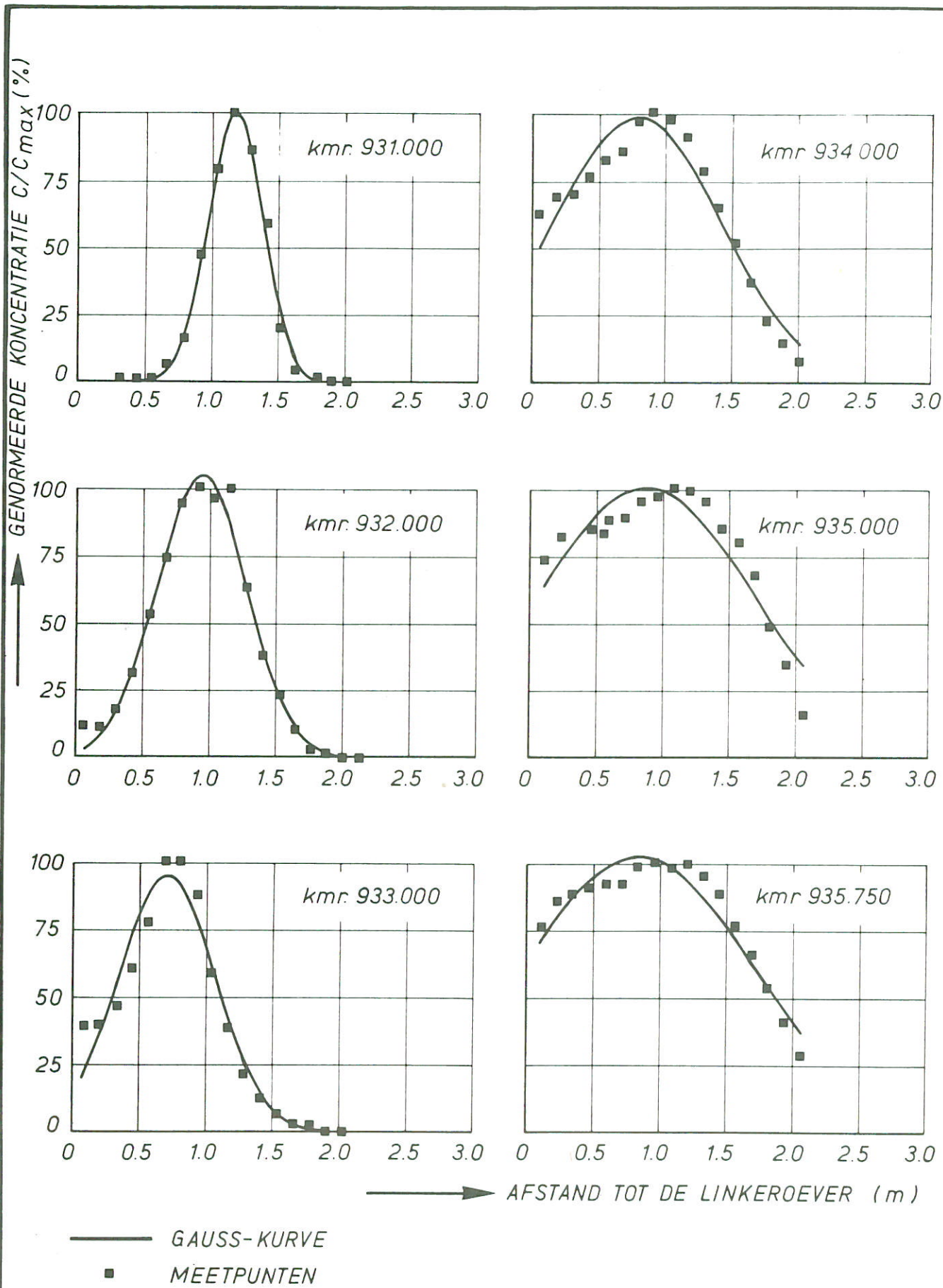
KONCENTRATIEVERDELINGEN PROEF WM 3
 RHODAMINEMETINGEN IN WAALMODEL M.959

JM

A 4

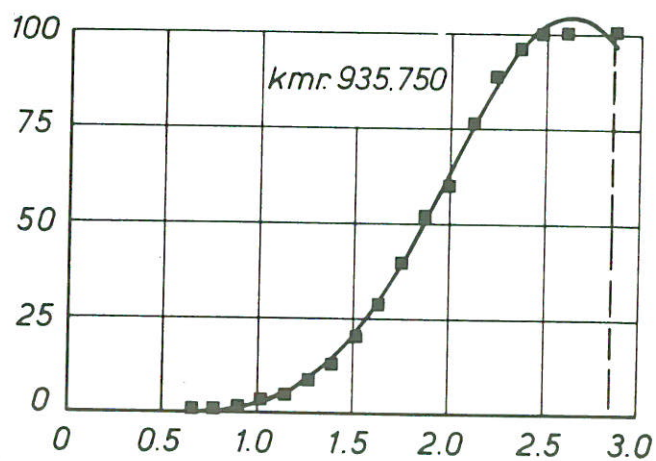
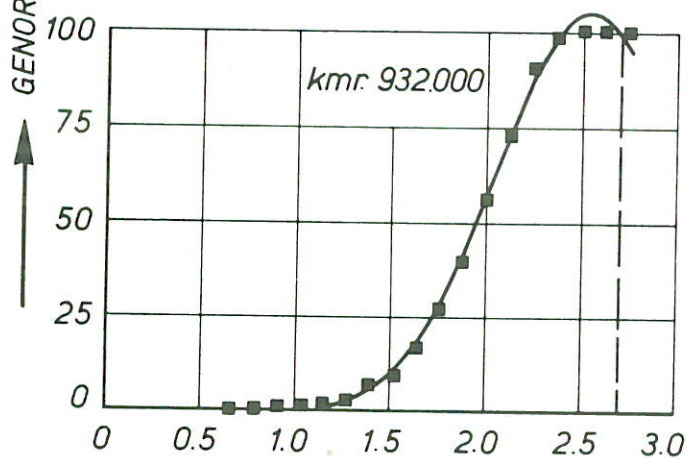
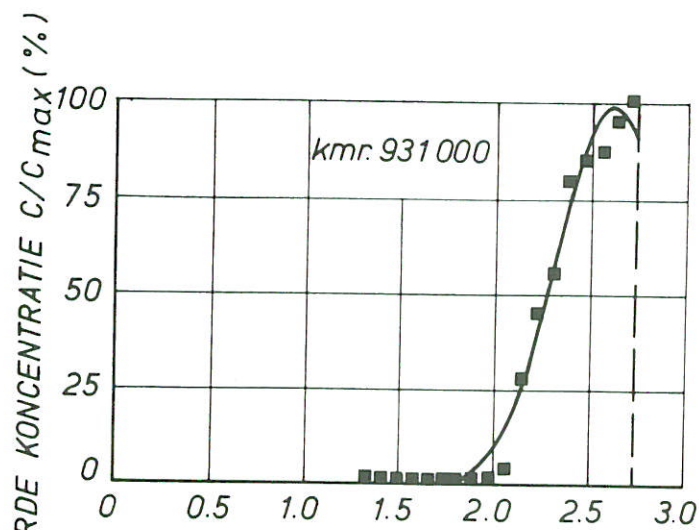
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R.706 - 1019 FIG. 4.3



KONCENTRATIEVERDELINGEN PROEF WM 4
 RHODAMINEMETINGEN IN WAALMODEL M.959

JM
 A 4



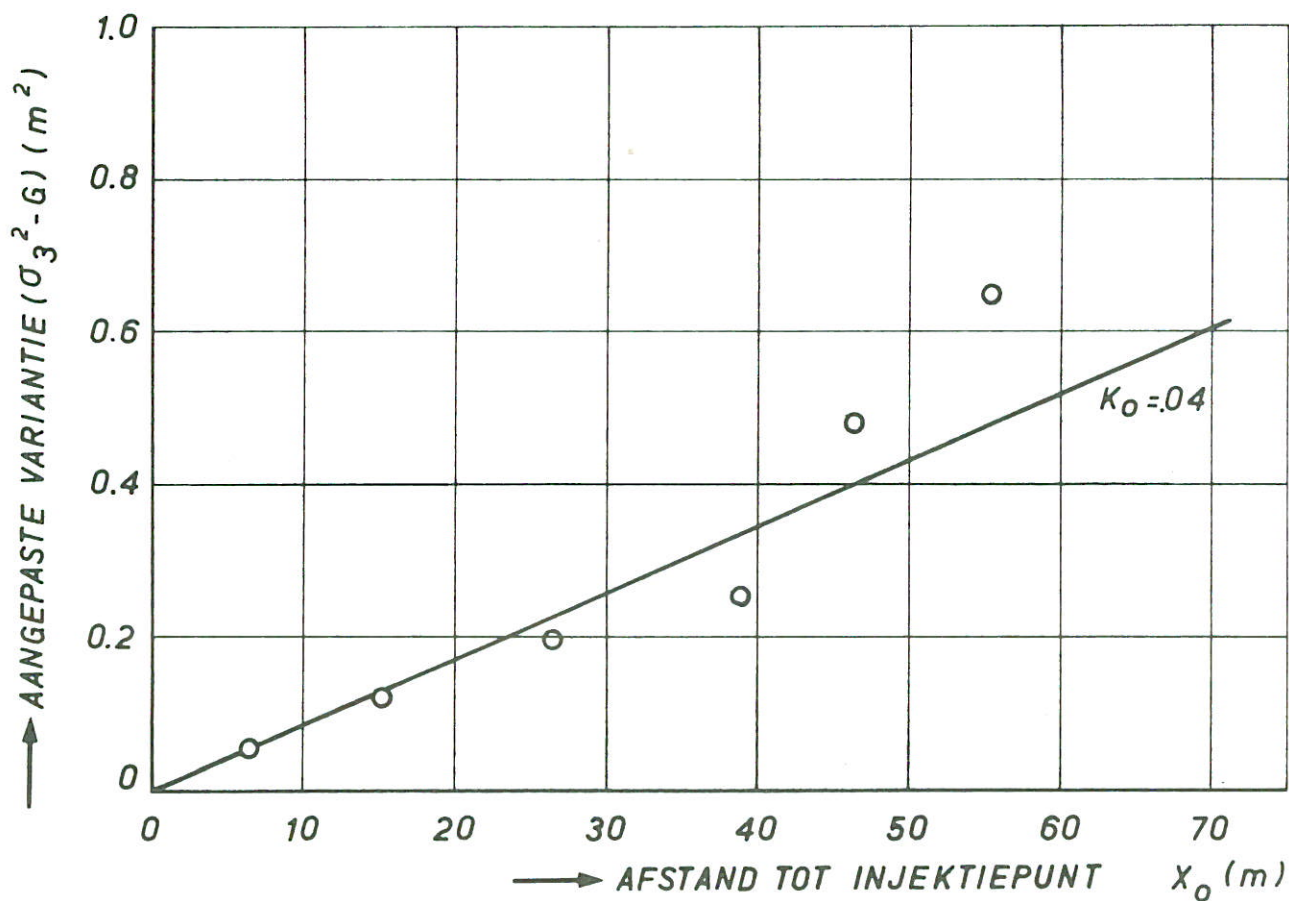
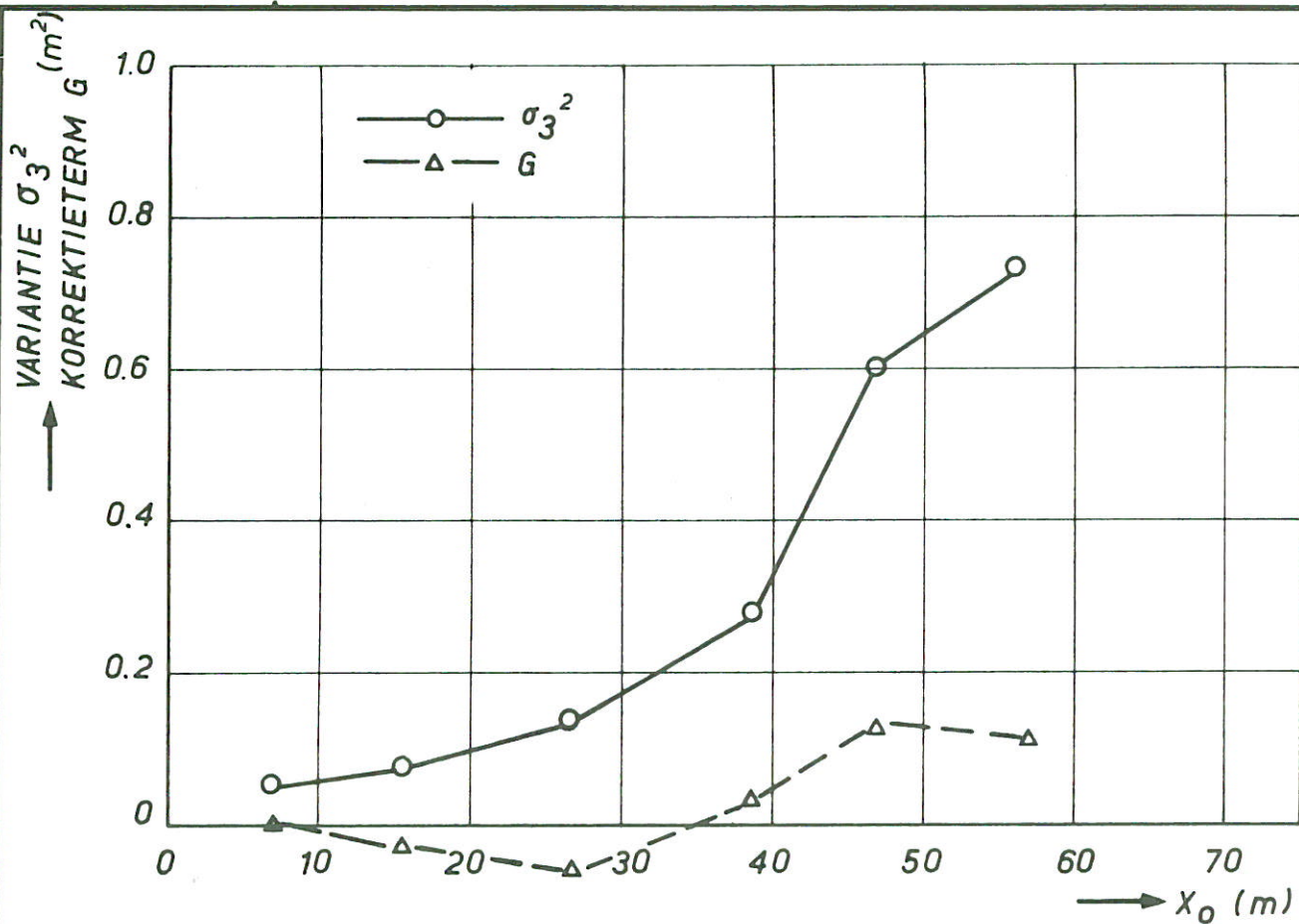
→ AFSTAND TOT DE LINKEROEVER (m)

- GAUSS-KURVE
- MEETPUNTEN
- - - RIVIERRAND

KONCENTRATIEVERDELINGEN PROEF WM 5
RHODAMINEMETINGEN IN WAALMODEL M.959

JM

A 4



ALGEMENE MOMENTEN GRADIENTMETHODE
 LINKSINJEKTIE WM 1 IN WAALMODEL M.959

PROEF WM 1

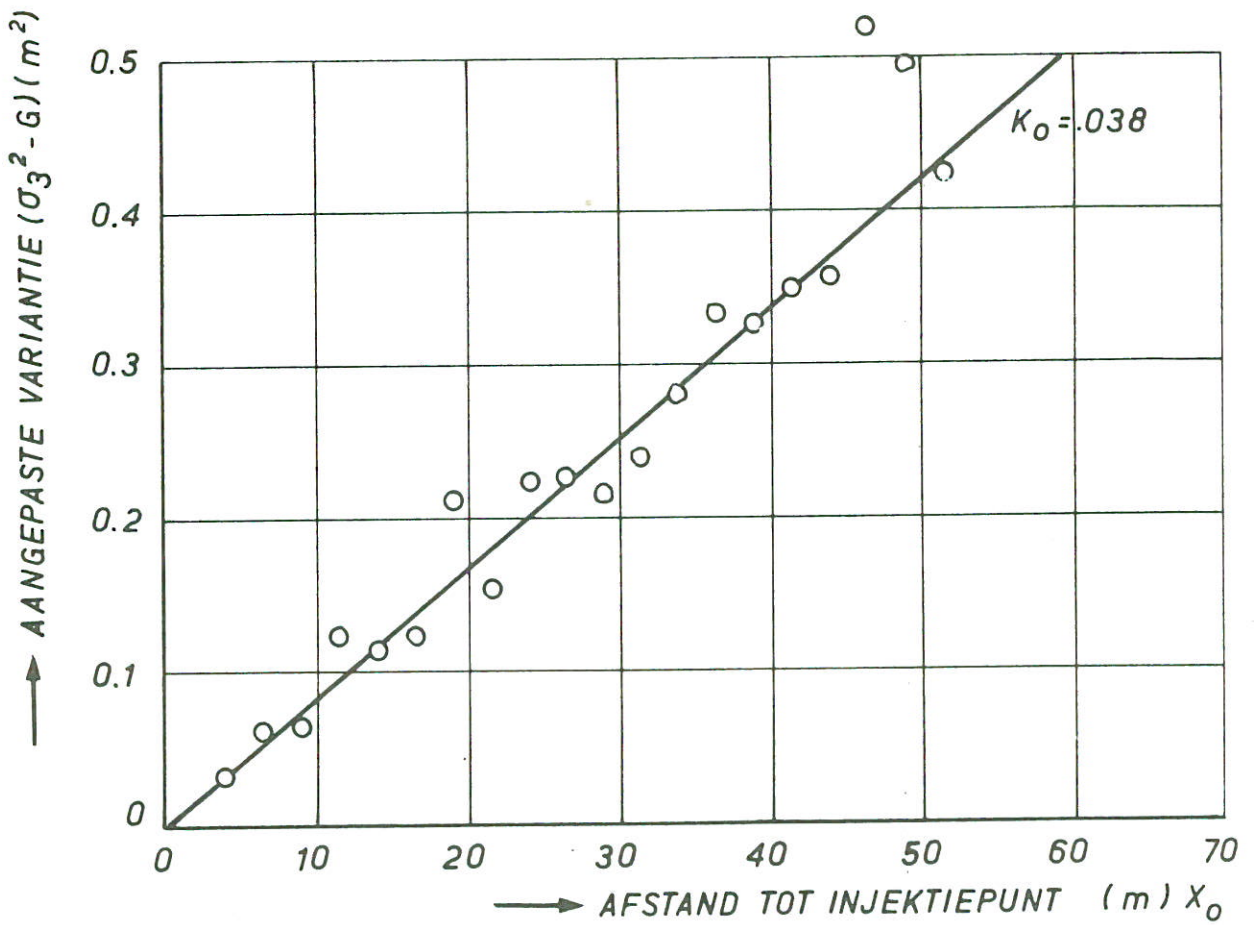
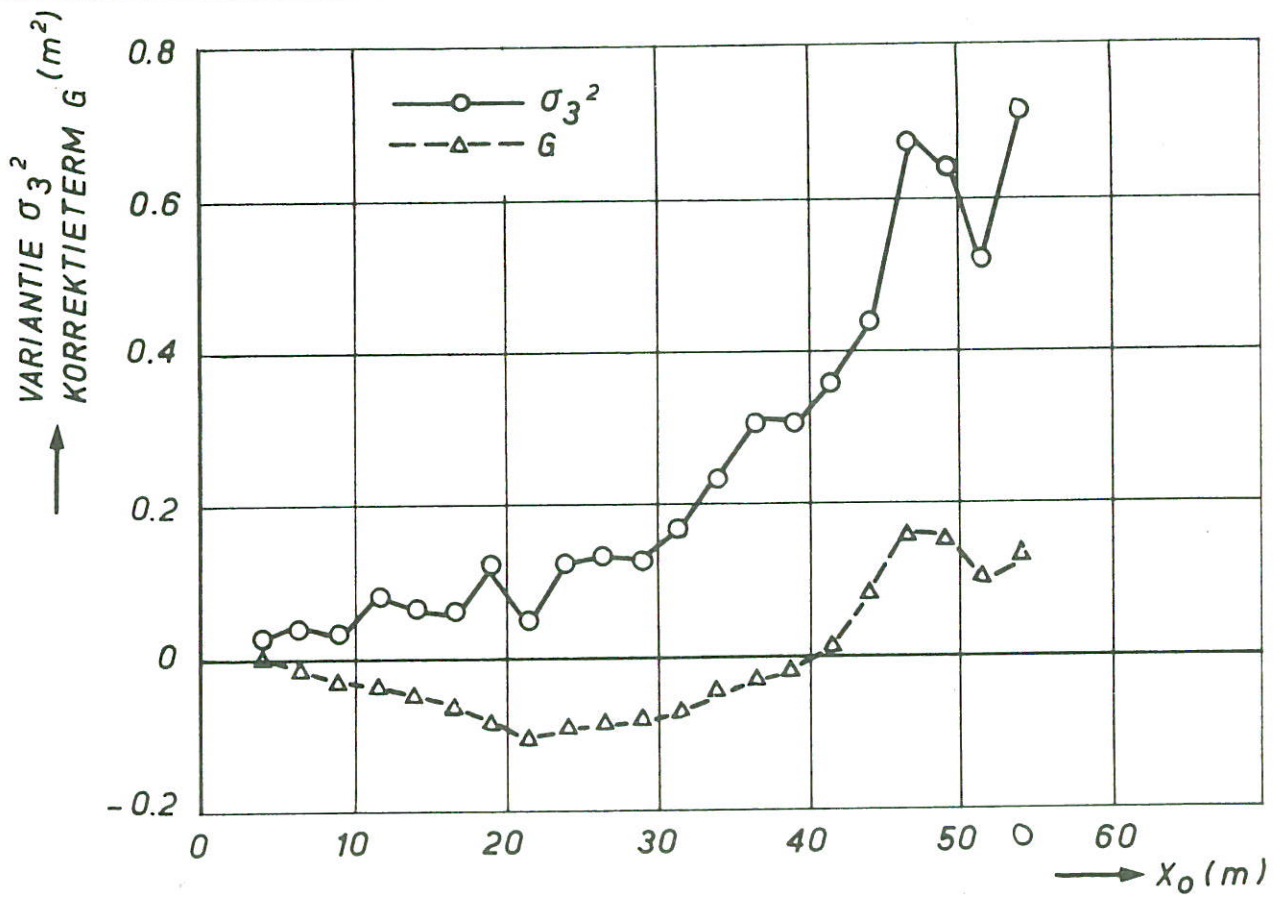
JM

A4

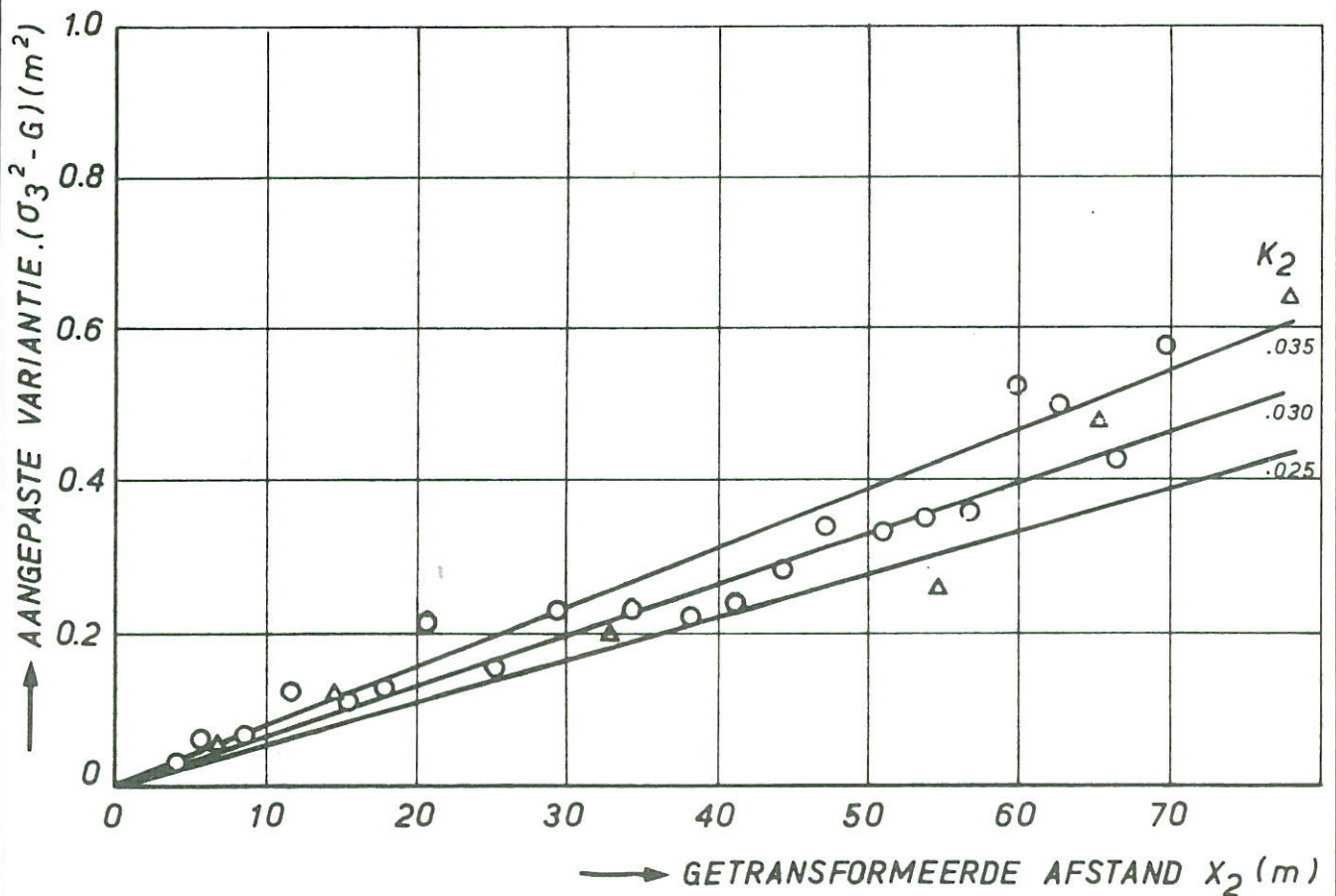
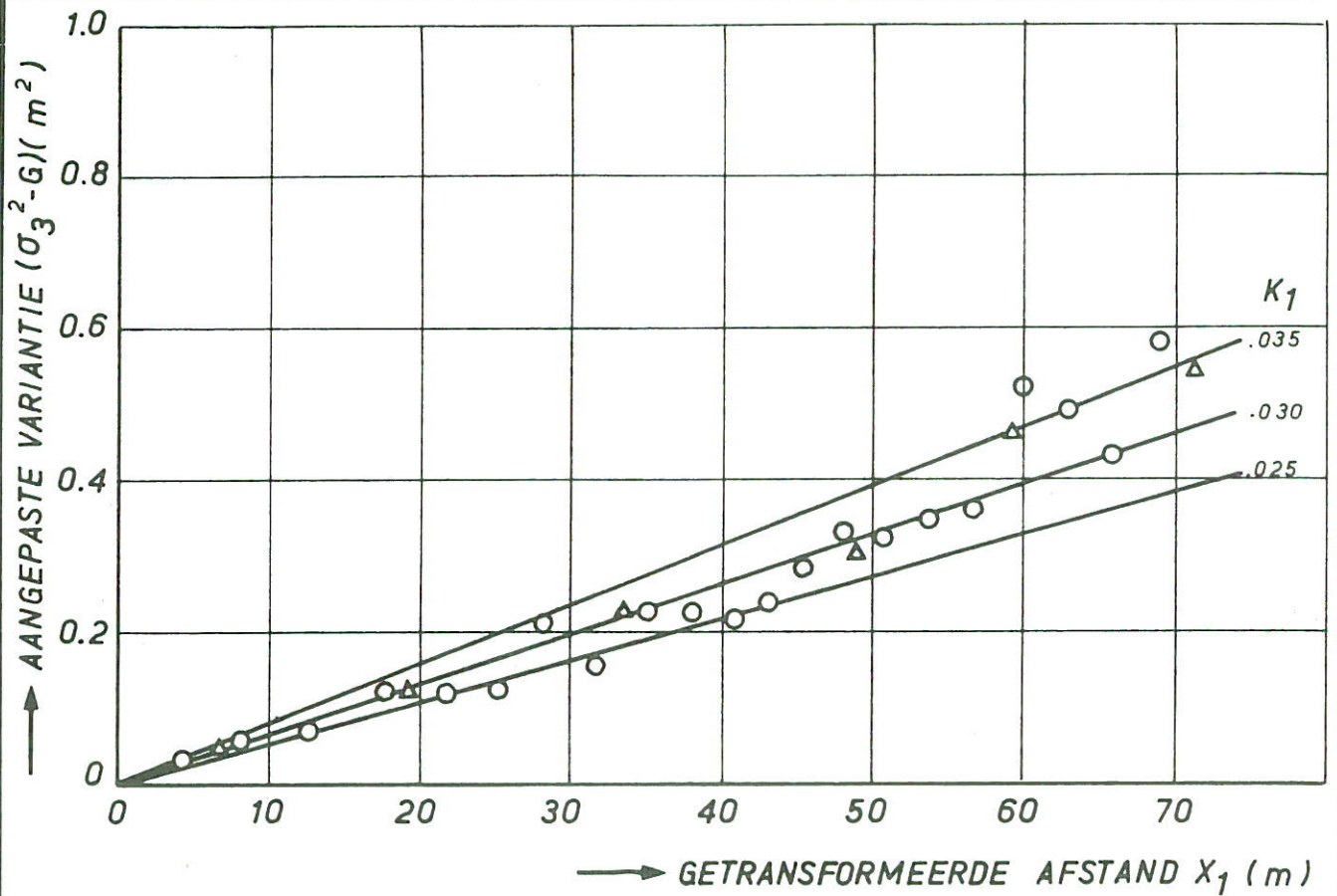
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R.706 - 1011

FIG.4.6



ALGEMENE MOMENTENGRADIENT METHODE LINKSINJEKTIE IN WAALMODEL M 959	PROEF WM 2	JM
		A4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	R.706 - 1017	FIG.4.7



ALGEMENE MOMENTENGRADIËNTMETHODE
LINKSINJEKTIE IN WAALMODEL M.959

PROEF WM 1
" WM 2

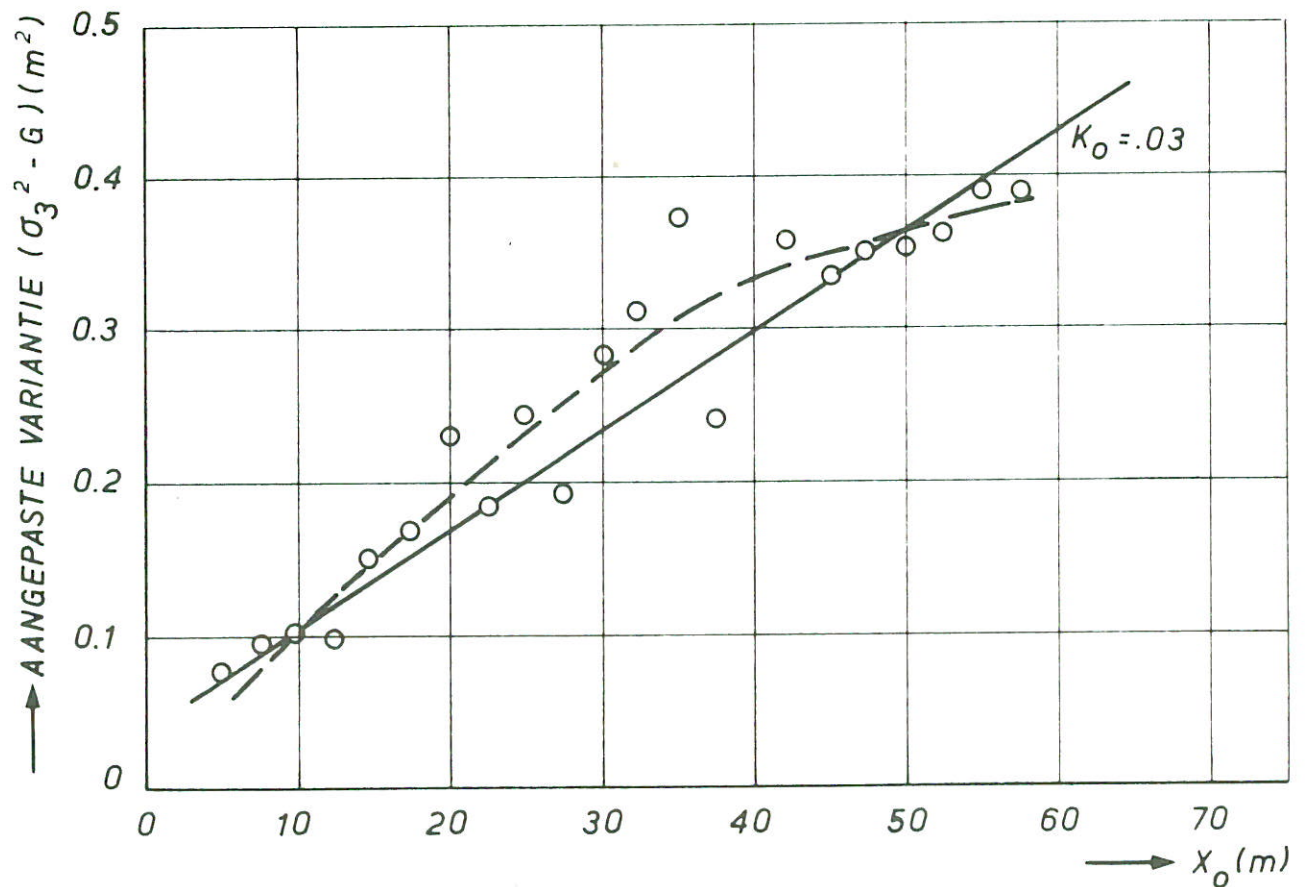
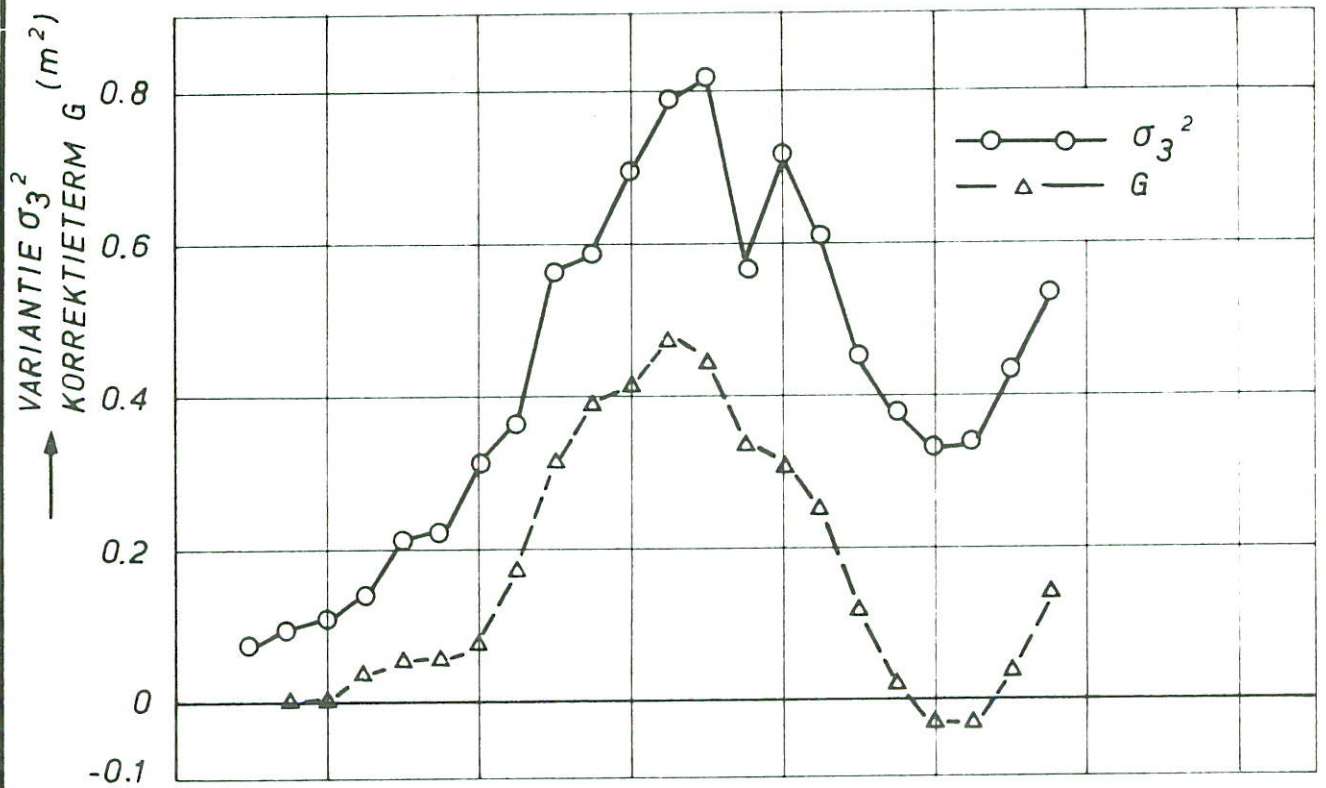
JM

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R.706 - 1033

FIG.4.8



ALGEMENE MOMENTENGRADIENTMETHODE
 RECHTSINJEKTIE IN WAALMODEL M. 959

PROEF WM 3

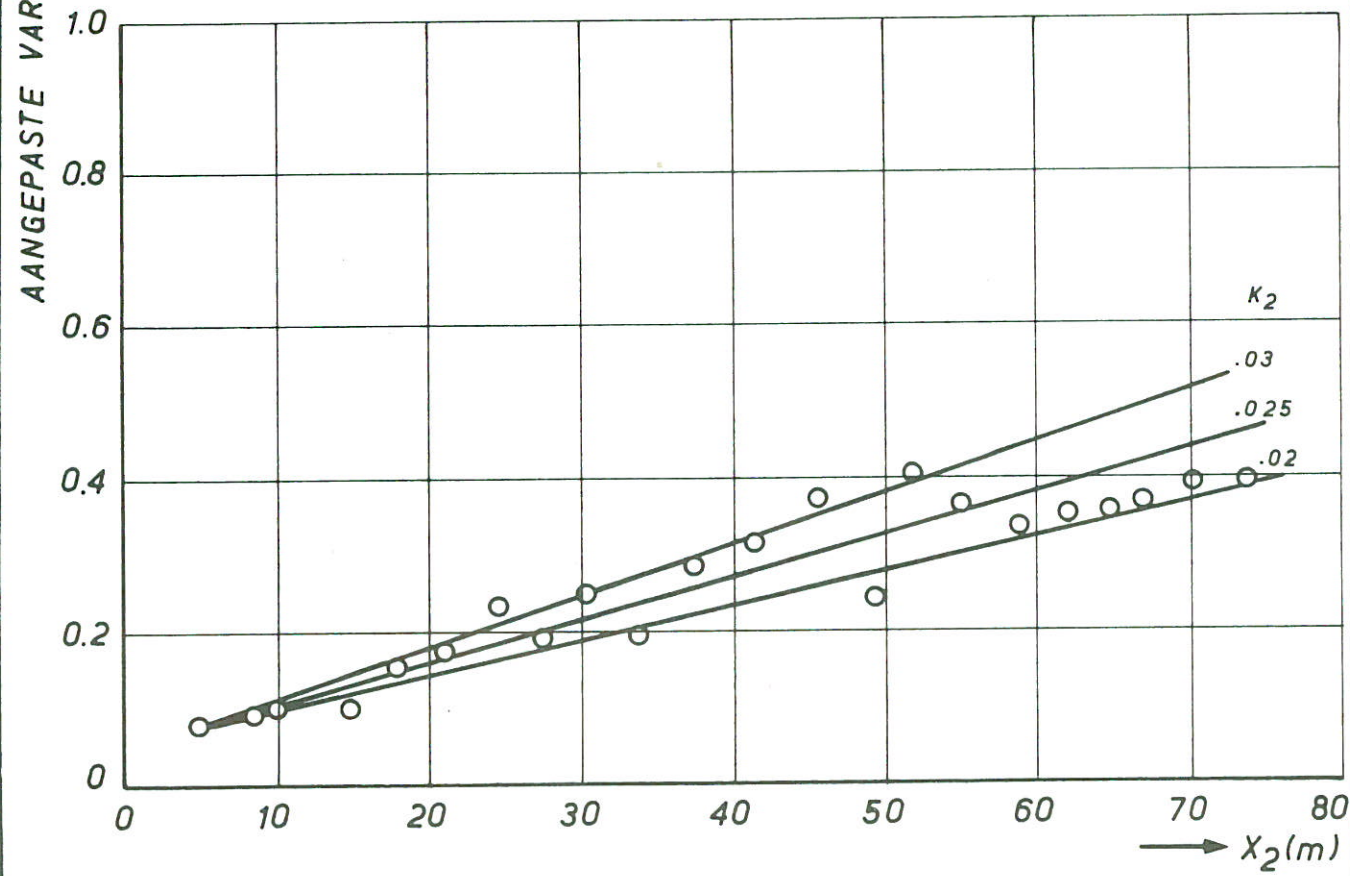
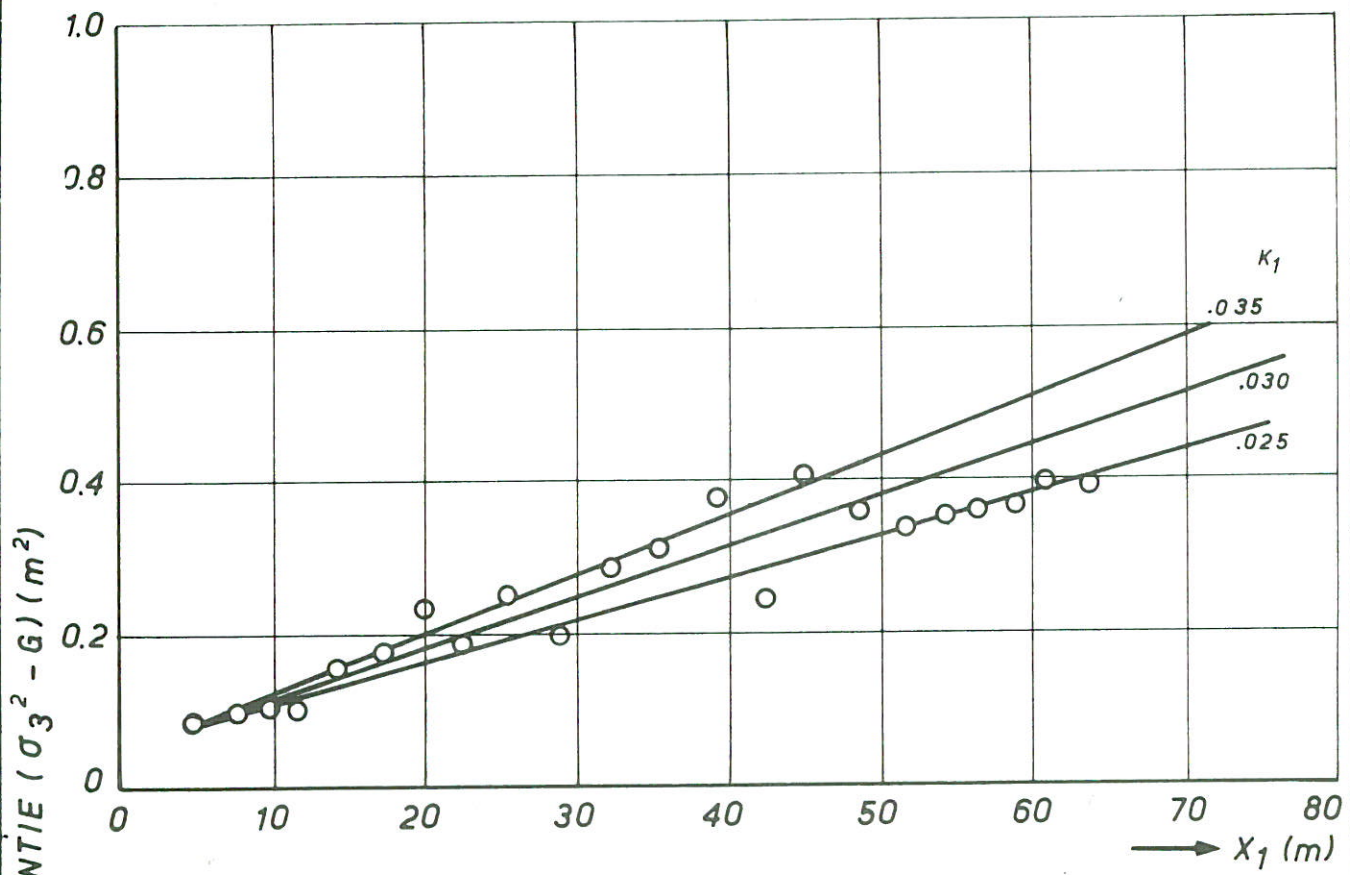
JM

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R. 706 - 1018

FIG.4.9



ALGEMENE MOMENTENGRADIENTMETHODE
RECHTSINJEKTIE IN WAALMODEL

PROEF WM3

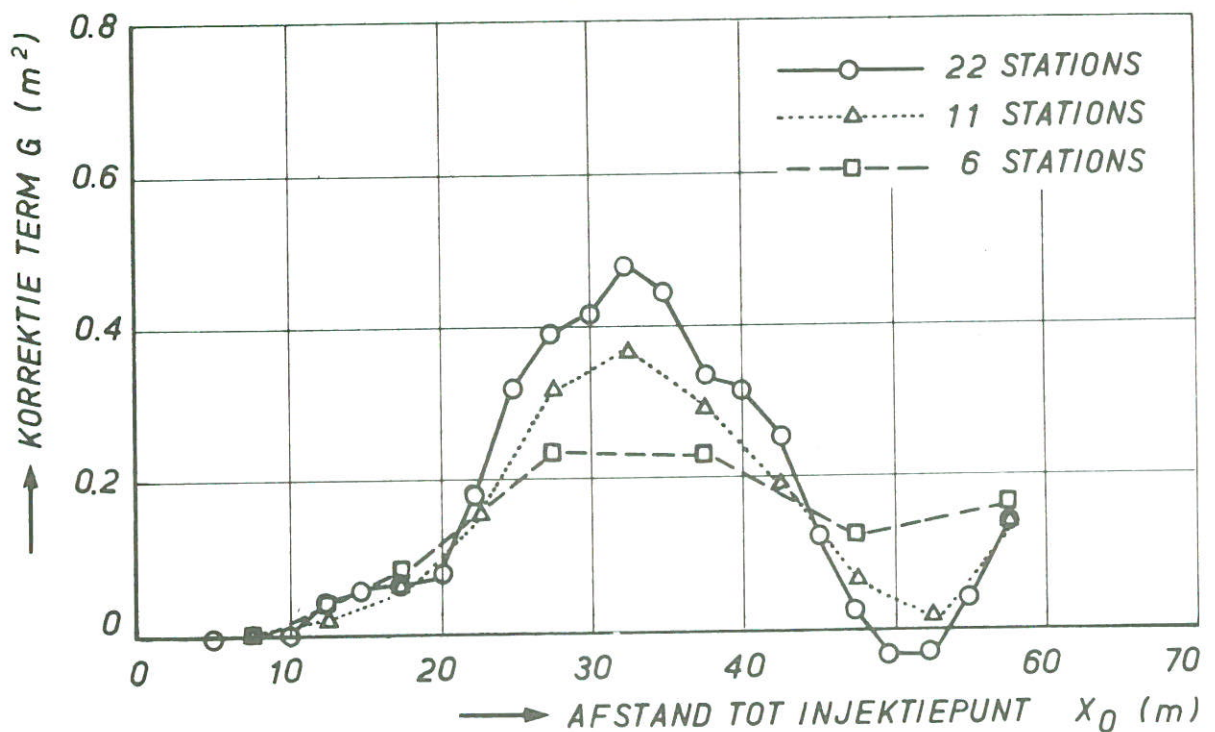
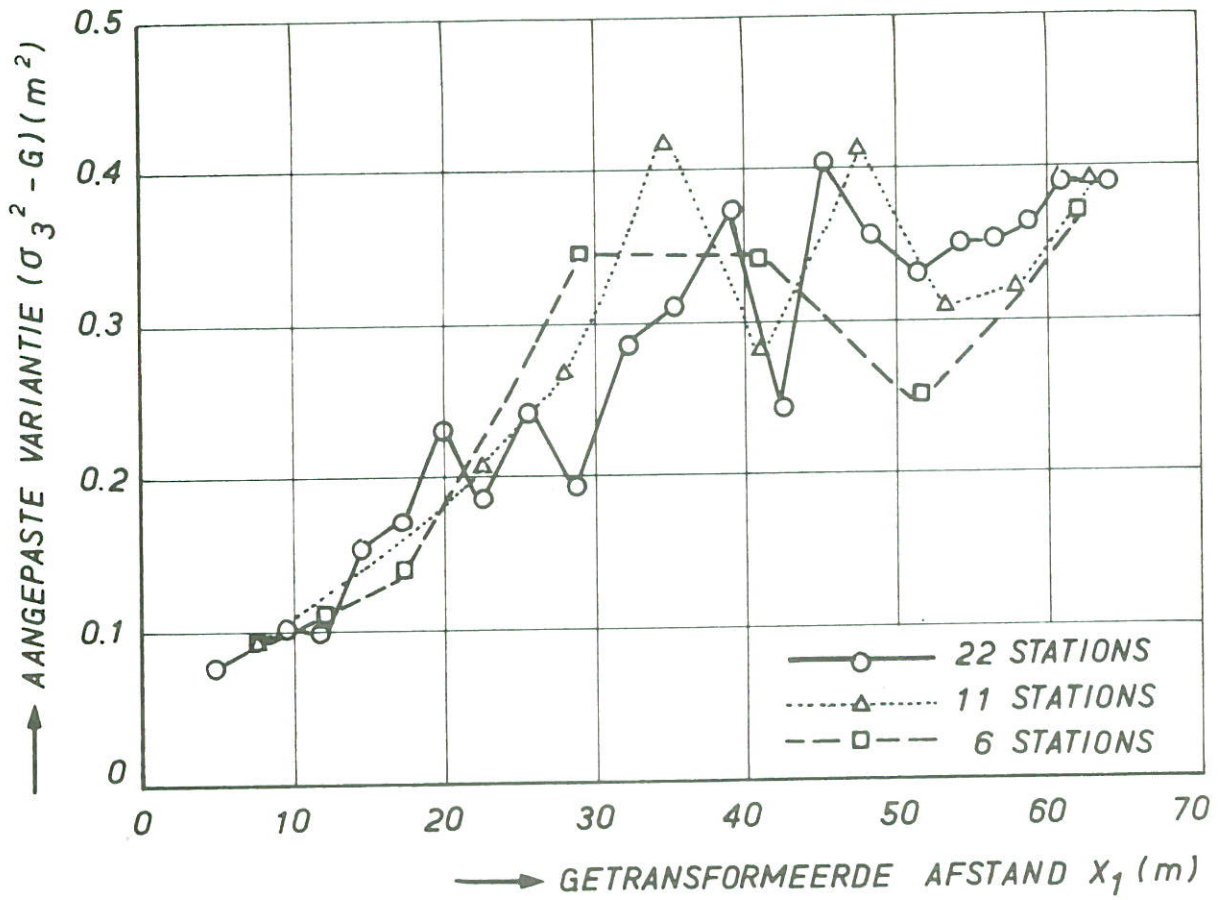
JM

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R.706 - 1023

FIG.4.10



WAALMODEL : INVLOED VAN MEETDICHTHEID
OP AANGEPASTE VARIANTIE

PROEF WM 3

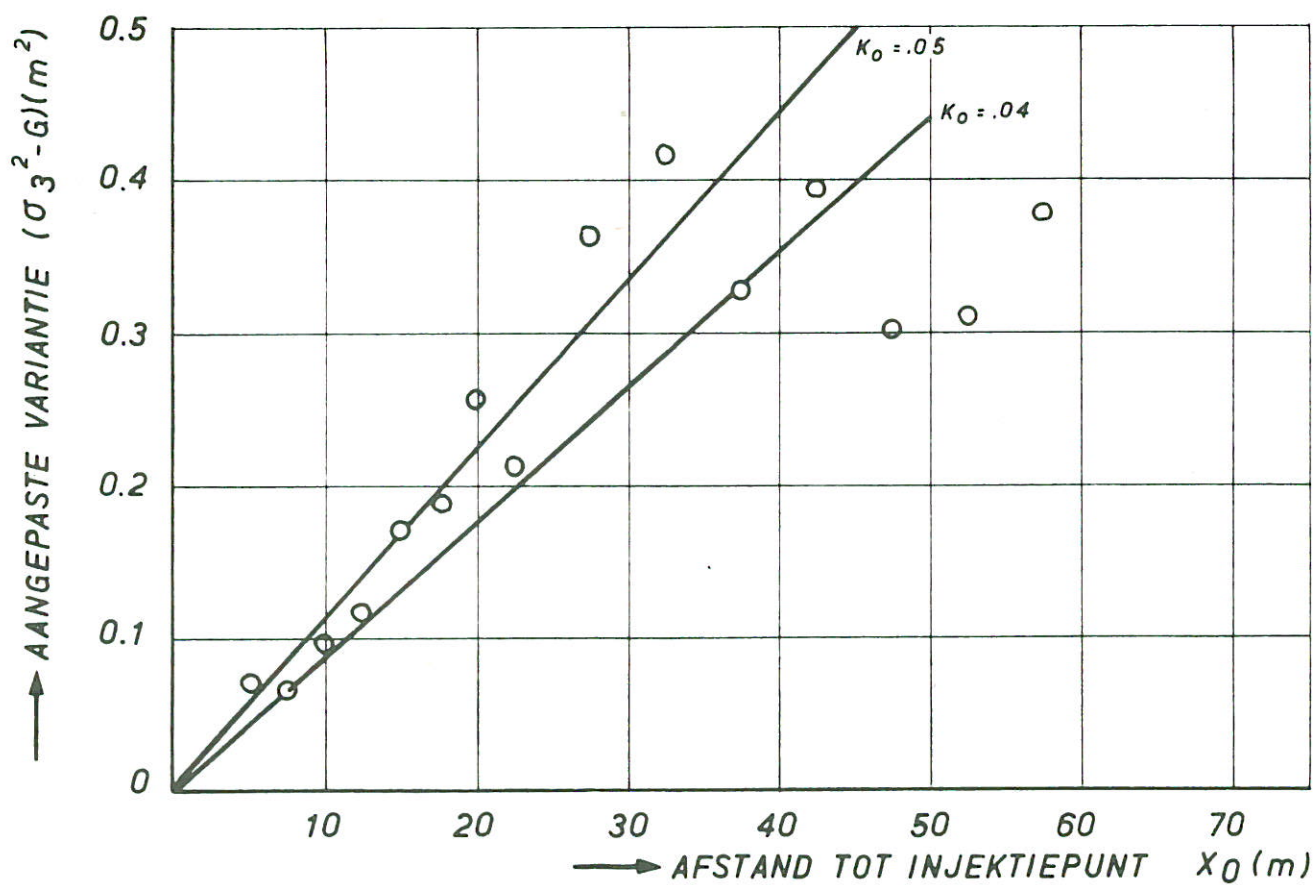
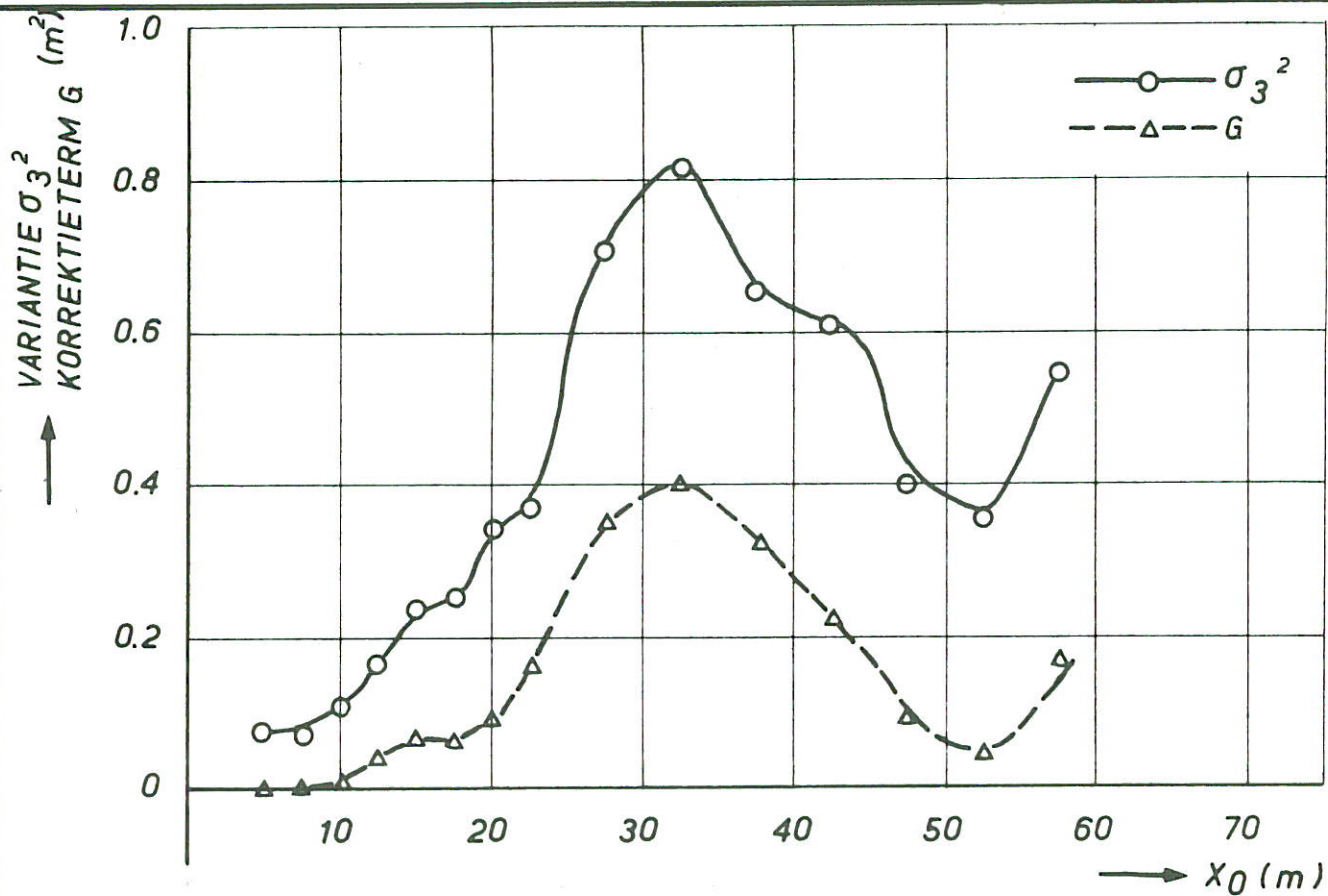
JM

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R.706 - 1024

FIG.4.11



ALGEMENE MOMENTEN GRADIENT METHODE
RECHTSINJEKTIE IN WAALMODEL M.959

PROEF WM 5

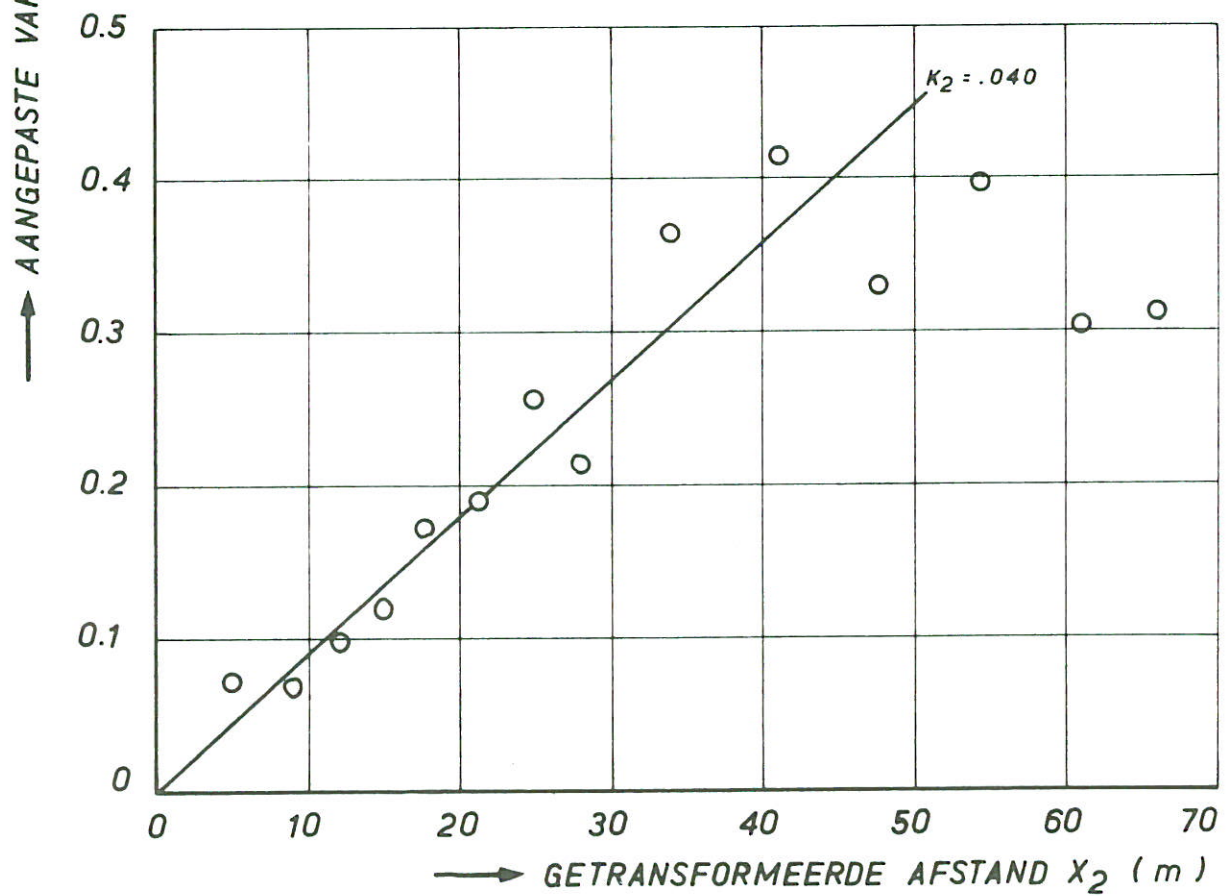
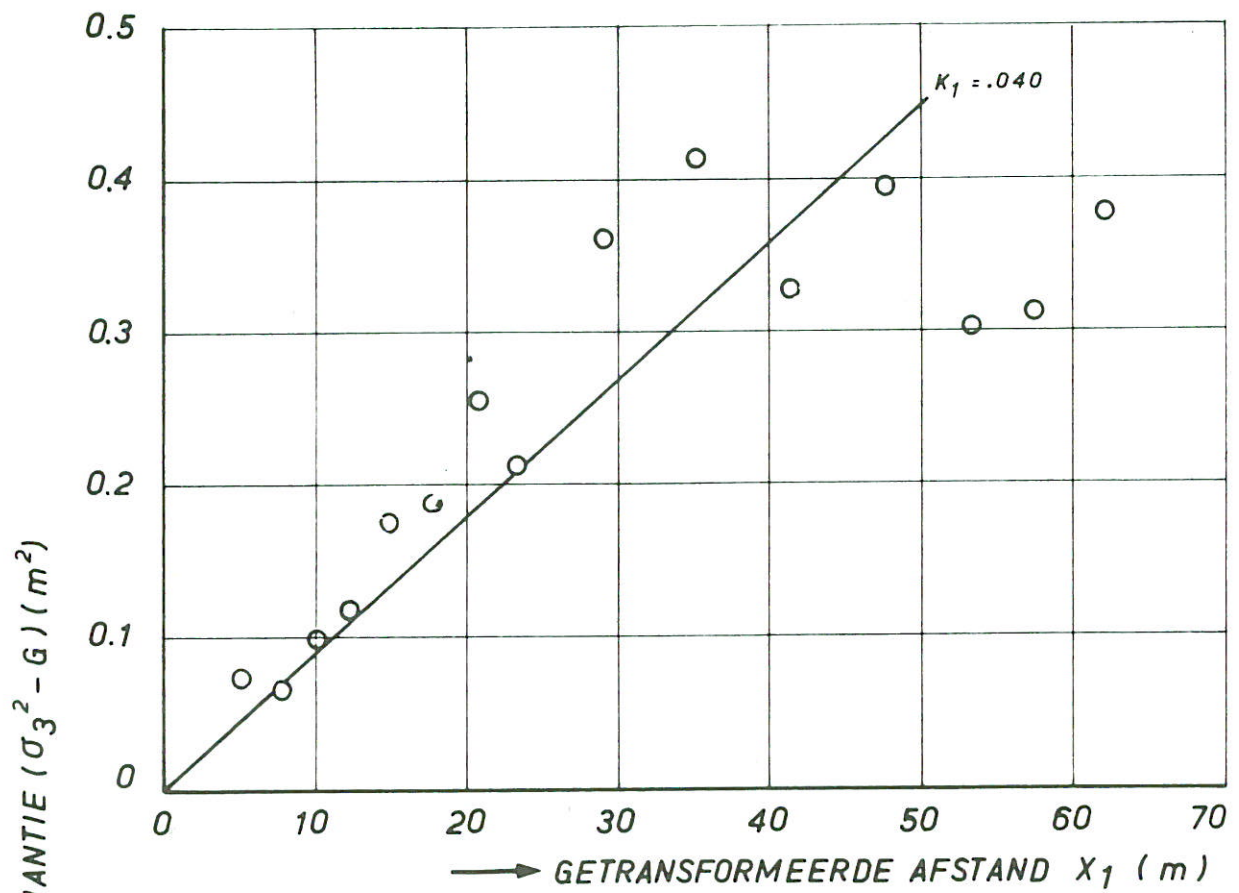
JM

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R.706 - 1025

FIG.4.12



ALGEMENE MOMENTENGRADIENTMETHODE
 RECHTSINJEKTIE WM 5 IN WAALMODEL M.959

PROEF WM 5

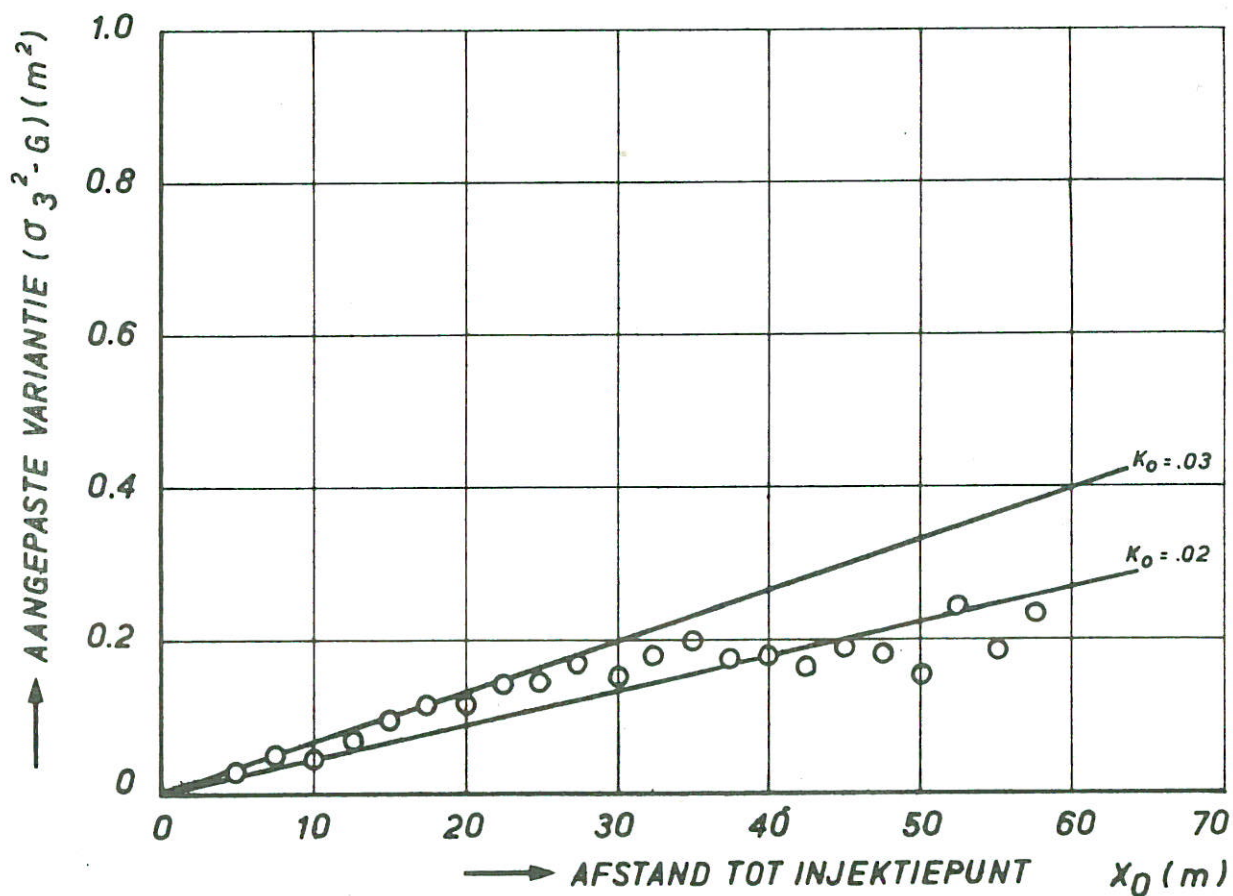
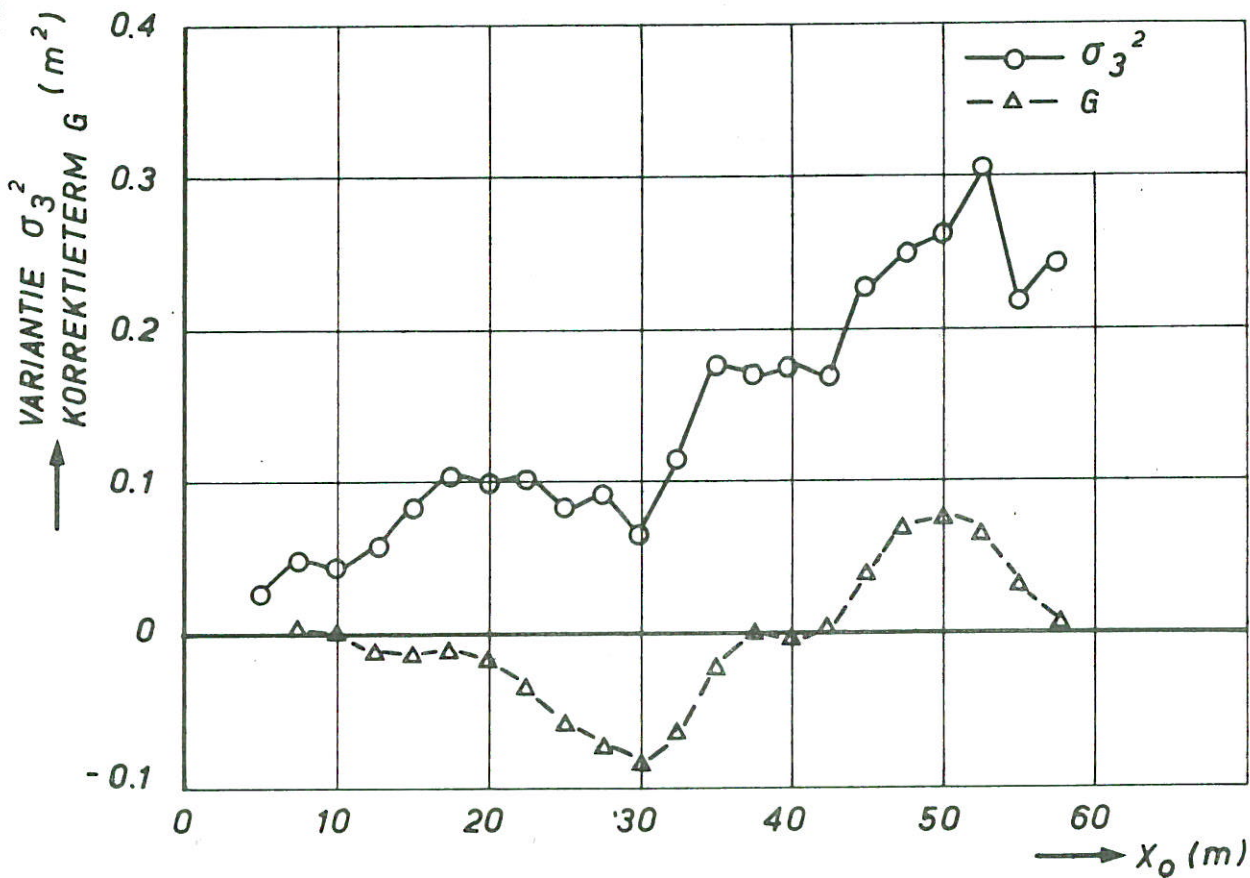
JM

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R. 706 - 1032

FIG.4.13



ALGEMENE MOMENTENGRADIENTMETHODE
 WAALMODEL M 959 - WM 4 MIDDENINJEKTIE

PROEF WM 4

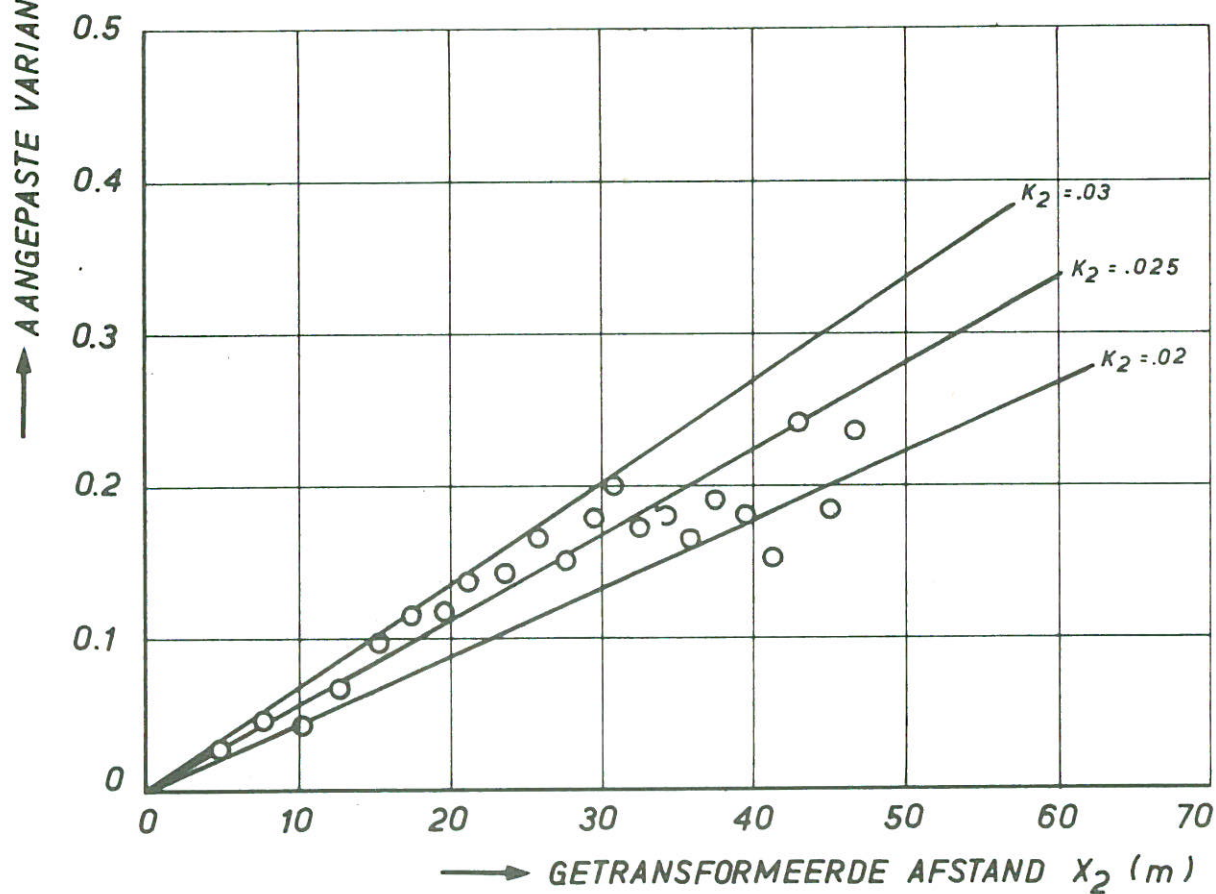
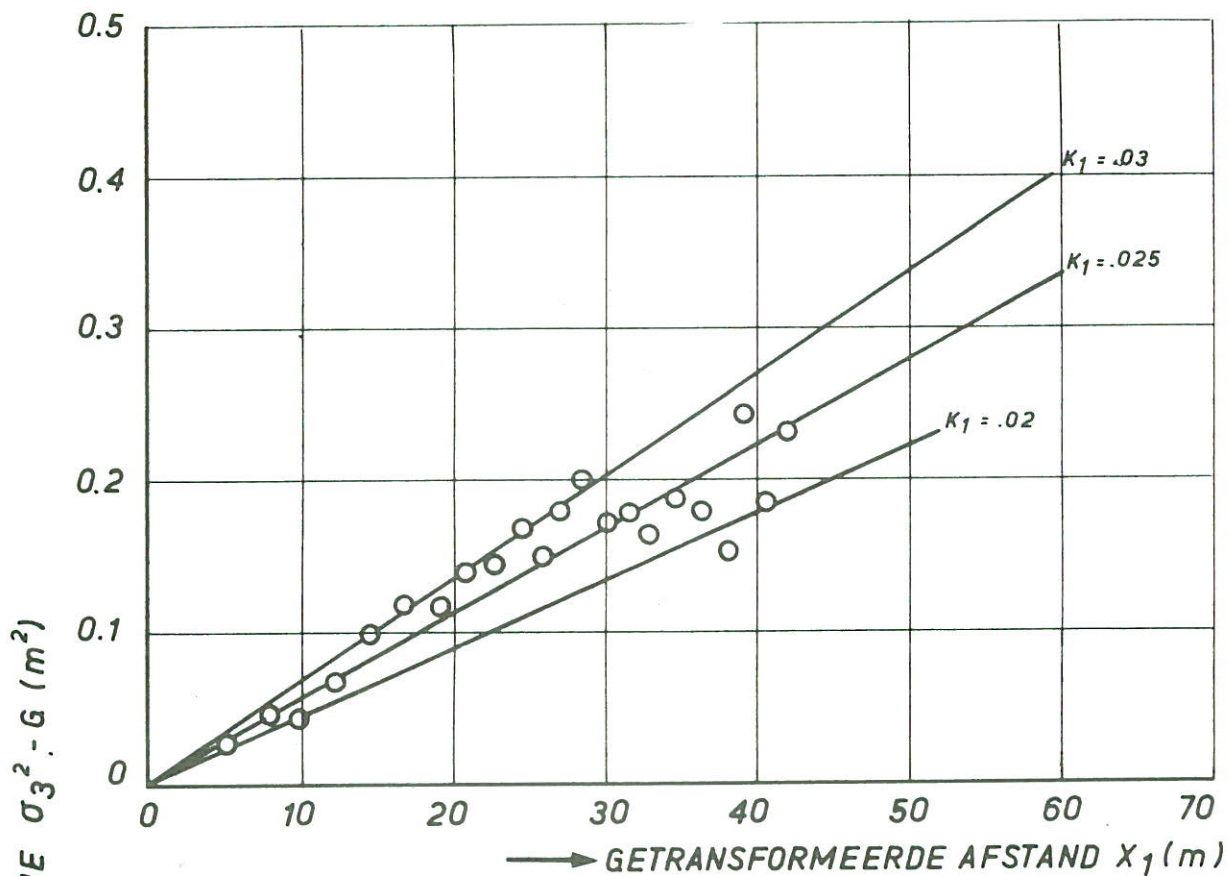
JM

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R.706 - 1026

FIG.4.14



ALGEMENE MOMENTENGRADIENTMETHODE
WAALMODEL M.959 WM 4 MIDDENINJEKTIE

PROEF WM 4

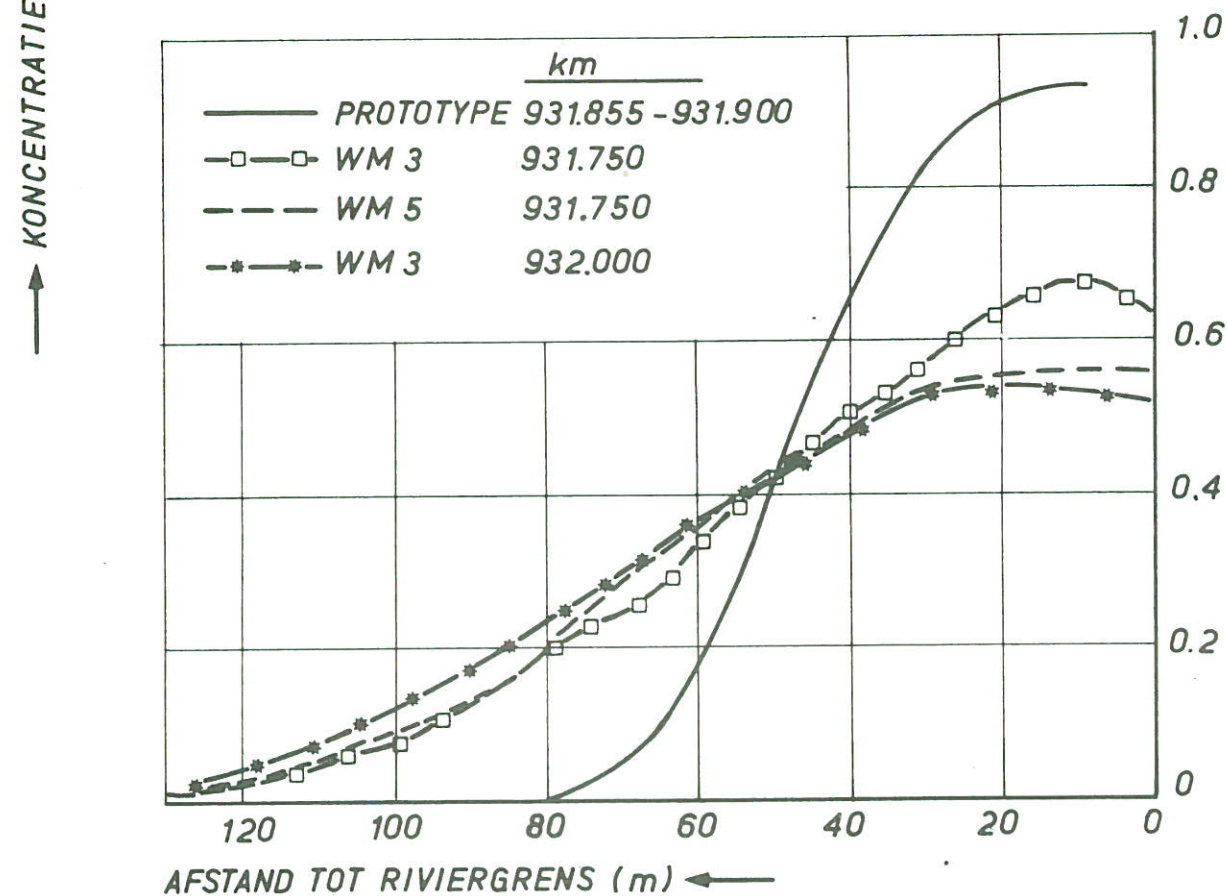
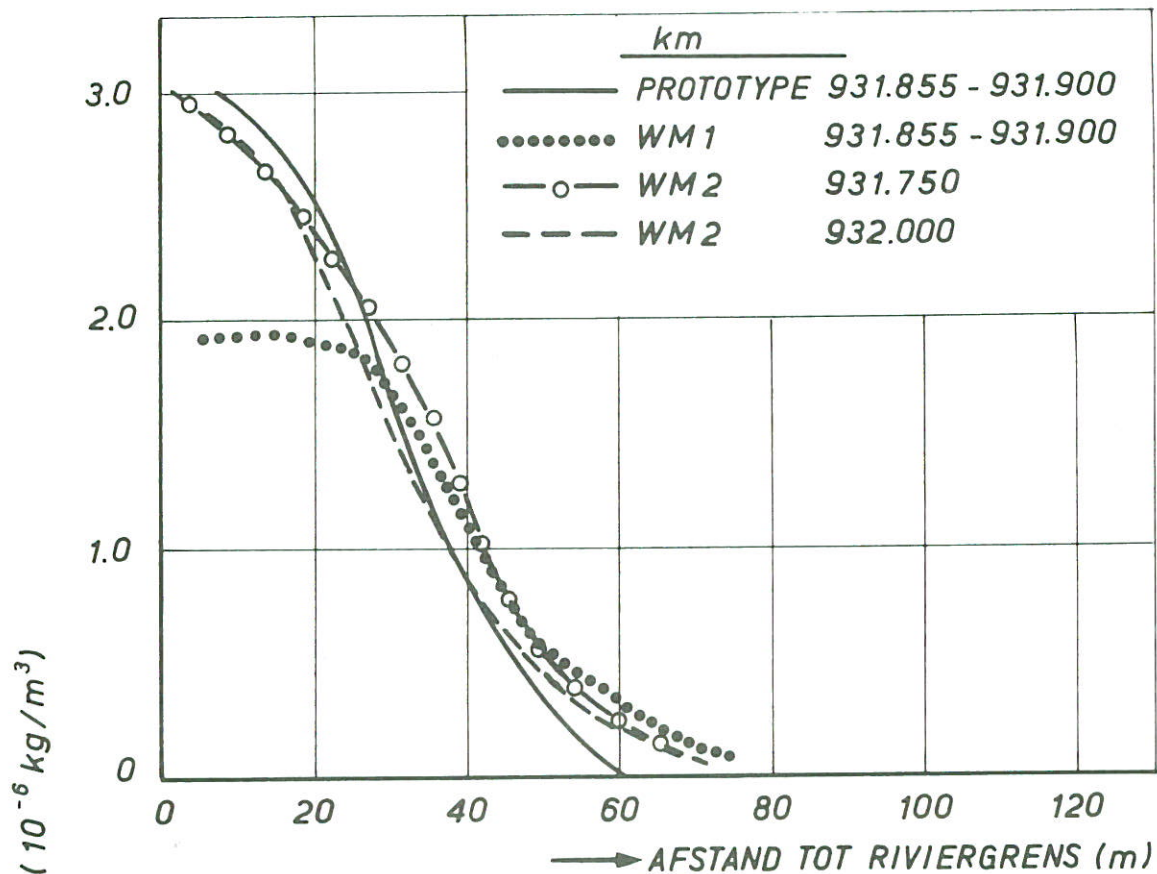
JM

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R.706 - 1027

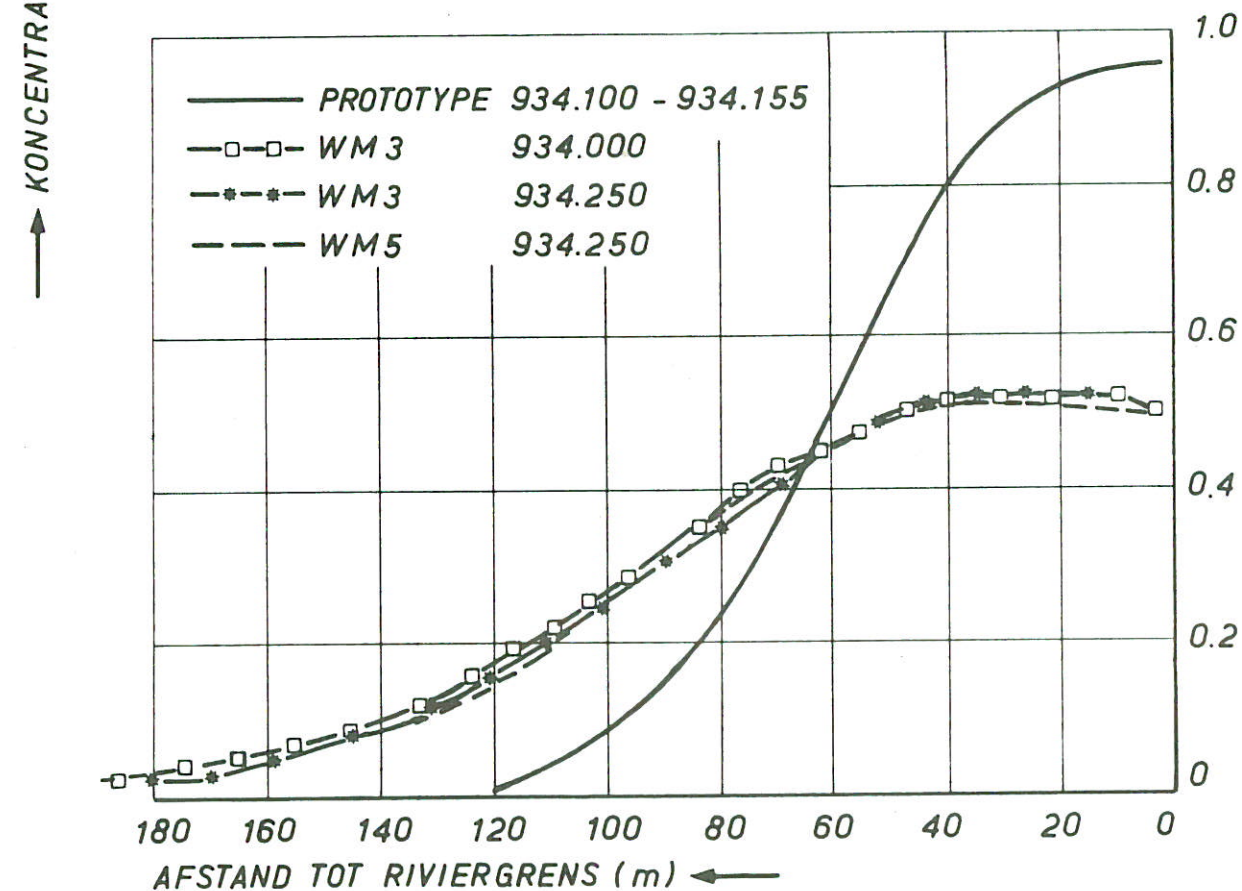
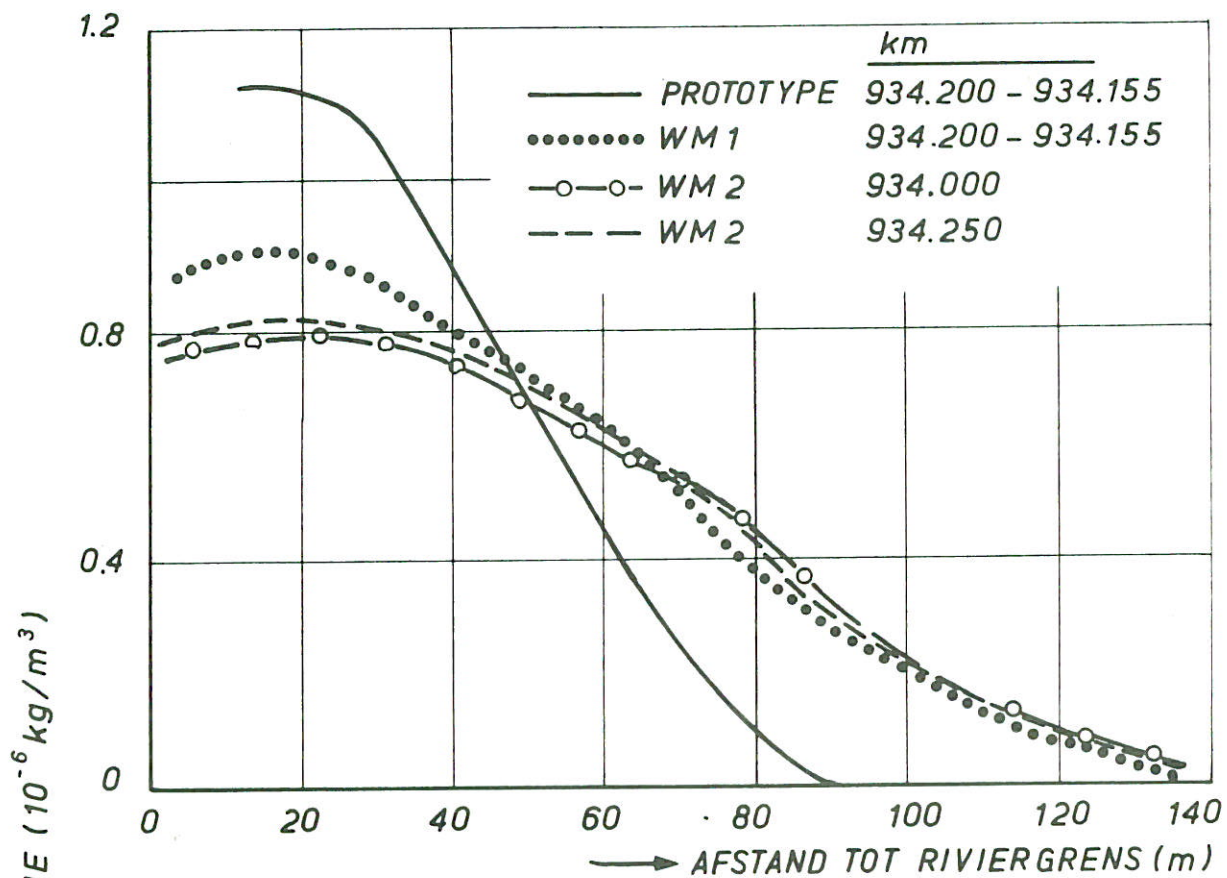
FIG.4.15



VERGELIJKING VAN MODEL EN PROTOTYPE
 KONCENTRATIEVERDELINGEN - WAAL NABIJ ZALTBOMMEL

JM

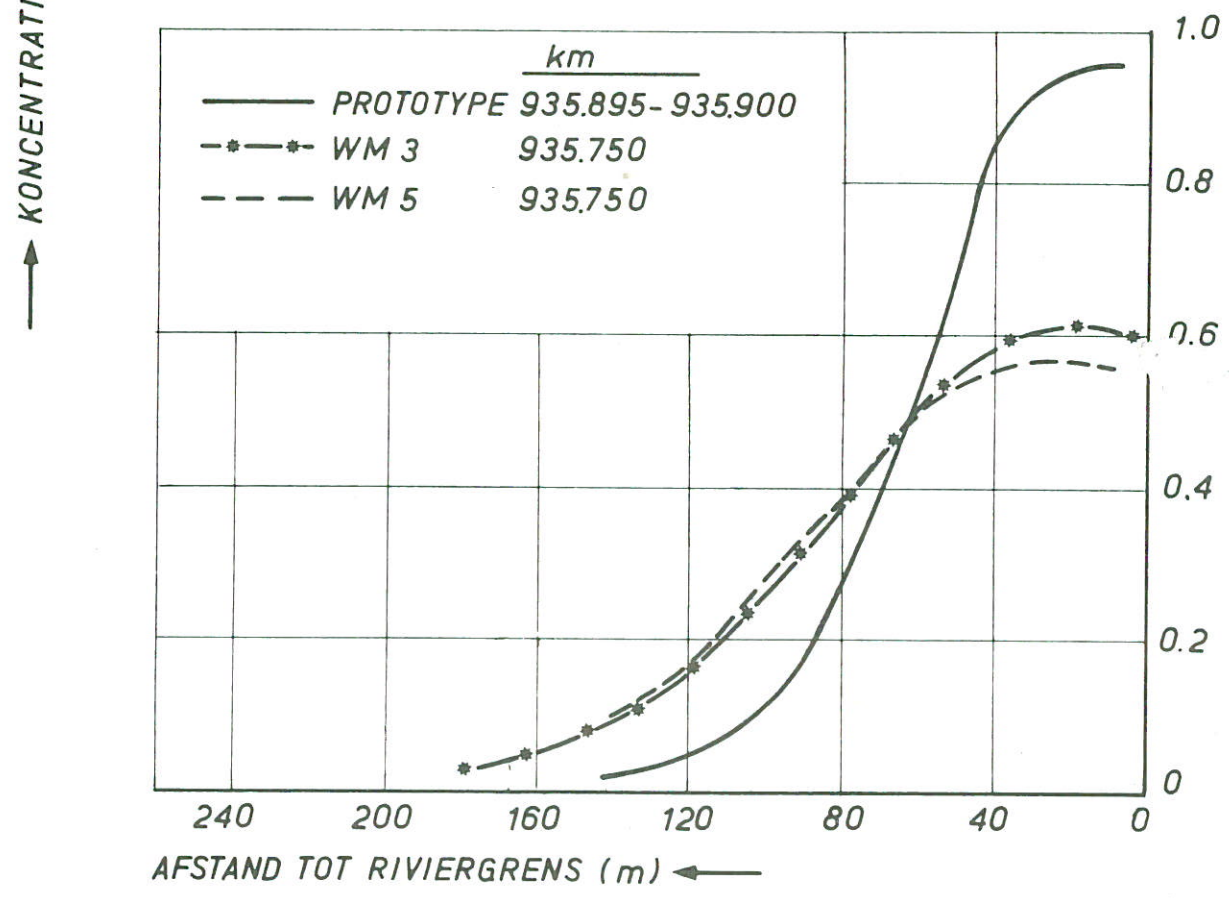
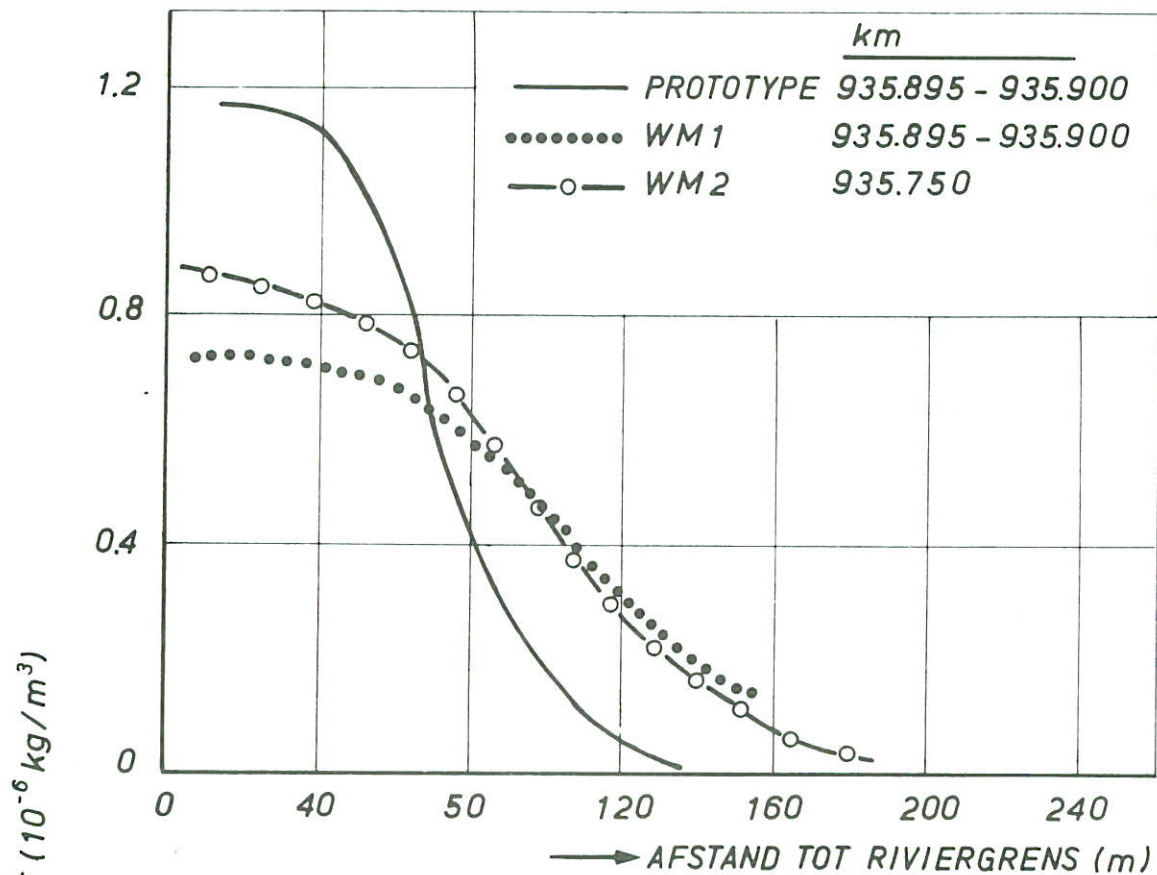
A4



VERGELIJKING VAN MODEL EN PROTOTYPE
KONCENTRATIEVERDELINGEN - WAAL NABIJ ZALTBOMMEL

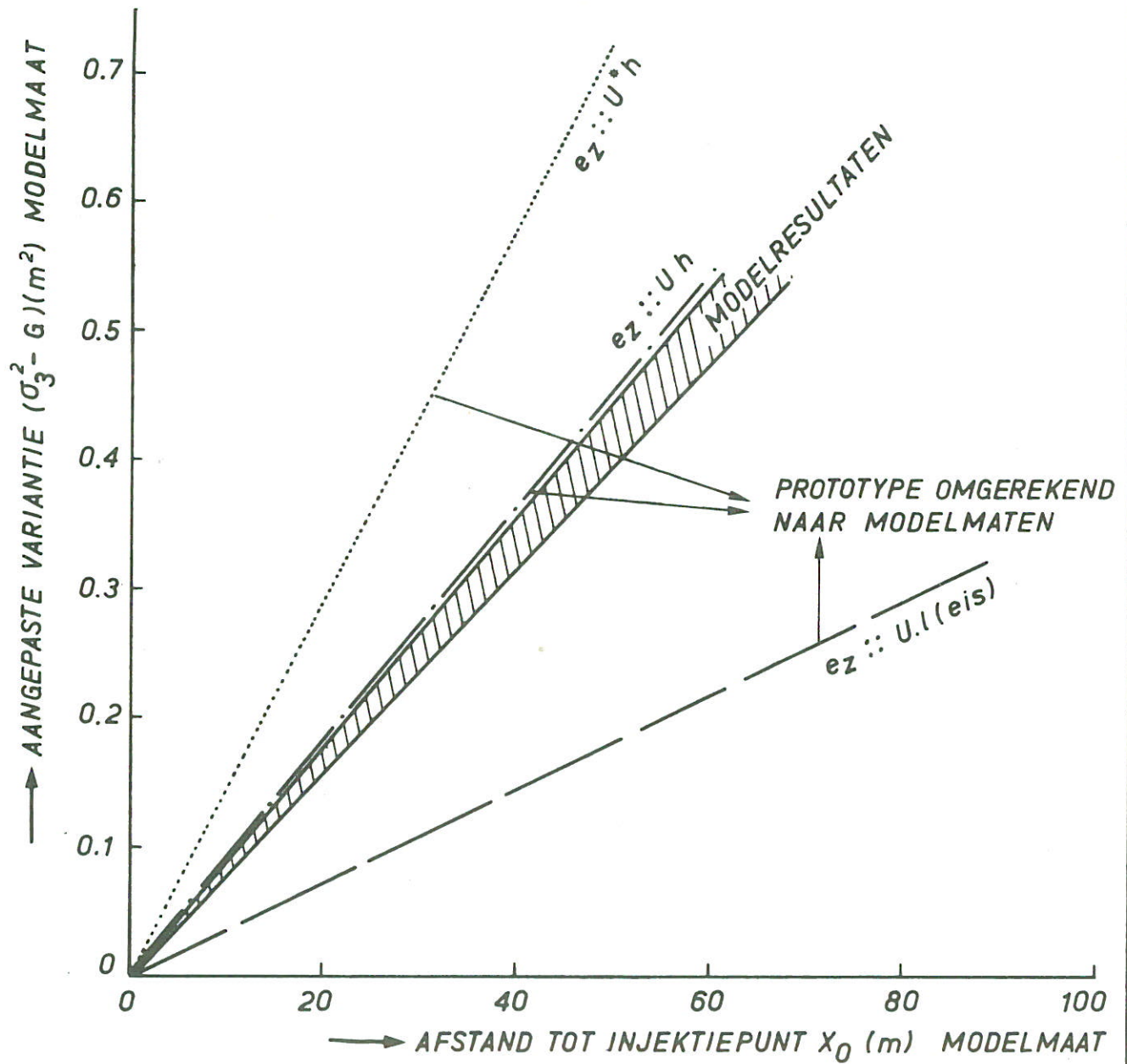
JM

A4



VERGELIJKING VAN MODEL EN PROTOTYPE
 KONCENTRATIEVERDELINGEN - WAAL NABIJ ZALTBOMMEL

JM
 A4



MODEL-PROTOTYPE VERGELIJKING VAN RESULTATEN WAAL
 ALGEMENE MOMENTENGRADIENTMETHODE

JM

A4

Tabel 1 Modelgegevens en concentratie-meetraaien.

Meetraai km	B m	\bar{d} m	A m ²	\bar{U} # m/sec.	Q (berekend) m ³ /sec.	QR	concentratie-meetraaien								
							Proef WM 1	Proef WM 2	Proef WM 3	Proef WM 4	Proef WM 5				
injectie:															
930.000	2.58 ⁵	.089	.231	.173	.0400	.998	links 930.34	links 930.34	rechts 930.00	rechts 930.00	rechts 930.00				
930.500	2.67	.120	.320	.125	.0474	.842			x	x	x				
930.750	2.65 ⁵	.101	.268	.149	.0412	.969		x	x	x	x				
931.000	2.54 ⁵	.099	.251	.159	.0439	.909	x	x	x	x	x				
931.250	2.45 ⁵	.104	.256	.156	.0467	.855		x	x	x	x				
931.500	2.58 ⁵	.119	.307	.130	.0498	.801		x	x	x	x				
931.750	2.55	.115	.294	.136	.0456	.875		x	x	x	x				
931.855-931.900	2.34 ⁵	.096	.224	.178	.0375	1.06 ⁵	x								
932.000	2.51 ⁵	.115	.289	.138	.0499	.799		x	x	x	x				
932.250	2.59	.097	.250	.160	.0424	.942		x	x	x	x				
932.500	2.54 ⁵	.125	.319	.125	.0472	.846		x	x	x	x				
932.750	2.66 ⁵	.104	.276	.144	.0376	1.060		x	x	x	x				
933.000	2.49	.106	.264	.151	.0432	.923	x	x	x	x	x				
933.250	2.63 ⁵	.101	.267	.150	.0332	1.201		x	x	x	x				
933.500	2.90 ⁵	.122	.354	.113	.0414	.963		x	x	x	x				
933.750	2.68 ⁵	.119	.320	.125	.0415	.960		x	x	x	x				
934.000	2.75	.095	.261	.153	.0332	1.202		x	x	x	x				
934.200-934.155	2.71 ⁵	.119	.324	.123	.0408	.978		x							
934.250	2.68	.118	.316	.126	.0417	.956		x	x	x	x				
934.500	2.61	.135	.352	.113	.0441	.905		x	x	x	x				
934.750	2.68	.122	.327	.122	.0394	1.014		x	x	x	x				
935.000	2.61	.115	.301	.133	.0391	1.020		x	x	x	x				
935.250	2.60 ⁵	.097	.253	.158	.0339	1.176		x	x	x	x				
935.500	2.50	.119	.298	.134	.0390	1.023		x	x	x	x				
935.750	2.61	.119	.310	.129	.0386	1.034		x	x	x	x				
935.895-935.890	2.55 ⁵	.106	.272	.147	.0335	1.193	x								
Totaal:							6	21	22	22	22	15			

snelheid \bar{U} = over dwarsdoorsnede gemiddelde van de gemeten snelheden # QR

rivierdebiet was voor alle proeven gelijk aan 0.0399 m³/sec.

Tabel 2 Resultaten algemene momentengradientmethode.

Proef	Prototype station kmr.	z_0 m	Meetmethode/ tijdstip	c_{\max} 10^{-5} kg/m ³	Q_m 10^{-7} kg/sec.	$(\sigma_1^2)_G$ m ²	Δ_G %	x_0 m	x_1 m	x_2 m	x_5 m	σ_1^2 m ²	σ_3^2 m ²	ξ m	$\sigma_3^2 - \sigma_1^2$ m ²
WM 1 links- injectie	931.00	0	kuv.	6.99	.820	.035	1.83	6.6	6.6	6.6	6.6	.027	.050	-.0021	.050
	931.88	0	flessen	2.75	1.145			15.4	19.5	14.83	16.4	.051	.077	-.0020	.155
	933.00	0	kuv.	1.13	.703	.089	2.20	26.6	34.1	33.53	33.7	.068	.136	+.00005	.195
	934.20	0	kuv.	.713	.623	.832	.56	38.6	49.8	55.56	53.1	.196	.276	+.0076	.244
	935.00	0	kuv.	.693	.664	.410	.74	46.6	60.2	66.36	62.9	.426	.603	+.0039	.476
	935.90	0	kuv.	.689	.912	.598	.87	55.6	72.5	79.72	75.0	.534	.737	-.0075	.643
WM 1 links- injectie	931.00	0	kuv.		.612	.042	.75		19.81	14.76		.029	.050	-.0014	.050
	931.88	0	kuv.	2.64		.089			34.65	33.36				+.00005	.190
	933.00	0	kuv.			.232			50.36	55.40				+.0076	.239
	934.20	0	kuv.			.410			60.72	66.18				+.0039	.471
	935.00	0	kuv.			.598			72.98	79.60				-.0075	.638
	935.90	0	kuv.												
WM 2 links- injectie	930.75	.07	kuv.	4.07	.198	.040	2.22	4.1	4.1	4.1	4.1	.019	.032	-.0018	.032
	931.00	.07	kuv.	4.18	.526			6.6	8.3	5.7	5.7	.027	.048	-.0039	.062
	931.25	.08	kuv.	3.03	.404			9.1	12.8	8.3	8.3	.019	.037	-.0014	.065
	931.50	.11	kuv.	2.35	.664			11.6	17.7	11.8	11.8	.051	.088	-.0013	.122
	931.75	.13	kuv., n.m.	2.34	.644			14.1	21.8	15.1	15.1	.045	.068	-.0034	.114
	932.00	.11	kuv., n.m.	1.85	.502	.062	0.70	16.6	25.2	17.8	17.8	.040	.061	-.0027	.122
	932.25	.10	kuv., n.m.	1.58	.675			19.1	28.3	20.8	20.8	.077	.126	-.0075	.213
	932.50	.14	kuv., n.m.	1.32	.431			21.6	31.6	25.0	25.0	.024	.050	+.0003	.155
	932.75	.13	kuv.	.91	.405			24.1	35.1	29.7	29.7	.069	.128	+.0035	.223
	933.00	.15	kuv.	.98	.611	.095	1.85	26.6	38.8	34.5	34.5	.068	.138	-.0003	.225
	933.25	.20	kuv.	.94	.540			29.1	41.0	38.5	38.5	.079	.130	+.0012	.215
	933.50	.16	kuv.	.84	.740			31.6	43.2	41.2	41.2	.131	.170	+.0049	.239
	933.75	.18	kuv.	.82	.589			34.1	45.7	44.3	44.3	.160	.238	+.0053	.282
	934.00	.14	kuv.	.75	.791	.250	1.40	36.6	48.3	47.4	47.4	.224	.308	+.0015	.334
	934.25	.12	kuv., n.m.	.64	.640			39.1	50.9	50.5	50.5	.218	.309	+.0024	.326
934.50	.10	kuv., n.m.	.65	.676			41.6	53.9	53.7	53.7	.292	.361	+.0095	.348	
934.75	.08	kuv., n.m.	.56	.560			44.1	56.8	56.7	56.7	.348	.441	+.0186	.357	
935.00	.06	kuv., n.m.	.55	.555	.429	.80	46.6	60.0	59.9	59.9	.477	.681	+.0113	.522	
935.25	.10	kuv., n.m.	.56	.632			49.1	63.0	63.2	63.2	.474	.648	-.0139	.496	
935.50	.11	kuv., n.m.	.53	.610			51.6	65.8	66.3	66.3	.375	.526	-.0063	.424	
935.75	.06	aut.	.98	.867	.421	.95	54.1	69.1	69.9	69.9	.464	.717	+.0199	.582	

Tabel 2 (vervolg 1)

Proef	Prototype station kmr.	z_0 m	Meet- methode/ tijdstip	c_{\max} 10^{-5} kg/m ³	Q_m 10^{-7} kg/sec.	$(\frac{2}{1})_G$ m^2	ΔG %	x_0 m	x_1 m	x_2 m	x_5 m	$\frac{2}{1}$ m^2	$\frac{2}{3}$ m^2	ϵ m	$\frac{2}{3}$ m^2
WM 3 rechts- injectie	930.50	2.73	aut.	2.19	1.34			5.0	5.0	5.0	5.0	.051	.077	.0005	.077
	930.75	2.72	aut.	1.71	1.18			7.5	7.5	8.8	8.2	.063	.095	-.0008	.096
	931.00	2.61	aut.	1.65	1.15	.101	.74	10.0	9.6	9.9	10.7	.078	.107	+0.0035	.101
	931.25	2.53	aut.	1.55	.982			12.5	11.8	14.6	13.2	.099	.134	+0.0082	.098
	931.50	2.69	kuv.	0.956	.783			15.0	14.4	17.7	15.9	.143	.211	+0.0005	.154
	931.75	2.67	kuv.	0.831	.731			17.5	17.2	21.2	19.0	.166	.223	-.0021	.170
	932.00	2.62	kuv.	0.785	.880	.240	.64	20.0	20.0	24.6	22.2	.231	.309	+0.0115	.232
	932.25	2.69	kuv.	0.684	.733			22.5	22.6	27.4	24.8	.294	.361	+0.0282	.185
	932.50		kuv., n.m.	0.714	.689			25.0	25.5	30.2	27.3	.380	.563	+0.0288	.245
	932.75	2.79	kuv., n.m.	0.619	.669			27.5	28.8	33.7	30.5	.408	.584	+0.0003	.193
	933.00		kuv., n.m.	0.791	.851	.466	1.13	30.0	32.2	37.6	34.1	.464	.697	+0.0079	.285
	933.25	2.83	kuv., n.m.	.690	.839			32.5	35.6	41.5	37.8	.529	.785	+0.0170	.311
	933.50		kuv.	.690	.772			35.0	39.2	45.5	41.7	.558	.818	-.0294	.375
	933.75	2.86	kuv.	.679	.811			37.5	42.6	49.1	45.3	.428	.563	-.0142	.241
	934.00		kuv.	.631	.719	.413	.79	40.0	45.3	51.9	48.0	.477	.716	+0.0049	.404
934.25	2.80	kuv.	.608	.688			42.5	48.3	55.2	51.5	.418	.608	-.0249	.358	
934.50		kuv., n.m.	.553	.699			45.0	51.6	58.8	54.6	.367	.452	-.0233	.332	
934.75	2.75	kuv., n.m.	.541	.732			47.5	54.3	61.8	57.4	.331	.377	-.0155	.351	
935.00		kuv., n.m.	.536	.659	.347	1.93	50.0	56.6	64.6	64.6	.293	.325	-.0059	.353	
935.25	2.70	kuv., n.m.	.512	.632			52.5	58.7	67.2	62.2	.284	.342	+0.0084	.363	
935.50		kuv., n.m.	.500	.670			55.0	61.1	70.1	64.8	.339	.431	+0.0168	.389	
935.75	2.71	kuv., n.m.	.512	.637	.309	1.34	57.5	64.0	73.9	67.8	.358	.534	+0.0239	.390	
WM 4 midden- injectie	930.50	1.27	aut.	2.10	1.24			5.0	5.0	5.0	5.0	.028	.028	.0001	.028
	930.75	1.38	kuv., n.m.	.90	.68			7.5	7.5	7.7	7.7	.048	.051	.0016	.046
	931.00	1.15	kuv., n.m.	.86	.68	.042	1.57	10.0	10.0	10.2	10.2	.046	.044	-.0003	.044
	931.25	.96	aut.	1.20	1.19			12.5	12.3	12.7	12.7	.055	.058	-.0017	.069
	931.50	1.02	kuv.	.99	1.15			15.0	14.6	15.2	15.1	.098	.085	+0.0015	.097
	931.75	1.02	kuv.	.83	1.03			17.5	17.0	17.5	17.4	.116	.103	-.0008	.114
	932.00	.96	kuv.	.77	1.04	1.13	2.49	20.0	19.1	19.6	19.3	.111	.100	-.0019	.117
932.25	0.85	kuv.	.72	1.01			22.5	20.9	21.3	21.0	.119	.101	-.0057	.138	
932.50	.69	kuv.	.65	1.07			25.0	22.8	23.6	23.6	.108	.083	-.0033	.142	

Tabel 2 (vervolg 2)

Proef	Prototype station kmr.	z_0 m	Meet- methode/ tijdstop	c_{\max} 10^{-5} kg/m ³	Q_m 10^{-7} kg/sec.	$(\sigma_1^2)G$ m^2	ΔG %	x_0 m	x_1 m	x_2 m	x_5 m	σ_1^2 m^2	σ_3^2 m^2	ϵ m	$\sigma_3^2 - G$ m^2
	932.75	.79	kuv.	.57	.95	.1283	4.22	27.5	24.5	25.9	25.3	.120	.091	-.0032	.166
	933.00	.73	"	.54	.96			30.0	25.9	27.6	26.8	.115	.067	-.0002	.150
	933.25	.79	"	.47	.88			32.5	27.1	29.5	28.2	.156	.115	+ .0081	.179
	933.50	.79	"	.48	.94			35.0	28.5	30.7	29.8	.212	.178	+ .0090	.199
	933.75	.89	"	.43	.83			37.5	30.2	32.5	31.5	.217	.172	-.0003	.172
	934.00	.89	"	.45	.92	.393	2.40	40.0	31.6	34.2	33.2	.225	.175	-.0014	.179
	934.25	.90	"	.41	.85			42.5	33.0	35.8	35.1	.215	.168	+ .0045	.164
	934.50	.93	"	.39	.86			45.0	34.9	37.8	37.1	.255	.229	+ .0100	.188
	934.75	1.03	"	.38	.82			47.5	36.5	39.7	36.4	.281	.250	+ .0018	.180
	935.00	1.14	"	.38	.80	.642	2.54	50.0	37.9	41.3	39.1	.269	.263	+ .0005	.151
	935.25	1.15	"	.37	.83			52.5	39.4	43.2	40.1	.334	.307	-.0047	.242
	935.50	.99	"	.36	.80			55.0	40.8	45.1	41.2	.258	.219	-.0076	.184
	935.75	1.08	"	.33	.83	.743	1.57	57.5	42.2	47.0	42.4	.305	.242	-.0022	.232
WM 5	930.50	2.73	kuv. n.m.	5.50	3.25			5.0	5.0	5.0	5.0	.047	.072	.0005	.072
rechts	930.75	2.72	aut.	6.80	3.95			7.5	7.7	8.8	8.5	.044	.066	-.0009	.066
injektie	931.00	2.61	aut.	5.83	4.66	.083	3.34	10.0	10.0	12.2	11.5	.078	.103	+ .0034	.098
	931.25	2.53	kuv.	3.04	2.18			12.5	12.2	15.0	14.1	.109	.154	+ .0090	.117
	931.50	2.69	"	2.60	2.28			15.0	14.8	18.1	16.7	.162	.232	+ .0006	.172
	931.75	2.67	"	2.42	2.52			17.5	17.7	21.5	19.8	.185	.244	-.0022	.187
	932.00	2.62	"	2.17	2.50	.230	1.08	20.0	20.6	25.0	13.3	.255	.337	+ .0124	.255
	932.25	2.69	"	2.17	2.28			22.5	23.3	28.0	26.2	.295	.368	+ .0179	.211
	932.75	2.79	"	2.08	2.62			27.5	28.9	34.2	31.2	.494	.702	+ .0189	.361
	933.25	2.83	"	2.17	2.78			32.5	35.2	41.3	37.2	.551	.814	-.0075	.415
	933.75	2.86	"	2.29	2.99			37.5	41.4	47.8	43.6	.498	.646	-.0085	.327
	934.25	2.80	"	2.23	2.64			42.5	47.7	54.6	50.2	.425	.612	-.0118	.394
	934.75	2.75	"	1.87	2.68			47.5	53.5	61.1	56.0	.362	.391	-.0135	.300
	935.25	2.70	"	1.59	2.24			52.5	57.4	66.2	60.7	.312	.351	-.0036	.309
	936.75	2.71	"	1.49	2.63	.385	.88	57.5	62.2	72.3	66.7	.374	.541	-.0212	.375

Tabel 4 Resultaten algemene momentengradiëntmethode - Waalrivier

Test	prototype- station kmr.	z_0	Q_m 10^{-3} kg/sec.	x_0 m	x_1 m	x_2 m	x_5 m	σ_1^2 m^2	σ_3^2 m^2	g m	$\sigma_3^2 - G$ m^2
Waal rechts	931.88	0	.150	1880	1880	1880	1880	460	695	+0.0432	675
	934.18	0	.151	4480	4440	4480	4550	1330	1750	-.0326	1730
	935.90	0	.192	5900	6420	6390	6470	1625	2030	-.1980	2400
	939.83	0	.164	9830	10.465	10.245	10.660	2065	2440	+0.0334	3460
Waal links	931.88	0	.207	1580	1580	1580	1580	265	385	-.0188	385
	934.18	0	.212	3880	3945	3550	3630	665	810	-.0017	855
	935.90	0	.221	5600	5790	5250	5405	1795	2275	+0.2080	1970
	939.83	0	.242	9530	10.480	9515	9885	4490	5295	+0.0844	3840

Tabel 5 Reproductie van dwarsdispersie

Omschrijving/ dispersierelatie	Schaal n_{e_z}	Schaal n_{σ}^2	$\frac{n_{\sigma}^2}{n_{eis}}$	$\frac{n_{\sigma}^2}{n_{eis}}$	Waalmodel
Vereiste schaal	$n_L n_H^{\frac{1}{2}}$	n_L^2			
$e_z :: U^* H$	$n_L^{-\frac{1}{2}} n_H^2$	$n_H 3/2 n_L^{+\frac{1}{2}}$	$\frac{n_H}{n_L} 3/2$	4	
$e_z :: U H$	$n_H 3/2$	$n_H n_L$	$\frac{n_H}{n_L}$	2.5	
$e_z :: U L$	$n_L n_H^{\frac{1}{2}}$	n_L^2	1	1	
Gemeten in Waal					$\approx 2.1 \pm 0.5$

Tabel 6

Overzicht van model- en prototype resultaten

Rivier	Injektie- punt	Gemiddelde diepte H m	Gemiddelde breedte B m	B/ H	Gemiddelde snelheid U m/s	$K_1 = \frac{e}{UH}$	$K_5 = \frac{e}{U\eta}$	ΔK^*
IJsselmodel	M	0.091	1.20	13	0.13	0.024	0.024	.005
	R	0.091	1.20		0.13	0.029	0.034	.005
	L	0.091	1.20		0.13	0.041	0.037	.005
Waalmodel	M	0.112	2.62	23	0.135	0.030	0.029	.005
	R	0.112	2.62		0.135	0.030	0.028	.005
	L	0.112	2.62		0.135	0.030	0.030	.005
IJsselrivier Rhodamine	R/L	4.0	70	17.5	1.0	0.03 - 0.04		
	R/L	4.9	265	54	0.92	0.03 - 0.04		
IJsselrivier temperatuur	R	4.1	121	29.5	0.54	0.04 - 0.05		
	L	5.8	242	42	1.05	0.02 - 0.03		

* mogelijke afwijking in K.

waterloopkundig laboratorium postbus 177 delft