

hoofdafdeling
maatschappelijke technologie

organisatie voor
toegepast-natuurwetenschappelijk
onderzoek



nijverheidsorganisatie



SNELHEIDSVERDELINGEN IN KANALEN
MET VERSCHILLENDE BODEMPROFIELEN

door
P.J.H. Bultjes

nijverheidsorganisatie



postbus 342
7300 AH apeldoorn

bezoekadres
laan van westenenk 501

telex 49095 tnoap
telefoon 055 - 77 33 44

Ref. nr. : 81-01462
Dossiernr.: 8710-91620-002
Datum : januari 1981

Opdrachtgever:
Rijkswaterstaat
Hoofdafdeling Hydro-instrumentatie
Nijverheidsstraat 2
2288 BB RIJSWIJK

„Voor de rechten en verplichtingen van de opdrachtgever met betrekking tot de inhoud van dit rapport wordt verwezen naar de Algemene Voorwaarden van TNO”.

Niets uit deze uitgave mag worden veeleenvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotocopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO. TNO aanvaardt geen enkele aansprakelijkheid met betrekking tot de inhoud en/of de vorm van deze uitgave.

<u>INHOUDSOPGAVE</u>	<u>Pag.</u>
SAMENVATTING	3
NOTATIELIJST	4
1. INLEIDING	6
2. DE THEORETISCHE ACHTERGROND	7
3. DE EXPERIMENTELE OPSTELLING	9
4. DE EXPERIMENTELE RESULTATEN	10
4.1 Het verticale snelheidsprofiel	10
4.2 Het horizontale snelheidsprofiel	13
4.3 Verdere resultaten bodemprofiel I	13
4.4 Verdere resultaten bodemprofiel II	16
4.5 Verdere resultaten bodemprofiel III	17
4.6 Verdere resultaten bodemprofiel IV	17
4.7 Generalisatie van de gemeten snelheidsprofielen	17
5. EEN VOORBEELD VAN DE BEPALING VAN CORRECTIEFACTOREN	19
6. REFERENTIELIJST	21

TABEL I: OVERZICHT RESULTATEN VERTIKAAL SNELHEIDSPROFIEL OP MODELSCHAAL

SAMENVATTING

Een overzicht wordt gegeven van bij modellen gemeten snelheidsverdelingen over de dwarsdoorsnede van vier kanalen met verschillende bodemprofielen.

Teneinde ook voor kanalen met andere bodemprofielen snelheidsverdelingen te kunnen bepalen, is een generalisatie gemaakt van de gemeten verdelingen.

Als illustratie van het gebruik van de gevonden resultaten zijn hieruit zogenaamde correctiefactoren afgeleid. Deze dienen voor het corrigeren van de met behulp van een acoustische debietmeter op een bepaalde hoogte in het kanaal gemeten gemiddelde snelheid naar een totale gemiddelde snelheid over de kanaaldoorsnede, zodat daarmee het debiet nauwkeurig kan worden bepaald.

NOTATIELIJST

A_1, A_2	: constante	
B_1, B_2	: constante	
b	: breedte van een kanaal of rivier	[m]
D	: doorstroomde oppervlak	[m ²]
d_e	: hydraulische diameter	[m]
f	: frequentie	[Hz]
g	: zwaartekrachtsversnelling	[m/s ²]
H	: waterdiepte	[m]
H_L	: lokale waterdiepte	[m]
K	: correctiefactor	
K_1	: golfgetal	[1/m]
K_d	: reciproke Kolmogoroffschaal η	[1/m]
K_s	: equivalente zandkorrelruwheid	[m]
K_i	: afstand van zijwandinvloed	[m]
m	: index model	
n	: exponent in de machtswet	
O	: natte omtrek	[m]
p	: index prototype	
Q	: debiet	[m ³ /s]
U	: snelheid	[m/s]
U_m	: totale gemiddelde snelheid (debietsnelheid)	[m/s]
U_o	: maximale snelheid in de vertikaal	[m/s]
U_{max}	: maximale snelheid in het kanaal	[m/s]
u^*	: wandschuifspanningssnelheid	[m/s]
u'	: turbulentie intensiteit	[m/s]
x	: coördinaat in stromingsrichting	
y	: coördinaat in transversale richting	
y^+	: afstand vanaf de zijwand	[m]
z	: coördinaat in verticale richting	
z^+	: afstand tot aan knikpunt in vertikaal snelheidsprofiel	[m]
z_o	: ruwheidslengte	[m]

NOTATIELIJST (VERVOLG)

α	: bodem profielhoek	
ε	: turbulente dissipatie	[m ² /s ³]
ε_v	: virtuele verplaatsing	[m]
λ	: dissipatieschaal	[m]
η	: Kolmogoroffschaal	[m]
ν	: kinematische viscositeit	[m ² /s]
Δ_f	: macroschaal van de turbulentie	[m]

1. INLEIDING

Bij het gebruik van acoustische debietmeters is ter bepaling van het debiet door een kanaal of rivier informatie omtrent de optredende snelheidsverdeling in de stroming vereist.

De meetopstelling in situ bestaat namelijk slechts uit één of enkele meetlijnen, waarlangs met behulp van de acoustische debietmeter de snelheid gemiddeld over de meetlijnlengte wordt bepaald op de hoogte waarop de acoustische meetlijn is geplaatst. Deze gemeten gemiddelde snelheid moet dus worden omgezet in de totale gemiddelde snelheid over de gehele dwarsdoorsnede van het kanaal om het debiet Q te kunnen bepalen.

Hiervoor geldt de volgende formule:

$$Q = U_m \cdot D = K \cdot U \cdot D \quad (1)$$

Hierin is U_m de totale gemiddelde snelheid; D het oppervlak van de natte dwarsdoorsnede; U de door de acoustische snelheidsmeter gemeten snelheid en K is een correctiefactor.

Ten einde uit de acoustische meting het debiet met een zekere gewenste nauwkeurigheid te kunnen bepalen, dient de coëfficiënt K voldoende nauwkeurig bepaald te worden voor de stromingssituatie, waarin de debietmeter staat opgesteld.

Daarbij moet worden opgemerkt dat een onnauwkeurigheid in de waarde van K slechts één van de diverse onnauwkeurighedsfactoren bij de bepaling van het debiet is, zij het één van de grootste. Voor een totaalbeschouwing omtrent de nauwkeurigheden bij deze meetmethode wordt verwezen naar [1].

Dit tussentijdse rapport beschrijft voornamelijk de experimentele resultaten, verkregen in de periode november 1978 tot april 1980. De experimenten zijn uitgevoerd aan modellen van kanalen met vier verschillende bodemprofielconfiguraties. Het onderzoek is in opdracht van Rijkswaterstaat, hoofdafdeling Hydro-instrumentatie uitgevoerd door de afdeling stromingstechniek van MT-TNO, Apeldoorn.

2. DE THEORETISCHE ACHTERGROND

Het verticale verloop van de gemiddelde snelheid in een kanaal of rivier kan beschreven worden door het zogenaamde logaritmische snelheidsprofiel indien:

- Dit verloop bepaald wordt in het midden van een breed, rechthoekig kanaal, dat wil zeggen indien er geen invloed is van de zijwanden van het kanaal op de snelheidsverdeling.
Een breed kanaal is een kanaal, waarbij $b/H > 10$, waarbij b de breedte is van het kanaal en H de waterdiepte [2].
- Er geen invloed is van de windsnelheid op de bovenstroming in het kanaal.
- Het verloop wordt bepaald op voldoende afstand achter bochten en bodemonregelmatigheden in stromingsrichting, zodat zich een volledig ontwikkeld snelheidsprofiel heeft kunnen vormen.
- De stroming geen functie van de tijd is.

Het logaritmisch snelheidsprofiel voor stroming langs een ruwe wand wordt beschreven via:

$$U(z) = \frac{u^*}{0.40} \ln \left(\frac{z - z_0}{z_0} \right) \quad (2)$$

Hierin is $U(z)$ de snelheid op een afstand z van de bodem, u^* is de wand-schuifspanningssnelheid, z_0 is de ruweidslengte, 0.40 is de waarde voor de von Kármán-constante.

Hoewel aan het bovineinde van het verticale snelheidsverloop dicht bij het wateroppervlak geringe afwijkingen van het logaritmisch profiel kunnen optreden, wordt in het algemeen aangenomen dat het logaritmisch profiel geldig is over de totale diepte H van de rivier of het kanaal.

Uitgaande van [1] en [2] kan na integratie de volgende uitdrukking voor de coëfficiënt K worden gevonden:

$$K = \frac{\ln\left(\frac{H - z_0}{z_0}\right) - 1}{\ln\left(\frac{z - z_0}{z_0}\right)} \quad (3)$$

Voor $K = 1.00$ wordt hiermee gevonden $z = 0.37 H$. Dit betekent dat een snelheidsmeter geplaatst op een hoogte van $0.37 H$ boven de bodem de gemiddelde snelheid van het verticale logaritmische snelheidsprofiel bepaalt. Nu is het snelheidsverloop langs de middenvertikaal van een breed, rechthoekig gesloten kanaal ook volledig logaritmisch. Dit maakt het mogelijk om een waterstroming in een open kanaal onder invloed van de zwaartekracht (verhang) te modelleren door middel van een luchtstroming in een gesloten kanaal onder invloed van de drukgradiënt. In dat geval wordt dan gebruik gemaakt van een dubbel, gespiegeld model (zie Fig. 1). Voor een uitvoerige behandeling van de hierbij in acht te nemen schaalregels wordt verwezen naar [3].

3. DE EXPERIMENTELE OPSTELLING

De experimenten zijn uitgevoerd in een rechthoekig kanaal met een totale hoogte van $2H = 0.10$ m en een breedte van 1.00 m. Hiermee wordt een open kanaal gesimuleerd met een verhouding $b/H = 20$. Verschillende bodemprofielen konden worden aangebracht, gekarakteriseerd door de hoek α in Fig. 1. De totale lengte van het kanaal bedraagt 5.7 m. De lucht wordt door het kanaal gezogen; aan de ingang van het kanaal is een aanzuigmond in een suskamer aangebracht. De metingen zijn uitgevoerd op een afstand van $45 \cdot (2H)$ van de instroming. Deze lengte is, in combinatie met een aangebrachte stoordraad voldoende voor het tot stand brengen van een volledig ontwikkeld turbulent snelheidsprofiel.

De meeste experimenten zijn uitgevoerd bij een maximale snelheid van 10 m/s. Voor de snelheidsmetingen is gebruik gemaakt van een pitotbuis, en incidenteel van een gloeidraad.

De opstelling is weergegeven in Fig. 2A en 2B.

Metingen zijn uitgevoerd aan 4 verschillende configuraties:

- I Glad oppervlak, $\alpha = 90^\circ$
- II Glad oppervlak, $\alpha = 15^\circ$
- III Glad oppervlak, $\alpha = 34^\circ$
- IV Ruw oppervlak, $\alpha = 34^\circ$

4. DE EXPERIMENTELE RESULTATEN

4.1 Het verticale snelheidsprofiel

Allereerst zal worden ingegaan op de gemeten verticale snelheidsprofielen in het midden van het kanaal voor de 4 configuraties.

Fig. 3 geeft de verticale snelheidsprofielen voor $y/\frac{1}{2}b = 0$.

U_{\max} is de maximale snelheid in het midden van het kanaal voor $z/H = 1.0$. Hoewel formule (2) in principe alleen geldt voor stroming langs een ruwe wand, kan deze formule worden gehanteerd voor de bepaling van een effectieve ruweidslengte.

Gevonden wordt dan $z_0 = 6.5 \cdot 10^{-3}$ mm, $u^*/U_{\max} = 0.045$. Voor het ruwe oppervlak wordt gevonden $z_0 = 0.13$ mm, $u^*/U_{\max} = 0.068$. Hierbij is rekening gehouden met een virtuele verplaatsing ε_v ten gevolge van de ruwheden van 2.5 mm, door vervanging van z door $z - \varepsilon_v$. Deze virtuele verplaatsing is ook reeds in rekening gebracht in Fig. 3.

Uitgegaan kan worden van een model op schaal 1 : 100, een kanaal representerend met een waterdiepte van 5 m en een breedte van 100 m. Dit leidt tot ruweidslengten op ware grootte van 13 mm voor het ruwe oppervlak. Zoals hieronder wordt aangetoond, is een directe vertaling van het gladde model naar de prototype-situatie niet mogelijk wegens de Reynoldsafhankelijkheid. Niettemin zal hier als ruwe indicatie een ware grootte z_0 voor het gladde oppervlak van 0.65 mm worden gehanteerd.

Bij gebruikmaking van de uitdrukking $z_0/K_s = 0.03$ (zie b.v. [13]), geldig voor regelmatig verdeelde bodemruwheid, waarin K_s de equivalente zandruwheid is, leidt dit tot een ware grootte K_s van 22 mm voor het gladde oppervlak (effectieve K_s) en 0.43 m voor het ruwe oppervlak.

De equivalente hydraulische diameter d_e wordt gegeven door $d_e = 4 D/0$, waarin D het doorstroomde oppervlak is en 0 de natte omtrek. Zowel voor het model als het kanaal in situ leidt dit tot $d_e \simeq 4 H$.

Het Reynoldsgetal, gedefinieerd als $Re = U \cdot d_e/\nu$ geeft voor het model met $U = 10$ m/s, $d_e = 0.20$ m, $\nu = 16 \cdot 10^{-6}$ m²/s; $Re_m = 1,25 \cdot 10^5$. Voor een werkelijk kanaal leidt dit met $U = 1$ m/s, $d_e = 20$ m, $\nu = 1,4 \cdot 10^{-6}$ m²/s tot $Re_p = 14 \cdot 10^6$.

Voor het model met gladde wanden geldt $K_s/d_e \simeq 0.001$. Voor de ruwe wand-situatie is deze verhouding 0.022.

Een goed inzicht omtrent de mate van overeenkomst tussen de stromingen in model en prototype kan worden verkregen via het zogenaamde Moody-diagram, dat een verband aangeeft tussen de weerstandscoefficiënt, de wandruwheid en het Re-getal voor buisstromingen, en dat als indicatie kan worden gebruikt voor de aard van de stroming in een kanaal. In Fig. 4 zijn in het Moody-diagram de model- en prototypesituatie weergegeven.

De situatie voor de ruwe wand van het model kan direct worden vergeleken met de situatie voor het prototype met dezelfde ruwheid. Voor de gladde wandsituatie is er geen directe overeenkomst tussen model en prototype, hoewel de verschillen gering zullen zijn (voor een uitvoerige discussie zie [3]).

Twee in de hydraulica veel gebruikte grootheden zijn het verhang en de machtwet voor het snelheidsprofiel. Het verhang voor een open kanaal wordt gegeven door de formule:

$$(u^*)_p = \sqrt{-g H_p \left(\frac{\Delta z}{\Delta x}\right)_p} \quad (3)$$

Tevens geldt bij overeenkomst tussen model en prototype:

$$(u^*/U_{\max})_m = (u^*/U_{\max})_p \quad (4)$$

(zie ook [3]).

Uit (4) en (3) en de bovengenoemde waarden voor de gehanteerde grootheden volgt voor de gladde wandsituatie een verhang in werkelijkheid van ca. 4 cm per kilometer, voor de ruwe wand is het verhang ca. 9 cm per kilometer.

De machtwet voor het snelheidsprofiel wordt gegeven als:

$$\frac{U(z)}{U_{\max}} = \left(\frac{z}{H}\right)^{1/n} \quad (5)$$

Voor de gladde wand wordt gevonden $n \simeq 7.1$, voor de ruwe wand $n \simeq 4.2$.

De gemeten snelheidsprofielen kunnen ook vergeleken worden met uit de literatuur bekende theoretische en experimentele snelheidsprofielen. Een veel gehanteerde uitdrukking voor het snelheidsprofiel in gesloten kanalen of buizen langs gladde wanden is [4]:

$$\frac{U(z)}{u^*} = A_1 \ln \left(\frac{z}{v} u^* \right) + B_1 \quad (6)$$

Dicht bij het gesimuleerde wateroppervlak ($z \rightarrow H$) zullen afwijkingen van dit profiel kunnen optreden, die beschreven worden door een deviatiefunctie [4]. Deze afwijkingen kunnen echter voor praktische toepassingen als gering worden beschouwd.

Toepassing van formule (6) op de metingen voor de gladde wand levert:

$$A_1 = 2.51, B_1 = 4.02.$$

In de literatuur ([4], [5]) wordt vaak gehanteerd $A_1 = 2.5$, $B_1 = 5.5$. Deze waarde van A_1 komt overeen met een waarde voor de von Karmanconstante van 0.40 ($= 1/A$) in formule (2). De waarde van B_1 is een functie van het Re-getal, in de literatuur komen waarden voor tussen de 4 en 6. ([6], [7], [8]). De huidige metingen sluiten blijkbaar goed aan bij de literatuurgegevens.

Voor de stroming langs ruwe wanden kan in plaats van formule (2) geschreven worden:

$$\frac{U(z)}{u^*} = A_2 \ln(z/K_s) + B_2 \quad (7)$$

Voor zandkorrelruwheden geldt $A_2 = 2.5$, $B_2 = 8.5$ ([5], pg. 582), $1/A_2 = 0.40$, de von Kármánconstante.

Toepassing van formule (7) op de metingen voor de ruwe wand levert:

$A_2 = 2.5$, $B_2 = 8.8$, hetgeen in goede overeenkomst is met de literatuurwaarden. (Deze waarden van A_2 en B_2 komen overeen met de waarde van z_0 van 0.13 mm).

Concluderend kan worden gesteld dat de gemeten verticale snelheidsprofielen in het midden van het kanaal in goede overeenstemming zijn met de uit de literatuur bekende resultaten en tevens een goede modelering zijn van de werkelijke rivier- en kanaalstromingen. In tabel I zijn de verkregen resultaten samengevat.

4.2 Het horizontale snelheidsprofiel

In Fig. 5 zijn de horizontale snelheidsprofielen weergegeven voor de verschillende bodemprofielen voor $z/H = 1.0$, het gesimuleerde wateroppervlak. U_0 is de maximale snelheid van het verticale snelheidsprofiel op een bepaalde plaats $y/\frac{1}{2}b$.

Duidelijk is in Fig. 5 de invloed van de zijwanden te zien. Deze invloed manifesteert zich door middel van secundaire stromingen. Bij vergelijking van de resultaten voor $\alpha = 34^\circ$ voor de ruwe en de gladde wand is een grotere zijwandinvloed zichtbaar bij de ruwe wandsituatie; een ruwer oppervlak versterkt de secundaire stromingen.

4.3 Verdere resultaten bodemprofiel I, $\alpha = 90^\circ$

Aandacht is gegeven aan het verloop van de verticale snelheidsprofielen in de buurt van de zijwand. In Fig. 6 zijn de resultaten voor een gladde wand weergegeven.

Uit de logaritmische gedeelten van de profielen volgt als eerste benadering voor alle profielen dat de effectieve $z_0 = 6.5 \cdot 10^{-3}$ mm.

Blijkbaar wordt de stroming dicht bij de bodem grotendeels bepaald door de ruwheid van de bodem en niet door de secundaire stromingen.

Wel is de invloed van de secundaire stromingen merkbaar voor $y/\frac{1}{2}b \lesssim 0.9$ door het ontstaan van een gebied met redelijk constante snelheid, waarbij zelfs de maximale snelheid niet op het gesimuleerde oppervlak wordt bereikt.

Als eerste benadering kan worden gesteld dat de verticale profielen logaritmisch zijn tot aan:

$$z^+/H = (1 - y/\frac{1}{2}b) / 0.1 \quad (8)$$

met een maximale waarde $z^+/H = 1.0$ voor $y/\frac{1}{2}b = 0.9$. Vanaf deze waarde voor z^+/H geldt $U = U_0$ als eerste benadering.

Er is dus sprake van een directe zijwandinvloed tot $y/\frac{1}{2}b = 0.90$. Voor het horizontale snelheidsprofiel wordt hierbij een snelheid gevonden

van $U_o/U_{\max} = 0.92$. Als definitie kan dan worden gesteld dat de directe zijwandinvloed zich uitstrekt tot die plaats waar $U_o/U_{\max} = 0.92$. Een indirecte zijwandinvloed is merkbaar tot aan de plaats waar $U_o/U_{\max} = 0.99$. Dit wordt voor bodemprofiel I bereikt voor $y/\frac{1}{2}b = 0.70$.

De directe zijwandinvloed strekt zich uit tot een afstand K_i vanaf de zijwand $K_i/H = 1.0$, de indirecte zijwandinvloed tot een afstand $3 K_i$ ($U_o/U_{\max} = 0.99$). Een verdere beschouwing omtrent deze zijwandeffecten zal worden gegeven onder 4.7).

In Fig. 7 zijn iso-snelheidslijnen getekend, welke een duidelijke indicatie geven van de optredende secundaire stromingen.

Met behulp van een gloeidraad zijn in het midden van het kanaal enkele turbulentieingen verricht. In Fig. 8 zijn de resultaten van de turbulentie-intensiteit in de hoofdstroomrichting vergeleken met literatuurgegevens. De overeenkomst is zeer goed.

Voor de macroschaal Δ_f , een maat voor de grote wervels is in het midden van het kanaal gevonden $\Delta_f/H \simeq 3$.

In referentie [8] wordt voor deze verhouding een waarde gevonden van ca. 1, referentie [12] geeft $\Delta_f/H \simeq 0.8$. De gevonden te grote waarde voor Δ_f is mogelijkwijs beïnvloed door langzame wisselingen in de stroming ten gevolge van de ventilatorwerking. Mede gezien de resultaten voor het spectrum (zie hieronder) zal worden uitgegaan in het vervolg van $\Delta_f/H = 1.0$.

Teneinde een indicatie te verkrijgen van het turbulente spectrum in een rivier ten behoeve van de invloed van turbulentie op het meetvolume van een doppler snelheidsmeter is een spectrum bepaald in het model op $y/\frac{1}{2}b = 0$, $z/H = 0.5$.

De integraalschaal in het model bedraagt 0.05 m, $u'/U \simeq 0.05$, waarmee $u' \simeq 0.5$ m/s,

Een belangrijke factor bij spectrumanalyse is de turbulente dissipatie.

De turbulente dissipatie wordt gegeven door:

$$\varepsilon = 0(1) \cdot \frac{u'^3}{\Delta_f} \quad (9)$$

([4], pg. 224 e.v.).

Er volgt $\varepsilon_m \simeq 2.5 \text{ m}^2/\text{s}^3$, $\varepsilon_p \simeq 2.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$.
Voor de dissipatieschaal geldt:

$$\lambda = \left(\frac{15 \nu u'^2}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Er volgt $\lambda_m \simeq 4.9 \text{ mm}$, $\lambda_p \simeq 46 \text{ mm}$.

Hiermee volgt voor het dissipatie Re-getal:

$$\text{Re}_\lambda = \frac{u' \lambda}{\nu} \quad (11)$$

$$(\text{Re}_\lambda)_m \simeq 150 \quad , \quad (\text{Re}_\lambda)_p \simeq 1670$$

Tenslotte geldt voor de zogenaamde Kolmogoroffschaal:

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (12)$$

Er volgt $\eta_m \simeq 20 \cdot 10^{-5} \text{ m}$, $\eta_p \simeq 58 \cdot 10^{-5} \text{ m}$.

Voor een vergelijking van het spectrum op modelschaal met het prototype is van belang de verhouding van de verschillende schalen. Er geldt:

$$\frac{\Delta_m}{\Delta_p} = 0.01$$

$$\frac{\lambda_m}{\lambda_p} = 0.1 \quad (13)$$

$$\frac{\eta_m}{\eta_p} = 0.3$$

Hiermee is duidelijk dat het spectrum in het model 'samengedrukt' is ten opzichte van het spectrum in het prototype.

Fig. 9 toont het gemeten spectrum, met een vergelijking met literatuurgegevens, $K_d = 1/\eta$, $K_1 = \frac{2\pi f}{U}$ waarbij f de frequentie in Hz is. Het laag frequente deel van het spectrum wordt bepaald door de macroschaal Δ via:

$$\lim_{K_1 \rightarrow 0} \frac{E_1(K_1)}{u_1^2} = \frac{2 \Delta}{\pi} \quad (14)$$

Uitgaande van $\Delta = 0.05$ m wordt hiermee gevonden

$$\lim_{K_1 \rightarrow 0} \frac{E_1(K_1)}{(\varepsilon V^5)^{1/4}} \approx 6 \cdot 10^3$$

Uit Fig. 9 is hiermee duidelijk dat het laag-frequente deel van het spectrum beïnvloed is door wisselingen ten gevolge van de ventilator of andere instabiliteiten in de stroming.

Het spectrum is een duidelijke functie van Re_λ , zoals weergegeven in Fig. 9. Kistler [9] heeft het spectrum bepaald in een windtunnel onder overdruk, Grant e.a. [10] bepaalde het spectrum in een getijde-stroming.

Uitgaande van $\Delta_f/H = 1.0$ zou voor een werkelijk kanaal worden gevonden $\Delta_f \approx 5$ m, $\lambda \approx .05$ m, $\eta \approx 0.0006$ m.

4.4 Verdere resultaten bodemprofiel II, $\alpha = 15^\circ$

In Fig. 10 staan de verticale snelheidsprofielen weergegeven, welke dicht bij de zijwand zijn gemeten. Ook voor deze profielen geldt dat in eerste benadering $z_o/H_L = 0.13 \cdot 10^{-3}$, met dien verstande dat H_L de lokale waterdiepte is. In deze situatie is dus geen sprake van afwijkingen van het logaritmisch snelheidsprofiel dicht bij het gesimuleerde wateroppervlak, de invloed van secundaire stromingen is minder geprononceerd.

Indien ook voor deze situatie wordt uitgegaan van een directe zijwandinvloed tot aan de plaats waar $U_o/U_{\max} = 0.92$ wordt voor deze afstand van beïnvloeding K_i gevonden $K_i/H \approx 4.0$ (H is maximale waterdiepte). Indien ook hier wordt aangenomen dat de indirecte zijwandinvloed zich uitstrekt tot een afstand van $3 K_i$ van de zijwand, volgt hiermee dat

ook in het midden van het kanaal nog sprake is van een indirecte zijwandinvloed, dat wil zeggen dat voor een breder kanaal met ditzelfde bodemprofiel een hogere U_{\max} bereikt zou worden dan nu gemeten is.

4.5 Verdere resultaten bodemprofiel III, $\alpha = 34^\circ$

De resultaten van de verticale snelheidsprofielen staan weergegeven in Fig. 11. Voor deze profielen geldt ook $z_o/H_L = 0.13 \cdot 10^{-3}$, met H_L de lokale waterdiepte.

De iso-snelheidslijnen, weergegeven in Fig. 12 volgen het bodemprofiel, de secundaire stromingen zijn zwakker dan bij bodemprofiel I.

De directe zijwandinvloed reikt tot $K_i/H \simeq 2.0$, de indirecte tot $K_i/H \simeq 6.0$.

4.6 Verdere resultaten bodemprofiel IV, $\alpha = 34^\circ$, ruwe wand

In Fig. 13 zijn de verticale profielen weergegeven. Voor alle profielen geldt $z_o/H_L = 2.6 \cdot 10^{-3}$, met H_L de lokale waterdiepte.

Indien ook voor het ruwe wandprofiel wordt aangehouden dat de directe zijwandinvloed loopt tot de plaats waar $U_o/U_{\max} = 0.92$ geldt $K_i/H \simeq 2.4$; de indirecte zijwandinvloed reikt dan tot $K_i/H \simeq 7.2$.

4.7 Generalisatie van de gemeten snelheidsprofielen

Voor vier bodemconfiguraties zijn de snelheidsprofielen gemeten.

Teneinde het gebruik van deze snelheidsprofielen te vergroten, zal nu getracht worden de resultaten op zodanige wijze samen te vatten dat in principe ook voor andere bodemprofielen, dat wil zeggen andere α en ruwheid, de snelheidsprofielen kunnen worden bepaald.

Allereerst wordt het horizontale snelheidsprofiel voor $z/H = 1.0$ bekeken. Een bepalende factor voor deze snelheidsprofielen is de afstand K_i , de min of meer arbitraire afstand vanaf de zijwand tot waar een directe zijwandinvloed merkbaar is. De indirecte zijwandinvloed strekt zich dan uit tot een afstand $3 K_i$. Fig. 14 toont de afstand K_i als functie van α . Wellicht kan gesteld worden dat de ruwe wandsituatie voor $\alpha = 34^\circ$ zich effectief gedraagt als een gladde wandsituatie voor $\alpha \simeq 28^\circ$.

Drie gebieden kunnen worden onderscheiden. Voor een afstand vanaf de zijwand groter dan $3 K_i$ van de zijwand geldt $U_o = U_{\max}$. Voor een afstand tussen K_i en $3 K_i$ is er een overgangsgebied, voor een afstand kleiner dan K_i is er een directe zijwandinvloed.

Het overgangsgebied loopt van $U_o/U_{\max} = 0.92$ tot 1.0.

Fig. 15 geeft het snelheidsverloop in dit gebied van K_i tot $3 K_i$; dimensioneloos gemaakt met K_i , y^+ is de afstand vanaf de zijwand. De resultaten tonen dat er sprake is van een universeel snelheidsverloop, onafhankelijk van het bodemprofiel.

Tenslotte geeft Fig. 16 het horizontale snelheidsverloop dicht bij de wand als functie van y^+/K_i . Voor $35^\circ < \alpha < 90^\circ$ is het snelheidsverloop over een groot gebied nog redelijk universeel, voor $\alpha < 35^\circ$ treden afwijkingen op.

Bij gegeven bodemprofiel, voor bepaalde α , z_o en b/H kan nu het volledige snelheidsverloop in principe worden bepaald.

Uit fig. 14 volgt de lengteschaal K_i , waarmee met behulp van Fig. 15 het snelheidsverloop in het overgangsgebied kan worden bepaald. Uit Fig. 16 volgt via interpolatie het horizontale snelheidsprofiel dicht bij de zijwand. Hiermee ligt het horizontale snelheidsprofiel aan het oppervlak vas.

Voor $\alpha \lesssim 60^\circ$ geldt dat de verticale snelheidsprofielen logaritmisch zijn, met $z_o/H = \text{constant}$, waarbij H de lokale waterdiepte is. Voor $60^\circ \lesssim \alpha \leq 90^\circ$ zal in toenemende mate sprake zijn van gebieden van min of meer constante snelheid in de vertikaal.

5. EEN VOORBEELD VAN DE BEPALING VAN CORRECTIEFACTOREN

Teneinde correctiefactoren te kunnen bepalen voor acoustische debietmeters is het noodzakelijk het debiet te kennen door het kanaal. Op grond van de gemeten snelheidsprofielen is dit debiet bepaald via numerieke (regel van Simpson) en/of grafische integratie. Beide methoden leidden tot dezelfde waarden voor het debiet (nauwkeurigheid $\pm 0.5\%$).

Fig. 17 toont het debiet, gedefinieerd via de werkelijke gemiddelde snelheid U_m (zie formule (1)) en U_{max} , als functie van de bodemprofielhoek α . In Fig. 17 zijn tevens de theoretische waarden opgenomen, uitgaande van een oneindig breed kanaal met het verticale snelheidsprofiel beschreven volgens formule (2) en de gemeten waarden voor z_0 . Duidelijk blijkt uit Fig. 17 een afname van U_m/U_{max} met toenemende ruwheid, waarbij het bodemprofiel beschreven via de hoek α als 'ruwheid' wordt gezien. Het feit dat voor $\alpha = 90^\circ$ U_m/U_{max} groter is dan de theoretische gladde wandwaarde wordt veroorzaakt doordat in de hoeken ten gevolge van de secundaire stromingen een grotere snelheid heerst, zoals weergegeven in Fig. 7.

Teneinde de bepaling van correctiefactoren te illustreren, zullen hieronder correctiefactoren worden gegeven, uitgaande van één meetlijn op een willekeurige afstand vanaf de wand.

Voor een oneindig breed kanaal wordt de correctiefactor K beschreven door formule (3), gebaseerd op het logaritmisch snelheidsprofiel, beschreven door formule (2). Fig. 18 geeft deze theoretische K -factoren als functie van de bodemruwheid. Uitgaande van een waterdiepte van 5 m volgt uit Fig. 18 dat voor een bepaling van het debiet met een nauwkeurigheid van 1% de waterdiepte voor $z_0 = 13$ mm mag liggen tussen 4.9 m en 5.3 m, en voor $z_0 = 0.65$ mm tussen 4.6 m en 5.6 m, uitgaande van een plaatsing van de meetlijn op $z/H = 0.37$. (Dit geldt indien een vaste waarde van K , onafhankelijk van de waterdiepte is ingesteld).

Via integratie van de gemeten snelheid langs de meetlijnhoogte kan voor iedere hoogte bij het betreffende bodemprofiel de K -factor worden bepaald. De resultaten voor de glasse wand staan weergegeven in Fig. 19. Voor bodemprofiel I en III liggen de resultaten zeer dicht bij de theoretische waarden. Een duidelijke afwijking treedt op bij bodemprofiel II. Plaatsing van de meetlijnhoogte op $0.37 H$ zou bij bodemprofiel II bij gebruik van de theoretische K -waarde van 1.0 leiden tot een overschatting van het debiet van ca. 5.5%.

In Fig. 19 zijn ook K-factoren opgenomen voor een smaller kanaal, $b/H = 5$. Voor smalle kanalen treedt een verlaging van de snelheid aan het oppervlak op in het midden van het kanaal, de maximale snelheid wordt bereikt onder het wateroppervlak. Door gebruik te maken van de resultaten van Rajaratnam [11] zijn K-factoren voor deze situatie bepaald. Ook deze K-factoren wijken weinig af van de theoretische waarden.

Opgemerkt dient te worden dat de nauwkeurigheid van de weergegeven K-factoren geschat wordt op $\pm 1\%$.

Fig. 20 tenslotte toont de K-factoren voor bodemprofiel IV, de ruwe wand. Ook hier treedt een duidelijke afwijking ten aanzien van de theoretische waarden op, bij $z/H = 0.37$ zou een overschatting van ca. 3% van het debiet optreden, indien zou worden uitgegaan van de theoretische waarden. De afwijkingen worden voornamelijk bepaald door het horizontale snelheidsprofiel.

Concluderend kan gesteld worden dat vooral bij ruwere wandsituaties, waaronder ook de configuraties met flauwe hellingen ($\alpha \leq 30^\circ$) worden gerekend, afwijkingen optreden ten opzichte van theoretische correctiefactoren.

In geval van een configuratie met een willekeurig bodemprofiel kan als volgt te werk worden gegaan. Indien één meetlijn wordt opgesteld, kan gebruik worden gemaakt van Fig. 19 en 20, waaruit door interpolatie de betreffende K-factoren kunnen worden bepaald.

Een nauwkeuriger methode is om gebruik te maken van de beschrijvingen die gegeven zijn omtrent horizontale en verticale snelheidsprofielen en om hiermee de snelheidsverdeling te bepalen voor het betreffende bodemprofiel.

Uitgaande van deze snelheidsverdeling kunnen vervolgens correctiefactoren worden bepaald. Deze laatste methode moet in ieder geval gevolgd worden, indien meerdere meetlijnen worden toegepast, of indien de snelheidsmeter niet in de zijwand wordt geplaatst, maar op meetpalen, waardoor slechts een deel van het horizontale snelheidsprofiel wordt bemeaten.

6. CONCLUSIES EN VOORSTELLEN VOOR VERDER ONDERZOEK

- De gemeten snelheidsverdelingen bij verschillende bodemprofielen kunnen dienen voor het bepalen van snelheidsverdelingen bij andere bodemprofielen, mits deze niet te ver afwijken van de onderzochte bodemprofielen.
- Uitgaande van gemeten, of uit metingen geïnterpoleerde snelheidsverdelingen kunnen voor iedere willekeurige meetopstelling correctiefactoren worden bepaald.
- De verschillen tussen theoretische en uit metingen bepaalde correctiefactoren is het grootst bij bodemprofielen met flauwe hellingen, en bij situaties met een ruw oppervlak. Deze verschillen liggen voor de onderzochte situaties in de orde van 5%.

Het verdere onderzoek zal vooral gericht worden op de volgende punten:

- Een vergelijking tussen de in het model gemeten snelheidsverdelingen en de resultaten verkregen uit de meting in situ te Bunde.
- Het aanvullen van de resultaten met verdere metingen aan een ruw bodemprofiel, en aan situaties met andere bodemprofielen (geknikt, ellipsvormig).
- Toepassing van de boven beschreven methoden op een rivier met een bepaald bodemprofiel. Na bepaling van snelheidsverdelingen en correctiefactoren met behulp van de resultaten beschreven in dit rapport zullen aan dit rivierprofiel modelmetingen worden verricht ter bepaling van de nauwkeurigheid van de gebruikte methode. Zo mogelijk zullen ook metingen in situ worden uitgevoerd.
- Nadere beschouwing van: de stroming over uiterwaarden; de invloed van bochten op de snelheidsverdeling; en de mogelijke invloed van wind.

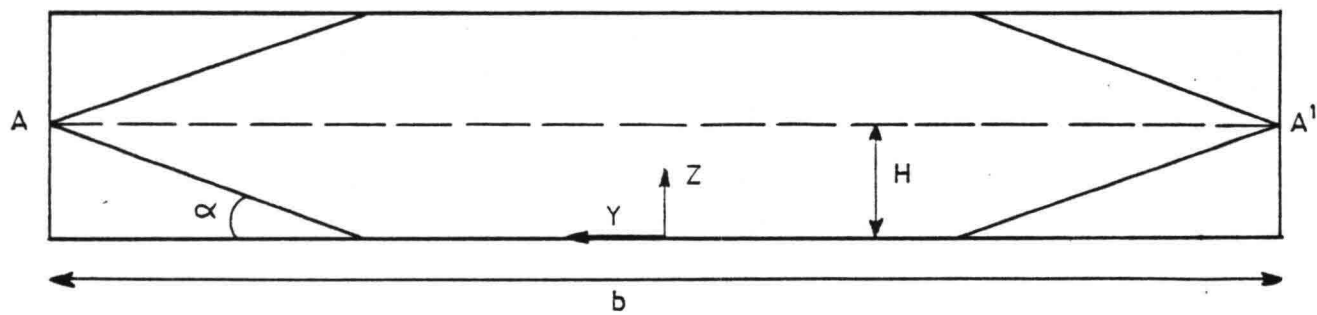
7. REFERENTIES

- [1] Drenthen, J.G., P.J.H. Builtjes en P.E.J. Vermeulen,
"The accuracy of the total discharge determined by acoustical
velocity measurement". - To be presented at the 2nd Symposium
on Flow, St. Louis, U.S.A., March 1981.
- [2] Chow,
Open-channel hydraulics, Mc. Graw Hill 1959, pag. 27.
- [3] Builtjes, P.J.H.,
'Het gebruik van lucht voor de bestudering op modelschaal van
stromingen in water'
TNO-rapport 80-011061, sept. 1980.
- [4] Hinze, J.O.
'Turbulence' Mac-Graw Hill 1976, pag. 721.
- [5] Schlichting, H.
'Boundary Layer Theory', Mc Graw Hill 1968.
- [6] Hussain, A en Reynolds, W.C.
'Measurements in fully developed turbulent channel flow'
J. of Fluids Eng. 568, Dec. 1975.
- [7] Ueda, H. e.a.
'Eddy diffusivity near the free surface of open channel flow'
Int. J. of Heat and Mass Trsf. 20, 11, 1127, 1977.
- [8] Adriaans, P en Stoop, J.
Ingenieursverslag T.H. Delft 1976
- [9] Kistler e.a.
J. Fluid Mech. 26, 37 (1966)

- [10] Grant e.a.
J. Fluid Mech 12, 241 (1962)
- [11] Rajaratnam, N
'Boundary shear stressdistribution in rectangular open channels
La Houille Blanche 6, 603 (1969).
- [12] Raichlan
'Some turbulence measurements in water'.
J. Eng. Mech. Div., 73, (April 1967)
- [13] Visser, G.Th.
'Snelheidsverdelingen in de kanalen van de hevelleiding bij
de Grevelingendam,
TNO-Rapport 80-014235, nov. 1980.

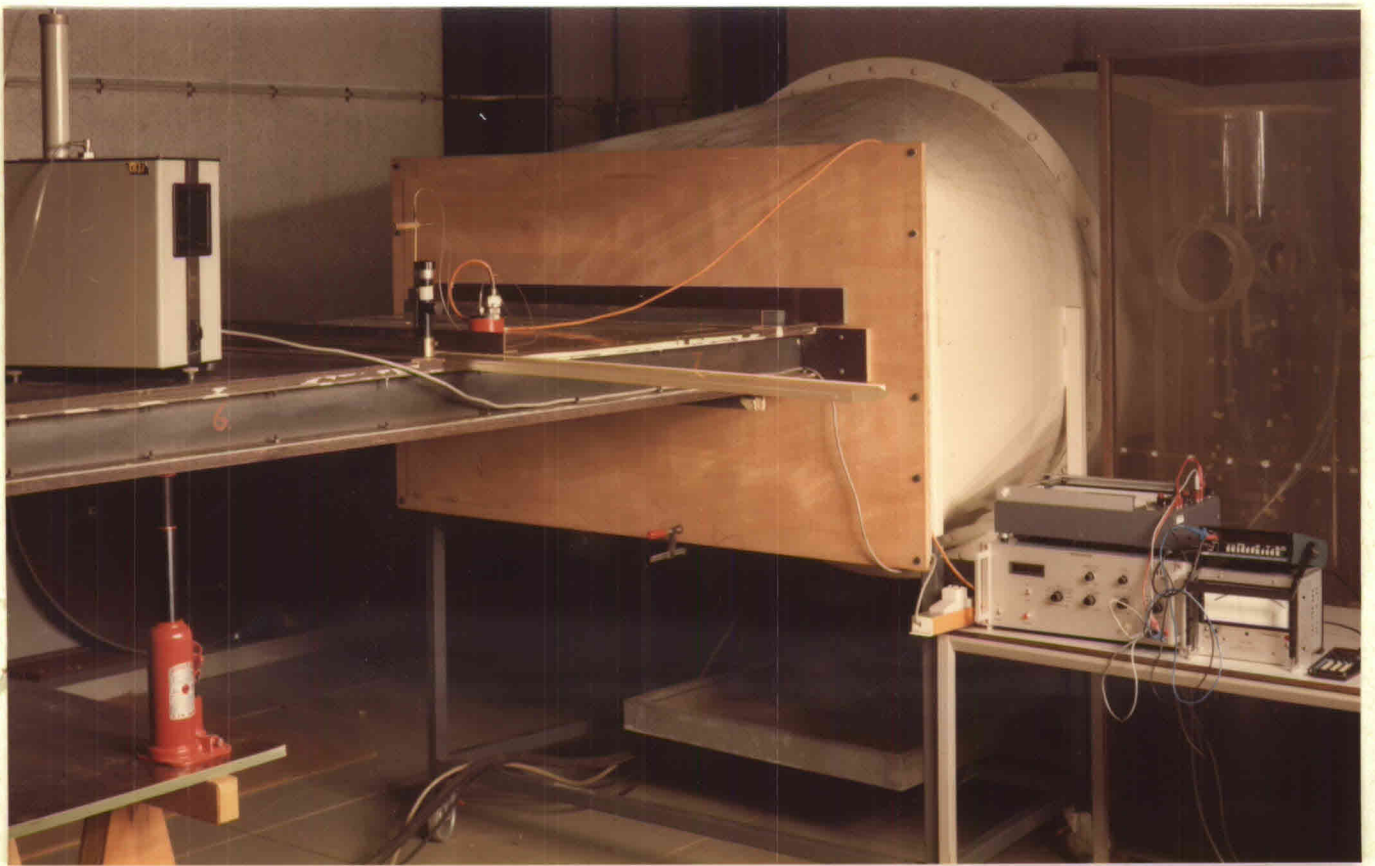
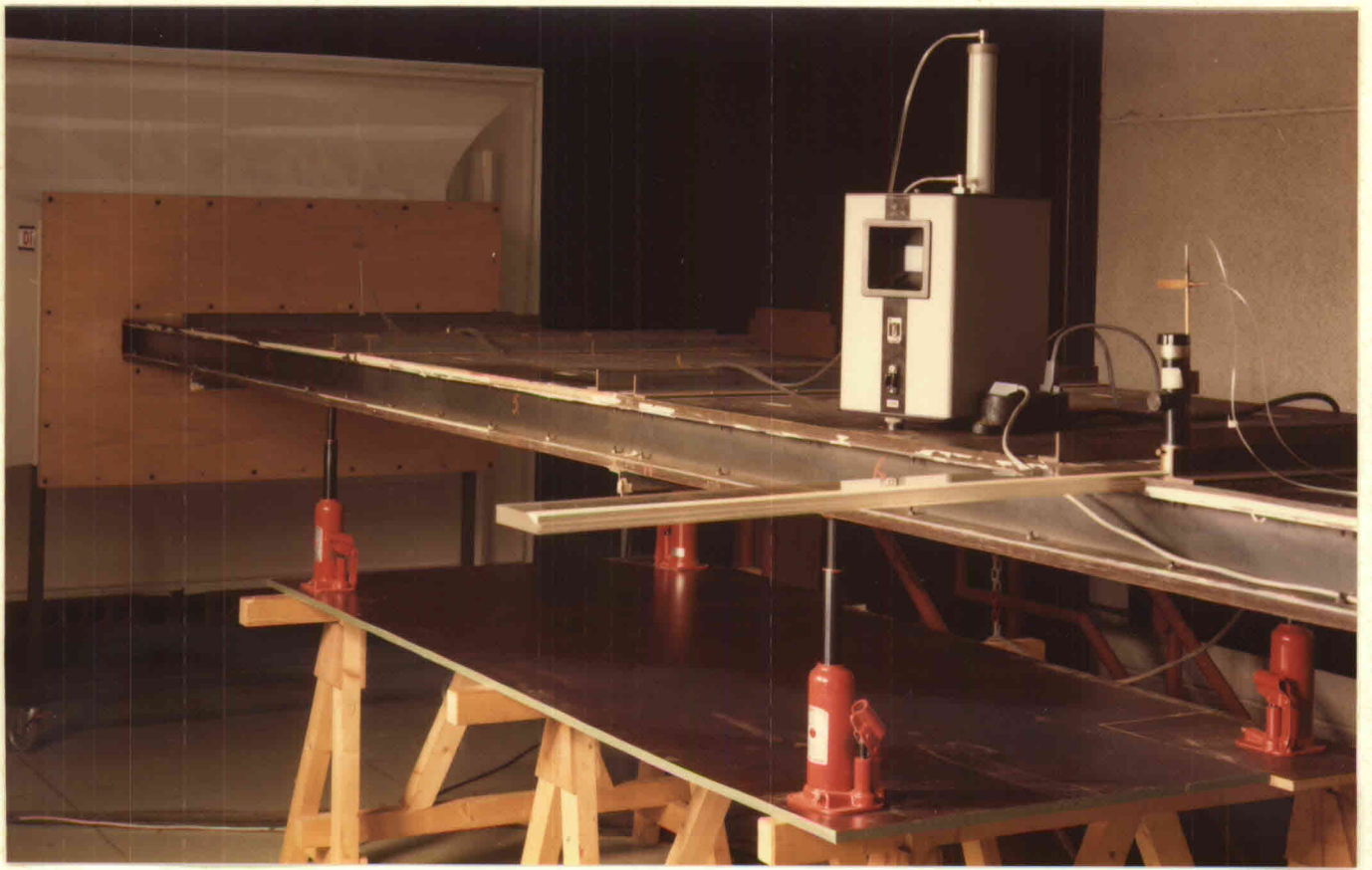
TABEL I Overzicht resultaten vertikaal snelheidsprofiel op modelschaal

	Gladde wand	Ruwe wand
Re	$1.25 \cdot 10^5$	$1.25 \cdot 10^5$
z_o	$6.5 \cdot 10^{-3}$ mm, effectief	0.13 mm
u^*/U_{\max}	0.045	0.068
K_s	0.22 mm, effectief	4.3 mm
d_e	0.20 m	0.20 m
n	7.1	4.2



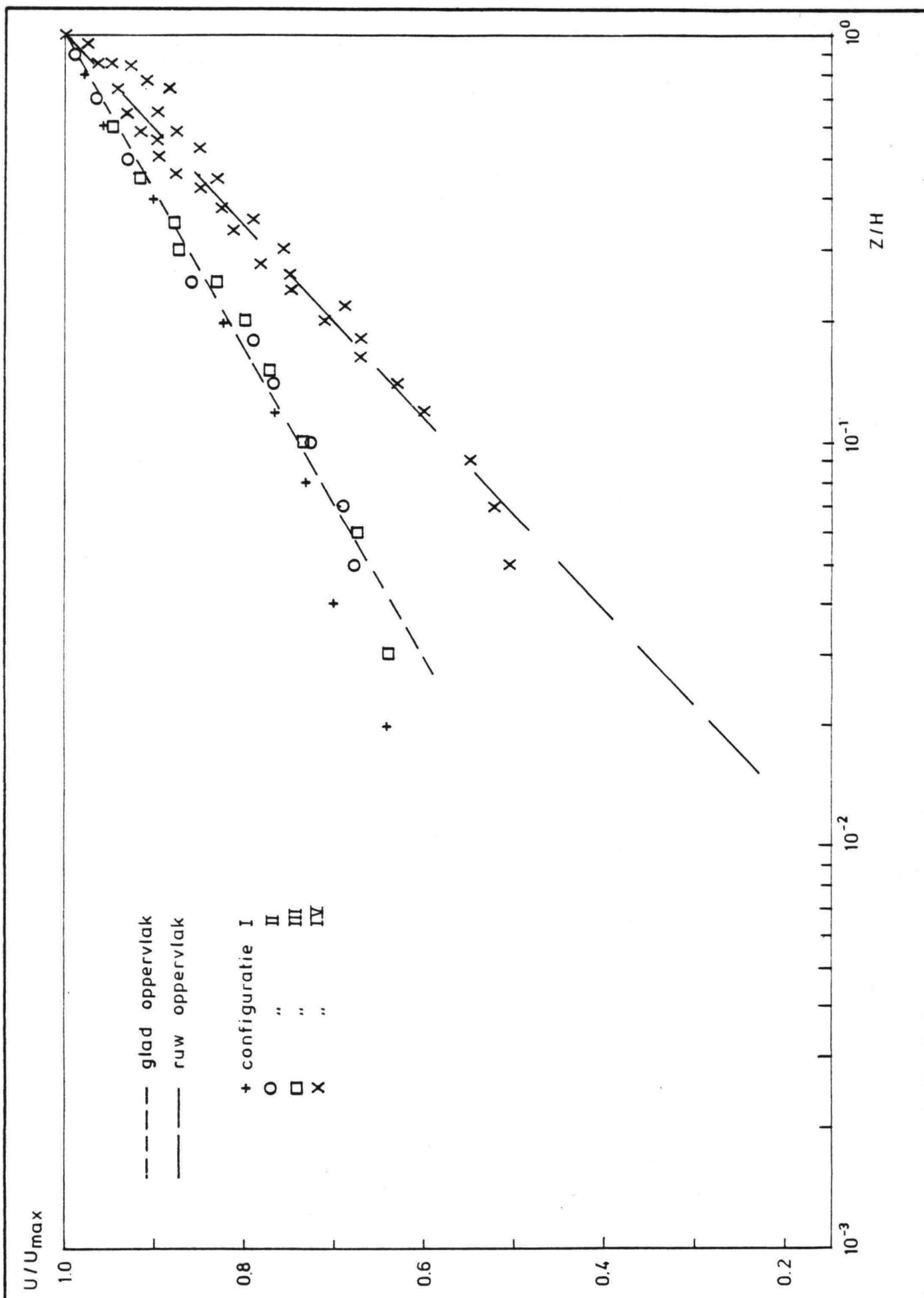
Het gebruikte model

MT-TNO
91620
Fig. 1



De meetopstelling.

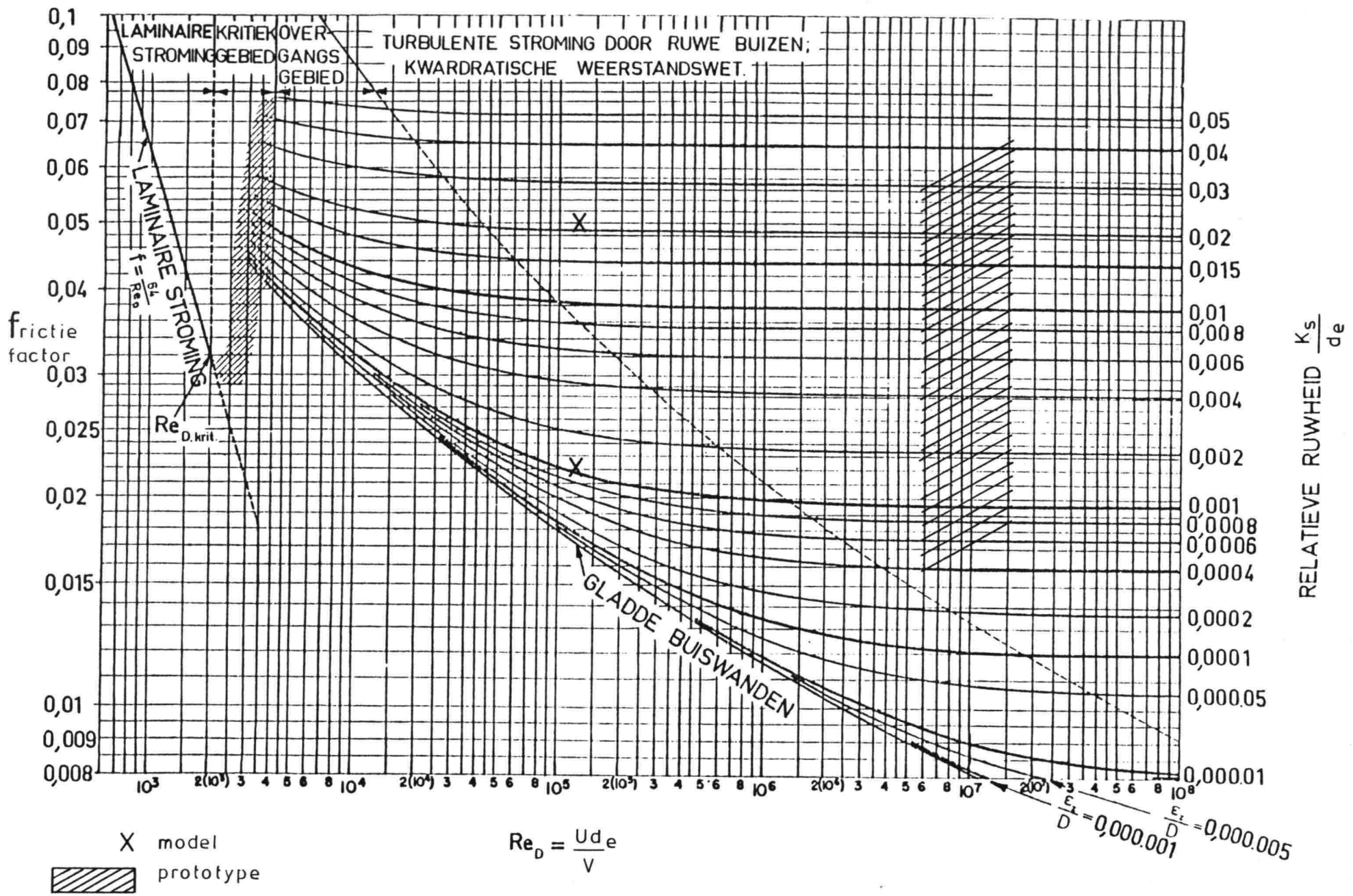
MT-TNO
91620
Fig. 2



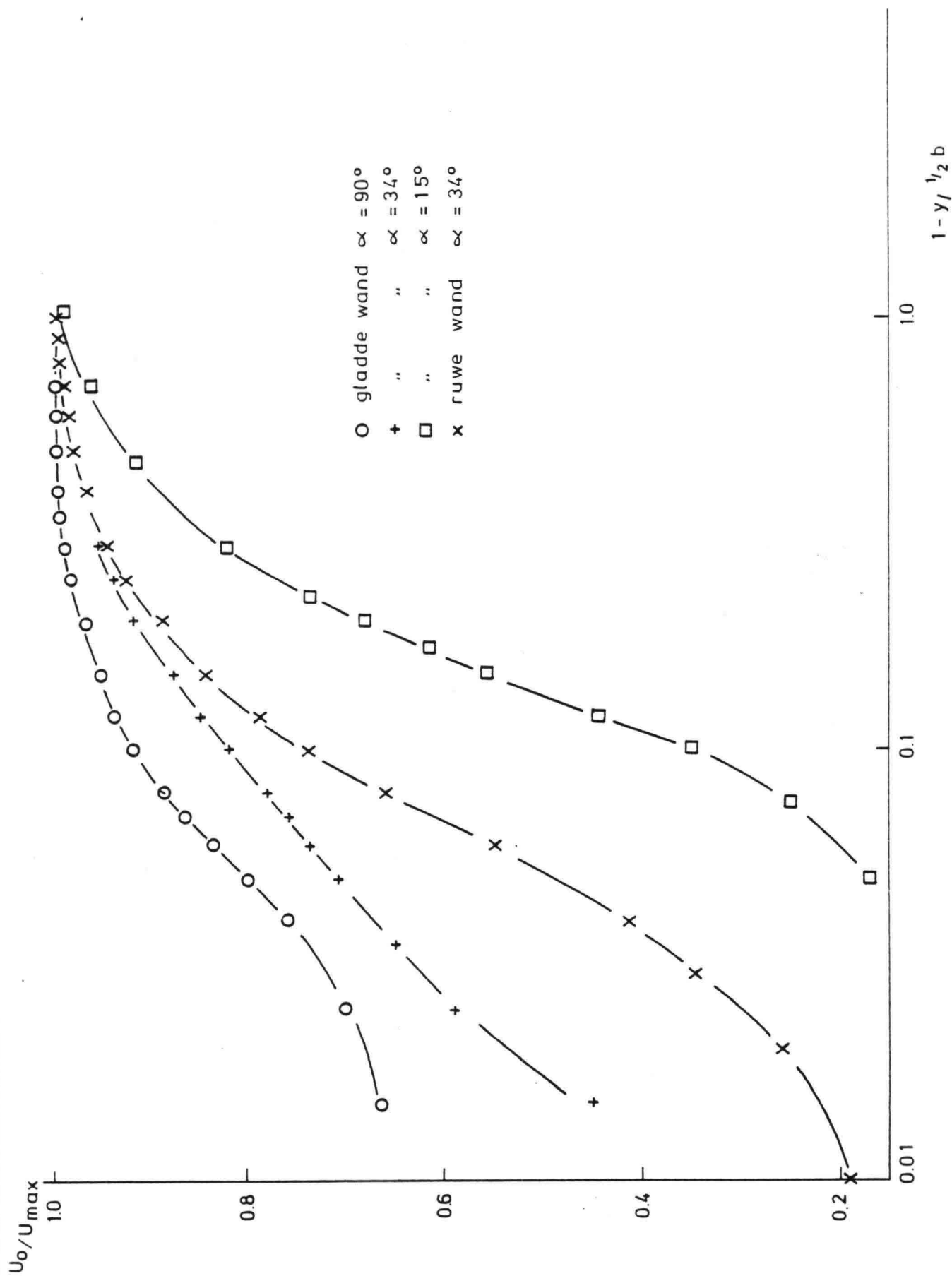
Het verticale snelheidsprofiel voor $y/\frac{1}{2}b=0$

MT - TNO
 91620
 Fig. 3

Het Moody diagram

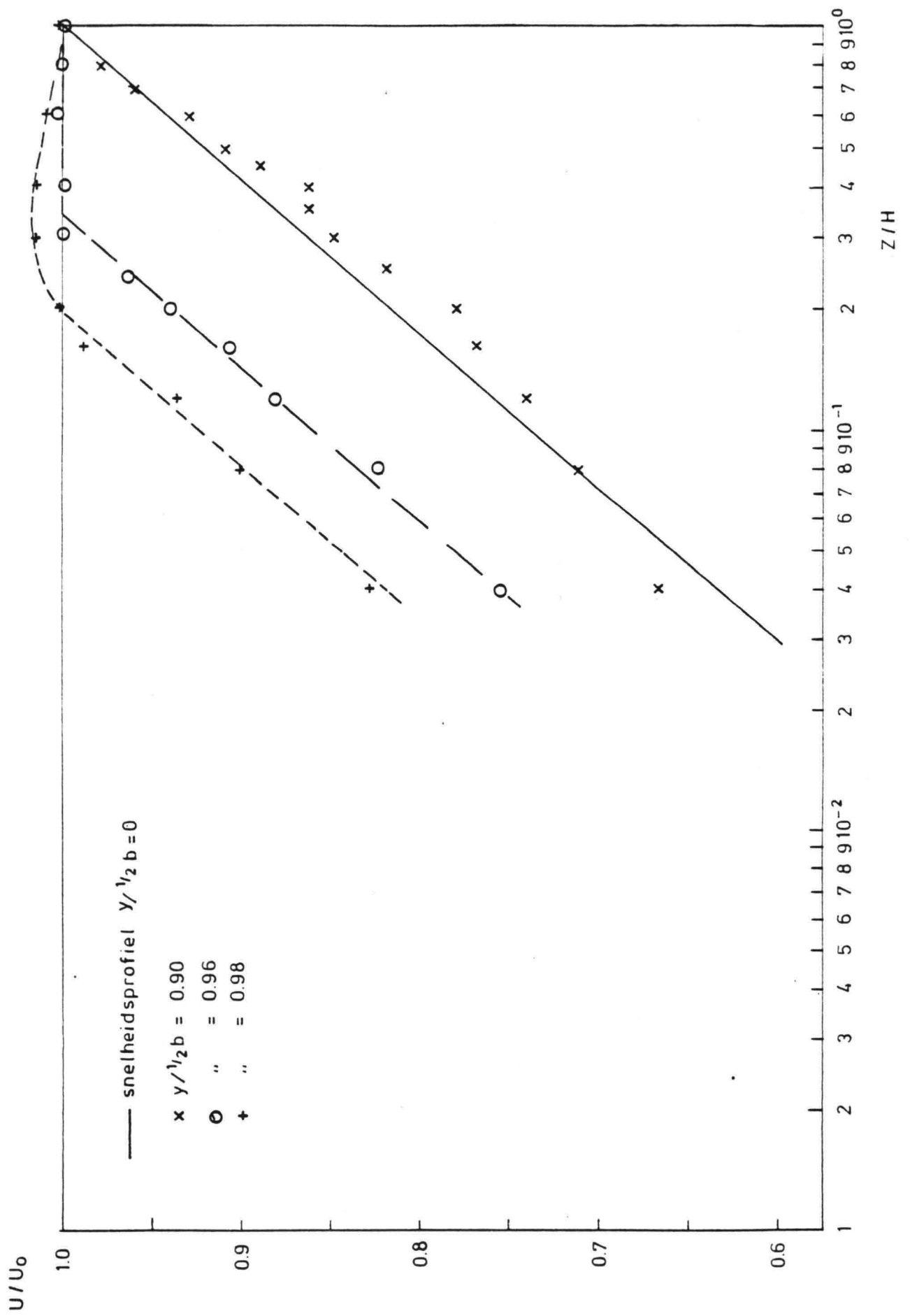


MT-TNO
91620
Fig. 4



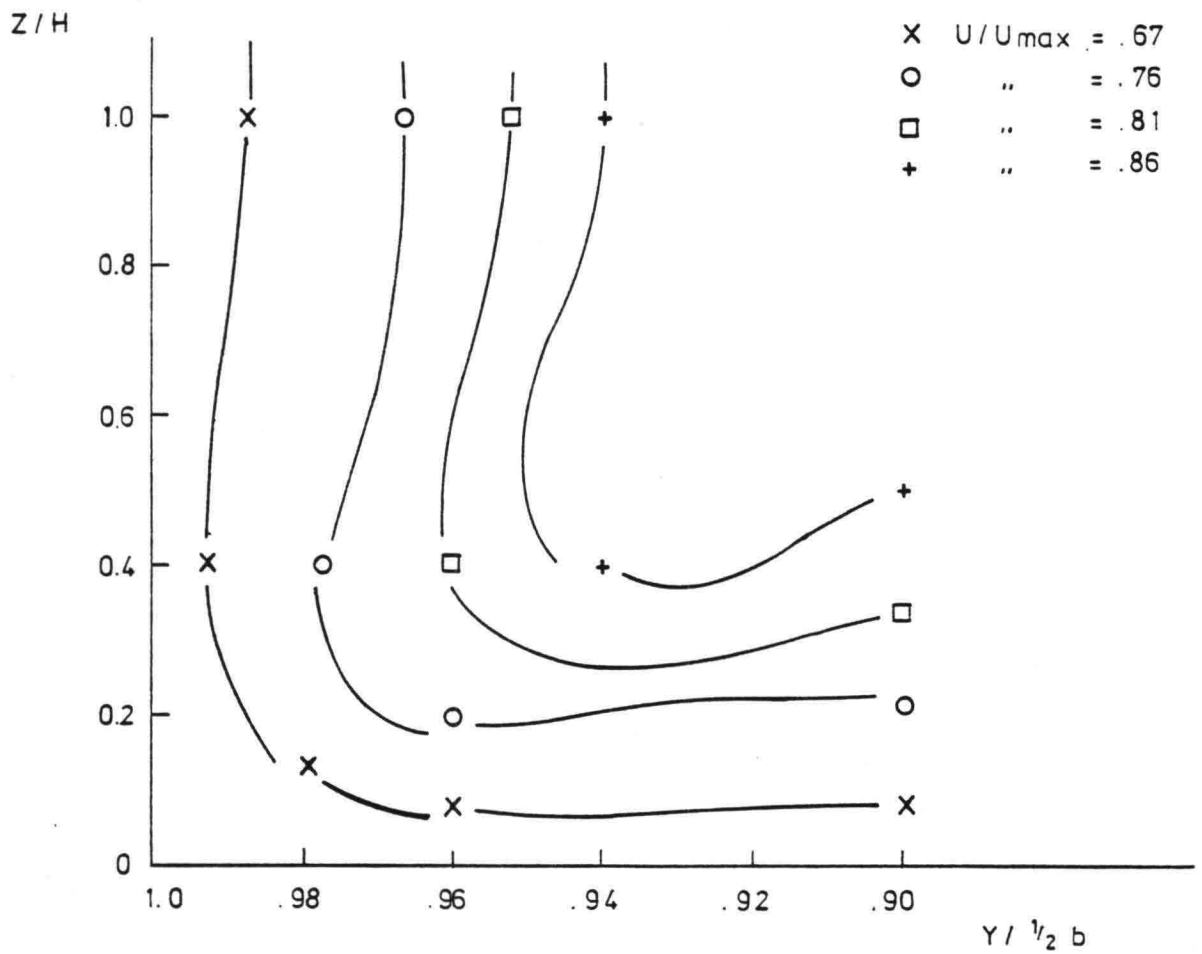
Het horizontale snelheidsprofiel

MT-TNO
 91620
 Fig. 5



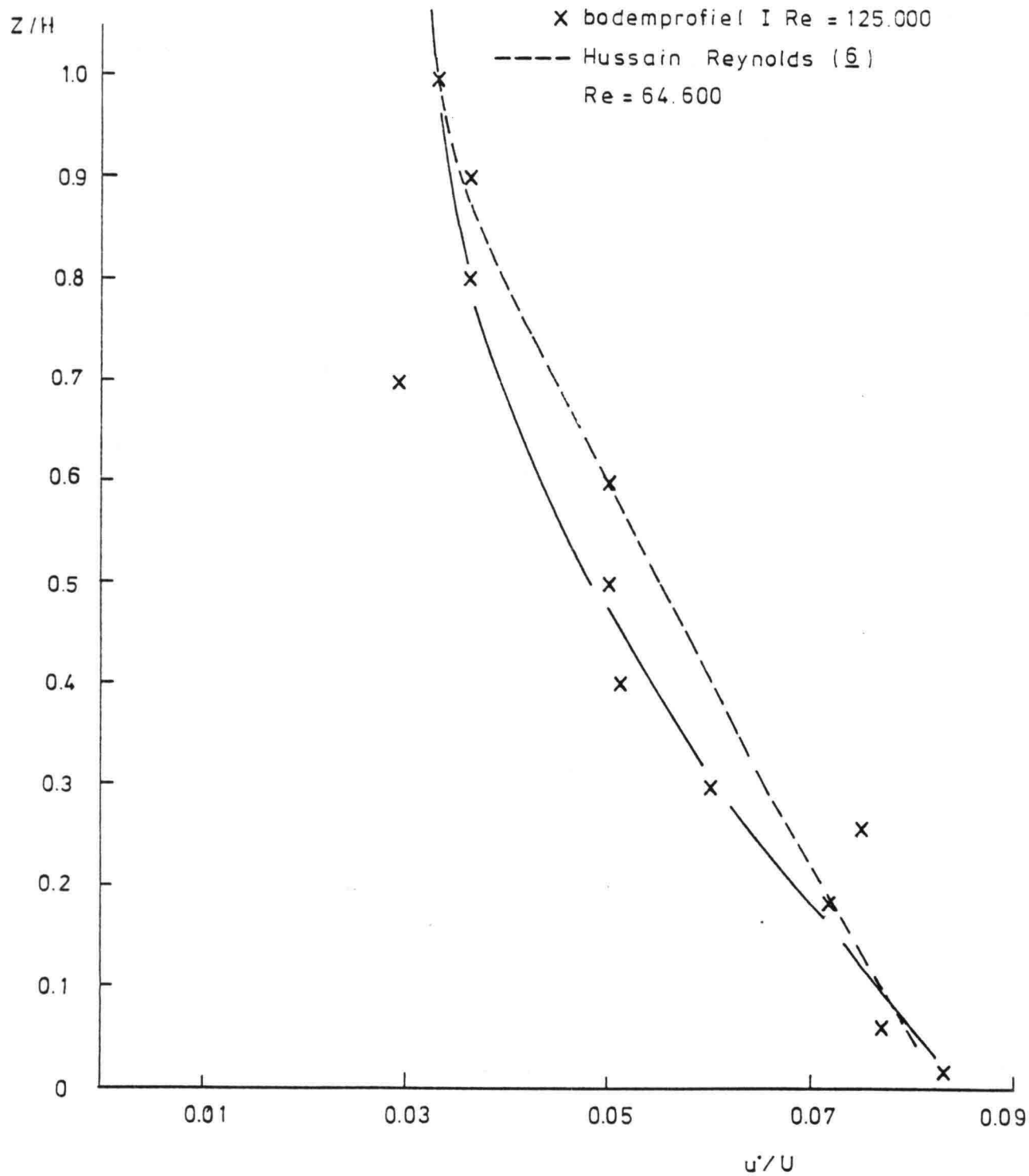
Vertikale snelheidsprofielen voor bodemprofiel I

MT - TNO
 91620
 Fig. 6



Iso - snelheidslijnen voor bodemprofiel I

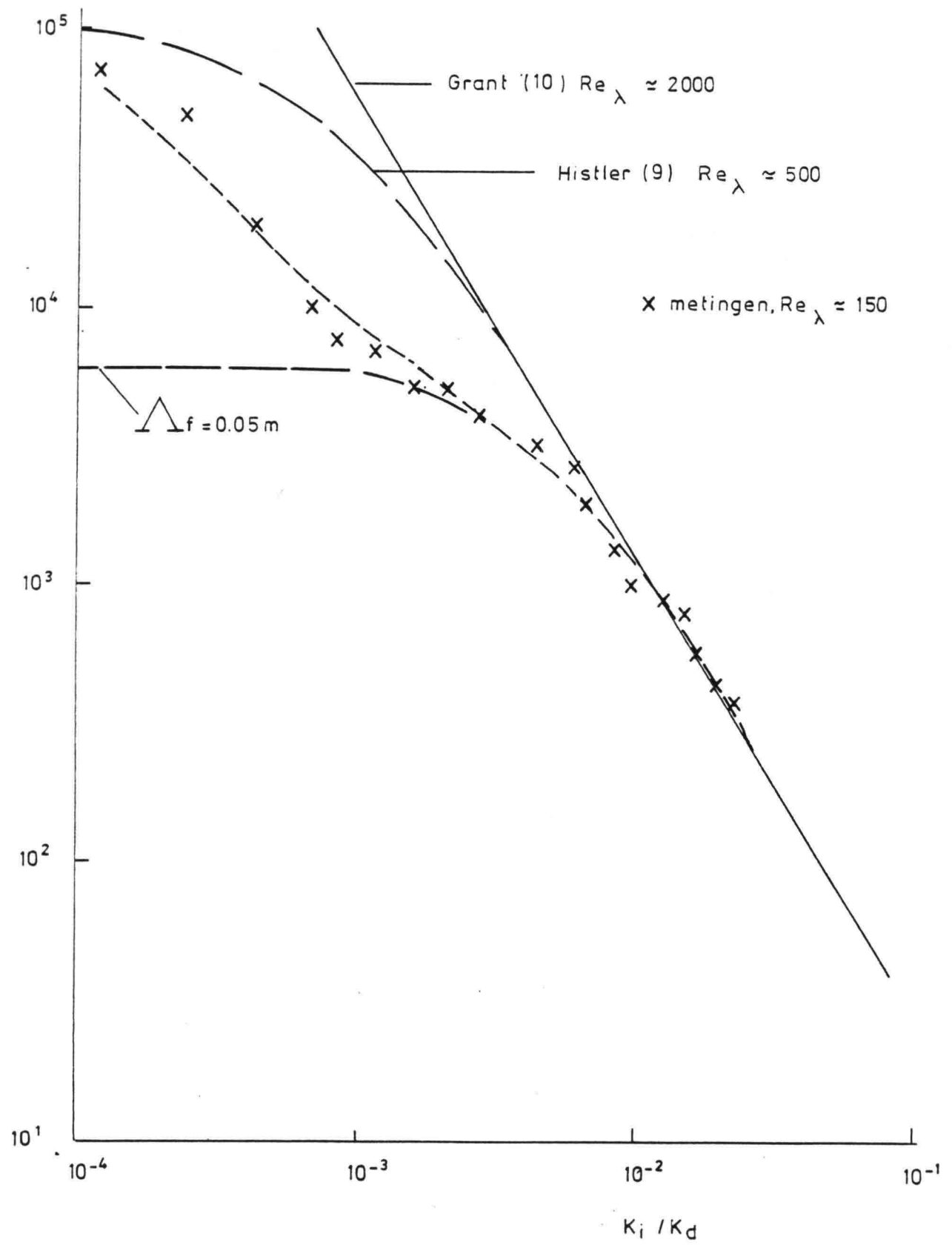
MT - TNO
 91620
 Fig. 7



Turbulentie verdeling voor $y/1/2 b = 0$

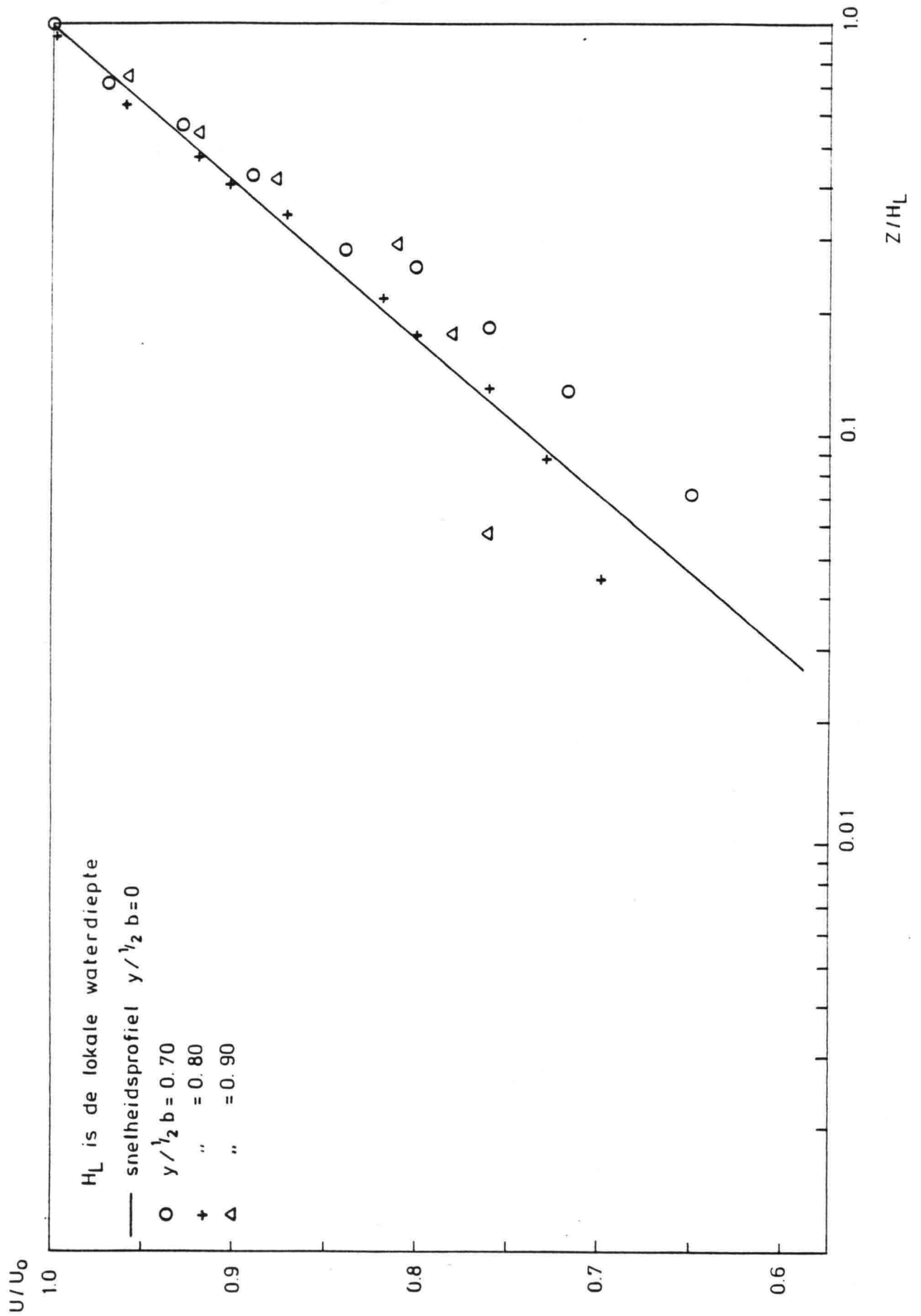
MT-TNO
91620
Fig. 8

$$\frac{E_i(K_i)}{(E V^5)^{1/4}}$$



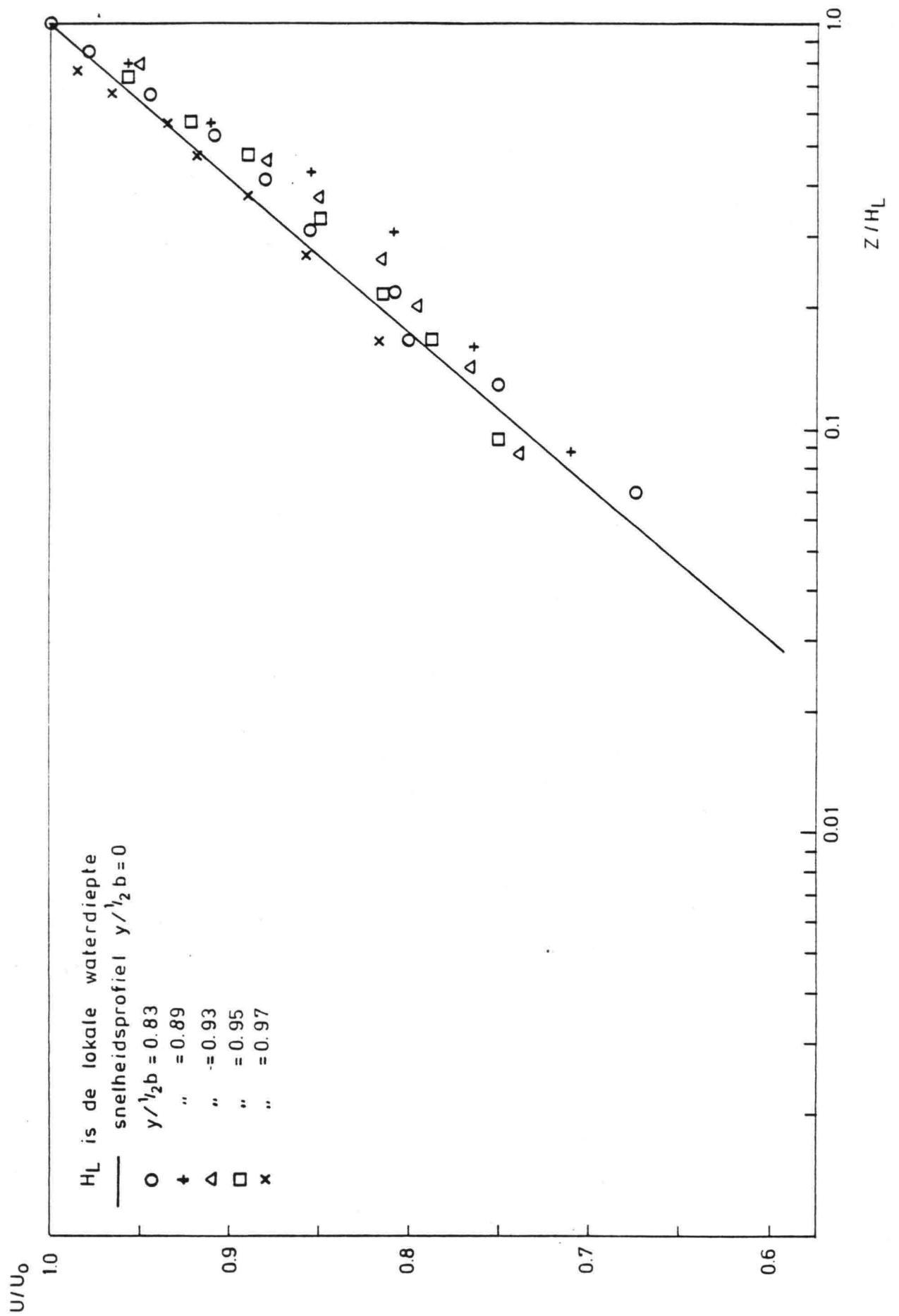
Turbulentie spectrum

MT-TNO
91620
Fig. 9



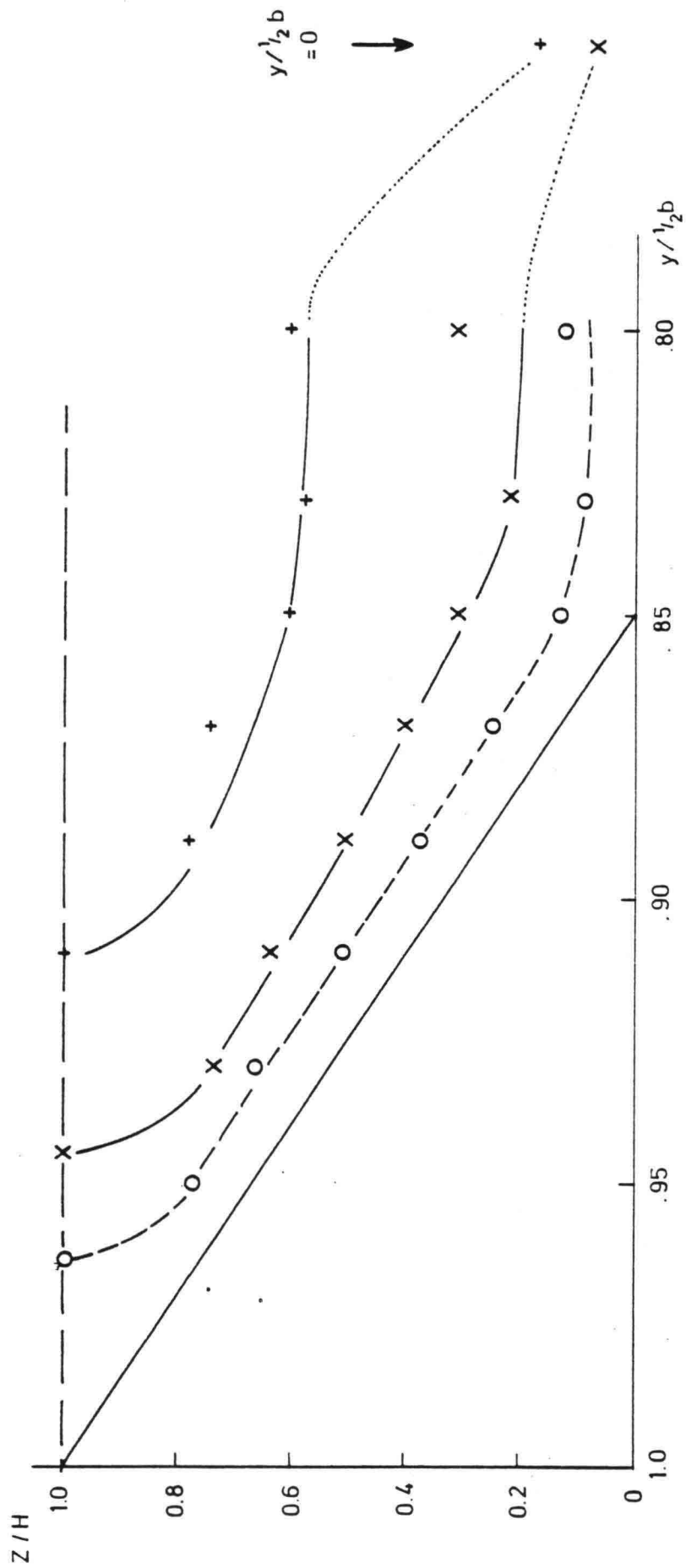
Vertikale snelheidsprofielen voor bodemprofiel II

MT-TNO
 91620
 Fig.10



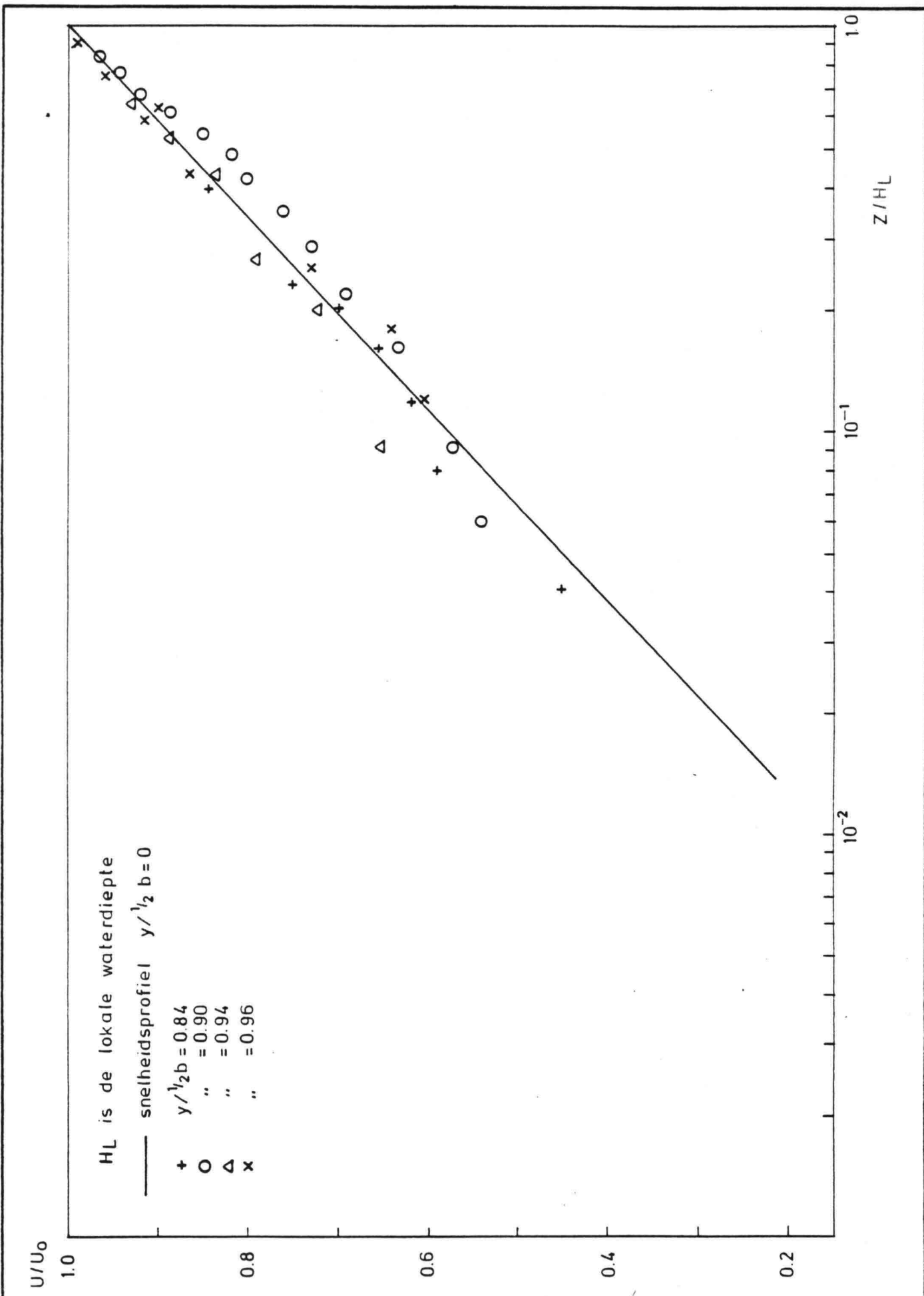
Vertikale snelheidsprofielen voor bodemprofiel III

MT-TNO
 91620
 Fig.11



Iso - snelheidslijnen voor bodemprofiel III

MT - TNO
 91620
 Fig. 12



Vertikale snelheidsprofielen voor bodemprofiel IV

MT-TNO
 91620
 Fig.13

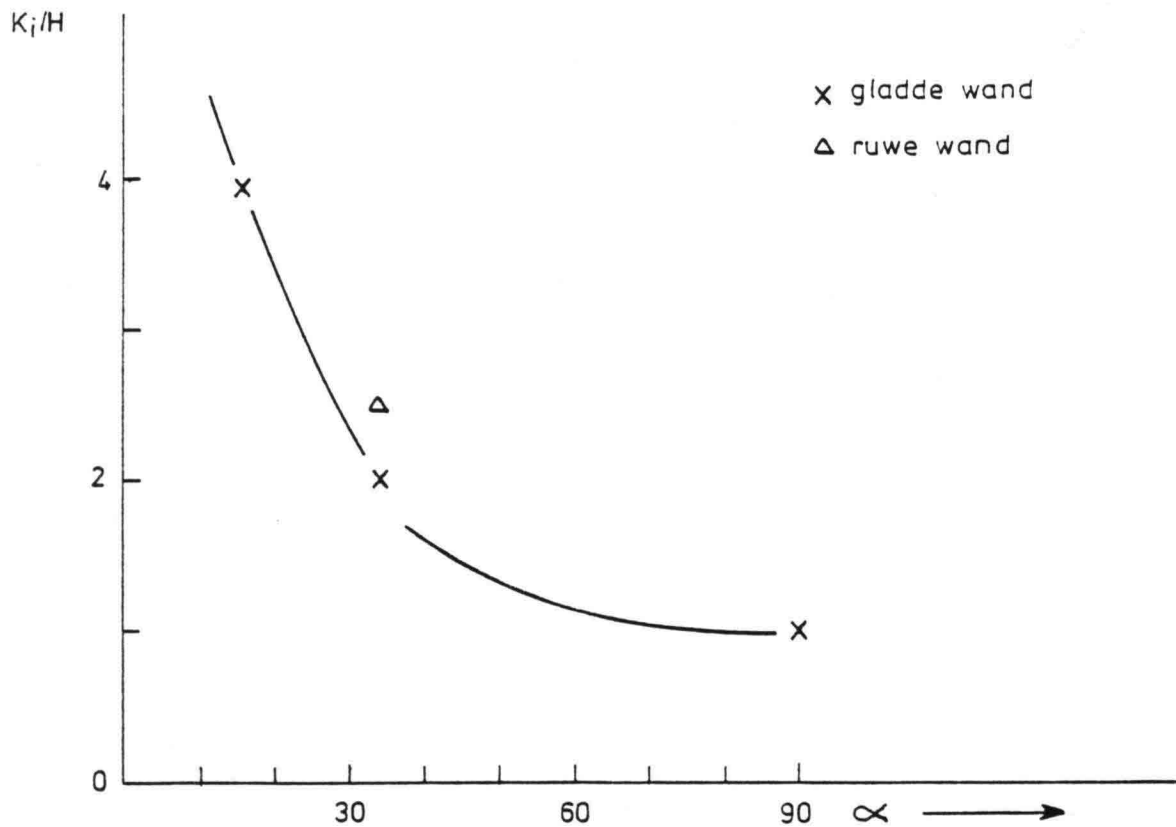
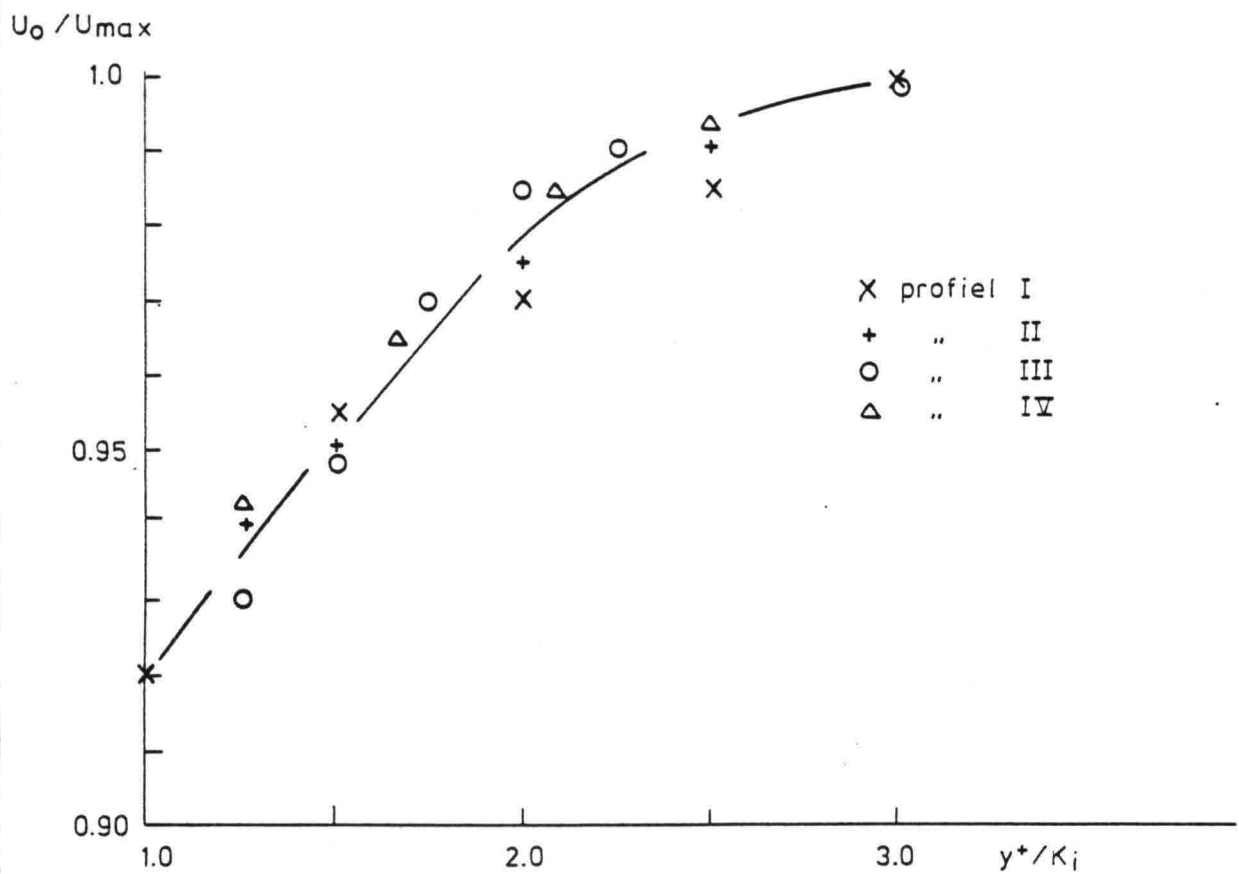
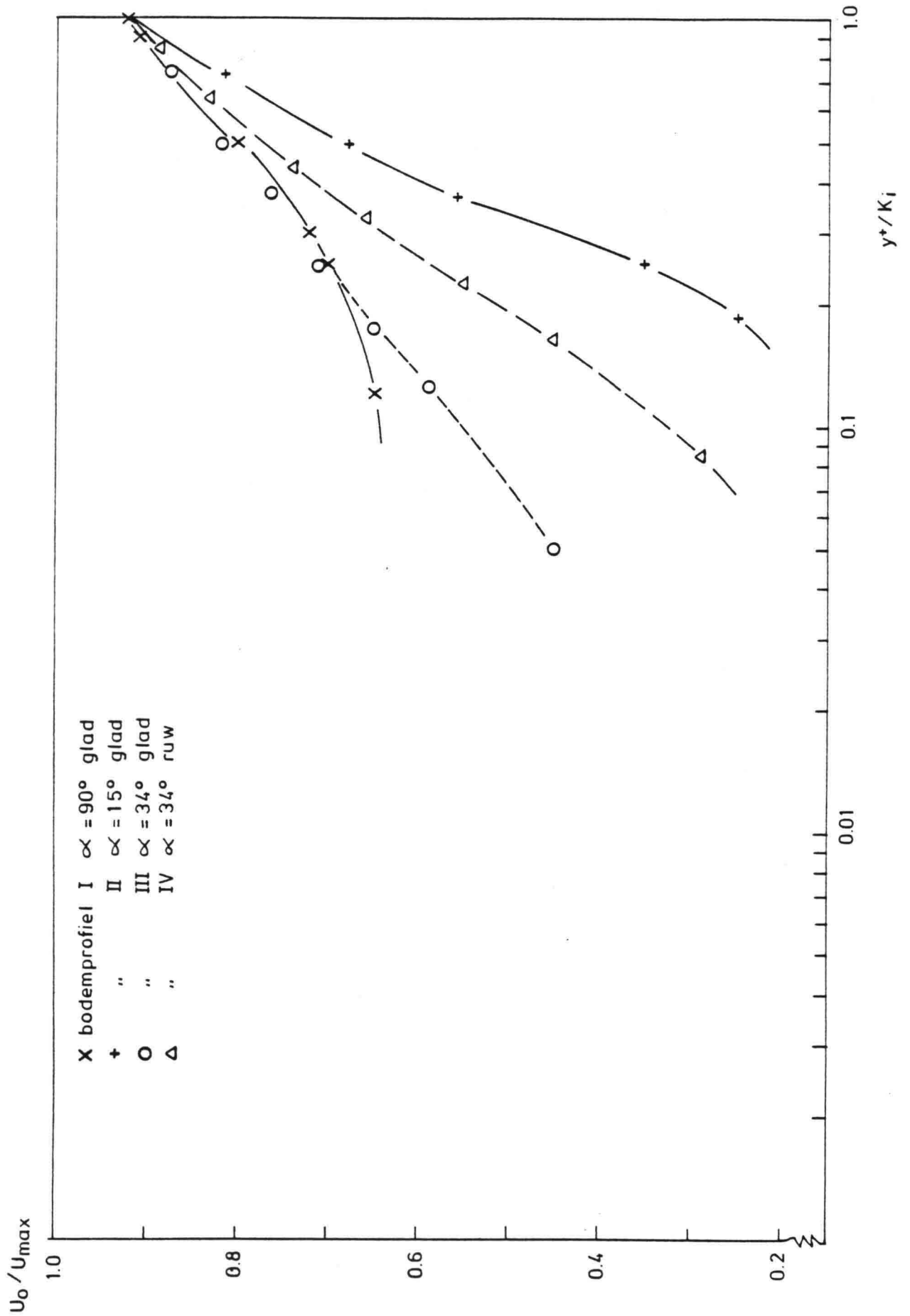


Fig.14 Directe zijwand invloed bij verschillende bodemprofielen.



Snelheidsverloop in het overgangsgebied

MT-TNO
91620
Fig.15



Snelheidsverloop dichtbij de zijwand

MT-TNO
91620
Fig.16

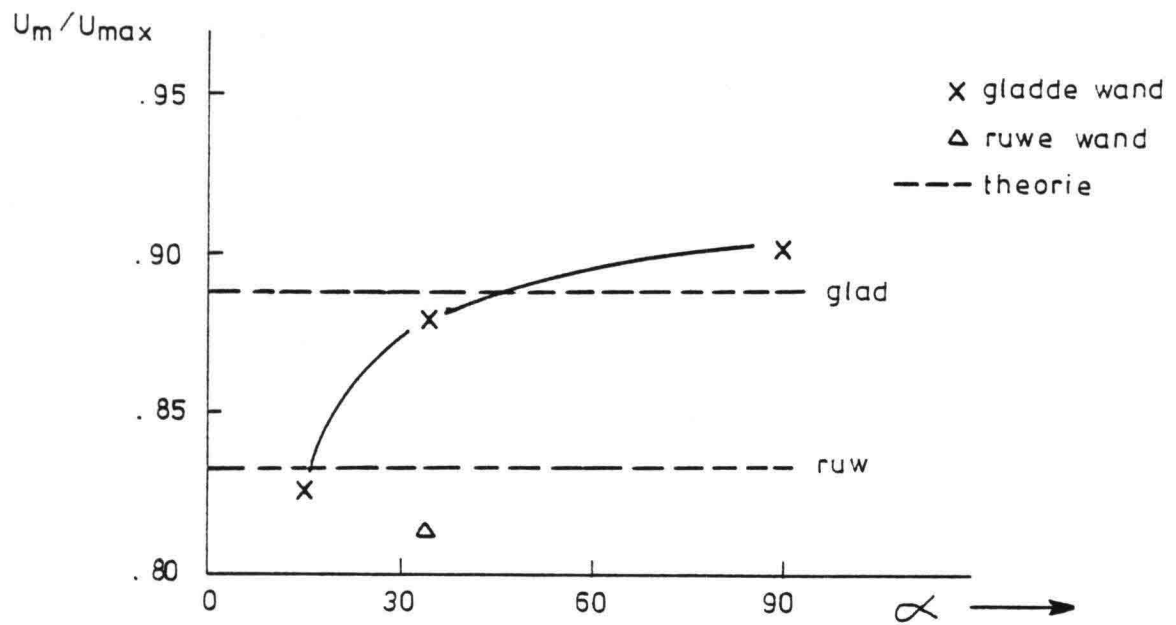


Fig. 17 Debiet bij verschillende bodemprofielen

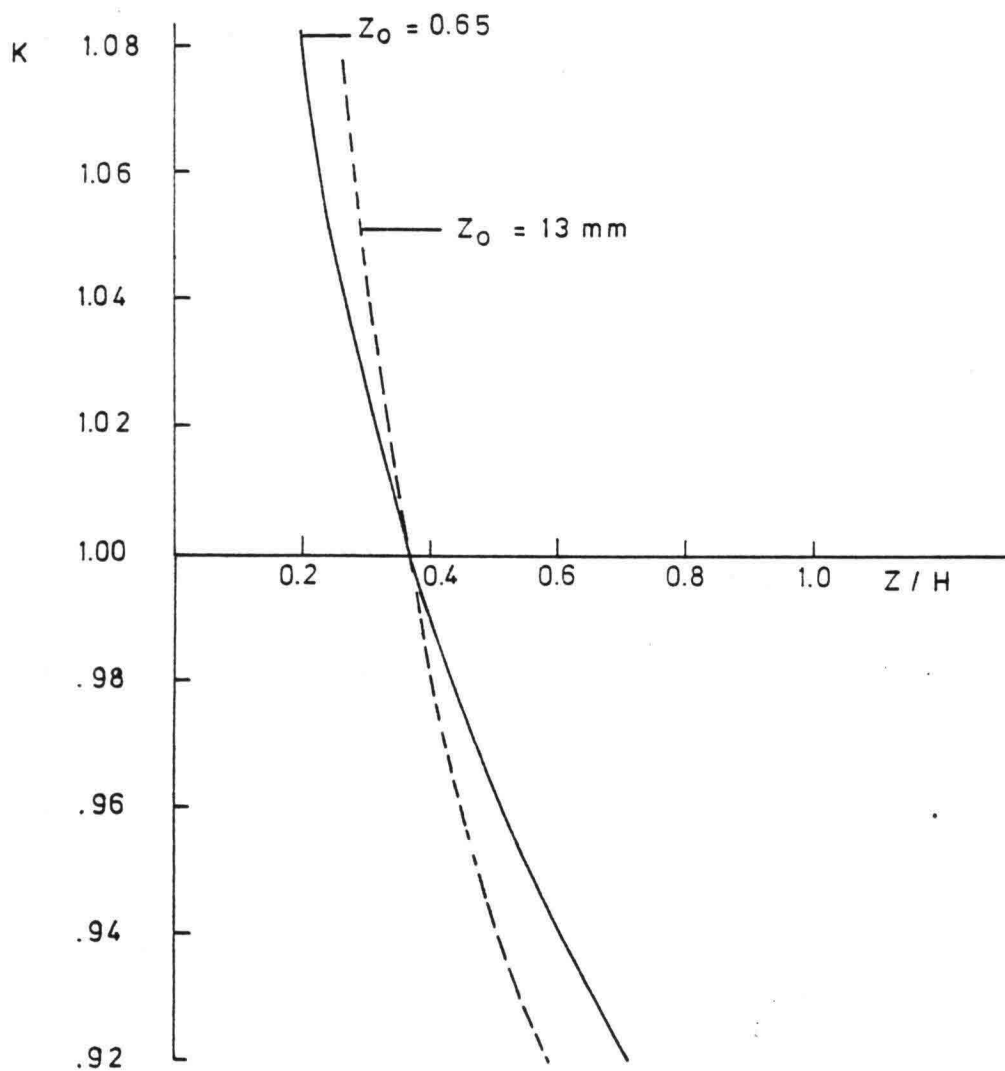
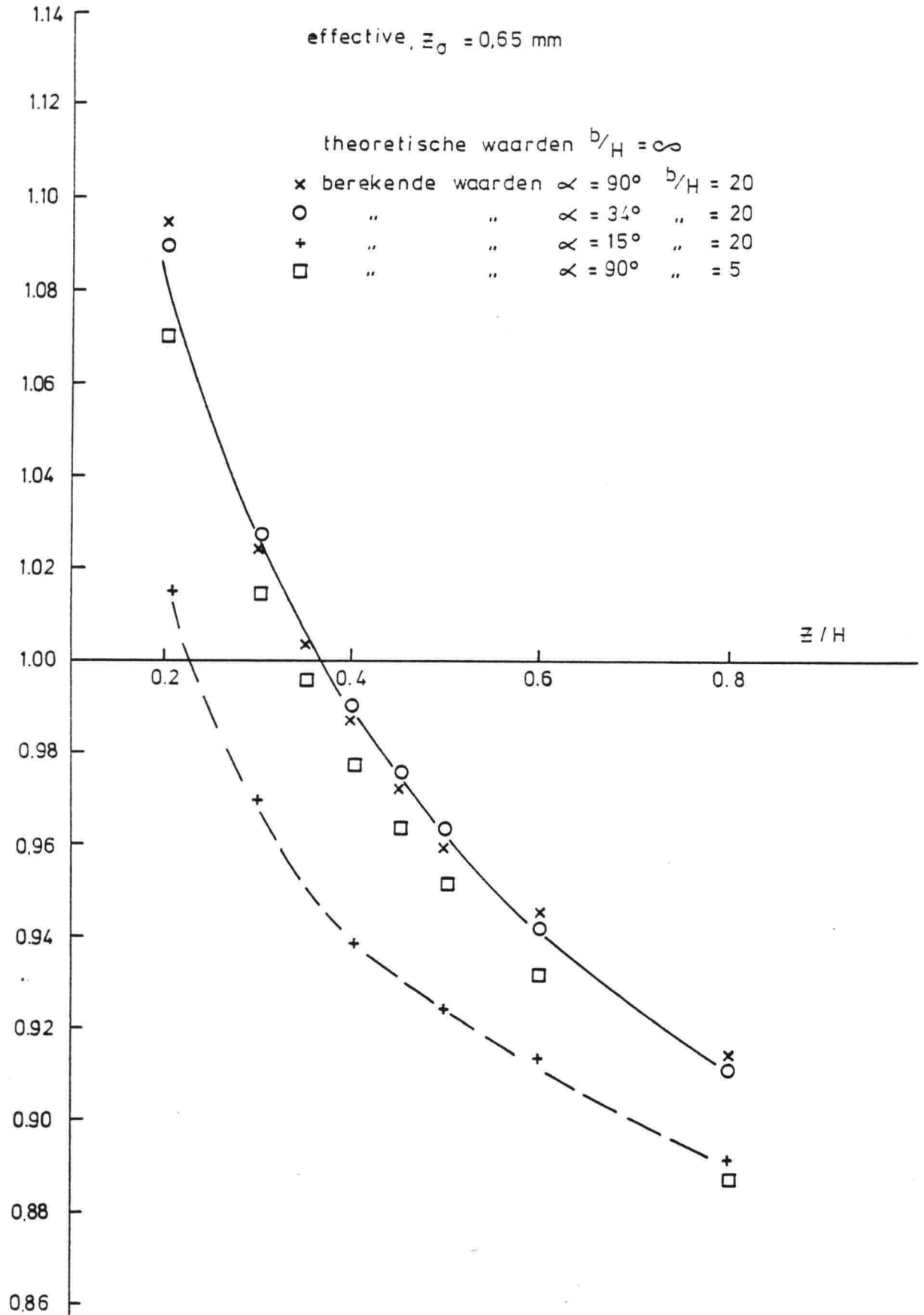


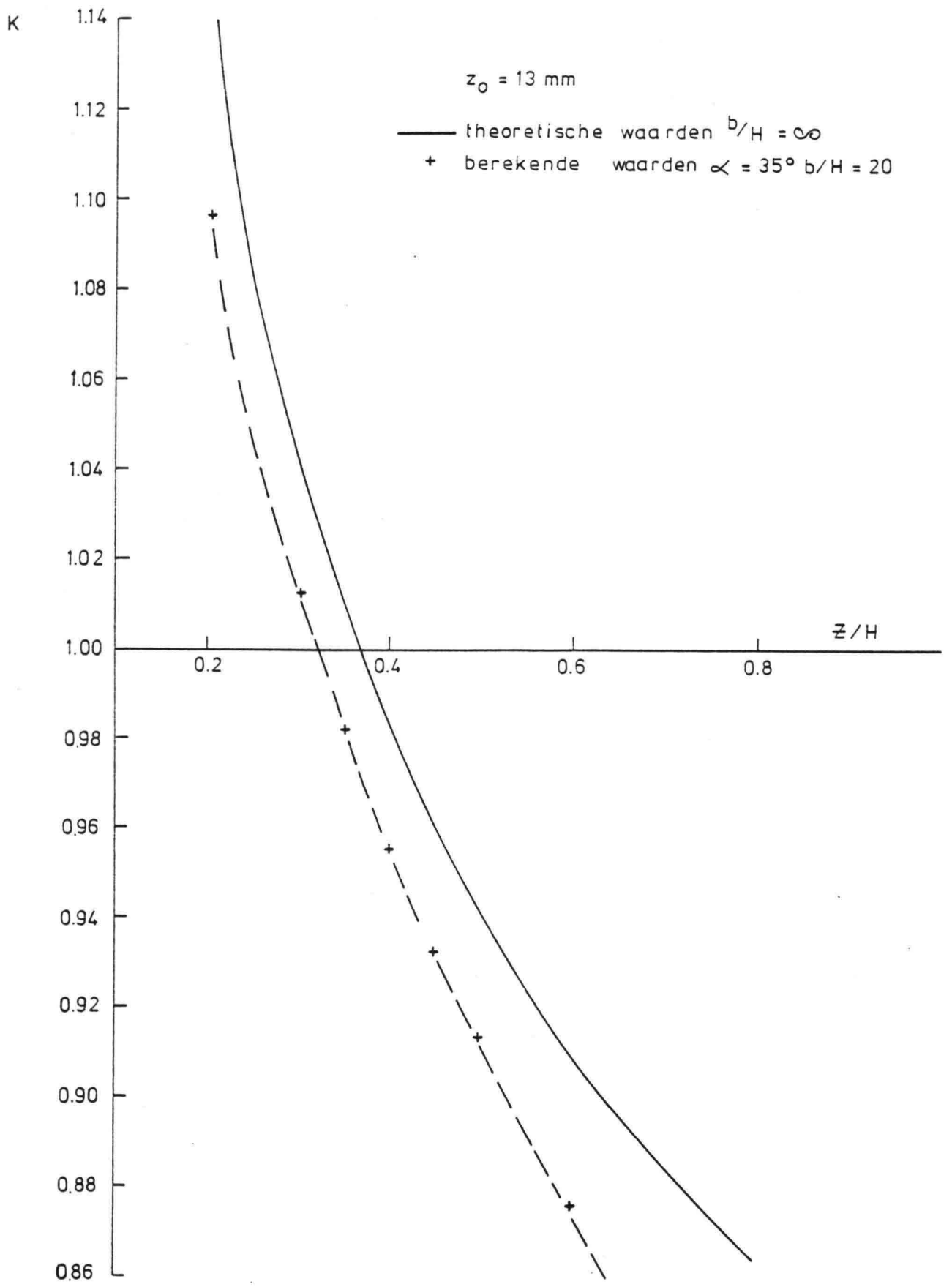
Fig. 18 Theoretische K - factoren.

K



Correctie-factoren voor de gladde wand situatie

MT-TNO
91620
Fig.19



Correctie-factoren voor de ruwe wand situatie

MT-TNO
91620
Fig. 20

