

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

Interactie van submerse vegetatie en
fysische processen; 1998

Verslag onderzoek

maart 1999

wl | delft hydraulics

Z2473-1998

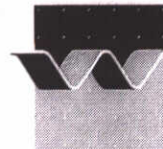
Z2473/Z2540

Interactie van submerse vegetatie en
fysische processen; 1998

I. Tanczos / M.de Vries



wl | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER: RWS-RIZA

TITEL: Interactie van submerse vegetatie en fysische processen; experimenten 1998

SAMENVATTING:

In samenwerking met WL | DELFT HYDRAULICS heeft het RIZA(WST) een project opgestart waarbij de beïnvloeding van de onderwatervegetatie op het transport van slib in de nederlandse meren wordt onderzocht. Dit rapport bevat de beschrijving en analyse van de resultaten van een serie experimenten uitgevoerd in een grootschalige meetopstelling van WL | DELFT HYDRAULICS in 1998.

Uit veldwaarnemingen is bekend dat het water boven een submers vegetatieveld, in tegenstelling tot de rest van het meer, vaak kraakhelder is. Dit verschil in doorzicht wordt toegeschreven aan het feit dat submerse vegetatie ofwel de opwerveling van bodemslib tegengaat, dan wel het sedimenteren van zwevend slib bevordert, dan wel het transport van zwevend slib door de vegetatievelden heen beïnvloedt. Echter welk proces precies beïnvloed wordt is tot op heden niet goed bekend.

In 1998 zijn experimenten uitgevoerd in de Getijgoot van het Waterloopkundig Laboratorium, gebruik makend van kunstplanten, echte planten en slib. De meetresultaten zijn gebruikt om een 1DV model te calibreren. Hieruit is geconcludeerd dat het model de gemeten verticale profielen van stroomsnelheid, turbulentie en eddy-diffusiviteit zowel binnen als buiten het plantenbed goed kan simuleren.

REFERENTIES:

VER.	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING			
1.0	Tánczos/de Vries	<i>WML</i> 19 maart 1999		Kuijper <i>DK</i>	Schilperoort <i>DK</i>			
PROJECTNUMMER:		Z2473/Z2540						
TREFWOORDEN:								
INHOUD:	TEKST	75	TABELLEN	-	FIGUREN	49	APPENDICES	-
STATUS:	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG		<input type="checkbox"/> CONCEPT		<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF			

Samenvatting

In samenwerking met WL | DELFT HYDRAULICS heeft het RIZA(WST) een project opgestart waarbij de beïnvloeding van de onderwatervegetatie op het transport van slib in de Nederlandse meren wordt onderzocht. Dit rapport bevat de beschrijving en analyse van de resultaten van een serie experimenten uitgevoerd in een grootschalige meetopstelling van het WL | DELFT HYDRAULICS in 1998.

Probleemstelling

Vanuit eerdere studies (Actief Biologisch Beheer, RIZA-WSE) is gebleken dat veel oppervlakte wateren in Nederland te kampen hebben met een verstoord biologisch evenwicht als gevolg van troebel water. Hoewel binnen dit ABB programma, door middel van biologische manipulatie, een deel van de problemen is opgelost, blijkt toch dat voornamelijk de onderwatervegetatie zich niet altijd goed kan ontwikkelen. Een belangrijke barrière bij het verdere herstel van de ondiepe meren en plassen is vaak de grote hoeveelheid door windgolven opgewerveld slib in het watersysteem.

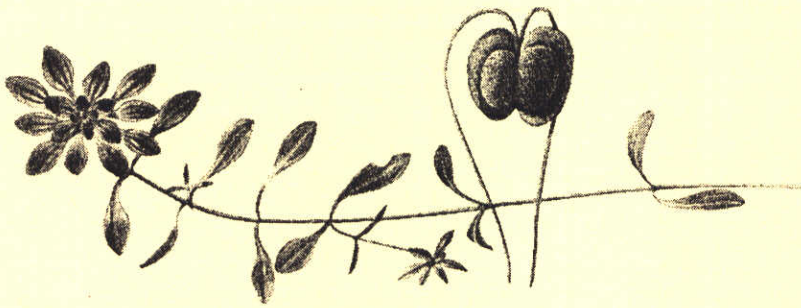
Wanneer de vegetatie zich wel weet te vestigen wordt, doordat het doorzicht spectaculair verbetert, vaak een directe positieve reactie op de ontwikkeling van het ecosysteem in het desbetreffende systeem gevonden.

Uit veldwaarnemingen is bekend dat het water boven een submers vegetatieveld, in tegenstelling tot de rest van het meer, vaak kraakhelder is. Dit verschil in doorzicht wordt toegeschreven aan het feit dat submerse vegetatie ofwel de opwerveling van bodemslib tegengaat, dan wel het sedimenteren van zwevend slib bevordert, dan wel het transport van zwevend slib door de vegetatievelden heen beïnvloedt. Echter welk proces precies beïnvloed wordt is tot op heden niet goed bekend.

Vragen als: wanneer en waar kan submerse vegetatie zich vestigen, en kan een submerse vegetatieveld het hele meer helder krijgen en hoe groot moet het veld dan zijn kunnen derhalve niet goed worden beantwoord.

Onderzoek

In 1997 is de beïnvloeding van submerse vegetatie op het slibtransport door middel van laboratorium-onderzoek gestart. Hierbij is in een stroomgoot (hoogte 1 m, breedte 1 m en lengte 130 meter) een plantenveld over een afstand van 10 meter aangebracht. In eerste instantie is met kunstvegetatie gewerkt. Hierbij zijn de effecten van het plantenveld op de waterbeweging (stroomsnelheid) en op de sedimentatieprocessen nauwkeurig gemeten (zie foto). Uit de resultaten van de stroommetingen blijkt dat de stroomsnelheid boven de plantjes tot een factor 2 kunnen toenemen, en dat in het plantenveld de snelheid tot een factor 4 kunnen afnemen. Turbulentiemetingen laten ook een stijging in de turbulente energie boven het plantenveld zien. Deze toename is een gevolg van een combinatie van turbulente kinetische energie gegenereerd door de plantjes zelf en door de aanwezigheid van de veel hogere gemiddelde snelheid boven de vegetatie. Tussen de plantjes blijkt de turbulente energie af te nemen en verandert het spectrum van de turbulente wervelingen. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de veel lagere gemiddelde stroomsnelheid en de dichtheid en diameter van de aanwezige plantenstengels. In het experiment is gebruik gemaakt van Haaksterrekroos.



Haaksterrekroos, Callitriche hamulata.

De resultaten met toevoeging van (kunst)slib laten zien dat de concentratie zwevend slib boven het plantenveld afneemt naarmate men verder in het plantenveld komt. De gemeten afname in de concentraties zijn echter niet genoeg om een verandering in de helderheid van het water te krijgen. Dichter bij de bodem is de afname in slibconcentratie duidelijker aanwezig.

Op basis van deze resultaten is een verband gevonden tussen de variatie in de turbulente menging en de verandering in de slibconcentraties.

Met behulp van een 1DV-model is vervolgens gekeken of de meetresultaten (stroomsnelheids-, turbulente kinetische energie- en concentratieprofielen) gereproduceerd konden worden. Bij deze modelstudie lag de nadruk vooral op:

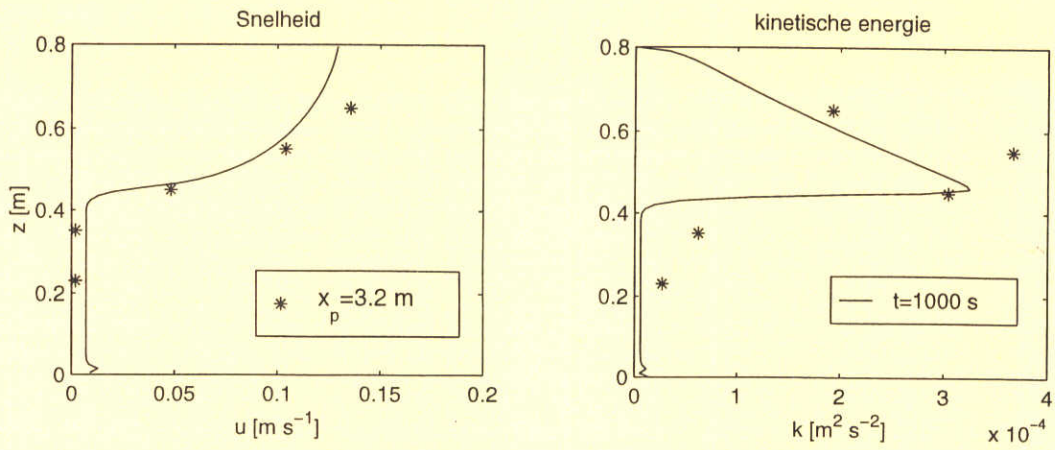
Welke parameter(s) is (zijn) bepalend om de gemeten effecten van de submerse vegetatie te kunnen simuleren?

Kan de waarde van deze parameter(s) worden gekoppeld aan de eigenschappen van de vegetatie zoals lengte, dichtheid, flexibiliteit etc.?

Indien het mogelijk is de invloed van submerse vegetatie op slibconcentraties in een uniforme stroming te modelleren, luidt de laatste vraag:

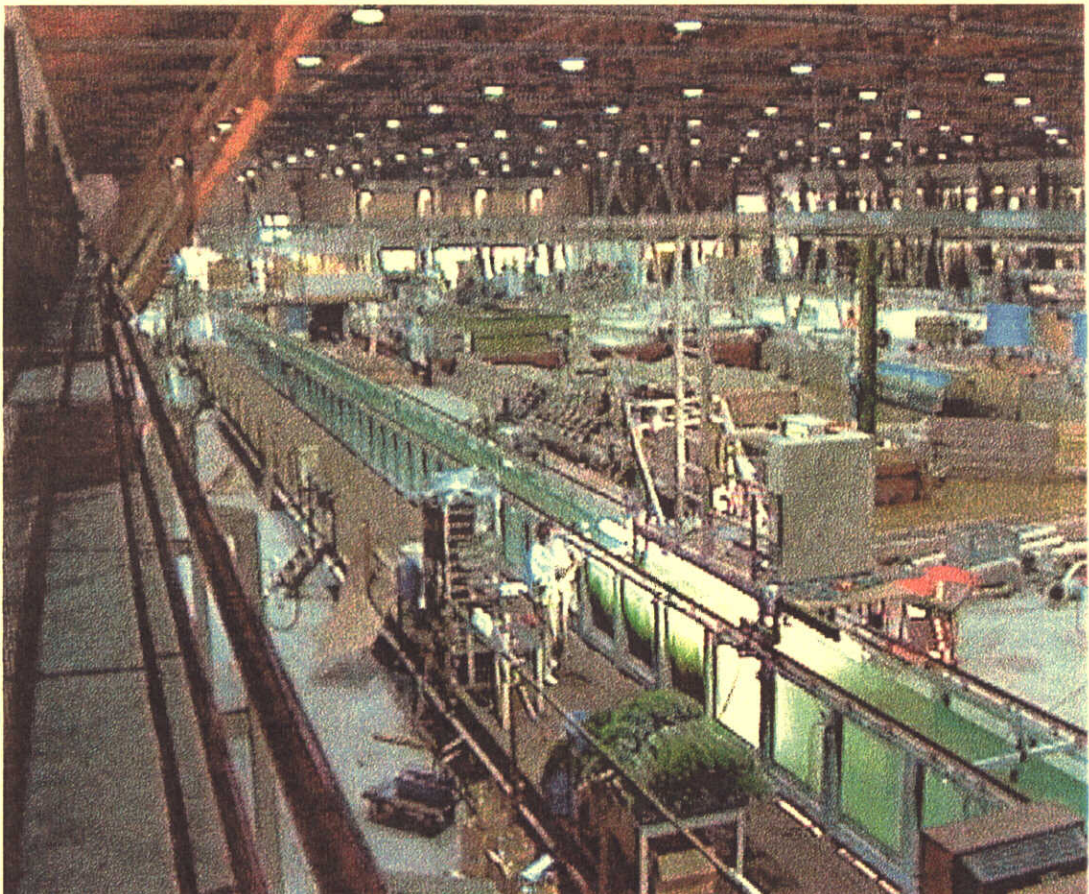
Is het effect dusdanig dat de helderheid van het water boven een plantenveld wordt verbeterd?

De resultaten van de 1DV-berekening laten zien dat het model de experimenten redelijk tot goed kan simuleren. Een juiste combinatie van aanstroomsnelheid, bodemruwheid en ruwheid van het plantenbed kan de hydraulische meetresultaten verklaren. Het plantenbed werd in het model geschematiseerd door middel van kwantificering van planthoogte, aantal stengels en bladoppervlakte per oppervlakte-eenheid. Simulatie van experimenten waarbij ook slib in het systeem aanwezig was toonde aan dat valsnelheid en kritieke schuifspanning belangrijke parameters zijn die de vorm van de verticale slibconcentratie profielen beïnvloeden. De concentratie van gesuspendeerd slib en de daaraan gekoppelde dichtheid van slib op de bodem heeft een duidelijke invloed op de verticale distributie van turbulente energie.



Snelheidsprofiel en turbulente kinetische energie boven en tussen de natuurlijke plantjes na 500 s bij een gemiddelde snelheid van 5 cm s^{-1} , $C_D = 0.5$ en $d = 2 \text{ mm}$. Er zit geen slib in de goot.

De helderheid van het water boven submerse vegetatievelden kan echter niet goed verklaard worden. Deze toename in helderheid is bij de laboratoriumopstelling niet gevonden. En ook het model geeft geen verklaring voor dit fenomeen. De hypothese dat het gebruikte plantenveld te kort was om een merkbaar visueel effect te sorteren blijkt niet te kloppen.



Meetopstelling in de Getijgoot

Modelberekeningen voor een (gesimuleerd) plantenveld van 200 meter lengte laten geen extra verlaging van de slibconcentraties boven het plantenveld zien.

In de veldsituatie zal de opwoeling van slib vanuit de epipelonlaag bij de bodem bepalend zijn voor de locale slibconcentraties. Hierbij speelt de aan het oppervlak gegenereerde turbulentie door de wind (golfwerking) een grote rol. In de aanwezigheid van planten zal deze (golf)turbulentie worden geabsorbeerd, zodat de bijna instantane opwoeling daar niet zal plaats vinden. Mogelijk dat dit laatste effect het verschil in helderheid tussen submerse vegetatievelden en onbegroeide delen van het meer verklaart. Belangrijke parameters hiervoor zijn de golfhoogte en de golffrequenties in relatie tot de vrije waterhoogte, de dichtheid en de lengte van het plantenbed.

Deze studie wordt dan ook in 1999 voortgezet waarbij de interactie submerse vegetatie - (wind)golven - slibconcentratieprofielen nader wordt onderzocht. Hierbij moet uitgegaan worden van een laagje hooggeconcentreerd slib nabij de bodem met een geringe sterkte ('fluffy layer').

Inhoud

Interactie van submerse vegetatie en fysische processen

Rapport I Opzet van het experiment

Rapport II Resultaten van de experimenten met kunstplanten

Rapport III 1DV Modeltoepassing

Rapport IV Resultaten van de experimenten met echte planten

Interactie van Submerse Vegetatie en Fysische Processen, 1998; Rapport I

Opzet van het experiment

drs. M.B. de Vries

november, 1998

Inhoud

Lijst van Figuren

1	Inleiding	1-1
2	Meetopzet om de interactie tussen onderwatervegetatie en slibconcentraties te meten	2-1
	2.1 Inleiding	2-1
3	Achtergrond.....	3-1
	3.1 Inleiding	3-1
	3.2 Turbulentie	3-1
4	Experimentele opzet.....	4-1
	4.1 Beoogde doelen van het experiment	4-1
	4.2 Opzet van de metingen.....	4-1
	4.2.1 Slibconcentraties en stroomsnelheden	4-1
	4.2.2 Lengte onderwatervegetatie	4-2
	4.2.3 Zuurgraad en chloride gehalte.....	4-2
5	Faciliteiten en meetinstrumenten	5-1
	5.1 Getijgoot	5-1
	5.2 Kunstmatige vegetatie.....	5-4
	5.3 Kunstslib	5-5
	5.4 Meetinstrumenten	5-5
	5.4.1 De sedimentatiebalans	5-8
6	Geplande metingen	6-1
	6.1 Deel I; Turbulentiemetingen	6-1
	6.2 Deel II; Metingen met slib	6-2
	6.3 Deel III; Valsnelheid bepalen.....	6-3

7 Vergelijking met veldsituatie..... 7-1

LiteratuurLit.-1

Lijst van Figuren

- figuur 1 De Getijgoot in de Zout-Zoet hal
- figuur 2 Foto van lege Getijgoot
- figuur 3 Kunstvegetatie *Egeria densa*
- figuur 4 Details van het vegetatiepatroon
- figuur 5 Overzicht van het schakelschema van alle meetinstrumenten
- figuur 6 Schematisch zijaanzicht van de plaatsing van de instrumenten in de goot
- figuur 7 De sedimentatiebalans

I Inleiding

Dit project is gebaseerd op de offerteaanvraag van RIZA, d.d. 9 maart 1998, referentie WST98.039. De inhoud is aangepast naar aanleiding van nader overleg op donderdag 2 april 1998. Opdrachtverlening volgens contract RI-2454(A) op 3 augustus 1998. Projectleider bij RIZA is de heer E. Houwing. Dit rapport omvat onderdelen 1 en 2.1 van het project.

Uit waarnemingen in meren wordt duidelijk dat onderwatervegetatie een sterk effect kan uitoefenen op transport, sedimentatie en resuspensie van slib. Echter, van de onderliggende processen is nog weinig bekend. Door de geringe stroming in meren ($< 10\text{cm/s}$) zijn veldmetingen moeilijk en is experimenteel onderzoek uitermate geschikt.

Bij WL is een bestaande experimentele faciliteit (getijgoot) ingericht voor het uitvoeren van fysisch-biologische proeven. In opdracht van RIZA is in 1997 gestart met een pilot-studie rond de interactie van submerse vegetatie en fysische processen (opdrachten 27420 / WST en 27776 / WST). Tot dan toe werden de hydraulische processen bestudeerd en werd slib vooralsnog buiten beschouwing gelaten. In dit rapport wordt een serie experimenten beschreven waarmee in 1998 Slibgedrag in relatie tot submerse vegetatie in detail is bestudeerd.

De in 1998 uitgevoerde experimenten hebben plaats gevonden in de getijgoot in de Zout-Zoet hal op het terrein van WL | DELFT HYDRAULICS. De getijgoot is een 130 meter lange goot waarin getij kan worden gesimuleerd en bestaat uit een smal deel (rivier) en een breed deel (zee). Door circulatie van het water naar het begin van de goot terug, wordt een *stroomgoot* gecreëerd. In deze goot is over een lengte van 6m een strook met kunstmatige vegetatie aangelegd. Diverse metingen leggen de invloed van de vegetatie op stroming, stroomsnelheid en sedimentatie/erosieprocessen vast. De getijgoot heeft (nog) geen mogelijkheid om golven op te wekken. De experimenten beslaan een periode van ongeveer 6 maanden met als startdatum 1 mei 1998.

Doelstellingen van het project

Het project is bedoeld om inzicht te verschaffen in de volgende aspecten:

- Optimalisatie van de experimentele opstelling en de uit te voeren experimenten teneinde een maximale beïnvloeding van te beschouwen processen te bewerkstelligen in relatie tot de te gebruiken typen sediment op basis van ervaringen uit de voorafgaande experimenten.
- Analyse van bestaande veldsituatie voor kwantificering van kentallen die de interactie tussen fysische processen en waterplantenvelden beschrijven. Analyse van de experimentele opstelling voor een zo natuurlijk mogelijke hydrodynamische situatie door variatie in dichtheid en opstelling van het waterplantenveld.
- Analyse van sedimentatie en resuspensie processen in een serie experimenten waarvan de graad van complexiteit stap voor stap wordt verhoogd.

Definitie van empirische of deterministische relaties die beschrijven hoe de fysische processen worden beïnvloed in en rond een waterplantenveld. Vaststelling van het begrip turbulentie in relatie tot 'dichtheid' en 'weerstand' van het veld neemt hier een belangrijke plaats in.

Organisatie

Bij de experimenten zijn de volgende personen betrokken:

- Mindert de Vries (projectleider);
- Ilka Tánzos (experimentator);
- Kees Koree (meettechnicus, projectleider metingen)
- John Cornelisse (inhoudelijk advies)
- Han Winterwerp (inhoudelijk advies)
- John Coolegem (assistent experimentator)

Opzet van de rapportage

In dit rapport wordt de meetmethode plus onderbouwing daarvan beschreven en wordt een analyse gemaakt van uitgangspunten in relatie tot de resultaten van voorafgaande experimenten en de veldsituatie. In het hierna volgende rapport worden de meetresultaten en de resultaten van de modellering besproken.

2 Meetopzet om de interactie tussen onderwatervegetatie en slibconcentraties te meten

2.1 Inleiding

Onderwatervegetatie beïnvloedt de helderheid van het water; boven een begroeide bodem is het water helderder dan boven een onbegroeide bodem. In de randmeren zoals bijvoorbeeld het Veluwemeer is dit goed te zien. In de experimenten, beschreven in dit rapport wordt gekeken naar mogelijke fysische verklaringen voor dit verschijnsel. Het doel is te onderzoeken hoe onderwater planten de hydraulica beïnvloeden en wat de gevolgen daarvan zijn voor de helderheid van het water.

Eind 1997 en begin 1998 zijn er proeven gedaan om het effect van onderwatervegetatie op de stroomsnelheid van het water te meten. Uit deze proeven kwam duidelijk naar voren dat in het plantenveld de snelheid snel afneemt tot bijna nul terwijl boven en naast de planten het water sneller gaat stromen. Dit betekent dat er tussen de planten veel minder sediment zal worden opgewoeld dan buiten het plantenveld.

In dit vervolg experiment ligt het accent op de (mogelijk) verhoogde sedimentatie van het slib boven het plantenbed. Dit kan een belangrijk proces zijn doordat de aanwezigheid van planten de stromings eigenschappen zo verandert dat het slib makkelijker sedimenteert.

Slib concentratie profielen over de diepte zullen worden gemeten door kunstslib (kaolinet) aan het water toe te voegen. Daarnaast zullen de gemiddelde stroomsnelheid en de turbulentie intensiteit van de stroming worden gemeten. Met deze twee gegevens zullen concentratie profielen worden berekend. Door de gemeten en berekende profielen met elkaar te vergelijken wordt inzicht verkregen in de van belang zijnde processen. Alle metingen zullen worden gedaan met een uniforme stroming. Hierbij worden golven dus buiten beschouwing gelaten.

3 Achtergrond

3.1 Inleiding

Helder water betekent dat er weinig deeltjes in rond zweven. De concentratie van materiaal in suspensie is dus lager boven een waterplantenveld dan wanneer er geen waterplanten op de bodem groeien. Hoeveel materiaal er in suspensie kan worden gehouden hangt af van de turbulentie intensiteit van de stroming, de vrije waterhoogte boven en tussen de plantjes en de bezinkingssnelheid van het materiaal. Daarnaast is het ook nog van belang hoeveel materiaal er wordt opgewoeld van de bodem (resuspensie/erosie). Dit laatste aspect zal in dit experiment echter buiten beschouwing worden gelaten.

3.2 Turbulentie

Turbulentie is de min of meer chaotische beweging van water. Het heeft de vorm van vortex bewegingen met verschillende tijd- en ruimteschalen. Om een turbulente stroming goed te kunnen meten moet je met de juiste frequentie bemonsteren om de relevante structuren te kunnen zien. Daarnaast moet er lang genoeg gemeten worden voor voldoende statistiek.

In een turbulente stroming kan een snelheid $u(t, x)$ worden geschreven als:

$$u(t, x) = u_{\text{gem}}(x) + u'(t, x),$$

waarbij $u_{\text{gem}}(x)$ de gemiddelde snelheid is en $u'(t, x)$ de tijdafhankelijke, fluctuerende component is.

De turbulentie intensiteit is gedefinieerd als de standaard deviatie of de 'root mean square' waarde van de snelheid. De turbulente kinetische energie k is gedefinieerd als de som van de variaties in alle drie de richtingen

$$k = 1/2(u'^2 + v'^2 + w'^2)$$

De "mengcapaciteit" van de stroom is het product van de turbulentie intensiteit en de afmetingen van de turbulente structuren. Beide worden beïnvloed door de aanwezigheid van de planten. De grootte van de turbulente structuren hangt af van de waterdiepte; dicht bij de oppervlakte en de bodem zullen de typische lengteschalen veel kleiner zijn dan in het midden van de stroming. In het plantenveld zal de afstanden tussen de stengels een beperking van de maximale grootte opleveren.

Hoeveel slib door de stroom in suspensie kan worden gehouden is een combinatie van de "mengcapaciteit" en de valsnelheid van het slib. Deze laatste parameter hangt onder meer af van de zuurgraad en het chloride gehalte van het water.

4 Experimentele opzet

4.1 Beoogde doelen van het experiment

Met in gedachten de boven beschreven achtergronden willen we met dit experiment antwoord geven op de volgende vragen:

1. Hoe beïnvloedt een waterplantenveld het turbulente karakter van een stroming?
2. Hoe beïnvloedt het plantenbed de concentratie profielen van kaoliniet?
3. Hoe verhoudt de valsnelheid van kaoliniet (eventueel met de toevoeging van flocculanten) zich tot die van natuurlijk slib? Hierbij moet rekening worden gehouden met de zuurgraad en het chloride gehalte van het water.

Welke parameters zijn van belang om gemeten concentratie profielen te kunnen berekenen/modelleren?

4.2 Opzet van de metingen

Het experiment bestaat uit 3 delen bestaan:

1. Het meten van snelheids- en turbulentie-profielen over de diepte in en buiten een plantenveld;
2. Het meten van de concentratieprofielen van kaoliniet; en
3. Het bepalen van de valsnelheid van het kaoliniet en het natuurlijke slib.

Met de resultaten van onderdeel 1 en 3 zullen er concentratie profielen voor het kaoliniet worden berekend met een model. Deze zullen worden vergeleken met de gemeten profielen.

Om de invang efficiëntie voor slib van het planten bed te bepalen zal ook de concentratie gradiënt in de lengte richting voor, over en na het plantenbed worden gemeten.

De reden dat de onderdelen 2 en 3 apart worden gemeten is van technische aard. Op het moment dat er slib in de goot wordt gebracht zal er dag en nacht doorgedraaid moeten worden om bezinken te voorkomen. Vanwege de daaruit voortvloeiende logistieke complicaties is er voor gekozen om de metingen waarbij slib wordt gebruikt tot een minimum te beperken.

4.2.1 Slibconcentraties en stroomsnelheden

Om slib in suspensie te houden is er voldoende turbulentie intensiteit nodig en dus een voldoende hoge stroomsnelheid. Typische stroomsnelheden zoals in de randmeren voorkomen liggen tussen 5 en 10 cm s⁻¹. De slibconcentraties zoals gemeten in het Markermeer variëren tussen 10 en 100 mg .L⁻¹ met gemiddelde waarden van ongeveer 40 mg .L⁻¹ (Slingerland, 1995).

In Winterwerp (1998) wordt een relatie gegeven tussen de diepte gemiddelde maximum sediment concentratie die een stroming van “de grond kan houden” en parameters zoals de stroomsnelheid, diepte en valsnelheid van het sediment. Uitgaande van een valsnelheid van het kaoliniet $w_{s=0.1} = 0.1 \text{ mm s}^{-1}$ blijkt dat bij een stroomsnelheid van 5 cm s^{-1} ongeveer 50 mg L^{-1} in suspensie kan worden gehouden. Voor 10 cm s^{-1} is dit ongeveer 350 mg L^{-1} .

Om er zeker van te zijn dat er concentratieverschillen te meten zullen zijn is er gekozen voor een kaoliniet concentratie van 200 mg L^{-1} en stroomsnelheden van $5, 10$ en 20 cm s^{-1} . Hierbij is moet de laatste gezien worden als een extreme waarde. Hierbij is ook rekening gehouden met de nauwkeurigheid van de instrumenten (zie hoofdstuk 4).

De gekozen kaoliniet concentratie is hoger dan over het algemeen wordt gevonden in de randmeren maar het voordeel is dat er in het geval van de laagste stroomsnelheid in ieder geval een effect zal worden gemeten.

4.2.2 Lengte onderwatervegetatie

De gekozen waterdiepte (80 cm) en plantlengte (50 cm) zijn typisch voor de randmeren. In de Gouwzee komen er zelfs planten voor op een waterdiepte van zo'n 2m. De vrije waterhoogte is dan 150cm.

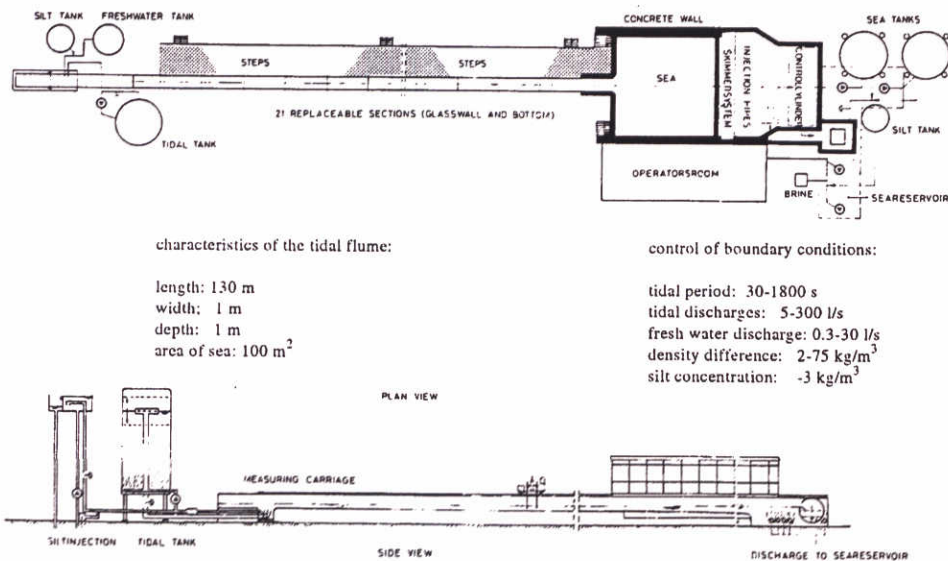
4.2.3 Zuurgraad en chloride gehalte

Het experiment zal worden uitgevoerd met gewoon ‘leidingwater’ met een constante PH-waarde. Deze ligt in de buurt van 7. Er zal geen chloride worden toegevoegd.

5 Faciliteiten en meetinstrumenten

5.1 Getijgoot

Als basis voor dit experiment dient de getijgoot in de Zout-Zoet hal, op het terrein van WL | DELFT HYDRAULICS, zie figuur 1.



Figuur 1: De getijgoot in de Zout-Zoet hal

De getijgoot is als experimentele faciliteit in 1985 in gebruik genomen. Bestaande uit een 'rivierdeel' en een 'zeedeel'. Mogelijk onderzoek betreft: inhomogene waterbeweging, turbulentie en menging en horizontale en verticale transporten o.i.v. stroming en/of (in)homogene getijbeweging. De lengte bedraagt 130m en de zowel (interne) breedte en maximale waterhoogte zijn vastgesteld op 1m. Aan de rivierzijde zijn de volgende randvoorwaarden in te stellen: rivierafvoer; wisseldebiet en slibconcentratie. Onder permanente omstandigheden geldt alleen het debiet als randvoorwaarde. Slibinjectie moet op ad hoc basis worden aangebracht.

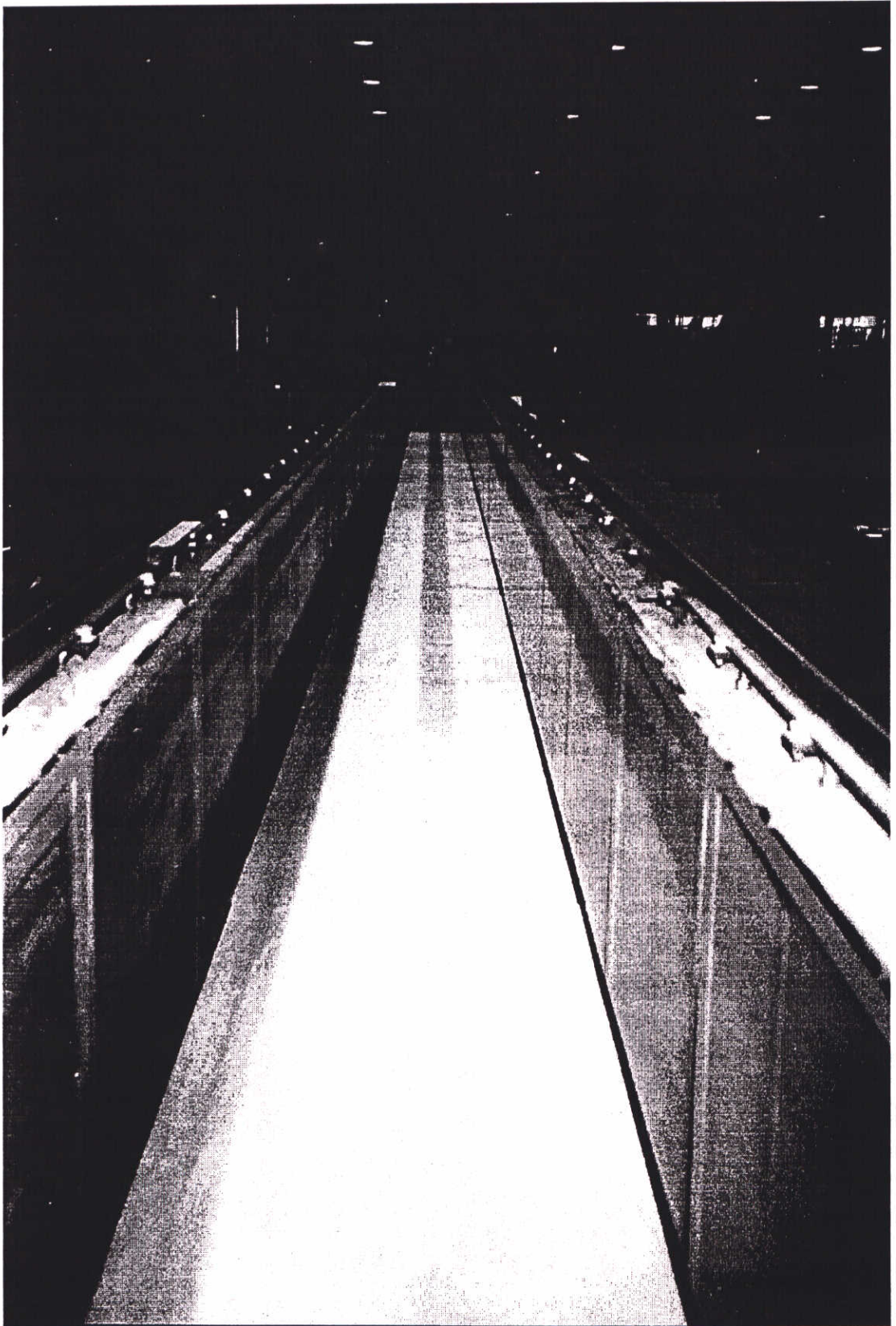
Op een verrijdbare meetwagen kunnen de meetinstrumenten over de volledige gootlengte worden verplaatst en gebruikt. De meetwagen is d.m.v. 'navelstreng' verbonden met de meetcabine, waar instrumenten worden aangestuurd en data wordt opgeslagen.

Indien de goot als recirculatiesysteem wordt gebruikt (stroomgoot: in dit geval) wordt het slibwatermengsel naar het begin van de goot verpompt. In dit geval is de goot met een schot afgesloten van de modelzee. Stationaire omstandigheden kunnen hierbij goed worden nagebootst (WL, 1994).

Het debiet (=stroomsnelheid) wordt geregeld met twee pompen met elk een maximum pompsnelheid van ongeveer 140 L/s. Met de cylinder kan de waterstand in de goot worden afgesteld.

In een slibtank wordt een homogeen slibmengsel aangemaakt wat gecontroleerd in de goot wordt ingebracht. Op deze manier kan tijdens het experiment de slibconcentratie aan de bovenstroomse kant van de goot constant worden gehouden.

Onderstaande figuur geeft een beeld van de nog lege getijgoot.

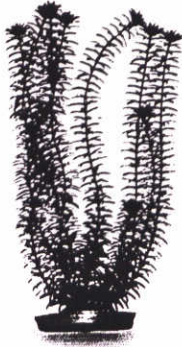


Figuur 2. Overzicht van de lege getijgoot

5.2 Kunstmatige vegetatie

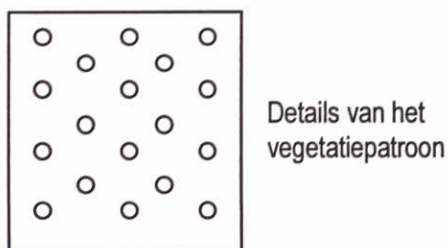
De kunstmatige vegetatie is van het merk *AQUASCAPERS* en is afkomstig van het AB-DLO te Wageningen. Ze zijn van het type *Anacharis (Egeria densa)*, een op waterpest lijkende Submerse waterplant. De kunstmatige waterplanten bestaan uit segmenten van 10 centimeter. Lengte en dichtheid (aantal stengels per plant) zijn dus te variëren.

Figuur 3 geeft een indruk van deze soort waterplant.



Figuur 3: Kunstvegetatie *Egeria densa*

De vegetatie wordt op CEMPANEL platen bevestigd (middels kleine gaatjes). Een CEMPANEL-plaat is een houtvezelboard verzwaaard (geperst) met cement waarvan de dichtheid groter is dan die van water. De platen hebben elk een lengte van 2.6 meter. Op één derde van het begin van de goot worden de drie kale platen gelegd, vervolgens vier platen met vegetatiegaatjes en tot slot wederom platen drie zonder vegetatie. De kale platen zijn bedoeld om over de platen, alvorens de vegetatie te bereiken een zo gelijkmatig mogelijke stroming te creëren.



Figuur 4: Details van het vegetatiepatroon

5.3 Kunstslib

Er zal gemeten worden met een soort Kaoliniet. Er is gekozen voor Chinese Klei omdat daar al de nodige ervaring mee is opgedaan binnen het WL. Het heeft een vrij uniforme korrelgrootte verdeling en bestaat voornamelijk uit fijne korrels (tot 5 μm). Indien nodig kan deze, door het toedienen van chemicaliën die het flocculeren bevorderen, nog worden veranderd.

5.4 Meetinstrumenten

De volgende meetinstrumenten zijn bij het experiment gebruikt:

- 5 Watervolgers (WAVO)
- 4 Electromagnetische snelheidsmeters (EMS),
- 5 Optische slibmeters (OSLIM).

Hieronder worden de instrumenten nader besproken.

WAVO

Langs de getijgoot bevinden zich waterstandsvolgers die met een nauwkeurigheid van 0.1 mm de lokale waterstand in de goot volgen. De opnemers kunnen alleen langzame waterstandsveranderingen volgen en zijn daarmee ongeschikt om oppervlaktegolven vast te leggen. Door middel van een diamanten naald wordt met een frequentie van 50 Hz contact gehouden met het wateroppervlak. Is er teveel contact dan wordt de opnemer m.b.v. een motor omhoog gehaald. Bij te weinig contact wordt deze gevierd.

EMS

De EMS is een *electro magnetische snelheidsmeter*. Deze meter meet de snelheid van een geleidende vloeistof door een magnetisch veld. Dit magnetische veld wordt geïnduceerd door een kleine, gepulseerde stroom door de ellipsvormige sensor (probe). Twee paren platina, recht tegenover elkaar opgestelde elektrodes meten de inductie veroorzaakt door de waterstroming onder de sensor.

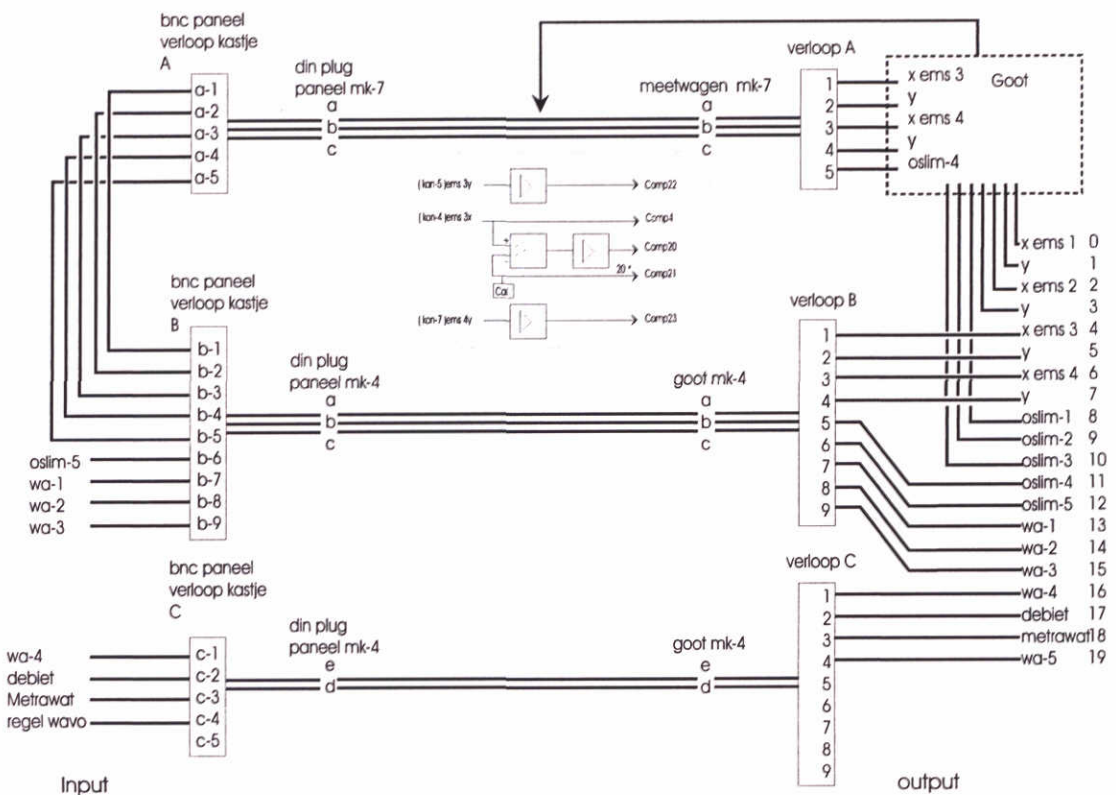
Het bereik is 0-1 m/s en de onnauwkeurigheid is maximaal 1.5 cm/s.

Van de 4 gebruikte EMS-sen zijn er twee aan de meetkar bevestigd. De zogenaamde "haakse EMS" meet de stroomsnelheid in het verticale vlak, de *u*- en *w*-component. De tweede "normale" EMS op de meetwagen meet in het horizontale vlak, de *u*- en *v*-component. De overige twee "normale" EMS-sen zijn voor en achter het plantenveld geplaatst op een vaste hoogte. Beide meten de *u*- en *v*-component.

Om de turbulentie intensiteit zo goed mogelijk te meten worden de uitgangssignalen van de EMS versterkt. Daarvoor wordt van het x-signaal (u) eerst de gemiddelde waarde afgetrokken door middel van een calibrator (zie figuur 5). Op deze wijze kan het gehele meetbereik zo optimaal mogelijk worden gebruikt voor het meten van de turbulentie (fluctuaties).

Om te zorgen dat er zo weinig mogelijk storingen in de metingen met de EMS zullen optreden is er een aantal maatregelen genomen:

1. Aan het begin en einde van de goot zijn twee ijzeren platen op de bodem gelegd. Deze platen zijn met elkaar en de aarde verbonden. Daarnaast is het gedeelte van de goot waarin wordt gemeten kortgesloten.
2. Het uitgangssignaal van iedere EMS wordt gefilterd.



Figuur 5: Overzicht van het schakelschema van alle meetinstrumenten

OSLIM

Een OSLIM meet de verandering in de lichtsterkte van een lichtstraal als gevolg van absorptie en weerkaatsing aan slibdeeltjes. Deze verandering is een functie van de slibconcentratie. Het apparaat heeft een bereik van 0-30 g/L en een onnauwkeurigheid van ongeveer 10%.

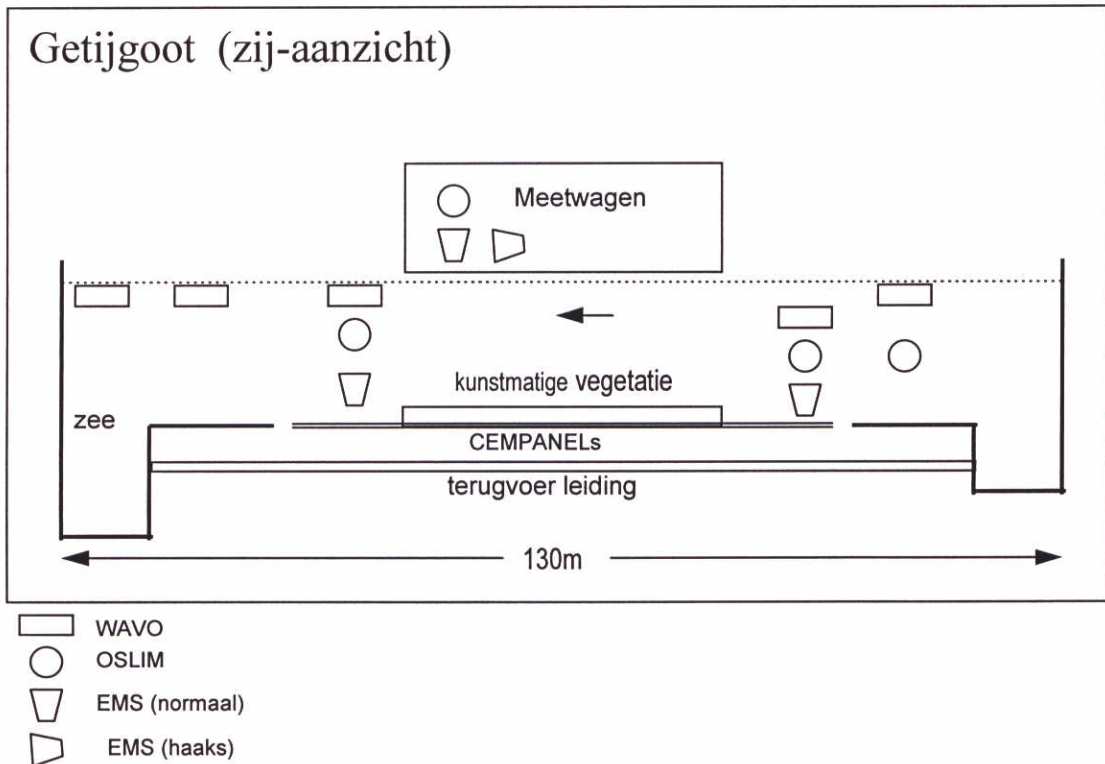
Naast bovenstaande metingen zijn de volgende aspecten relevant, dit zijn de zogenaamde *standaardmetingen (STM)* die bij elk experiment van belang zijn:

- waterdiepte ter plaatse (peilnaalden);
- debiet (debietmeters);

In tabel 2 en figuur 6 staat een schematisch overzicht van de plaatsing van de instrumenten in de goot.

Meetinstrument	Aantal	Plaatsing t.o.v. waterplantenveld
EMS	4	1 - voor (referentie, vast) 2 - achter (referentie, vast) 3- in/boven/naast (meetwagen) 4. idem
WAVO	4	1 - voor de platen, voor de planten 2 - boven de platen, voor de planten 3 - boven de platen, achter de planten 4 - achter de platen, achter de planten
OSLIM	4	1 - voor (referentie, vast) 2 - achter (referentie, vast) 3 - in/boven/naast (meetwagen) 4 - in slibinjectie circuit
Debietmeter	1	in leidingensysteem getijgoot
Peilnaalden	2	1 - begin van de goot 2 - einde van de goot

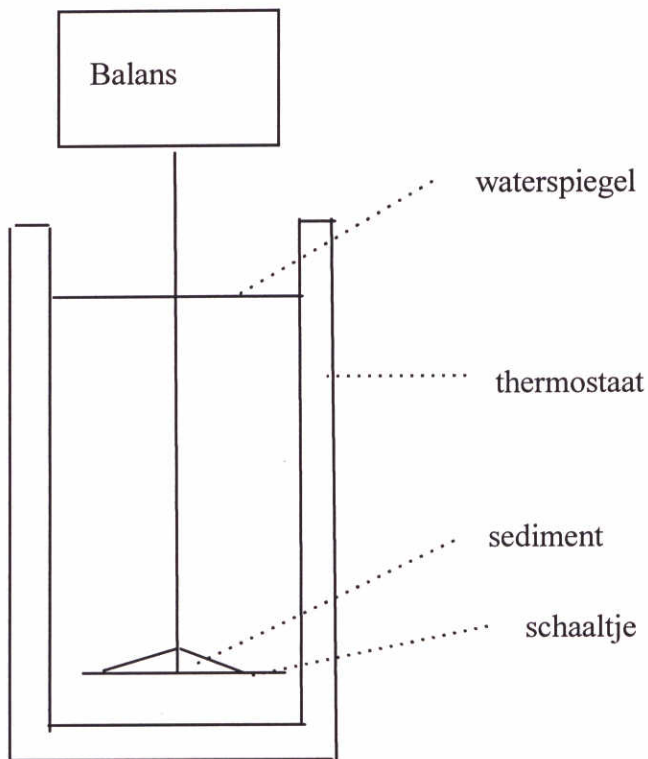
Tabel 2: Meetinstrumenten: aantallen en plaatsing



Figuur 6 Schematisch zijaanzicht van de goot en de plaatsing van de instrumenten.

5.4.1 De sedimentatiebalans

De sedimentatiebalans (zie figuur 7) meet het gewicht van het sediment wat op het schaalte onderin de kolom valt. Vanwege de gevoeligheid voor temperatuur schommelingen wordt de kolom op een constante temperatuur gehouden



Figuur 7 De sedimentatiebalans

6 Geplande metingen

In onderstaande tabel wordt een overzicht gegeven van de geplande proeven. De afzonderlijke experimenten zullen in het vervolg van dit rapport in een apart hoofdstuk besproken worden.

#	Experiment	Meting	Doel
I	Turbulentiemeting in standaard beplante goot met variatie in stroomsnelheid en plantendichtheid	debiet, EMS WAVO, STM	Meting van de verandering stroomsnelheid en mate van turbulentie door invloed vegetatie en stroomsnelheid
II	Standaard beplante goot met variatie in stroomsnelheid met toediening van kaoliniet	debiet, EMS WAVO, STM OSLIM	Meting van de verandering van vertikaal slibprofiel door invloed vegetatie en stroomsnelheid
III	Bepaling valsnelheid met sedimentatiebalans	Sedimentatie- balans	Meting van valsnelheid van natuurlijke slibdeeltjes en van kaoliniet.

Tabel 2: Proevenprogramma

6.1 Deel I; Turbulentiemetingen

Korte beschrijving van de metingen

Er wordt gewerkt met een plantenbed van 3 m lang over de volledige breedte in het midden van de goot (van $x=56-59$ m). Het water is helder zonder slib. Met een normale en een haakse EMS worden de snelheden in de x-, y- en z-richting gemeten op verschillende locaties en hoogtes (in en buiten het plantenbed).

Doel van de metingen

Het doel van de metingen is het effect van het plantenbed op de turbulentie intensiteit en de gemiddelde stroomsnelheden te bepalen. In combinatie met de valsnelheid van het slib kan d.m.v. een model een voorspelling worden gemaakt over de suspensie profielen in en buiten het plantenbed.

Meetcondities

- Stroomsnelheden: 5, 10 en 20 cm/sec.
- Planten: lengte = 50 cm, 6 stelen per plant
- Plaatsing: van $x=56$ to $x=59$ in de volgende configuraties

1. Rijen 10 cm van elkaar, om de 10 cm een plant, per rij 5cm verspringend (standaard),
 2. Rijen 10 cm van elkaar, om de 20 cm een plant, per rij 10 cm verspringen,
 3. Zonder planten
- Er zal op 4 locaties een profiel worden gemeten (ongeveer om de 10-20 cm in de verticaal):
 1. 2 m stroomopwaarts van de planten (x=61 m)
 2. 0 m " (x=59 m)
 3. 0.5 m in het plantenbed (x=58.5)
 - 2 m in het plantenbed (x=57 m)

Meetschema

In de onderstaande tabel staan de geplande metingen samengevat.

Plant dichtheid	1	2	0
stroomsnelheid	5, 10, 20	5, 10, 20	5, 10, 20
locaties	1-4	1-4	2

6.2 Deel II; Metingen met slib

Korte beschrijving van de metingen

Er wordt gewerkt met een zo lang mogelijk plantenbed over de volledige breedte van de goot (ongeveer 6 m). In het water zal een kaoliniet-concentratie van 200 mg/L worden gebracht. Met de OSLIMS's worden suspensie profielen gemeten op dezelfde locaties als boven genoemd. Daarnaast zal er ook worden gekeken naar het verschil in hoeveelheid gesuspendeerd sediment voor en achter het plantenbed.

Doel van de metingen

Het meten van de invloed van het plantenveld op de concentratie profielen. De gemeten profielen zullen uiteindelijk worden vergeleken met berekende profielen. Op deze wijze kan inzicht worden verkregen in de van belang zijnde parameters voor modellering.

Meetcondities

- Stroomsnelheden: 5, 10 en 20 cm/sec.
- Planten: lengte = 50 cm, 6 stelen per plant
- Plaatsing: van x=51.5 to x=57.5 in de volgende standaard configuratie
 1. Rijen 10 cm van elkaar, om de 10 cm een plant, per rij 5cm verspringend,
- Er zal op 4 locaties een profiel worden gemeten (ongeveer om de 10-20 cm):
 1. stroom opwaarts van de planten (x=61 m)
 2. in het plantenbed (x=56 m)
 3. in het plantenbed (x=54)
 4. in het plantenbed (x=52 m)

Meetschema

In onderstaande tabel worden de metingen van deel II samengevat.

Plant dichtheid	1
stroomsnelheid	5, 10 ,20
locaties	1-4

6.3 Deel III; Valsnelheid bepalen

Doel van de metingen

De valsnelheid van slib zal afhangen door de zuurgraad en chloride gehalte van het water. Deze beïnvloeden namelijk de flocculatiegraad van het slib. Het bepalen van de bezinkingssnelheid zal dan ook gebeuren bij een gemiddelde PH-waarde en verschillende chloride concentraties. De Ph waarde is die van leidingwater omdat daar ook mee is gemeten in de goot. De chloride gehalten omvatten de gehele range van waarden zoals gemeten in de Nederlandse Randmeren (Slingerland, 1995).

Meetopstelling

Er zal gemeten worden met een sedimentatie balans. Door de tijd te meten die het slib nodig heeft om naar de bodem te zinken wordt de bezinkings snelheid bepaald.

Meetschema

In de onderstaande tabel staan de geplande metingen samengevat.

	Gootsysteem 0 mg/l	pH=7 50mg/l	pH=7 100 mg/l	pH=7 300 mg/l
Kaoliniet	x			
Natuurslib	x	x	x	x

7 Vergelijking met veldsituatie

De meetopstelling is een benadering en niet een exacte simulatie van de veldsituatie. Op een aantal punten komt de opstelling goed overeen maar er is ook een aantal belangrijke verschillen.

Een belangrijk verschil is dat de plantjes over de hele breedte van de goot staan. Het water met slib zal nu door of over het planten veld moeten en kan er niet langs. In werkelijkheid kan dit natuurlijk wel maar er is toch gekozen voor deze opzet omdat:

1. het doel van het experiment is het bestuderen van de 'invangprocessen' en niet om de werkelijkheid te simuleren,
2. het de 'invang-efficiëntie voor het slib vergroot,
3. de analyse van de meetgegevens eenvoudiger wordt.
4. het grensvlak van een grootschalig plantenveld door water ook als een 1D obstakel kan worden aangestroomd.

Het slib wordt aan de bovenstreamse kant in de goot gebracht met een constante concentratie. Deze concentratie is ongeveer gelijk over de volledige waterkolom. In werkelijkheid ligt het slib op de bodem en zal opgewoeld worden wanneer de schuifspanningen daar groot genoeg zijn. Een dergelijke situatie is echter zeer complex en moeilijk na te bootsen. Bij dit experiment gaat het om de sedimentatie van het slib en niet om de resuspensie.

In dit verband is ook de afwezigheid van golven van belang. Deze zullen zeker invloed hebben op de resuspensie van sediment, met name in ondiep water. Omgekeerd geldt echter ook dat de aanwezigheid van waterplanten een dempende werking heeft op golven.

Het chloride gehalte van de Nederlandse randmeren varieert sterk in de tijd en per meer. In het Drontermeer b.v., worden in de winter waarden van 50 mg/l (1995, 1996) en 150 mg/l (1992) gemeten en in de zomer 200-250 mg/l (1992). Winterwaarden voor het Veluwe meer zijn 100 en 150 mg/l terwijl in de zomer 200 en 250 mg/l wordt gemeten (Slingerland, 1995).

Literatuur

- WL | DELFT HYDRAULICS, 1997. Interactie van submerse vegetatie en fysische processen, verslag van de experimenten (Z2328, WL | DELFT HYDRAULICS, Delft, april 1998.
- WL | DELFT HYDRAULICS, 1997. *Interactie van Submerse vegetatie en fysische processen: literatuurstudie* (Z2328), WL | DELFT HYDRAULICS, Delft, december 1997.
- T. Slingerland; 1995; *Ecologisch informatie systeem IJsselmeer*; Werkdocument; RIZA; Lelystad.
- J.C Winterwerp, R.E.Uittenbogaard en J.M de Kok; 1998; *Rapid siltation from saturated mud suspensions*; paper voor INTERCOH'98, DRAFT VERSIE, augustus 1998.

Interactie van Submerse Vegetatie en Fysische Processen, 1998; Rapport II

Resultaten van de experimenten met
kunstplanten

I. Tánczos

januari 1999

Inhoud

Lijst van Figuren

1	Inleiding	1-1
2	Analyse	2-1
2.1	Turbulente menging.....	2-1
2.2	Verticaal transport van slib.....	2-2
3	Snelheidsmetingen	3-1
3.1	Inleiding.....	3-1
3.2	Resultaten.....	3-1
3.2.1	Effectieve plantlengte.....	3-1
3.2.2	Metingen zonder planten in de goot.....	3-2
3.2.3	Metingen met hoge plantdichtheid.....	3-3
3.2.4	Metingen met lage plantdichtheid.....	3-5
3.3	Conclusies.....	3-6
4	Metingen met Slib	4-1
4.1	Analyse van de OSLIM metingen.....	4-1
4.2	Resultaten.....	4-1
4.3	Conclusies.....	4-2
5	Valsnelheidsbepalingen	5-1
5.1	Inleiding.....	5-1
5.2	Analyse van de sedimentatie balansmetingen.....	5-1
5.3	Resultaten.....	5-2
5.4	Conclusies.....	5-3
6	Discussie en conclusies	6-1
	Literatuur	Lit.-1

Lijst van Figuren

- 3.1 De twee gebruikte beplantingsdichtheden
- 3.2 Gemiddelde snelheden, geen planten
- 3.3 Turbulente intensiteit en kinetische energie, geen planten
- 3.4 Berekende turbulente snelheden, aanstroomsnelheid is 10 cm s^{-1} , geen planten
- 3.5 Turbulente energie spectra, geen planten
- 3.6 Turbulente mengcoëfficiënten, geen planten
- 3.7 Gemiddelde snelheden, aanstroomsnelheid is 5 cm s^{-1} , hoge plantdichtheid
- 3.8 Gemiddelde snelheden, aanstroomsnelheid is 10 cm s^{-1} , hoge plantdichtheid
- 3.9 Gemiddelde snelheden, aanstroomsnelheid is 20 cm s^{-1} , hoge plantdichtheid
- 3.10 Turbulente intensiteit en kinetische energie, aanstroomsnelheid is 5 cm s^{-1} , hoge plantdichtheid
- 3.11 Turbulente intensiteit en kinetische energie, aanstroomsnelheid is 10 cm s^{-1} , hoge plantdichtheid
- 3.12 Turbulente intensiteit en kinetische energie, aanstroomsnelheid is 20 cm s^{-1} , hoge plantdichtheid
- 3.13 Dimensieloze turbulente kinetische energieën, hoge plantdichtheid.
- 3.14 Turbulente mengcoëfficiënten, aanstroomsnelheid is 5 cm s^{-1} , hoge plantdichtheid
- 3.15 Turbulente mengcoëfficiënten, aanstroomsnelheid is 10 cm s^{-1} , hoge plantdichtheid
- 3.16 Turbulente mengcoëfficiënten, aanstroomsnelheid is 20 cm s^{-1} , hoge plantdichtheid
- 3.17 Dimensieloze turbulente mengcoëfficiënten, hoge plantdichtheid
- 3.18 Gemiddelde snelheden, aanstroomsnelheid is 5 cm s^{-1} , lage plantdichtheid
- 3.19 Gemiddelde snelheden, aanstroomsnelheid is 10 cm s^{-1} , lage plantdichtheid
- 3.20 Gemiddelde snelheden, aanstroomsnelheid is 20 cm s^{-1} , lage plantdichtheid
- 3.21 Turbulente intensiteit en kinetische energie, aanstroomsnelheid is 5 cm s^{-1} , lage plantdichtheid
- 3.22 Turbulente intensiteit en kinetische energie, aanstroomsnelheid is 10 cm s^{-1} , lage plantdichtheid
- 3.23 Turbulente intensiteit en kinetische energie, aanstroomsnelheid is 20 cm s^{-1} , lage plantdichtheid
- 3.24 Dimensieloze turbulente kinetische energie, lage plantdichtheid
- 3.25 Turbulente mengcoëfficiënten, aanstroomsnelheid is 5 cm s^{-1} , lage plantdichtheid
- 3.26 Turbulente mengcoëfficiënten, aanstroomsnelheid is 10 cm s^{-1} , lage plantdichtheid
- 3.27 Turbulente mengcoëfficiënten, aanstroomsnelheid is 20 cm s^{-1} , lage plantdichtheid
- 4.1 Kaoliniet concentratie profielen, aanstroomsnelheid is 5 cm s^{-1} , hoge plantdichtheid
- 4.2 Kaoliniet concentratie profielen, aanstroomsnelheid is 10 cm s^{-1} , hoge plantdichtheid
- 4.3 Kaoliniet concentratie profielen, aanstroomsnelheid is 20 cm s^{-1} , hoge plantdichtheid
- 4.4 Gemiddelde snelheden en turbulente kinetische energie zoals gemeten tijdens de slibconcentratieproeven
- 4.5 Gemeten kaoliniet concentraties als functie van gemiddelde snelheid en turbulente kinetische energie
- 5.1 Voorbeeld van een gewichtscurve gemeten met de sedimentatie balans
- 5.2 Valsnelheden voor kaoliniet en slib

I Inleiding

In dit rapport zullen de resultaten van de metingen naar het effect van onderwatervegetatie op slibconcentraties worden besproken. De directe aanleiding is de waarneming dat in de randmeren de helderheid van het water veel hoger is boven een planten veld dan daarbuiten. De opzet en achtergrond van deze metingen zijn beschreven in deel I van deze rapportage. Voor een beschrijving van de opstelling en de gebruikte meetapparatuur zal dan ook daarna worden verwezen. Door een aantal technische problemen zijn de metingen soms iets anders uitgevoerd dan in eerste instantie was bedacht. Dit heeft echter niet geleid tot een aanpassing van de doelstellingen.

Slib wordt in suspensie gehouden door de turbulente bewegingen van het stromend water. De aanwezigheid van onderwatervegetatie zal deze turbulentie beïnvloeden en daarmee dus de slibconcentraties. Daarnaast zal door de aanwezigheid van onderwaterplanten de resuspensie van sediment worden bemoeilijkt (WL | DELFT HYDRAULICS, 1997). Het experiment waarvan de resultaten zijn beschreven in dit rapport heeft tot doel de effecten van de vegetatie op de turbulente menging te bestuderen; welke parameters zijn van belang en hoe groot is het effect?

De metingen zijn uitgevoerd met gebruik van kunstmatige vegetatie en kaoliniet. Zij omvatten drie delen:

1. Snelheids- en turbulentiemetingen in de Getijgoot,
2. Kaoliniet concentratiemetingen in de Getijgoot,
3. Valsnelheidsbepalingen van kaoliniet en echt slib in de sedimentatie balans.

Het derde onderdeel is van belang om de meetresultaten van de eerste twee onderdelen te kunnen vertalen naar de veldsituatie. De resultaten zullen worden gebruikt om die parameters te identificeren en te kwantificeren om tot een zo goed mogelijke modellering van "het effect" te komen.

In hoofdstuk 2 zullen eerst de gebruikte analyse technieken worden geïntroduceerd. Daarna zullen in de hoofdstukken 3-5 de resultaten van de onderdelen I, II en III van het experiment worden besproken. Hoofdstuk 6 bevat een algemene discussie en conclusies van het gehele experiment. Hier zal ook de betekenis van de resultaten voor de veldsituatie worden besproken.

2 Analyse

In dit hoofdstuk zullen de gebruikte analyse technieken worden beschreven. Turbulentie is geen eenvoudige materie. Dit rapport zal zich slechts beperken tot het noemen van de dingen die van belang zijn voor het begrijpen van de verkregen resultaten. Voor een meer diepgaande discussie over turbulentie wordt verwezen naar de genoemde referenties

2.1 Turbulente menging

Een stroomsnelheid V in een turbulente stroming is te schrijven als:

$$V = V_{gem} + V_{fluc}$$

V_{gem} de gemiddelde snelheid is en V_{fluc} het fluctuerende gedeelte. De turbulente intensiteit V' [$m\ s^{-1}$] is dan gedefinieerd als:

$$V' = \sqrt{V_{fluc}^2} \cong \text{standaard deviatie van } V.$$

De resultaten zullen worden gepresenteerd als gemiddelde snelheden in de x -, y - en z -richting, u_{gem} , v_{gem} en w_{gem} , respectievelijk, en de turbulente intensiteiten u' , v' en w' . De verwachte onnauwkeurigheden hierin zijn als volgt berekend: als in alle N metingen u_i een onnauwkeurigheid zit ter grootte van Δu dan is de fout in de gemiddelde snelheid $u_{gem} = N^{-1} \sum u_i$ gelijk aan $\Delta u_{gem} = \Delta u N^{-0.5}$. De fout in de turbulente intensiteit $\Delta u'$, waarbij u' gelijk is aan de standaard deviatie van het signaal, wordt gegeven door $\Delta u' = \Delta u N^{-1}$. Hetzelfde geldt voor v en w .

De totale turbulente kinetische energie per eenheid van massa k [$m^2\ s^{-2}$] wordt gegeven door:

$$k = 0.5(u'^2 + v'^2 + w'^2).$$

Voor het in suspensie houden van sediment is behalve de turbulente intensiteit de grootte van de turbulente structuren van belang. Een grote maar "langzame" wervel kan evenveel effect hebben als een kleine wervel met een hogere snelheid. Om de grootte van de wervel te verkrijgen wordt de tijdserie van de snelheidsmetingen d.m.v. een Fourier Transformatie omgezet in een turbulent energie spectrum. In dit spectrum wordt de energie als functie van de typische reciproke lengteschaal $1/L$ weergegeven. Om deze transformatie goed uit te voeren worden er op het signaal nog een aantal "smoothing" operaties uitgevoerd waar hier niet verder op zal worden ingegaan. Voor nadere informatie over de procedure zie Bendat & Piersol (1971). De gebruikte software staat beschreven in Uittenbogaard (1995).

Turbulente structuren met een lengte kleiner dan 1 cm kunnen niet worden gemeten met een EMS zoals gebruikt bij de experimenten. De electrodes van de EMS hebben een onderlinge afstand van ongeveer 1 cm. Valt een werveltje daar tussen dan zal deze niet worden "opgemerkt". Op deze manier werkt de EMS als een filter. Omdat op de x-as van de figuren met de spectra de reciproke lengteschaal $1/L$ staat zal deze slechts lopen tot $1/L=10^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ($L = 1 \text{ cm}$).

Voor het in suspensie houden van sediment is de turbulente menging van belang. Deze is een product van de lengte L en de turbulente intensiteit V' en wordt de turbulente mengcoëfficiënt of "eddy diffusivity" Γ genoemd:

$$\Gamma \sim LV'$$

Omdat de energie het kwadraat van de turbulente intensiteit V' is, kan de waarde van de turbulente menging ontleend worden aan het turbulentie spectrum

$$\Gamma(L) \approx L \left[\int_0^{1/L} E(1/L_i) d(1/L_i) \right]^{1/2} .$$

Omdat de berekende turbulentie spectra bestaan uit discrete waarden verandert de integratie in een sommatie.

2.2 Verticaal transport van slib

Het verticaal transport van materiaal in suspensie wordt beschreven door de advection-diffusie vergelijking

$$\frac{\partial c}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} (w_s c) = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (v + \Gamma) \frac{\partial c}{\partial z} \right\},$$

met c = slib concentratie [kg m^{-3}], w_s = valsnelheid van het slib [m s^{-1}], v = kinematische viscositeit [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] en Γ = "eddy diffusivity" [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] of turbulente mengcoëfficiënt.

Deze vergelijking ligt ook ten grondslag aan het 1-DV model dat gebruikt zal worden om de verticale snelheids- en suspensieprofielen te modelleren. Er is dan een "source term P " en "sink term ϵ " toegevoegd om de depositie en erosie van materiaal, respectievelijk, in betrekking te nemen. De vergelijking wordt dan:

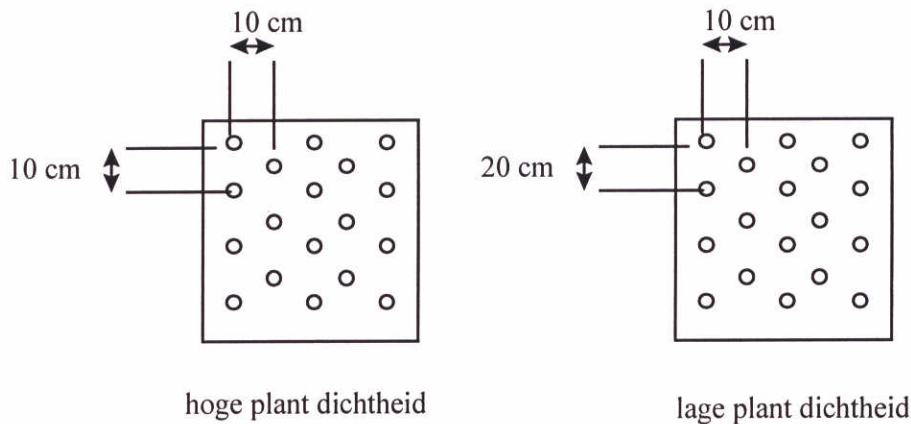
$$\frac{\partial c}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} w_s c = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (v + \Gamma) \frac{\partial c}{\partial z} \right\} + P + \epsilon .$$

De parameter Γ is evenredig met het quotiënt van het kwadraat van de turbulente kinetische energie k en de mate van energy dissipatie ϵ . Deze grootheden worden berekend met het zogenaamde k - ϵ model. Voor meer details over het model zie Winterwerp (1997).

3 Snelheidsmetingen

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de snelheidsmetingen besproken. Deze zijn uitgevoerd zonder de toevoeging van slib aan het water en met kunstmatige waterplantjes. De waterhoogte was 0.8 m voor alle experimenten. Er zijn twee beplantingsdichtheden gebruikt: een hoge en een lage dichtheid (zie figuur 3.1).



Figuur 3.1 De twee gebruikte beplantingsdichtheden

Achtereenvolgens zullen snelheden en turbulente intensiteiten worden besproken zoals gemeten zonder planten in de goot, met een hoge en een lage plantdichtheid.

3.2 Resultaten

3.2.1 Effectieve plantlengte

De lengte van de plantjes in stilstaand water bedraagt 50 cm. Door de stroming zullen de plantjes enigszins ombuigen. De toppen van de vegetatie komen daardoor lager te liggen dan de werkelijke lengte van de plantjes. Deze *effectieve plantlengte* l_{eff} hangt af van de aanstroomsnelheid en van de plantdichtheid. In Tabel 3.1 staan de waarden van l_{eff} voor de verschillende snelheden en plantdichtheden.

Aanstroom snelheid [cm s ⁻¹]	hoge plantdichtheid [cm]	lage plantdichtheid [cm]
5	45	46
10	40	43
20	33	36

Tabel 3.1 Effectieve plantlengtes

Tabel 3.1 laat zien dat bij een lagere plantdichtheid de plantjes iets meer rechterop staan. Het water heeft meer vrije ruimte om te stromen waardoor de krachten op de plantjes wat kleiner zullen zijn.

3.2.2 Metingen zonder planten in de goot

Gemiddelde snelheden

Voor de drie aanstroomsnelheden ter grootte van 5, 10 en 20 cm s⁻¹, is een verticaal snelheidsprofiel gemeten in een lege goot op $x = 57.5$ m. In figuur 3.2 staan de gemiddelde snelheden (over 400 s) zoals gemeten in de x, y en z -richting u_{gem}, v_{gem} en w_{gem} , respectievelijk. Op de verticale as staat de afstand tot de bodem z (cm) weergegeven.

Figuur 3.2. laat zien dat de snelheden in de x -richting het dichtst bij het water oppervlak ietwat lager zijn dan men verwacht op grond van een logaritmisch snelheidsprofiel. Dit effect treedt op bij alle drie de aanstroomsnelheden en wordt veroorzaakt door wandeffecten in de goot.

Over de gehele waterhoogte is er een kleine netto stroming in de dwars richting (= y) van de goot. Deze heeft een grootte van ongeveer 10 % van de gemiddelde snelheid in de x -richting. De gemeten gemiddelde naar beneden gerichte stroming in de z -richting is weliswaar zeer klein maar toch nog significant. De fout in de gemiddelde snelheid wordt berekend volgens $\Delta u_{gem} = \Delta u N^{0.5}$, waar Δu de fout in een meting is en N het aantal metingen. De meetfout in de EMS is ongeveer 1.5 cm s⁻¹ en het aantal metingen per hoogte is 2000 ($t=400$ s bij 5 Hz). Dit geeft een onnauwkeurigheid in de gemiddelde snelheid van $\Delta u_{gem} = 0.03$ cm s⁻¹. De gemeten snelheden in de z -richting zijn groter dan deze gemiddelde fout en men mag concluderen dat er secundaire stromingen voorkomen in de goot. Deze ‘secundaire’ stromingen zijn het gevolg van randeffecten. Doordat de goot niet een perfect recht en glad systeem is zal het water zal enigszins gaan meanderen.

Turbulente intensiteit en kinetische energie

In figuur 3.3. staan de respectievelijke turbulente intensiteiten u', v' en w' en de totale turbulente kinetische energie $k = (u'^2 + v'^2 + w'^2)$ geplot.

De figuur laat zien dat de turbulente kinetische energie het grootst is dicht bij de bodem om dan naar boven toe snel af te nemen. Ook is duidelijk te zien dat de energie toeneemt met de snelheid. De vorm van de gemeten curve is ietwat anders dan de berekende zoals gegeven in figuur 3.4 (Winterwerp, 1998). Afwijkingen met de berekende curve zijn het grootst dicht bij de bodem en bij het water oppervlak. De twee gemeten waarden het dichtst bij het oppervlak zijn nagenoeg gelijk terwijl de berekende curve naar 0 gaat.

Turbulentie spectra en 'turbulente mengcoëfficiënten'

De grafieken in figuur 3.5 laten de turbulentie spectra zien berekend uit data die op twee hoogtes $z=42.5$ en $z=7.5$ cm gemeten zijn. In alle plaatjes is een rechte doorgetrokken lijn met een helling van $-5/3$ bijgetekend. Deze geeft het theoretisch verloop van de turbulente energie weer (Tennekes & Lumley, 1972). Het laat zien dat de spectra zich "normaal" gedragen.

In figuur 3.6 staan de hieruit afgeleide turbulente mengcoëfficiënten $I(L)$ als functie van de reciproke typische turbulente lengteschalen l/L . Uit de figuur 3.6 blijkt dat de turbulente menging hoger wordt naarmate de snelheid toeneemt. Dichter bij de bodem is er iets meer menging dan in het midden van de water kolom. Bovendien valt op dat de grootte van de structuren toeneemt met de snelheid, in geval van 20 cm s^{-1} is de turbulente menging 1 orde van grootte hoger.

3.2.3 Metingen met hoge plantdichtheid

Gemiddelde snelheden

De gemeten gemiddelde snelheidsprofielen voor de verschillende aanstroomsnelheden staan in de figuren 3.7-3.9. De posities in de goot van de gemeten verticale snelheidsprofielen worden gegeven als de positie t.o.v. het plantenbed, x_p . Hierbij is het begin van het planten bed $x_p=0$ m en het einde $x_p=3$ m.

Twee meter voor het begin van het plantenveld ($x_p=-2.0$ m) zien de gemiddelde stromingsprofielen in de x -richting er over het algemeen net zo uit als die gemeten in de goot zonder planten. De enige uitzondering is bij een aanstroomsnelheid van 10 cm s^{-1} waar aan het einde van het veld dicht bij de bodem in de y -richting een erg hoge snelheid (12 cm s^{-1}) voorkomt.

Alhoewel er onderlinge verschillen optreden is er een duidelijke trend in het stromingspatroon te zien dat voor alle drie de aanstroomsnelheden gelijk is. Bij het begin van het plantenveld, $x_p=0$, wordt de stroming iets trager. Bovendien neemt de snelheid in de x -richting met de diepte sneller af dan 2 m voor het plantenveld ($x_p=-2.0$). Omdat de stroom over de planten heen moet is er een relatief sterke omhoog gerichte stromingscomponent op $x_p=0$. Verder in het veld neemt de snelheid in de x -richting in het begroeide gedeelte van de waterkolom sterk af, terwijl boven de planten het water aanzienlijk sneller stroomt. Dit effect wordt sterker naarmate de stroming verder in het plantenveld komt; op $x_p=2.1$ m, stroomt het water boven de plantjes ongeveer twee keer zo snel.

Tussen de plantjes daalt de snelheid in de x -richting met een factor 2-5 waarbij in het geval van de laagste aanstroomsnelheid van 5 cm s^{-1} het water zelfs vrijwel stil staat aan het eind van het veld. Over het grootste deel van de waterkolom tussen de planten is de snelheid min of meer constant om vervolgens af te nemen dicht bij de bodem. Dit komt het meest overeen met stroming door starre vegetatie (WL | DELFT HYDRAULICS, 1997). Wat verder nog opvalt is dat bij de twee hogere aanstroomsnelheden van 10 en 20 cm s^{-1} er een profiel gemeten is waarbij de snelheid toeneemt met de diepte in het onderste stuk van de waterkolom (zie figuren 3.8 en 3.9). Een verklaring hiervoor hebben we op dit moment niet

De overgang van de snelle stroming boven de plantjes naar de langzame stroming tussen de plantjes is erg abrupt. Het vindt plaats op de hoogte van de effectieve plantlengte. Afhankelijk van de aanstroomsnelheid is deze 45, 40 en 33 cm, respectievelijk.

De snelheden zoals gemeten in de y - en z -richting vertonen een grillig patroon. Er is geen relatie met de diepte aan te geven (afgezien op $x_p = 0$ m voor de snelheid in de z -richting waar de stroming omhoog buigt). In het algemeen zijn ze echter laag, sommige uitschieters daargelaten. Afgezien van de al genoemde omhoog gerichte stroming die optreedt aan het begin van het plantenveld ($x_p = 0$) is de gemiddelde snelheid in de y - en z -richting vrijwel nul.

Turbulente intensiteit en kinetische energie

De gemeten turbulente intensiteit en kinetische energie voor de drie aanstroomsnelheden staan weergegeven in de figuren 3.10-3.12. Ook hier is weer een duidelijke trend in aan te geven. De waarden zoals gemeten 2 m voor het begin van de onderwatervegetatie komen goed overeen met die zoals gemeten zonder de aanwezigheid van plantjes. Boven het plantenveld neemt de turbulente energie geleidelijk toe tot het uiteindelijk een factor van 2-4 hoger is t.o.v. de waarde zoals gemeten op $x_p = -2.0$ m. Tussen de plantjes halveert de energie grofweg op dit traject. Net als bij de gemiddelde snelheid is de overgang tussen de gebieden van hoge en lage energie vrij scherp. Dit patroon is gelijk voor alle drie de snelheidscomponenten.

Het is van belang om te weten of de vegetatie ook daadwerkelijk turbulente kinetische energie produceert of dat de toename boven de plantjes geheel is toe te schrijven aan de hogere gemiddelde snelheid. Daarvoor wordt in figuur 3.13 de relatieve turbulente kinetische energie gegeven k / u^2 [-] voor de drie aanstroomsnelheden. Hieruit blijkt dat er dus inderdaad een toename van de kinetische energie is welke niet afhangt van de snelheid. Ook is duidelijk te zien dat deze groot is tussen de plantjes (tot heel groot vlak bij de bodem) en afneemt vanaf de toppen van de vegetatie naar boven toe. Echter door de hoge snelheden boven het planten bed is de absolute toename van turbulente kinetische energie net boven de planten het grootst.

Turbulente menging

In figuren 3.14-3.16 is de turbulente mengcoëfficiënt $I(L)$ als functie van de typische reciproke lengteschaal $1/L$ weergegeven voor de drie aanstroomsnelheden. Om het effect van de onderwatervegetatie te illustreren worden in elke grafiek de waarden weergegeven zoals gemeten op een positie in het plantenveld $x_p = 2.1$ (vierkantjes) en een ervoor $x_p = -2$ (kruisjes). De mengcoëfficiënten zijn gegeven voor $z=62.5, 52.5, 42.5, 32.5, 22.5$ en 12.5 cm.

De waarden buiten het veld komen goed overeen met die zoals gemeten zonder planten in de goot (zie figuur 3.6). Het effect van de vegetatie is duidelijk zichtbaar: boven de vegetatie ($z = 62.5$ cm) is de turbulente menging duidelijk groter dan buiten de vegetatie. Tussen de planten is de menging een orde van grootte lager dan erbuiten. Merk op dat bij de hoogste snelheid de turbulente menging eerst toe neemt boven de vegetatie (zie figuur 3.16, bovenste plaatje rechts). Grotere turbulente structuren die op dezelfde hoogte buiten de vegetatie nog wel werden gemeten komen tussen de planten niet meer voor. De maximum grootte in het plantenveld ligt ongeveer op 10 cm ($1/L = 10^{-2}$ mm).

Voor de laagste aanstroomsnelheid lijkt de overgang van hoge naar lage turbulente menging minder vloeiend te gaan. Na eerst naar beneden te zijn gegaan neemt de menging weer toe net onder de toppen van de vegetatie (zie figuur 3.14, middelste plaatje rechts). Door deze afwijkende trend lijkt de meting op deze hoogte niet geheel betrouwbaar en zal daarom ook niet worden meegenomen in de uiteindelijke conclusies.

Uit de drie figuren blijkt ook dat de turbulente menging voor de hoogste aanstroomsnelheid 1-2 ordes van grootte hoger is dan bij de twee lagere snelheden.

Om deze snelheidsafhankelijkheid eruit te halen wordt de stroming in drie gebieden verdeeld met bijbehorende referentie snelheid en diepte, u_{ref} en h_i respectievelijk:

1. de vrije stroming met u_{ref} de aanstroomsnelheid en $h_i = 80$ cm,
2. boven de plantjes u_{ref} de gemiddelde snelheid boven de vegetatie en $h_i = 80$ cm - l_{eff} (de effectieve plantlengte) en,
3. tussen de plantjes u_{ref} de gemiddelde snelheid boven de vegetatie en $h_i = 80$ l_{eff} (de effectieve plantlengte).

In figuur 3.17 staan de dimensieloze mengcoëfficiënten $\Gamma / u_{ref,i} h_i$ weergegeven. Hieruit blijkt dat er boven de plantjes ($z=62.5$ cm) nog steeds een lichte toename is in turbulente menging in vergelijking met 2m voor het plantenveld. Maar op $z=12.5$ cm is er nauwelijks verschil te zien tussen de menging in en voor het veld. Dus de extra productie van kinetische energie door de plantjes wordt geheel te niet gedaan door de veel lagere gemiddelde snelheid. Daarbij is deze kinetische energie tussen de plantjes gekoppeld aan kleinere wervels dan buiten de vegetatie.

3.2.4 Metingen met lage plantdichtheid

Gemiddelde snelheden

In de figuren 3.18-3.20 staan de gemiddelde snelheden zoals gemeten bij een lage plantdichtheid voor de drie aanstroomsnelheden. Het effect hiervan is voornamelijk dat de overgang van hoge naar lage snelheden minder abrupt is. Bij de twee hoogste aanstroomsnelheden is het overgangs gebied ongeveer 10 cm breder dan bij de hoge plantdichtheid.

Turbulente intensiteit en kinetische energie

In de figuren 3.21-3.23 staan de gemeten turbulente intensiteiten en kinetische energieën. Er zijn weer duidelijke overeenkomsten met de situatie met een hoge plantdichtheid. Ook hier is duidelijk te zien dat het overgangsgebied breder is.

In figuur 3.24 zijn de dimensieloze waarden van de turbulente kinetische energie afgebeeld. Ook nu is weer duidelijk te zien dat de vegetatie turbulente kinetische energie genereert.

Turbulente menging

De figuren 3.25-3.27 geven de turbulente mengcoëfficiënten zoals “gemeten” buiten en boven/in het plantenveld. Voor al de drie aanstroomsnelheden is weer een zelfde patroon te onderscheiden. Boven de vegetatie is de menging groter dan daarbuiten. Van het wateroppervlak naar beneden is er eerst een toename. De maximale menging ligt dichtbij de

toppen van de plantjes (op ongeveer 46, 43 en 36 cm, respectievelijk). Bij nadering van de bodem neemt de menging af en wordt lager in vergelijking met de punten buiten het plantenveld op dezelfde hoogte.

Zoals verwacht ligt bij de lage plantdichtheid het overgangspunt van hoge naar lage turbulente menging lager dan bij de hoge plantdichtheid. Een vergelijking van de absolute waarden bij de twee plantdichtheden levert geen duidelijk beeld op. Ook de grootte van de turbulente structuren is ongeveer hetzelfde als bij de hoge plantdichtheid.

3.3 Conclusies

De gemeten profielen komen goed overeen met die zoals gemeten in het pilot experiment (WL | DELFT HYDRAULICS, 1998). Er is echter geen teruggaande stroming gemeten. Boven de vegetatie stroomt het water tot 2 keer zo snel als zonder de aanwezigheid van planten. Deze snelheid neemt toe naarmate men verder in het plantenveld komt.

Tussen de planten in neemt de snelheid tot een factor 4 af. Ook hier geldt weer dat het water langzamer stroomt hoe verder men in het veld komt. De overgang van snel naar langzaam stromend water in de verticale richting is erg scherp en hangt af van de effectieve plantlengte. Voor de minder dichte beplanting is het overgangs gebied iets breder.

Deze resultaten komen overeen met metingen gedaan in een smal riviertje (3-7 m) in Denemarken (Sand-Jensen, 1998). Ook hier zijn verticale snelheidsprofielen gemeten in verschillende typen onderwatervegetatie met verschillende dichtheden. Voor de dichte vegetatie is de overgang van de snelle stroming boven de planten naar de langzame stroming in de plantjes erg abrupt. Voor vegetatie met een veel minder dichte begroeiing is deze overgang heel geleidelijk. In het geval van de vegetatie met de hoge dichtheid is de snelheidstoename boven de plantjes ongeveer een factor 1.5.

Voor de turbulente intensiteit en kinetische energie geldt ook dat de aanwezigheid van vegetatie een flinke toename, tot een factor 5, veroorzaakt in het gebied boven de plantjes. Deze toename is het gevolg van een combinatie van turbulente kinetische energie gegeneerd door de plantjes en een veel hogere gemiddelde snelheid boven de vegetatie. Tussen de begroeiing in is de intensiteit juist lager vanaf zo'n 10 cm onder de toppen van de plantjes. Dit ondanks de bovengenoemde productie van energie; de gemiddelde snelheden zijn zo laag dat het netto effect een afname in turbulente intensiteit is.

De turbulente menging volgt een zelfde patroon als de turbulente kinetische energie. Het effect van een lagere plantdichtheid is met name een verschuiving naar beneden van het overgangsgebied van hoge naar lage menging. In het plantenveld komen de grotere structuren niet meer voor. De maximum lengte ligt op ongeveer 10 cm. De vergelijking van de gevonden absolute waarden bij de twee dichtheden levert geen duidelijk trend op.

De dimensieloze weergave van de turbulente menging laat zien dat deze boven de vegetatie hoger is dan 2m voor de plantjes op dezelfde hoogte. Dichter bij de bodem is er qua grootte nauwelijks een effect van de plantjes te zien (zie figuur 3.17).

4 Metingen met Slib

4.1 Analyse van de OSLIM metingen

Door omstandigheden is uiteindelijk slechts met één OSLIM gemeten i.p.v. de geplande vier. Deze OSLIM was op de meetwagen bevestigd. Dit betekent dat er geen continue informatie beschikbaar is over de sediment concentratie gradiënt in de goot.

De analoge waarden uit de OSLIMs worden door de ADC (Analoog Digitaal Converter) in de meet computer bemonsterd met een frequentie van 20 Hz. Er wordt gemeten voor een periode van minimaal 200 seconden. De uiteindelijk gerapporteerde waarde is het gemiddelde over de meetperiode. De opgegeven onnauwkeurigheid hierin is de standaard deviatie van het signaal.

4.2 Resultaten

Slibconcentraties

Per aanstroomsnelheid is een aantal verticale concentratie profielen op verschillende plaatsen in en buiten het plantenveld gemeten welke zijn weergegeven in de figuren 4.1-4.3. De posities worden weer aangegeven in x_p waarbij $x_p = 0$ m het begin van het plantenveld is en $x_p = 6$ m het einde. Er is slechts bij de hoge plantdichtheid gemeten.

Om de valsnelheid van het kaoliniet te verhogen is er electrolyt (type AF203 van BASF) aan het water in de goot toegevoegd om het flocculeren te bevorderen. In het totaal is er 14.4 gr aan het goot systeem toegevoegd ($\cong 180 \text{ m}^3$ water).

Figuur 4.1 toont de resultaten voor de laagste aanstroomsnelheid van 5 cm s^{-1} . Het laat zien dat de concentraties boven de vegetatie (voor z is groter dan 50 cm) geleidelijk minder worden naarmate men verder in het plantenveld komt. De concentratie afname blijft ongeveer constant. Er is geen verschil waar te nemen in deze afname bij het begin en einde van het plantenveld.

Dichter bij de bodem is er een heel duidelijke afname te zien in het plantenveld in vergelijking met er buiten. Op $x_p = 5.5$ m is er een afname van $\pm 16 \text{ mg L}^{-1}$ voor $z=30$ cm. Achter het plantenveld ($x_p = 9.5$ m) is de concentratie bij de bodem weer toegenomen t.o.v. die gemeten aan het einde in het plantenveld. Wat betreft de helderheid van het water had deze daling overigens geen zichtbaar effect.

Voor een aanstroomsnelheid van 10 cm s^{-1} (figuur 4.2) is er ook een afname over het plantenveld heen. Maar in tegenstelling tot de lagere snelheid is deze niet gelijkmatig. In het plantenveld tot $x_p = 3.5$ m stijgen de concentraties boven de vegetatie zelfs. Wel is er in een profiel een duidelijke afname met de diepte te zien. Op $x_p = 5.5$ m, 2 m verder, zijn de concentraties over de diepte gelijk gebleven.

Achter de vegetatie is de concentratie duidelijk lager. De netto daling over het plantenveld in de concentratie is overigens iets minder dan bij 5 cm s^{-1} (± 2.5 en 4 mg L^{-1} , respectievelijk).

Voor de hoogste aanstroomsnelheid van 20 cm s^{-1} is er over het planten veld een toename in de kaoliniet concentratie gemeten (zie figuur 4.3). Boven de vegetatie is de concentratie op $x_p=5.5 \text{ m}$ zelfs zo'n $20 \text{ mg L}^{-1} \cong 10 \%$ hoger dan voor het plantenveld. Waarschijnlijk is er kaoliniet wat was neergeslagen op de planten weer losgekomen (de volgorde van de proeven was weliswaar naar oplopende stroomsnelheid maar in de loop van het experiment is er toch kaoliniet neergeslagen op de plantjes, met name aan de onderste helft).

Gemiddelde snelheden en turbulente kinetische energieën

In figuur 4.4 zijn de gemiddelde snelheden en turbulente kinetische energieën zoals gemeten tijdens de slibconcentratie proeven weergegeven. Vanwege tijdsdruk als gevolg van technische problemen tijdens de proeven is te meettijd te kort om een bepaling van de turbulente mengcoëfficiënt te doen.

Voor de aanstroomsnelheden van 5 en 20 cm s^{-1} is het beeld consistent met de gemeten concentraties. Dit ondanks dat er in het geval van 5 cm s^{-1} achter het vegetatieveld een toename in de turbulente kinetische energie optreedt. Deze was blijkbaar niet genoeg om een verhoging in de sedimentconcentratie te veroorzaken. Bij een aanstroomsnelheid van 20 cm s^{-1} is er een grote toename in turbulente kinetische energie boven en in de plantjes. Dit laatste zelfs ondanks de lage gemiddelde snelheden daar.

In het geval van een aanstroomsnelheid van 10 cm s^{-1} is het beeld duidelijk tot aan 3.5 m in het veld. Tot aan hier wordt zowel een toename in turbulente kinetische energie als in de slibconcentratie gemeten. Echter op 5.5 m in het veld blijft de slibconcentratie constant terwijl de energie blijft stijgen. Achter het veld op $x_p=9.5 \text{ m}$ is de slib concentratie lager dan voor de plantjes maar de energie is een stuk hoger. De slibconcentraties als functie van positie lijken beter overeen te stemmen met de gemeten gemiddelde snelheden. Om dit te testen zijn in figuur 4.5 de gemeten concentraties uitgezet tegen de gemiddelde snelheid en de kinetische energie. Hieruit blijkt dat de correlatie tussen concentratie en de gemiddelde snelheid voor een aanstroomsnelheid van 10 cm s^{-1} niet beter is dan die tussen de concentratie en de kinetische energie.

4.3 Conclusies

Voor de laagste aanstroomsnelheid is er heel duidelijk een daling van de kaoliniet concentraties in het plantenveld. Met toenemende snelheid neemt dit effect af en bij de hoogste snelheid is er zelfs een toename van de concentraties gemeten. In het geval van de aanstroomsnelheid van 10 cm s^{-1} wijzen de resultaten erop dat bij een langer plantenbed er ook een vermindering van de concentraties zou worden gemeten. Voor geen van de drie stroomsnelheden was er een zichtbaar effect op de helderheid van het water.

De gemeten concentratie profielen voldoen aan het beeld dat ontstaat uit de gemeten turbulentie. Door de lagere intensiteit in de vegetatie nemen de concentraties daar af. Uit

een vergelijking van de waarden van de meng coëfficiënten bij aanstroomsnelheden van 5 en 10 cm s⁻¹ kan men afleiden dat sedimentatie optreedt voor waarden van $\Gamma(L) < 0.1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

5 Valsnelheidbepalingen

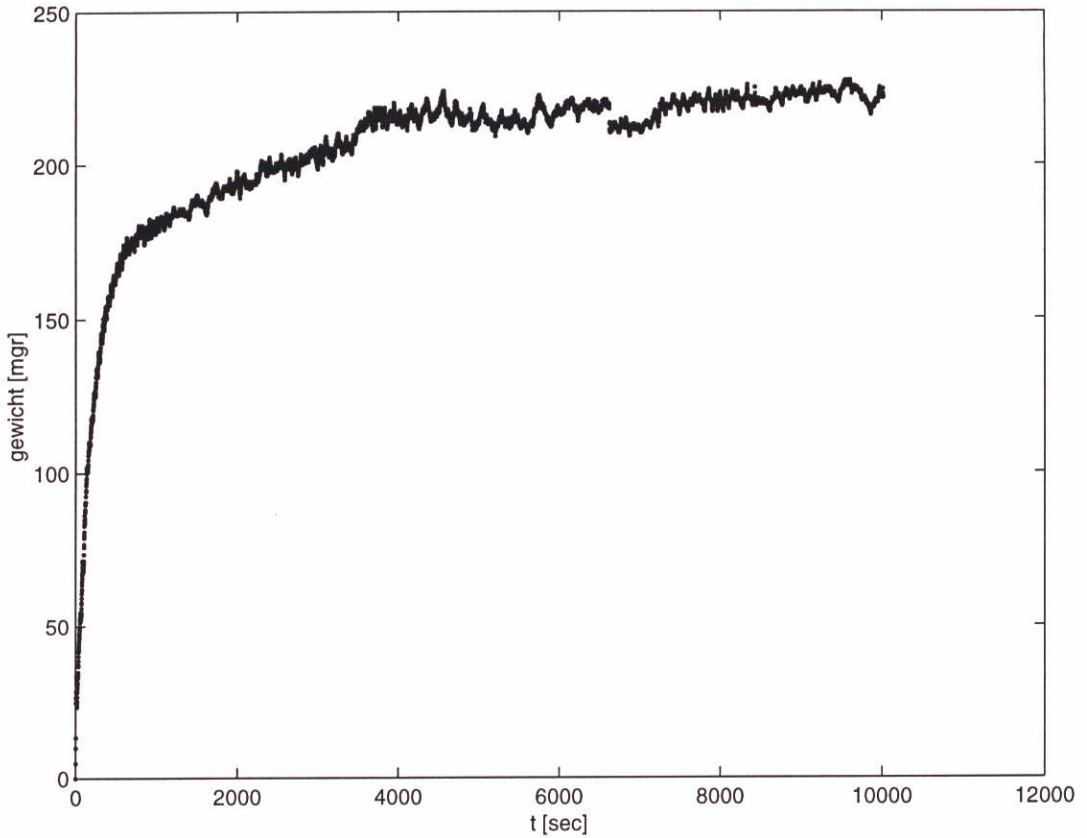
5.1 Inleiding

Een belangrijke parameter voor sedimentatie is de valsnelheid van het sediment. Het is dus van belang om te weten hoe de valsnelheid van het gebruikte kaoliniet (met het toegevoegde flocculant) zich verhoudt tot de valsnelheid van slib. Hierbij moet rekening worden gehouden met het feit dat de flocculatie graad van het slib wordt beïnvloed door het chloride gehalte van het water. In de Nederlandse randmeren variëren de extremen hierbij tussen 50 en 300 mg L⁻¹ (Slingerland, 1995).

5.2 Analyse van de sedimentatie balansmetingen

De valsnelheid is bepaald met de sedimentatiebalans. Deze meet het gewicht van het sediment dat opgevangen wordt op een schaalte onder in de kolom als functie van de tijd. De verkregen curve wordt omgezet in valsnelheden per fractie door te bepalen wanneer de gradiënt verandert. De balans waarmee het gewicht wordt gemeten is erg nauwkeurig en daardoor erg gevoelig voor storingen zoals trillingen. Daarnaast zal er af en toe wat sediment wat op het schaalte lag er weer van af vallen.

Een voorbeeld van een gemeten curve staat afgebeeld in figuur 5.1. Als gevolg van genoemde storingen is dit geen monotoon stijgende lijn. Hierdoor levert de bepaling van de valsnelheden van de verschillende fracties d.m.v. de gradiënt niet altijd "mooie" resultaten op.



Figuur 5.1 Voorbeeld van een gewichtscurve gemeten met de sedimentatiebalans.

5.3 Resultaten

Alle metingen zijn gedaan in leidingwater met een $\text{pH} \cong 7$. Dit ondanks het feit dat de pH van buitenwater wat hoger ligt ($\text{pH} \cong 8$). Echter het experiment in de getijgoot is gedaan met leidingwater.

Het gebruikte natuurslib komt uit de Gouwee (gehaald op 10-9-1998). Per meting is 2 gr nat slib gemengd in een liter water. De inhoud van de valkolom is ongeveer 0.68 L. Rekening houdend met een watergehalte van het slib van 50 % wordt de proef uiteindelijk met ongeveer 0.7 gr slib uitgevoerd.

Het chloride gehalte is aangepast door het water met analytisch Natrium-Chloride (NaCl) te mengen. Het gehalte is bepaald met behulp van een geleidingsmeter. De valsnelheid van het slib is bepaald met drie chloride gehalten:

1. 0 mg L^{-1} (demi water),
2. 70 mg L^{-1} (leiding water zonder toegevoegd NaCl),
3. 840 mg L^{-1} .

De laatste is een extreme waarde die in werkelijkheid niet voorkomt. De reden om dit experiment dan toch uit te voeren is dat als er een invloed van het chloor is deze dan in ieder geval zal worden opgemerkt. Daarnaast is de valsnelheid bepaald voor het kaoliniet

met electrolyt. Hiervoor is er een monster van 5 L uit de getijgoot gehaald. Om voldoende sediment te krijgen voor de bepaling is er hiervan 4 L water afgeheveld (nadat het sediment op de bodem is bezonken). Het chloride gehalte bij dit experiment is 460 mg L^{-1} .

De resultaten staan weergegeven in figuur 5.2. Hierin staat de valsnelheid als functie van het (massa) percentage van het totale monster. Zoals boven genoemd zijn deze resultaten niet echt "mooi". Het is dan ook niet mogelijk de absolute valsnelheid er nauwkeurig uit af te lezen. Desondanks worden er twee dingen duidelijk:

1. het chloride gehalte heeft geen invloed op de valsnelheid van het natuurslib en
2. het kaoliniet met toegevoegd electrolyt heeft een lagere valsnelheid dan het natuurslib, de w_{50} van het kaoliniet en het natuurslib zijn ongeveer 0.1 mm s^{-1} en 0.4 mm s^{-1} , respectievelijk.

Het laatste punt geldt in feite alleen voor de grovere fracties. Voor de kleinste fracties zijn de resultaten dusdanig onduidelijk dat er geen conclusies uit kunnen worden getrokken.

5.4 Conclusies

Het kaoliniet zoals gebruikt bij de experimenten in de getijgoot heeft een lagere valsnelheid dan het natuurslib, ongeveer 0.1 mm s^{-1} en 0.4 mm s^{-1} , respectievelijk. Er is geen relatie gemeten tussen de valsnelheid van het slib en het chloride gehalte van het water.

6 Discussie en conclusies

Onderwater vegetatie veroorzaakt een dusdanige afname van de turbulente intensiteit dat de turbulente menging in een plantenveld een stuk lager is t.o.v. buiten het veld. Dit is te wijten aan een sterke afname van de gemiddelde snelheid tussen de planten in want de productie van turbulentie neemt juist toe. Boven de vegetatie neemt de menging toe. Dit komt ten eerste door een grote toename in de gemiddelde snelheid. Ten tweede is er op het grensvlak van de vegetatie met de vrije stroming ook een toename van de turbulentie (onafhankelijk van de snelheid).

Naast de (absolute) afname van turbulente intensiteit in het plantenveld verplaatst de energie zich ook naar kleinere wervels. Deze dragen vooral bij aan de dissipatie van energie en niet aan de menging van sediment.

De resultaten wijzen erop dat het plantenveld te kort was om een uniform toestand te bereiken; er werd immers nog steeds een verandering in de turbulente intensiteit gemeten. Dit zal doorgaan tot er zich een uniforme toestand heeft gevormd waarin het snelheids- en concentratieprofiel plaats onafhankelijk zijn. Ook in het geval van het langere vegetatieveld, zoals gebruikt bij de slibconcentratiemetingen, is er nog geen sprake van een uniforme toestand aan het einde van het veld.

Er is een verband gevonden tussen de turbulente menging en de slibconcentraties. Bij een lagere turbulente menging neemt de concentratie af. Dit is vooral duidelijk tussen de plantjes in. Boven de plantjes werd alleen bij de laagste aanstroomsnelheid van 5 cm s^{-1} een constante afname boven de vegetatie gemeten. In het geval van een aanstroomsnelheid van 10 cm s^{-1} treedt er na eerst een toename na ruim 3 m in het veld uiteindelijk toch een verlaging van de concentratie boven het veld op. Dit gaat echter niet gepaard met een verlaging van de turbulente kinetische energie maar wel met een lagere gemiddelde concentratie.

De gemeten afnamen in de concentraties zijn niet genoeg om een verandering in helderheid te veroorzaken. Tot de uniforme toestand is bereikt zal er echter steeds meer slib sedimenteren omdat fracties met een lagere valsnelheid ook zullen uitzakken.

Het is dus mogelijk dat bij een langer veld wel een zichtbare toename van de helderheid optreden. Bij een hogere aanstroomsnelheid zal er een groter (langer) vegetatieveld nodig zijn om het zelfde effect te bereiken. Hierbij moet rekening worden gehouden met het feit dat op grond van de gemeten valsnelheden valt te verwachten dat de gemeten afnamen van de kaoliniet concentraties groter zouden zijn voor natuurslib dan voor kaoliniet.

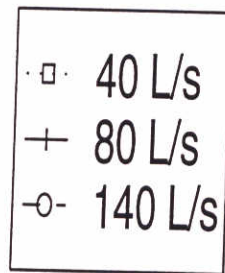
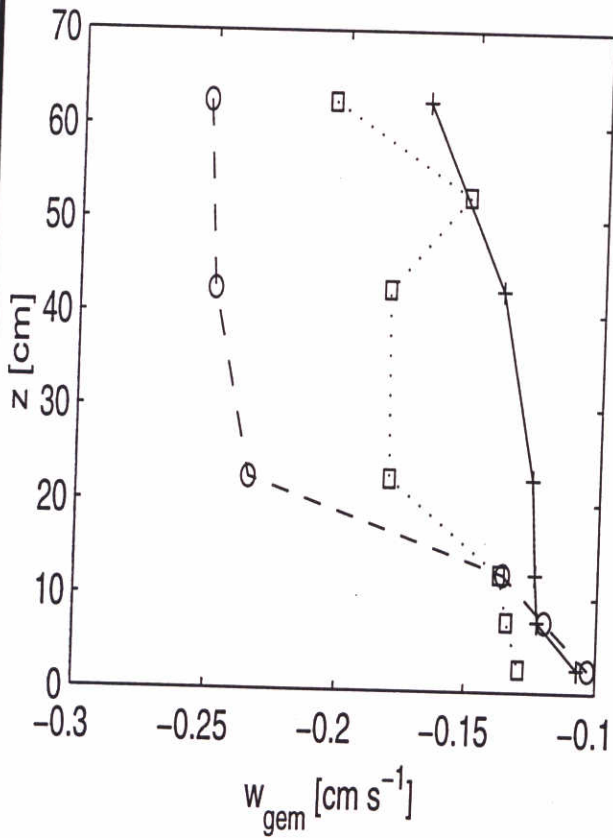
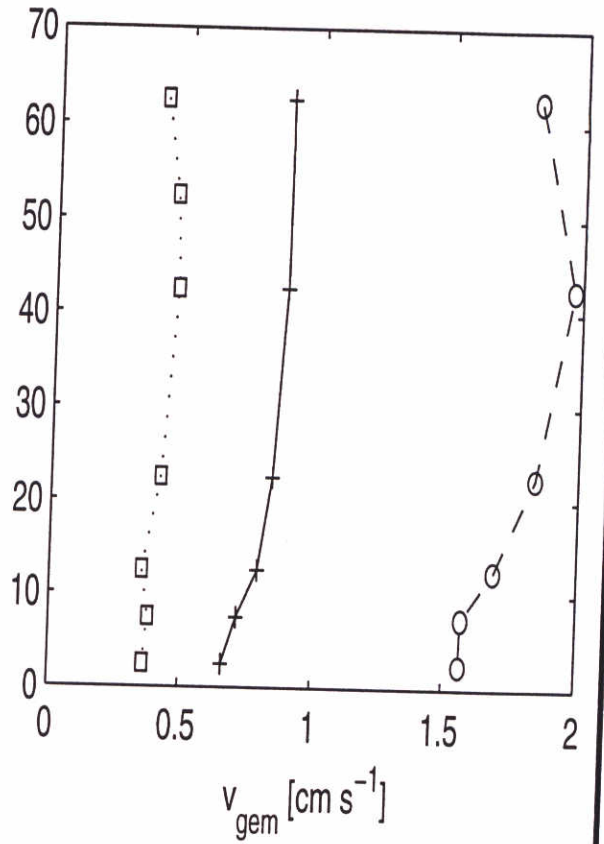
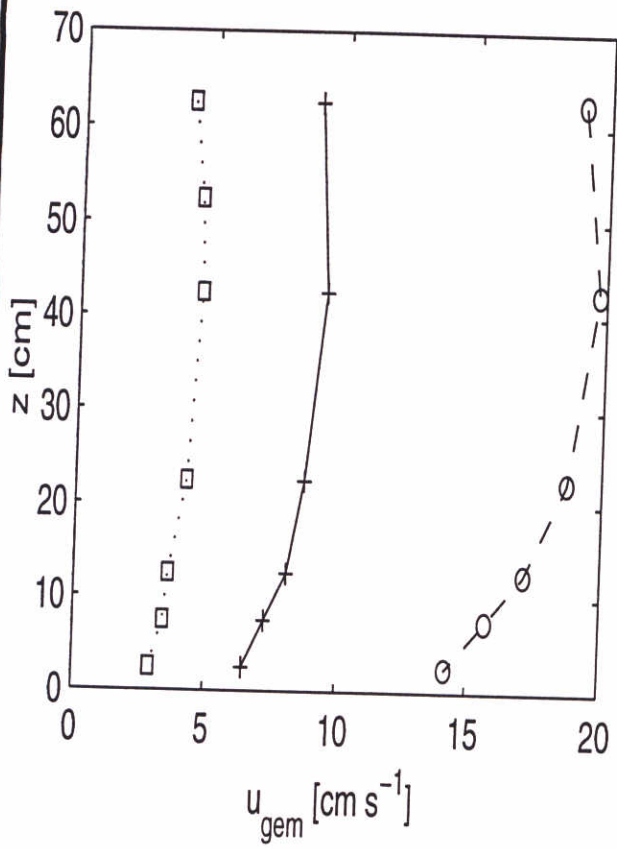
De afname in concentraties is in principe onafhankelijk van de begin concentraties. Dus ook bij lagere kaolinietconcentraties zal de afname procentueel gelijk blijven. Onder de aanname dat het flocculatie proces klaar is, d.w.z. dat de vloggrootte verdeling constant is, is de samenstelling van het kaoliniet onafhankelijk van de concentratie.

Bij afname van de turbulente menging van de stroom zullen de verschillende fracties de een na de ander uitzakken, de grootste het eerst. Met de afnemende gemiddelde snelheid zal ook de kans op resuspensie afnemen. De korrelgrootte van het bodemsediment in een plantenveld is hierdoor plaatsafhankelijk. Net aan het begin van een veld zal hij het grootst zijn om daarna af te nemen. Door Sand-Jensen (1998) is een duidelijk verband tussen korrelgrootte en gemiddelde snelheid gevonden. Het ging hier wel om zand en niet om slib.

De resultaten bevestigen gedeeltelijk de hypothese van dit experiment: de afname in slibconcentraties in een onderwater plantenveld is te relateren aan een afname in turbulente menging. Of deze afname ook leidt tot een verhoging van de helderheid zal mogelijk blijken uit model berekeningen met het 1-DV model. De resultaten zoals beschreven in dit rapport zullen voor calibratie van dergelijke berekeningen kunnen worden gebruikt.

Literatuur

- J.S. Bendat and A.G. Piersol; 1971; *Random data: analysis and measurements*; Wiley & sons; 1971
- R.E. Uittenbogaard; 1995; *The importance of internal waves for mixing in a stratified estuarine tidal flow*; Delft University, Ph.D.Thesis; 1995
- H. Tennekes and J.L. Lumley; 1972; *A first course in turbulence*; The MIT Press, Cambridge, 1972
- WL | DELFT HYDRAULICS, 1998. Interactie van Submerse vegetatie en fysische processen, verslag van de experimenten (Z2328), WL | DELFT HYDRAULICS, Delft, april 1998
- WL | DELFT HYDRAULICS, 1997. *Interactie van Submerse vegetatie en fysische processen: literatuurstudie (Z2328)*, WL | DELFT HYDRAULICS, Delft, december 1997
- K. Sand-Jensen; 1998; *Influence of submerged macrophytes on sediment composition and near-bed flow in lowland streams*; Freshwater Biology, Vol.39, p. 663-679
- J.C. Winterwerp and R.E. Uittenbogaard; 1997; *Sediment transport and fluid mud flow*; rapport Z2005; WL|DELFT HYDRAULICS; Delft, January, 1997
- J.C. Winterwerp; 1998; persoonlijke communicatie
- T. Slingerland; 1995; *Ecosys: Ecologisch Informatie Systeem IJsselmeer*; werkdocument RIZA, Lelystad, 1995



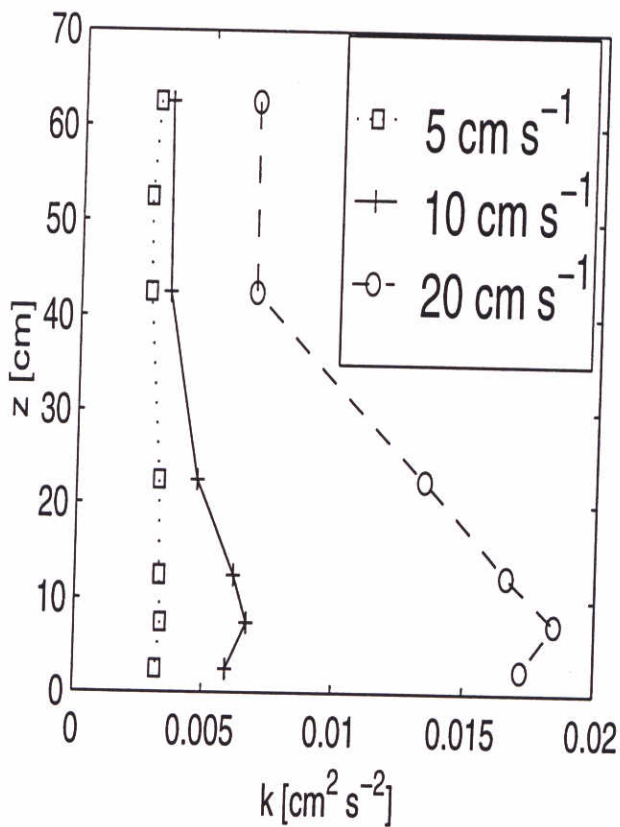
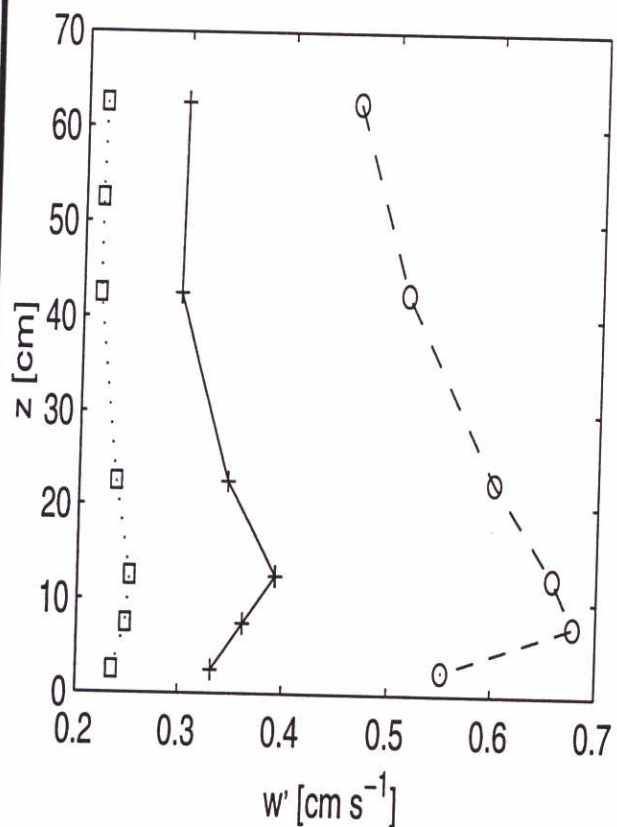
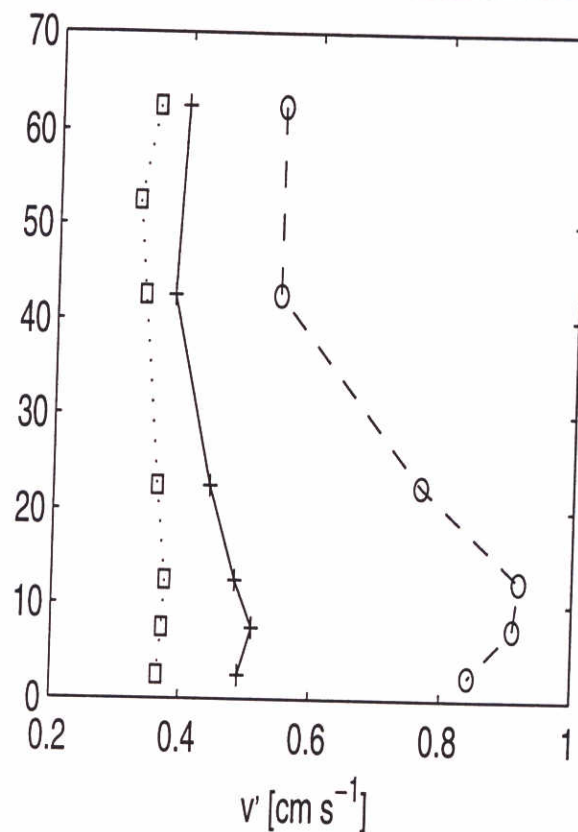
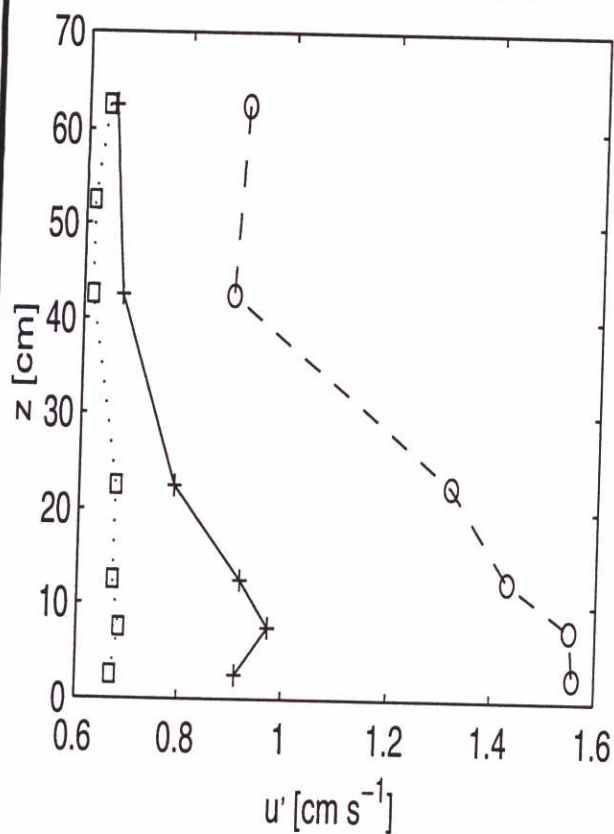
Gemiddelde snelheden
geen planten

getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.2



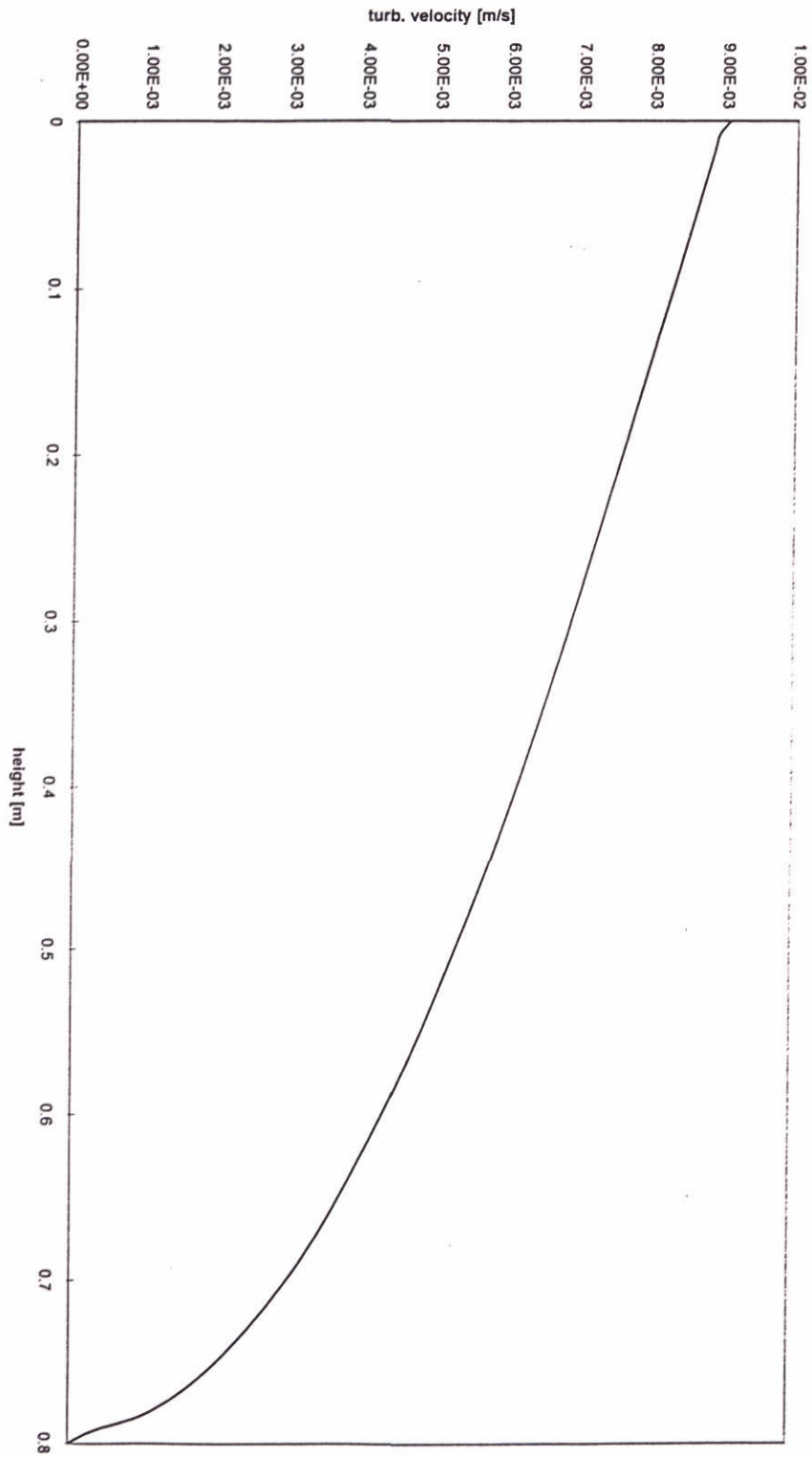
Turbulente intensiteit en kinetische energie
geen planten

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.3



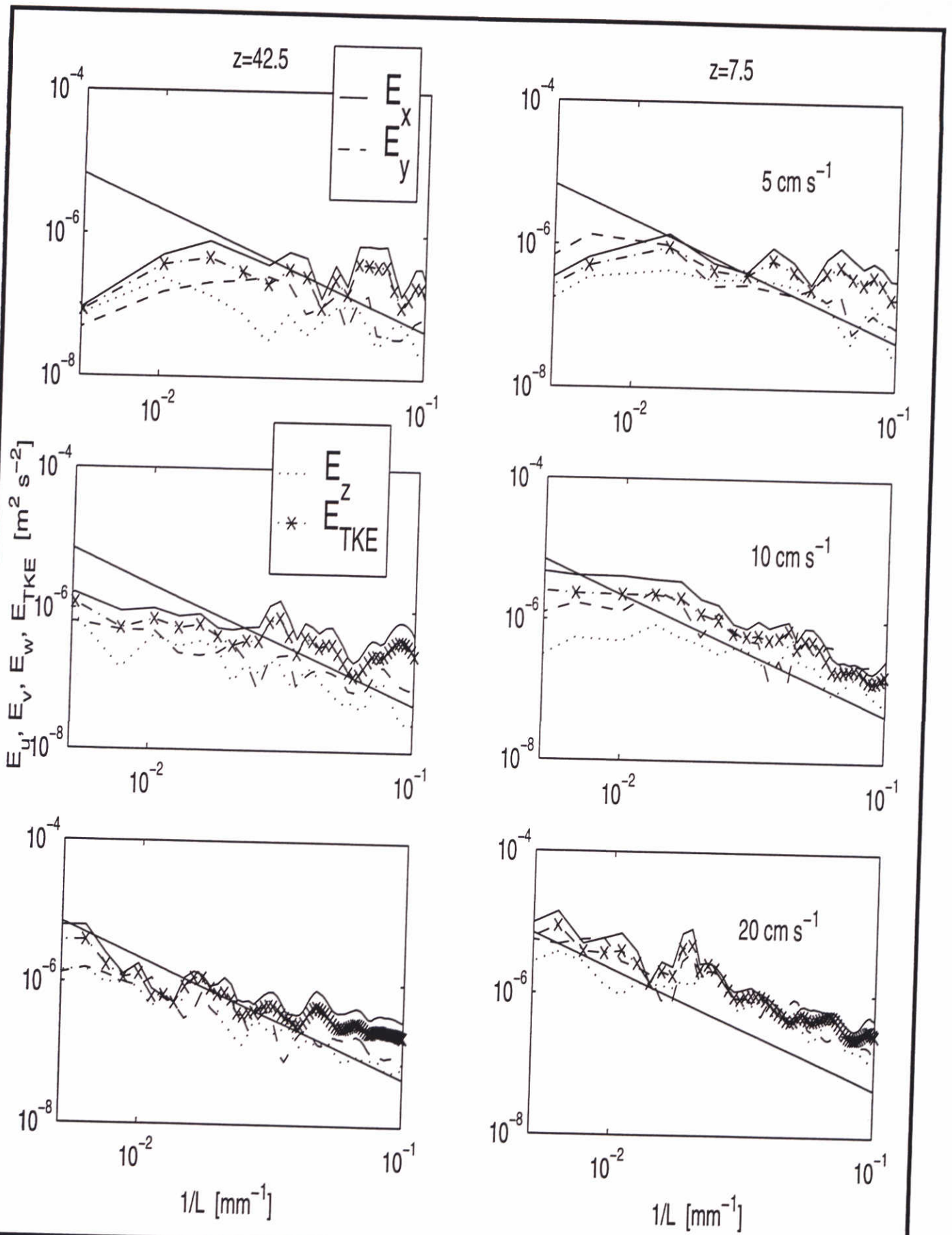
Berekende turbulente snelheden
aanstroomsnelheid is 10 cm s^{-1} .
Geen planten

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.4



Turbulente energie spectra
geen planten

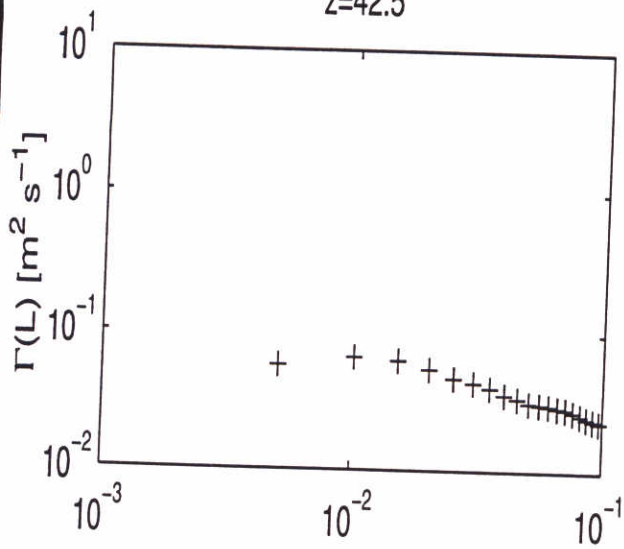
Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

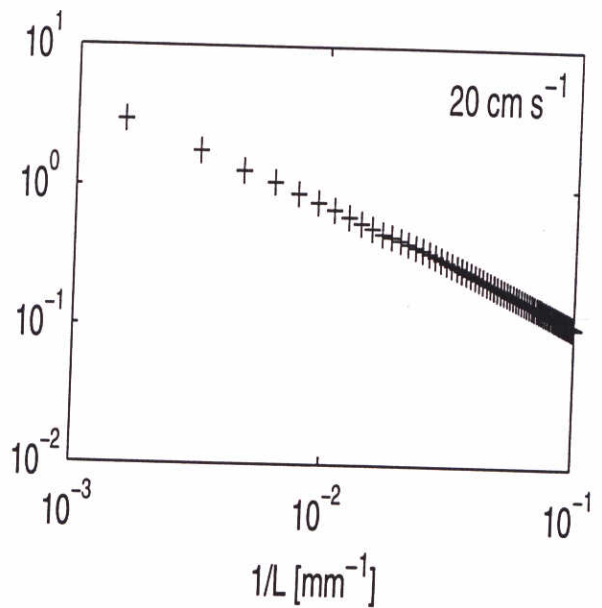
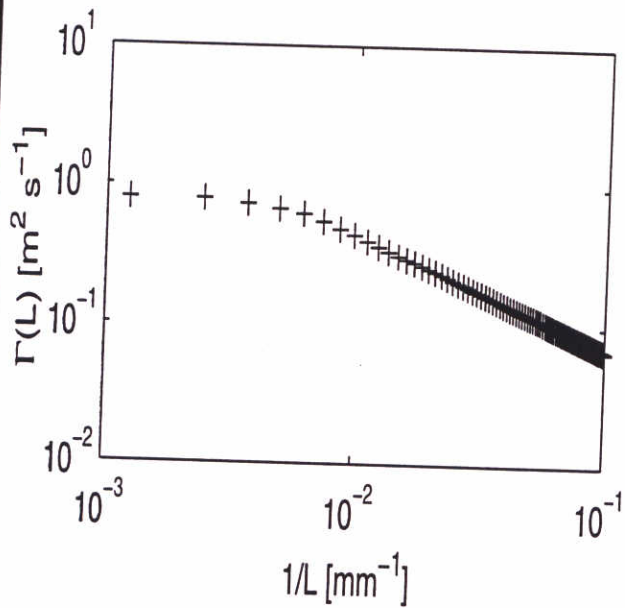
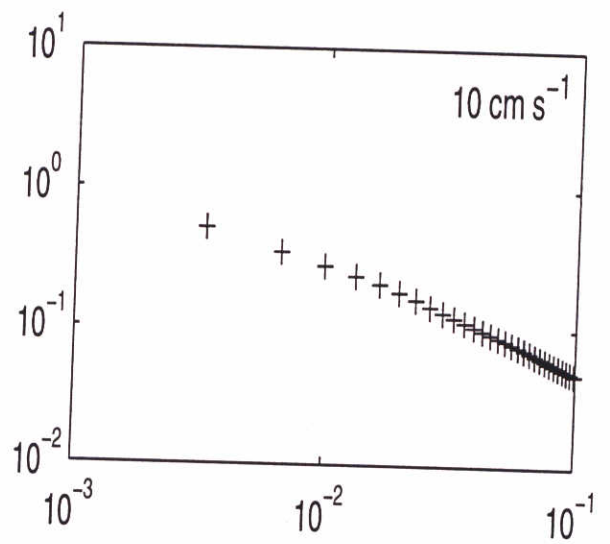
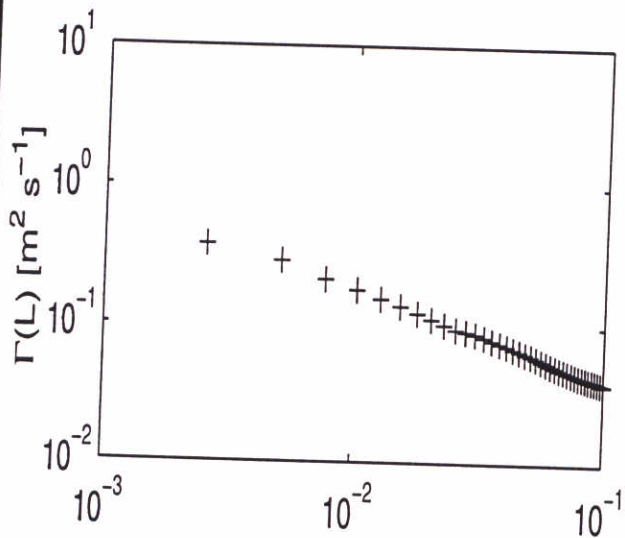
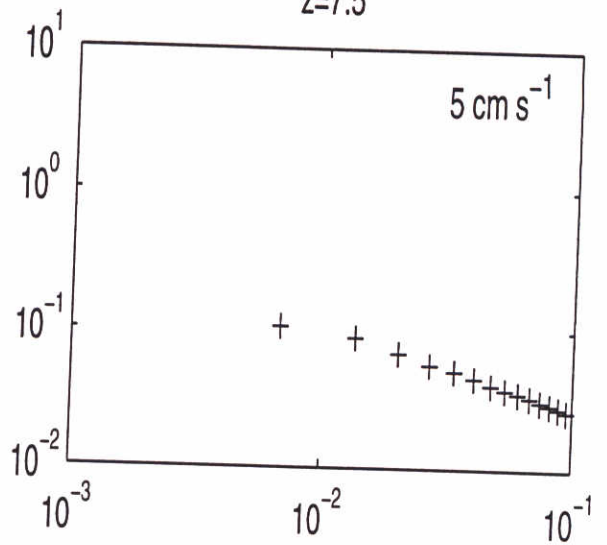
Z 2473

FIG 3.5

$z=42.5$



$z=7.5$



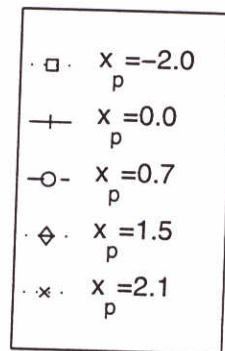
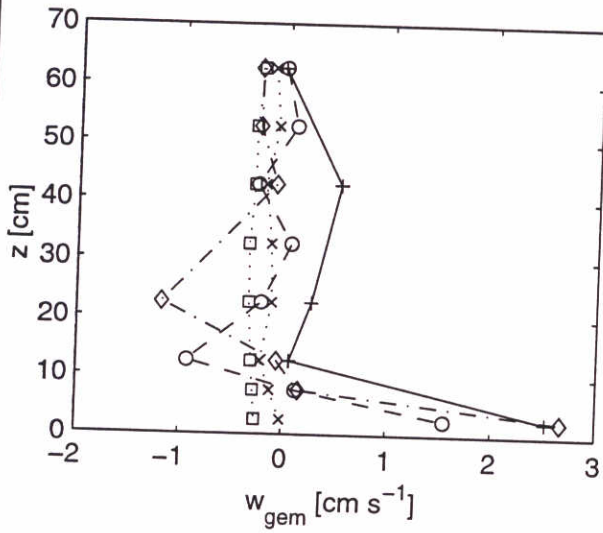
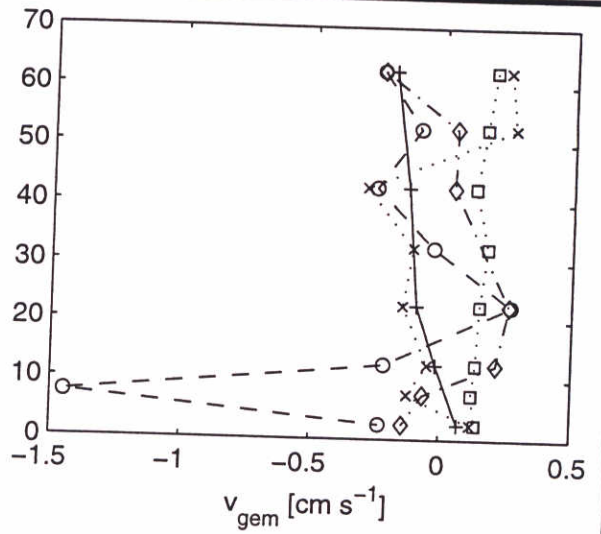
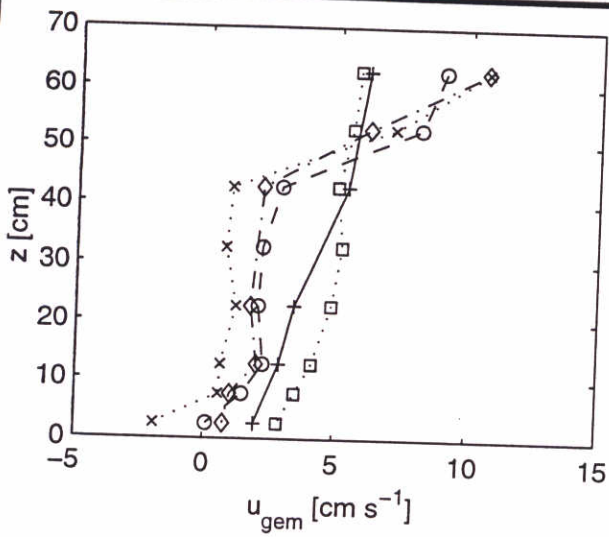
Turbulente mengcoëfficiënten
geen planten

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.6



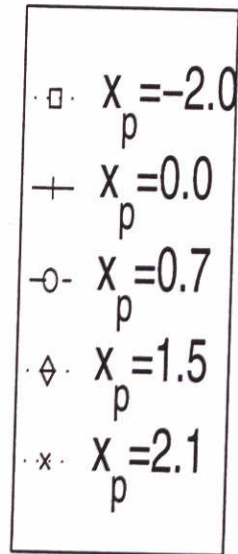
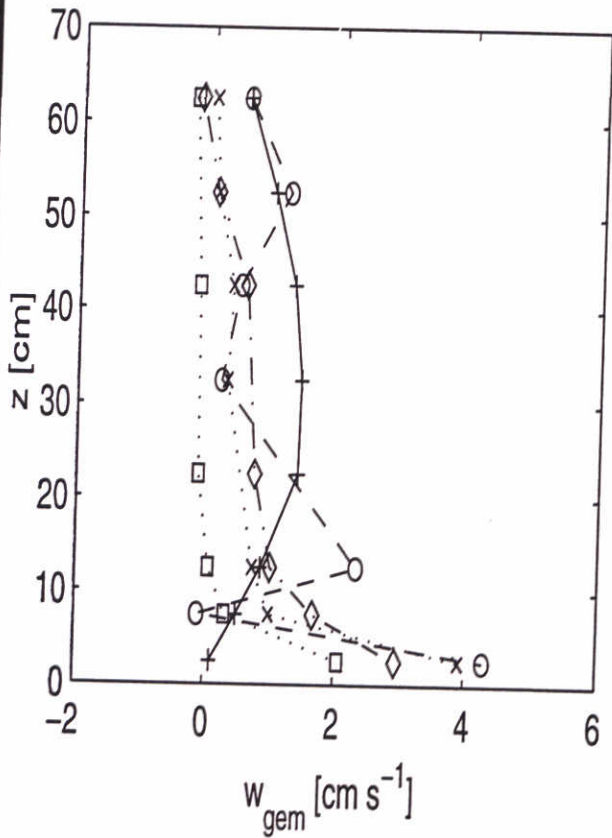
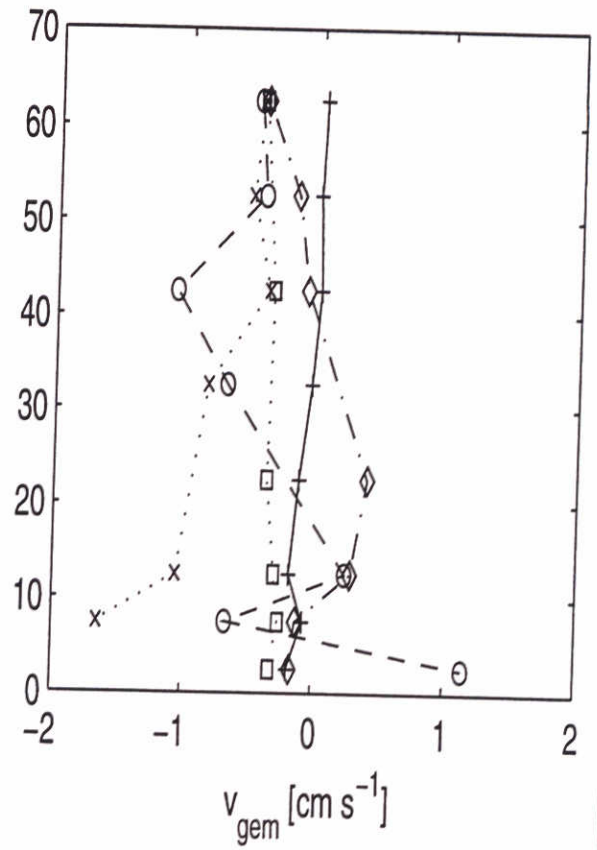
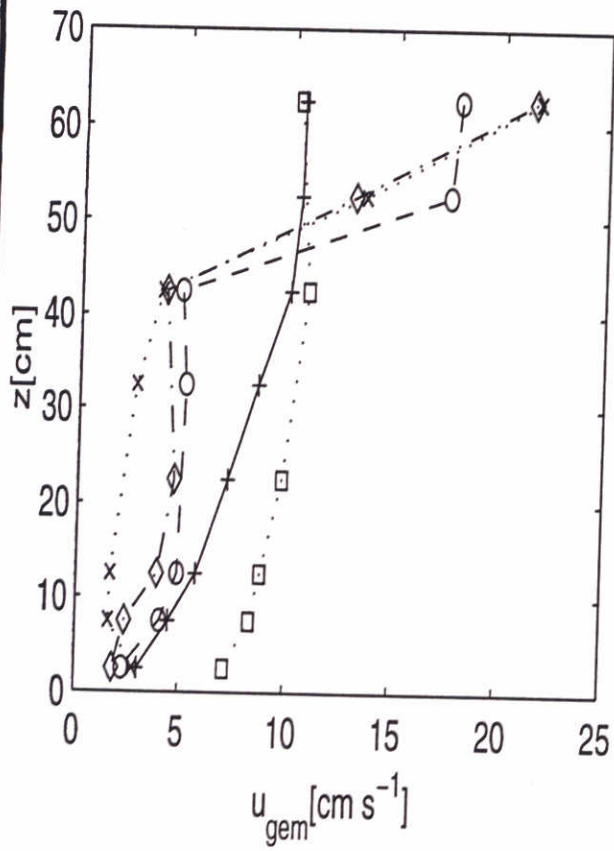
Gemiddelde snelheden
aanstroomsnelheid is 5 cm s⁻¹
hoge plant dichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.7



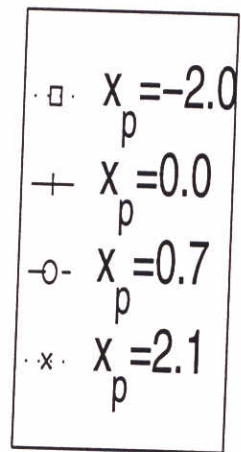
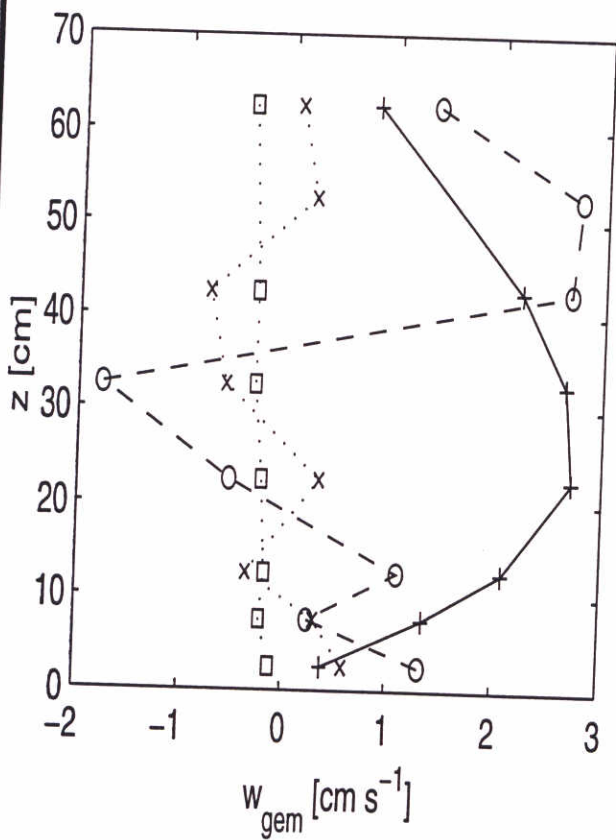
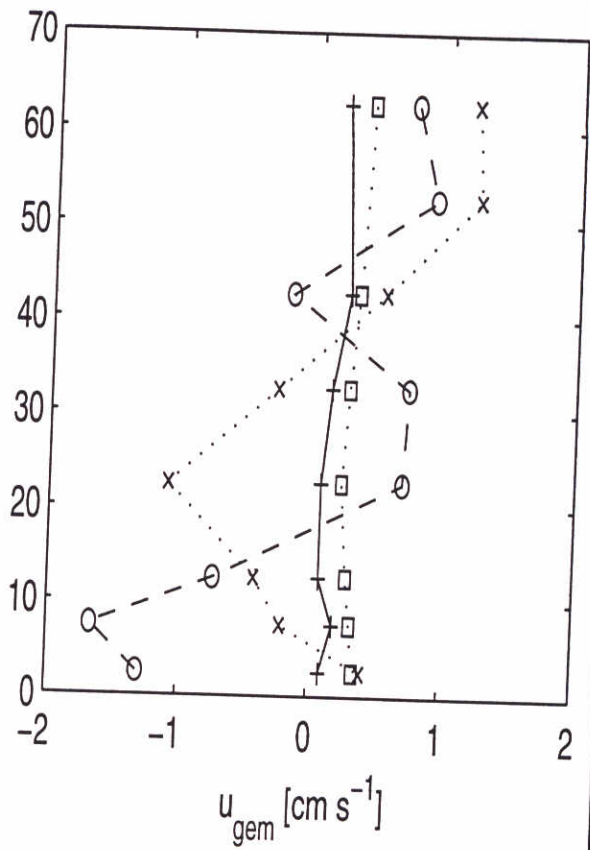
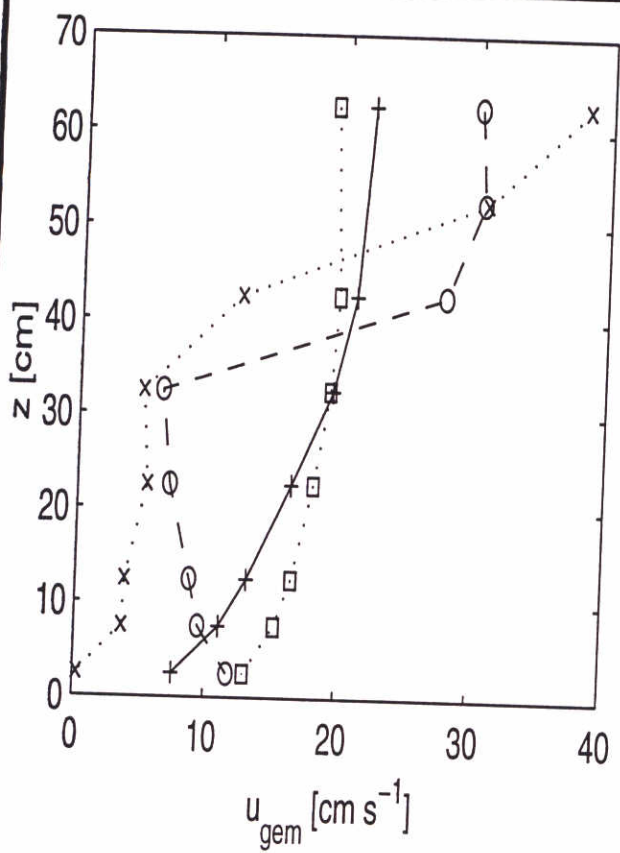
Gemiddelde snelheden
aanstroomsnelheid is 10 cm s⁻¹
hoge plant dichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.8



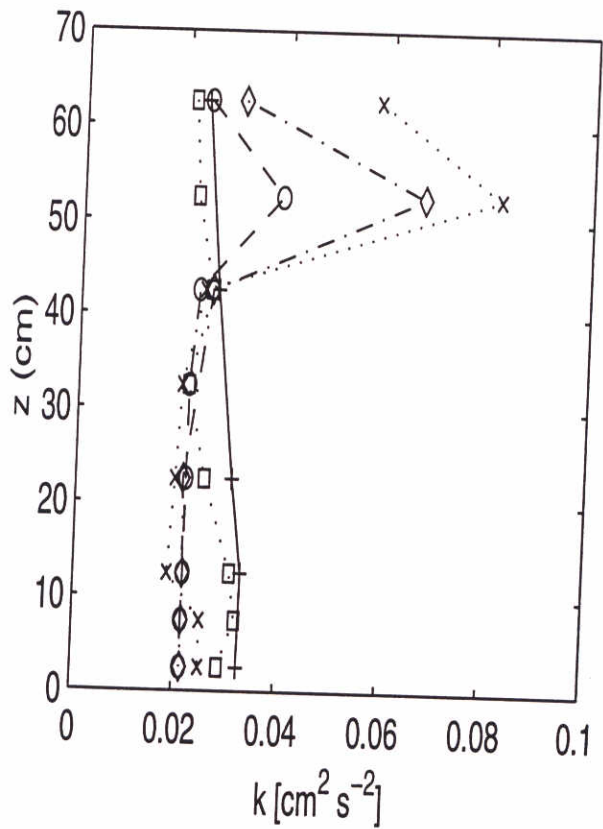
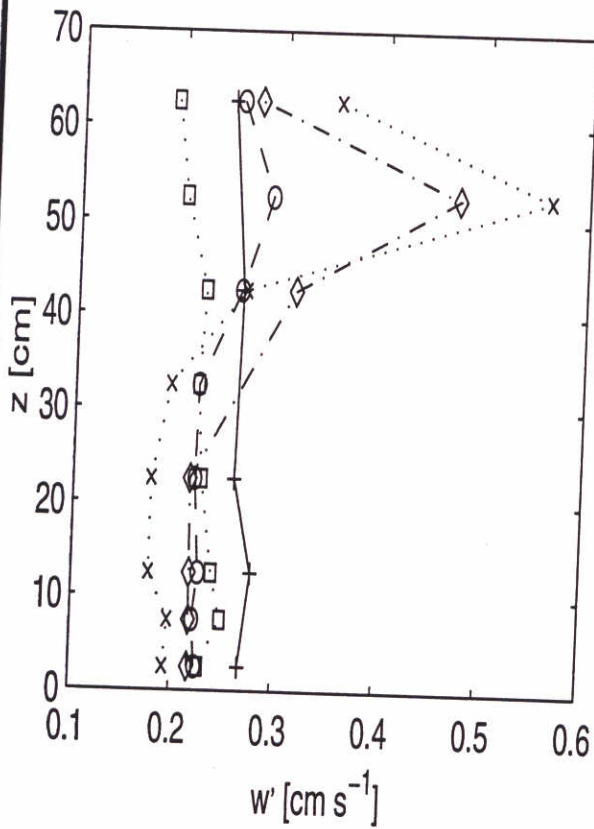
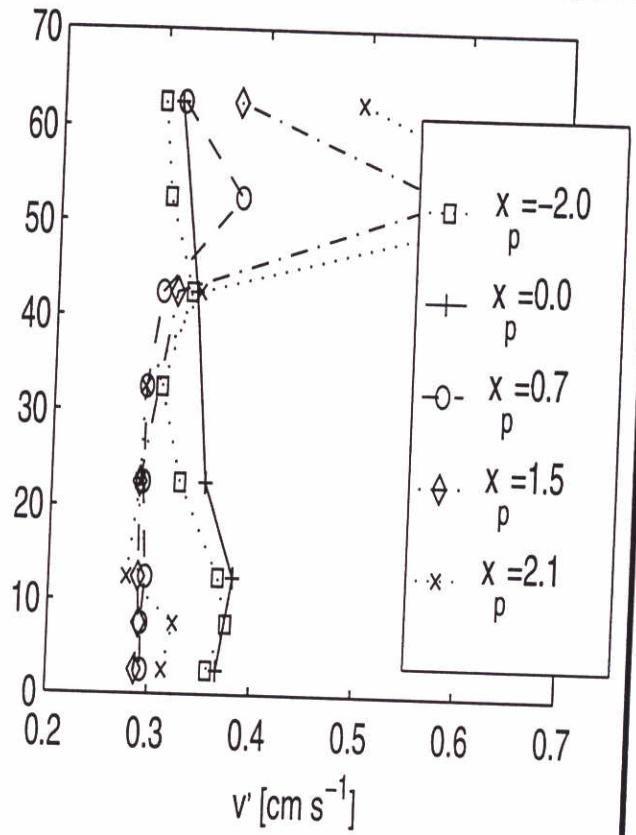
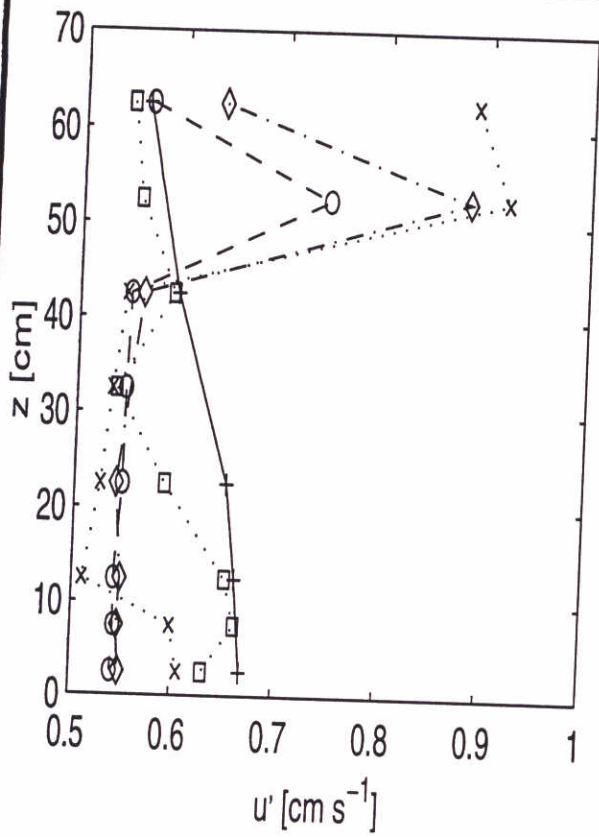
Gemiddelde snelheid
aanstroomsnelheid is 20 cm s⁻¹
hoge plant dichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.9



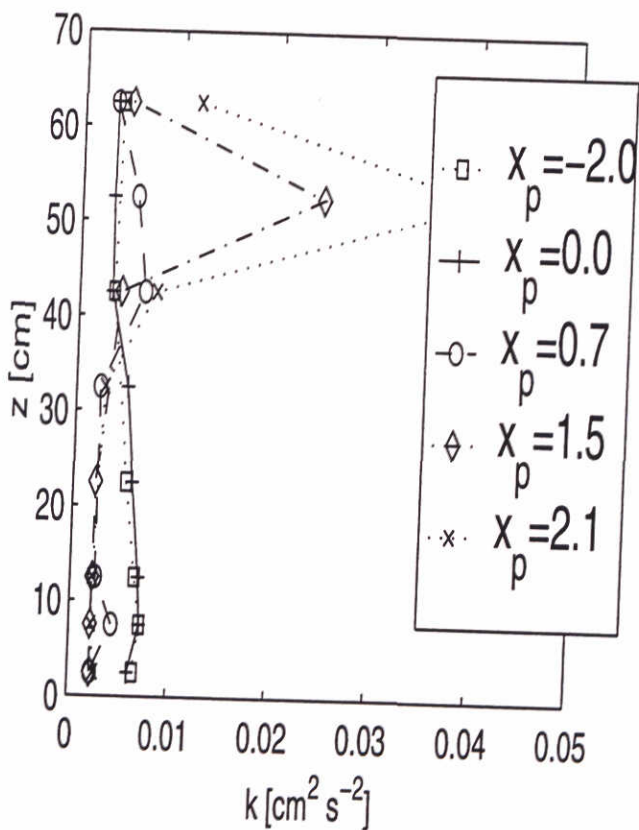
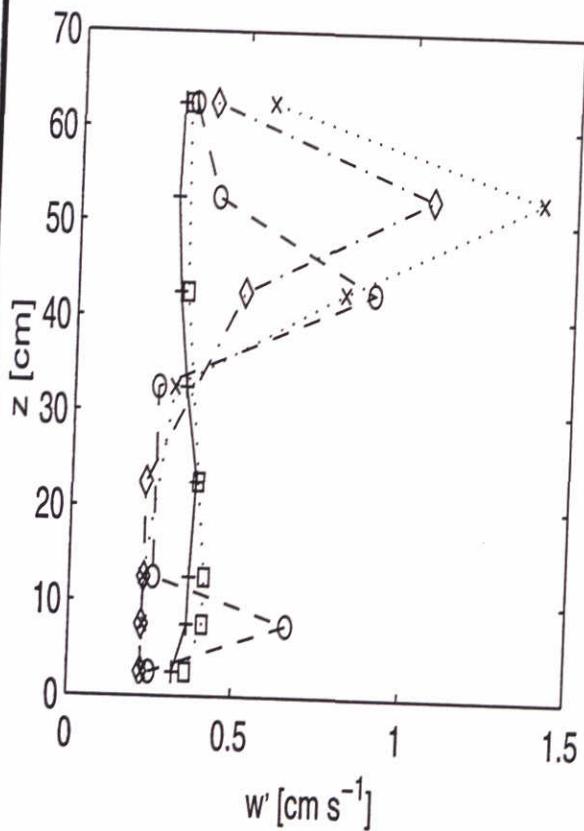
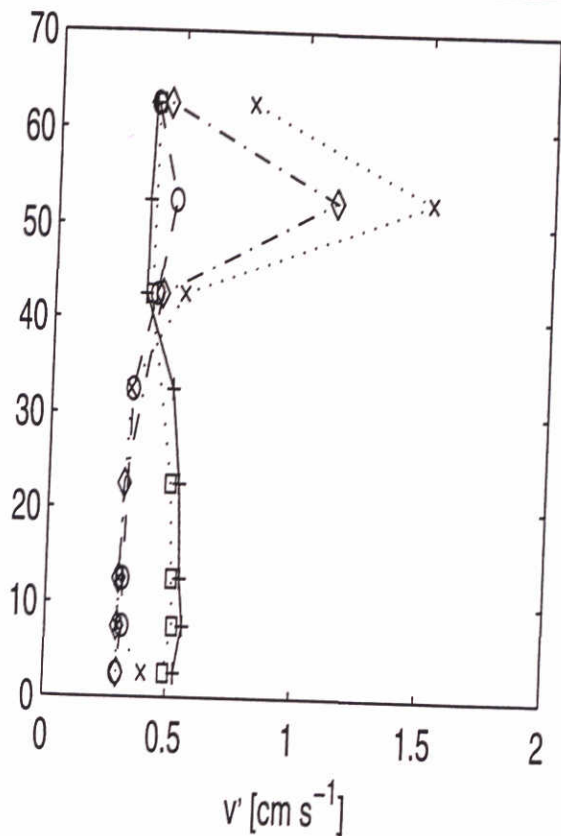
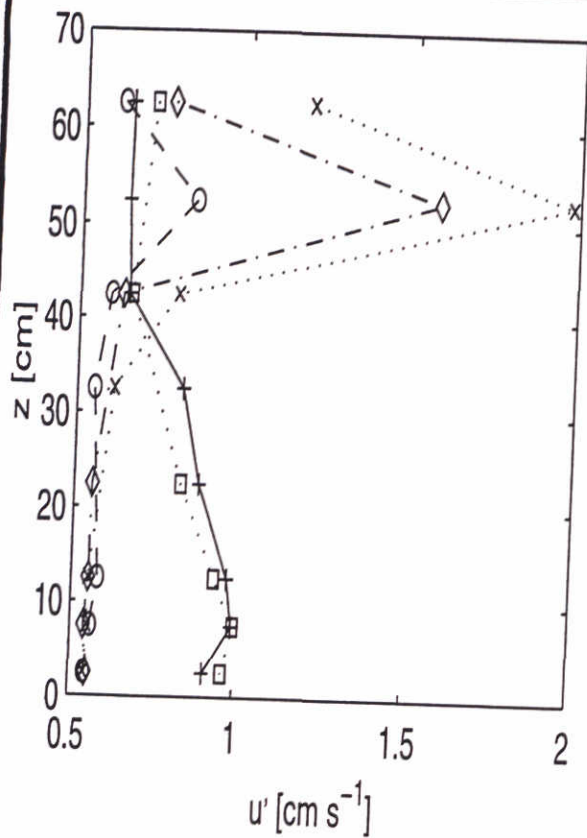
Turbulente intensiteit en kinetische energie
aanstroomsnelheid is 5 cm s⁻¹
hoge plant dichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.10



- $X_p = -2.0$
- ⊕ $X_p = 0.0$
- $X_p = 0.7$
- ◇ $X_p = 1.5$
- ⊗ $X_p = 2.1$

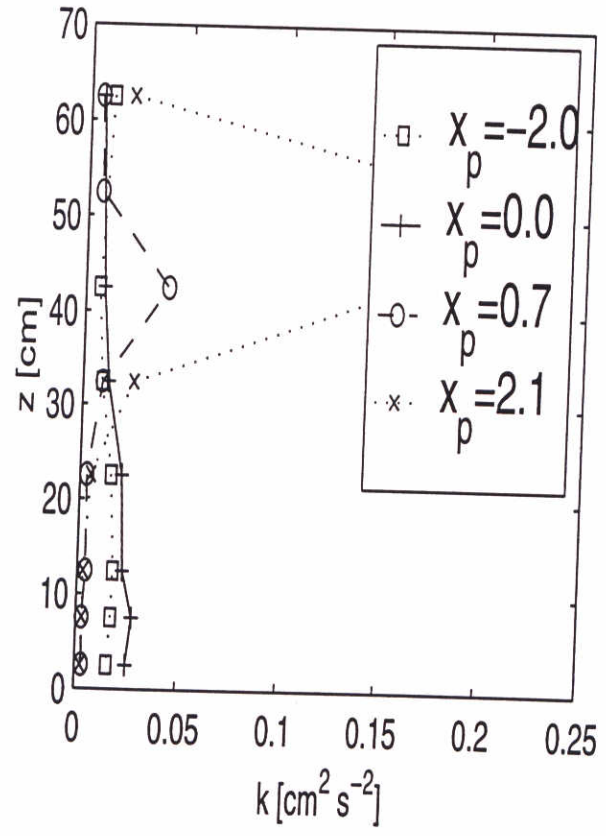
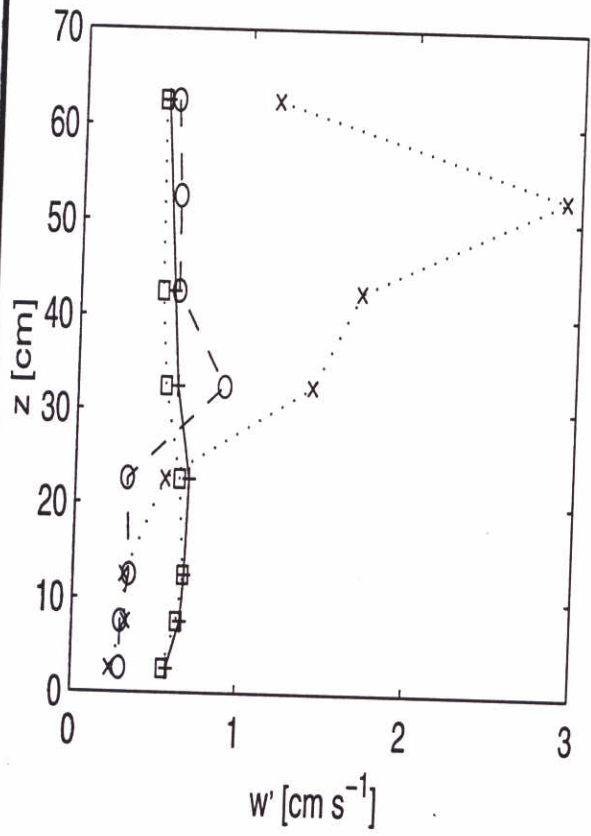
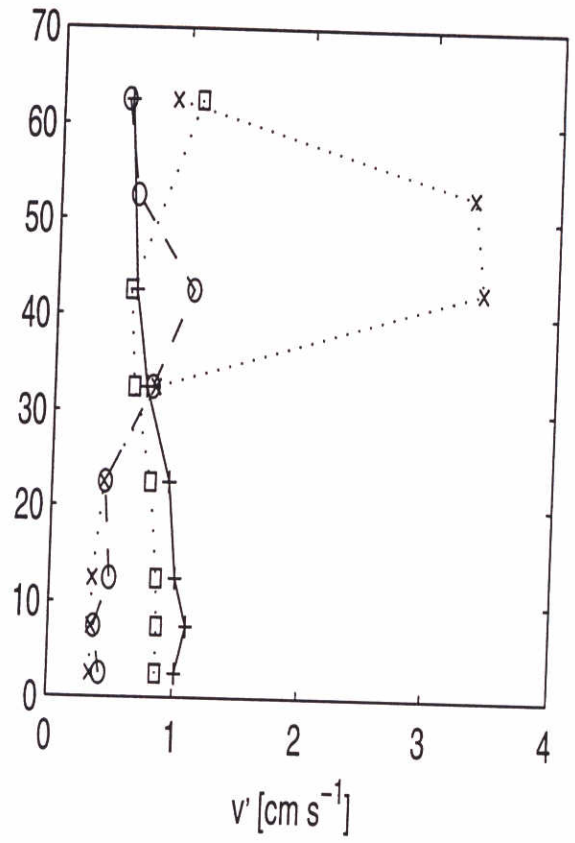
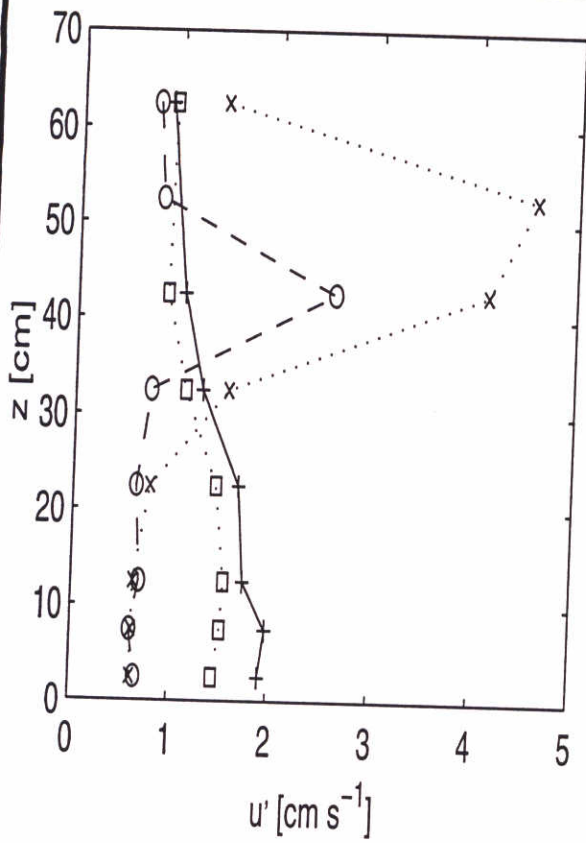
Turbulente intensiteit en kinetische energie
aanstroomsnelheid is 10 cm s⁻¹
hoge plant dichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.11



\square $x_p = -2.0$
 $+$ $x_p = 0.0$
 \circ $x_p = 0.7$
 \times $x_p = 2.1$

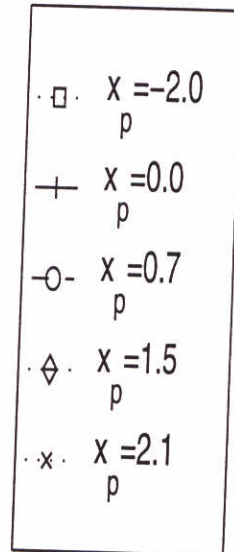
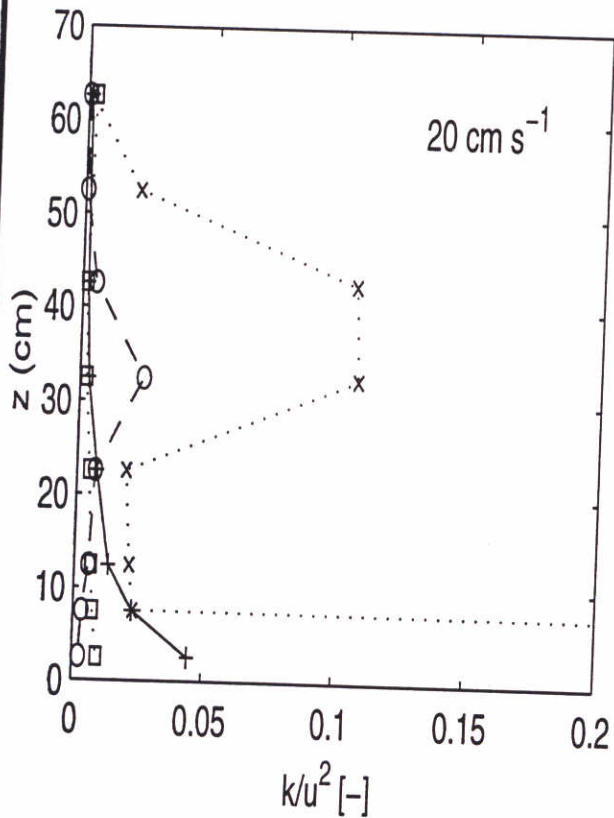
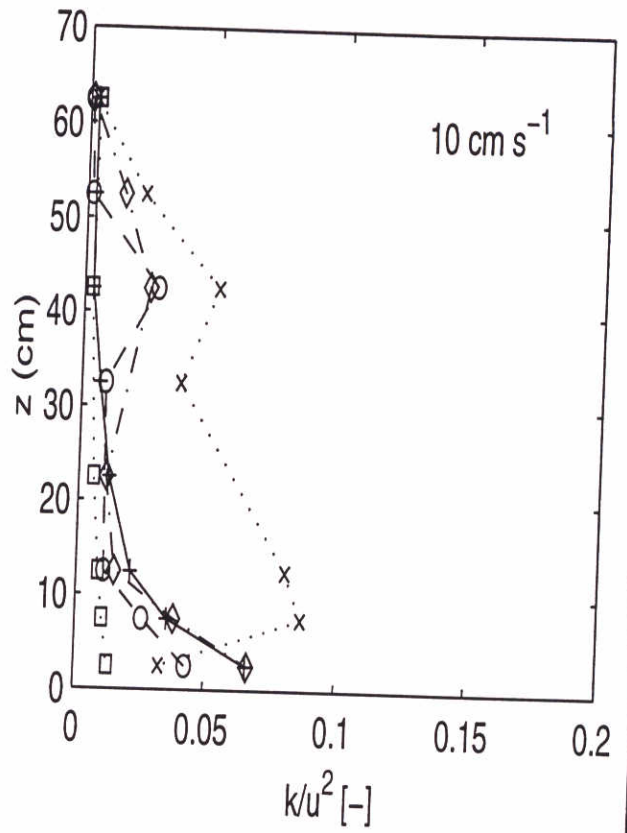
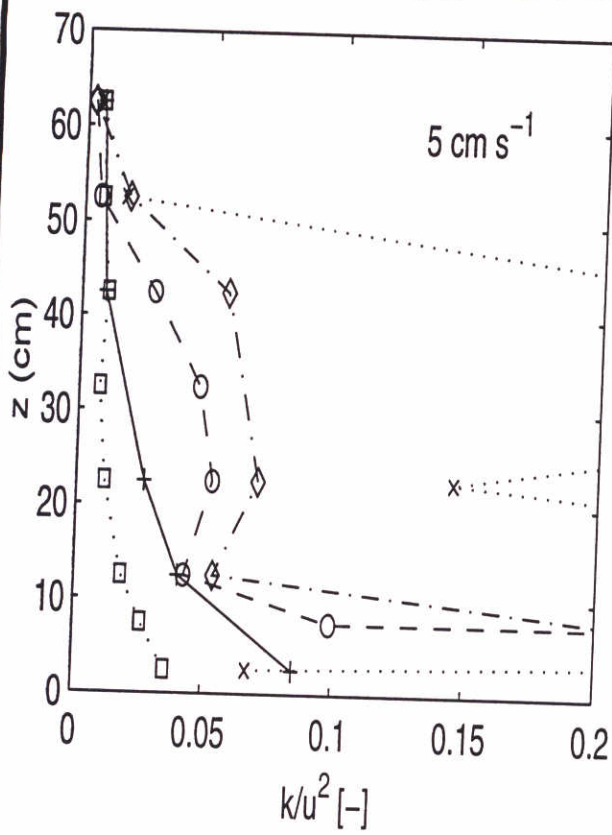
Turbulente intensiteit en kinetische energie
aanstroomsnelheid is 20 cm s^{-1}
hoge plant dichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.12



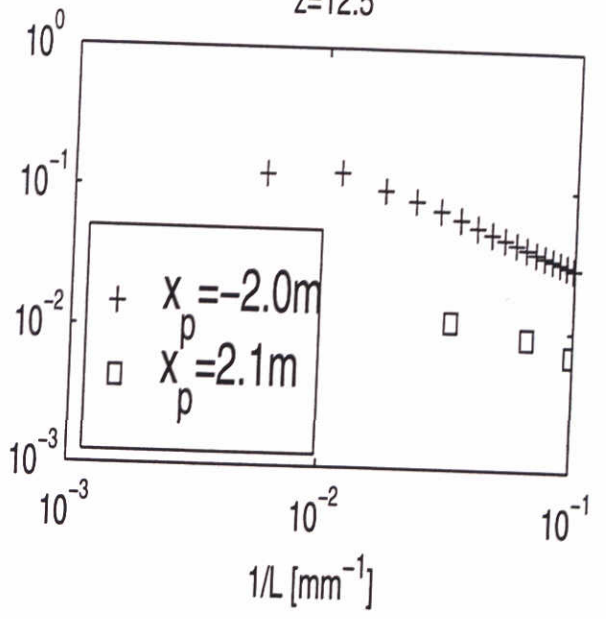
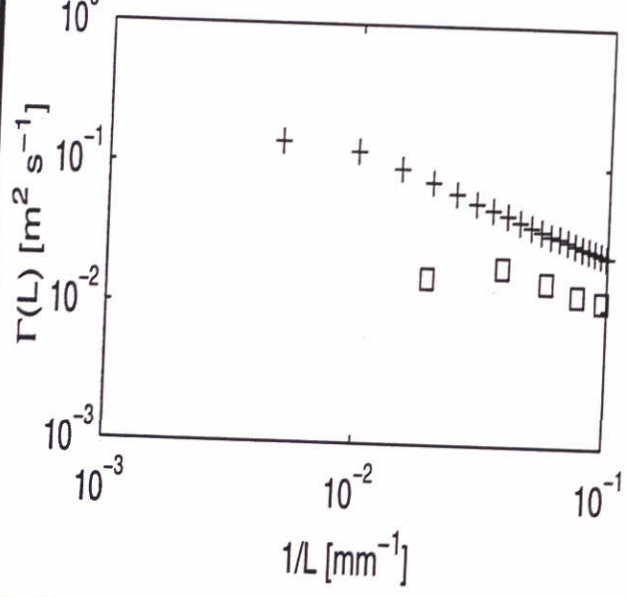
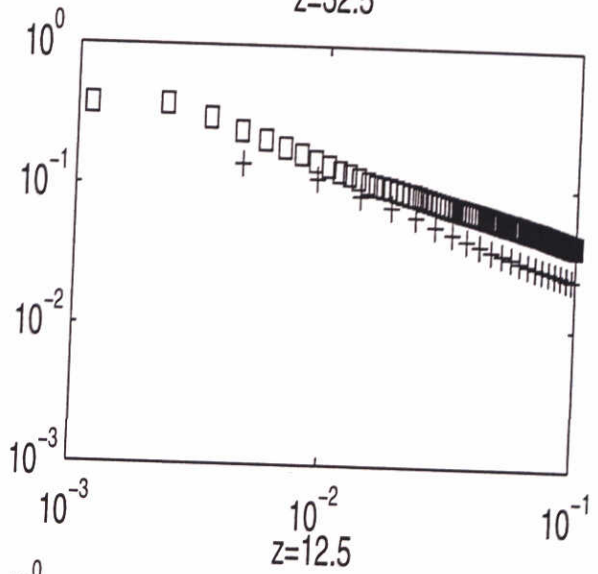
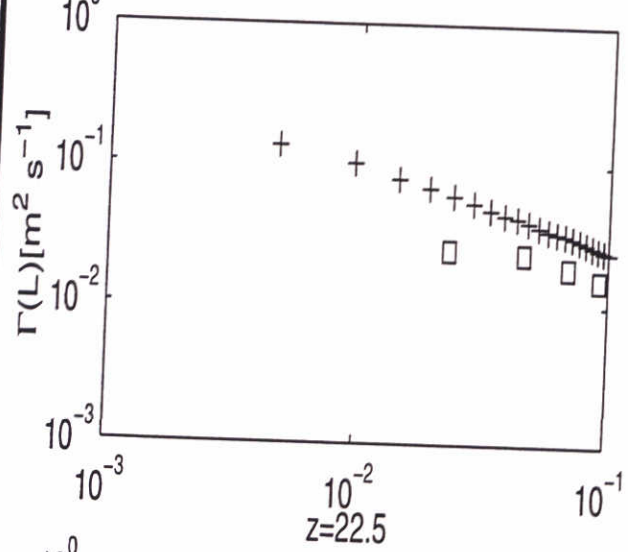
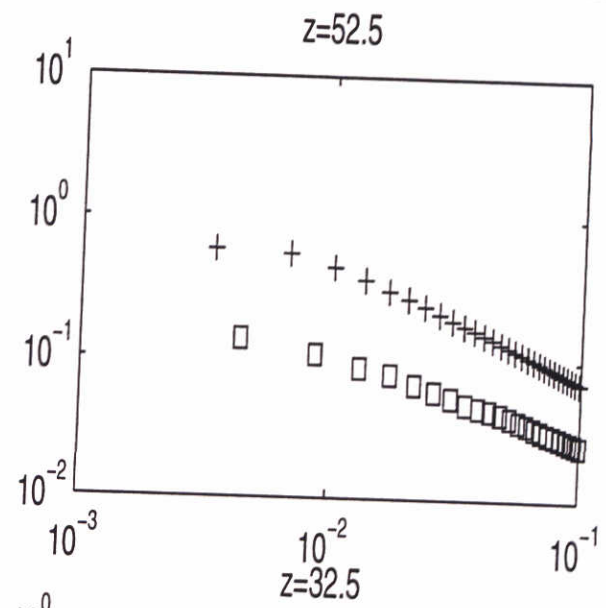
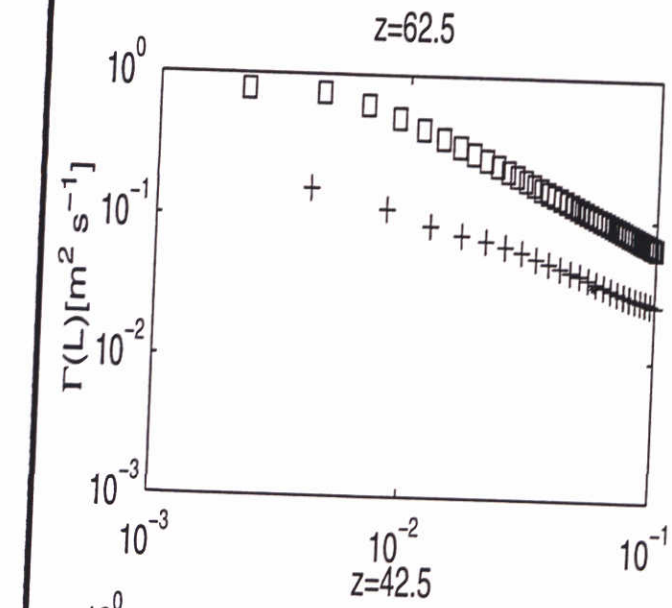
Dimensieloze turbulente kinetische energie
hoge plantdichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z2473

FIG 3.13



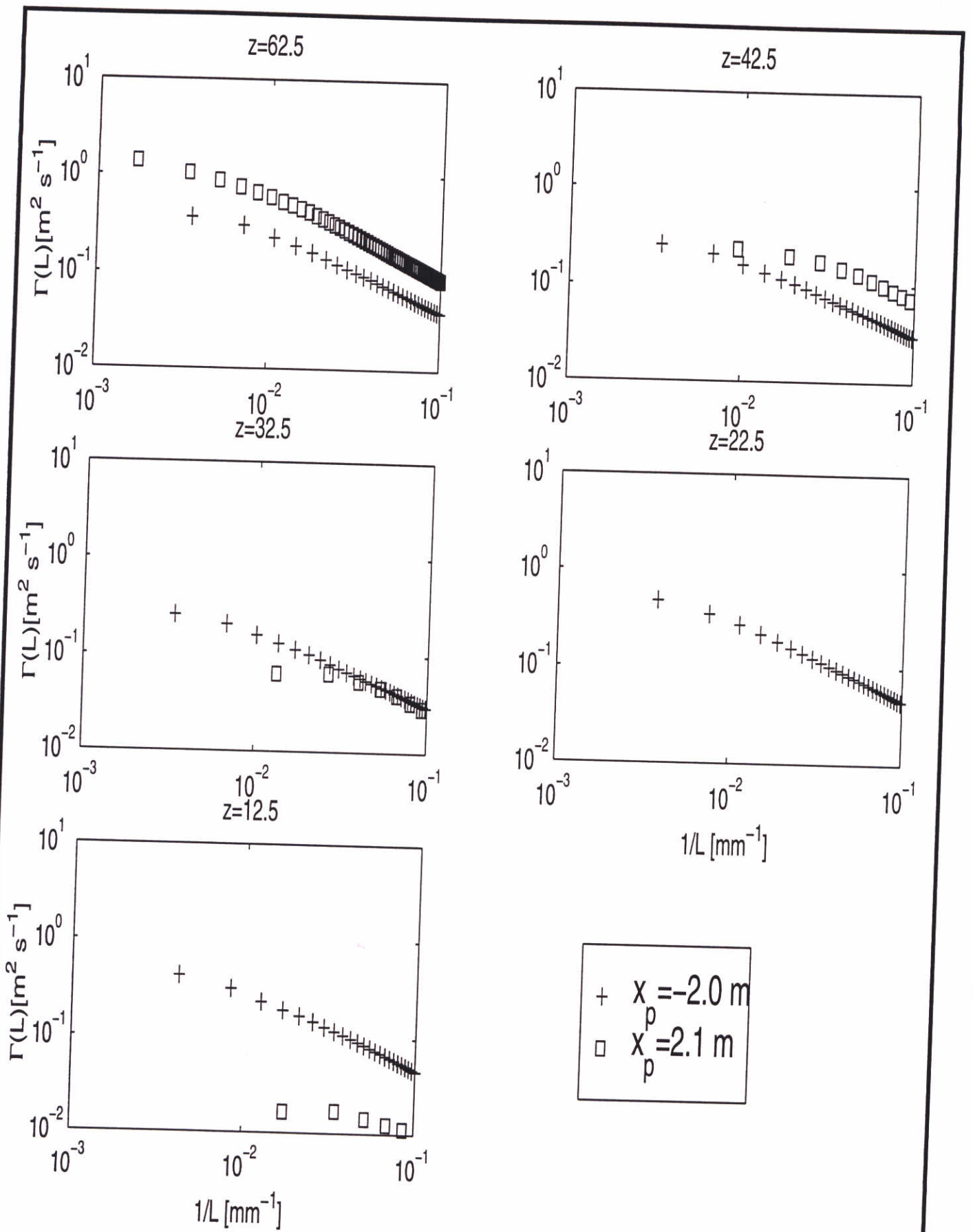
Turbulente mengcoëfficiënten
aanstroomsnelheid is 5 cm s^{-1}
hoge plant dichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.14



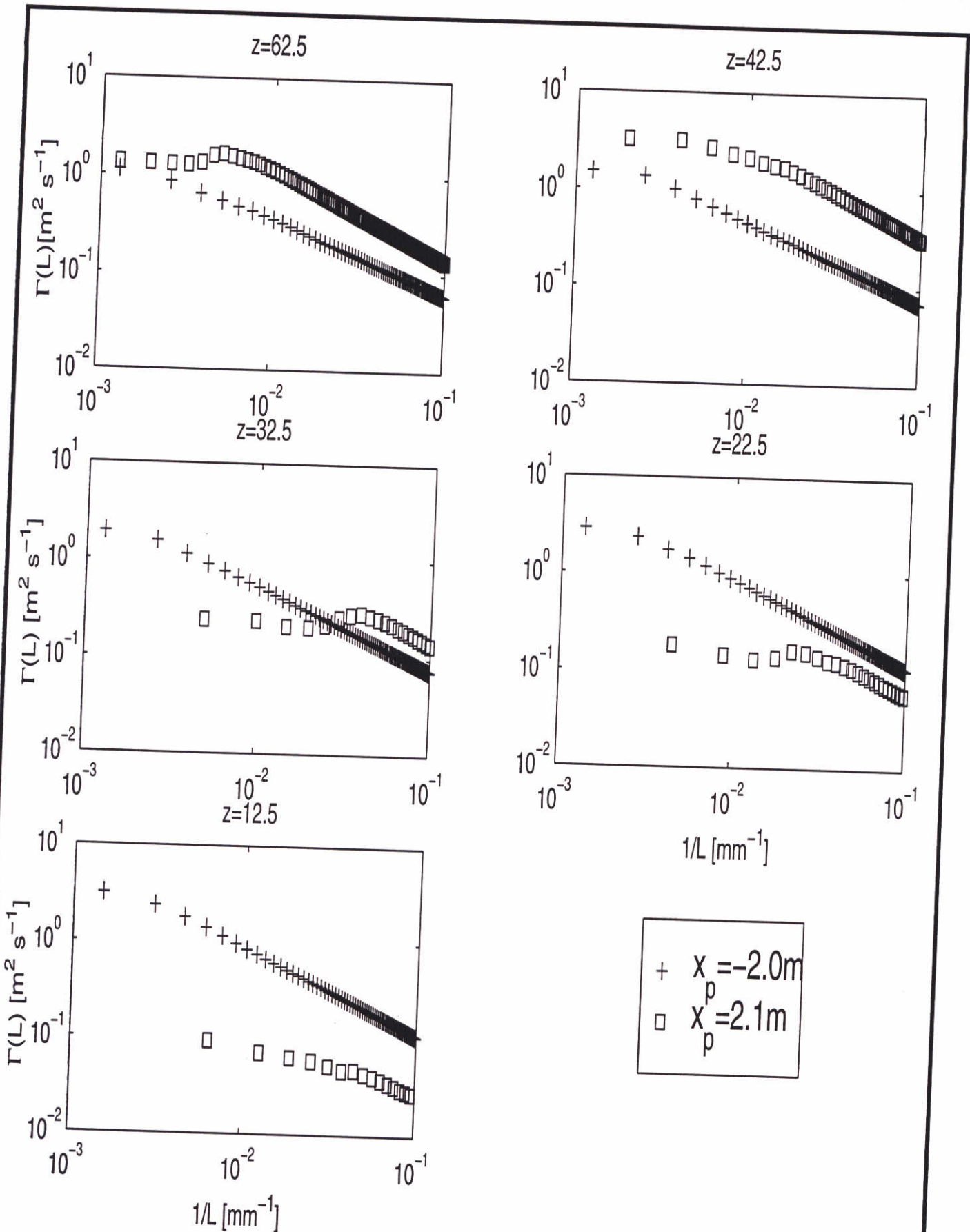
Turbulente mengcoëfficiënten
aanstroomsnelheid is 10 cm s^{-1}
hoge plant dichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.15



Turbulente mengcoëfficiënten
aanstroomsnelheid is 20 cm s^{-1}
hoge plant dichtheid

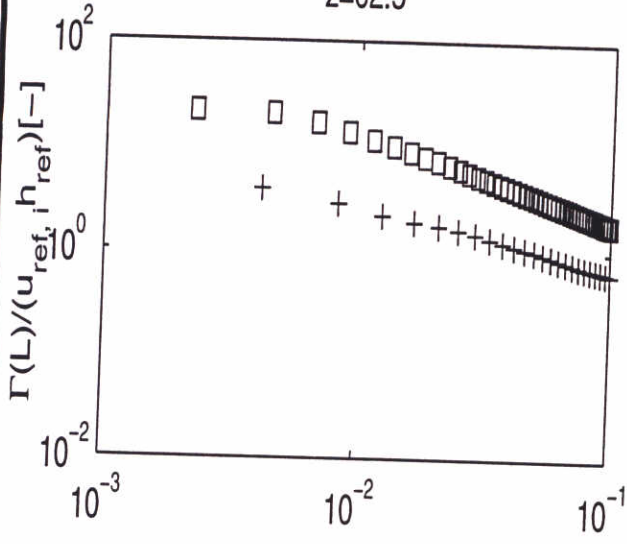
Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

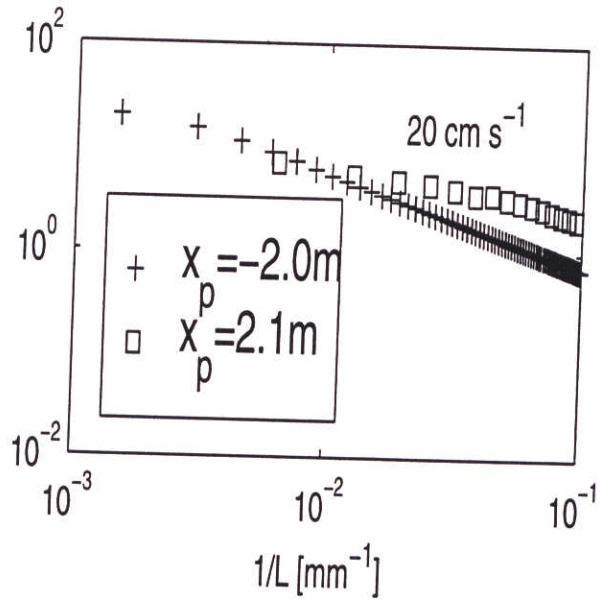
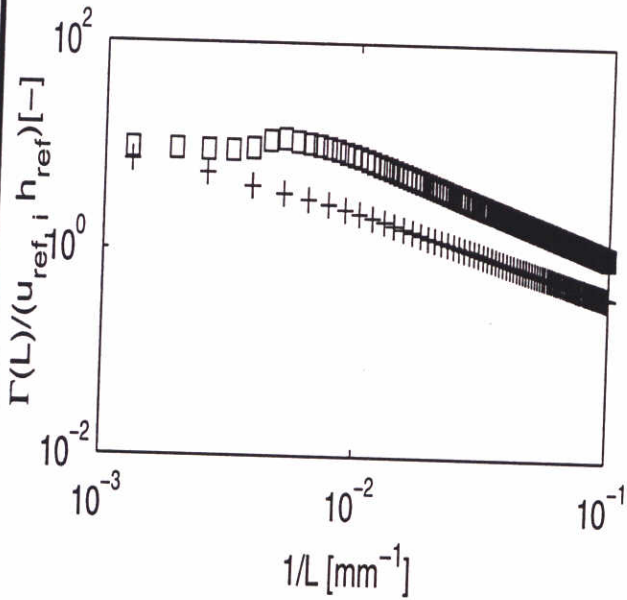
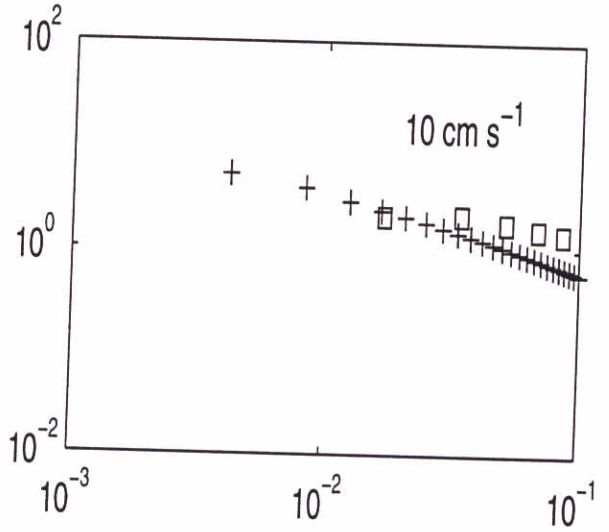
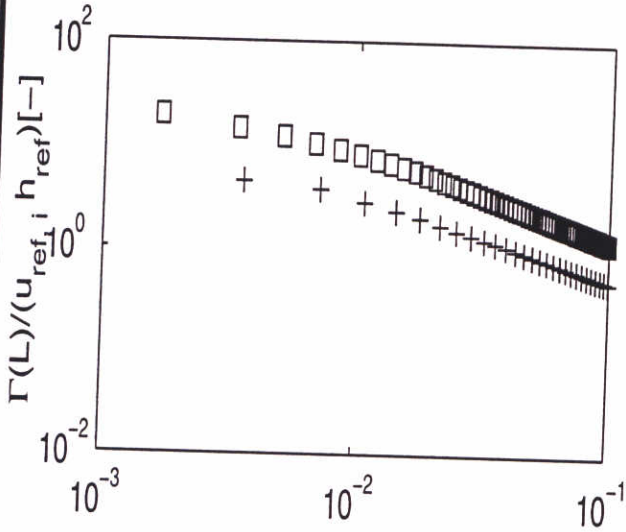
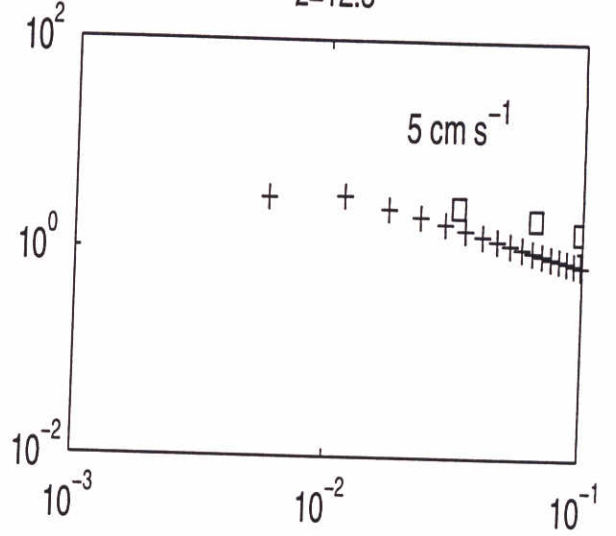
Z 2473

FIG 3.16

$z=62.5$



$z=12.5$



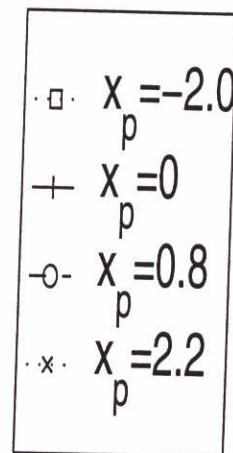
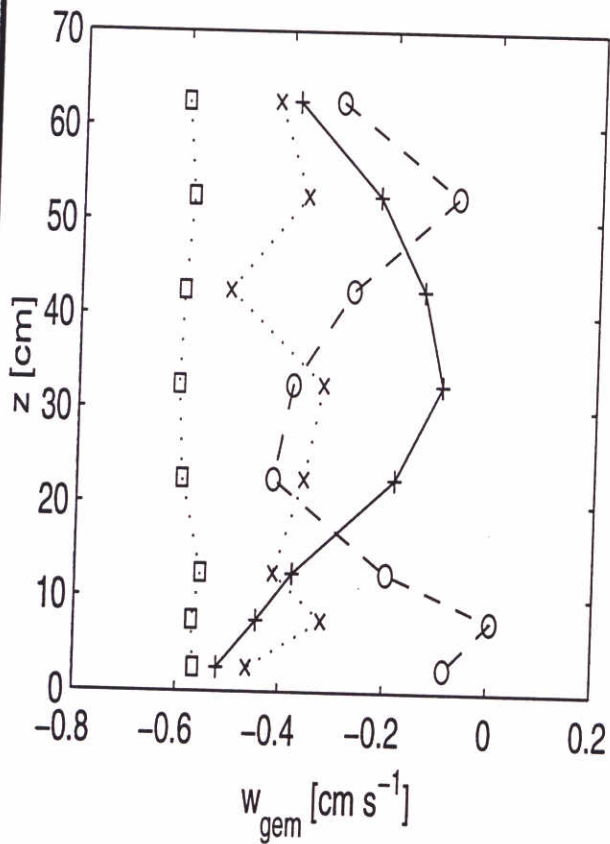
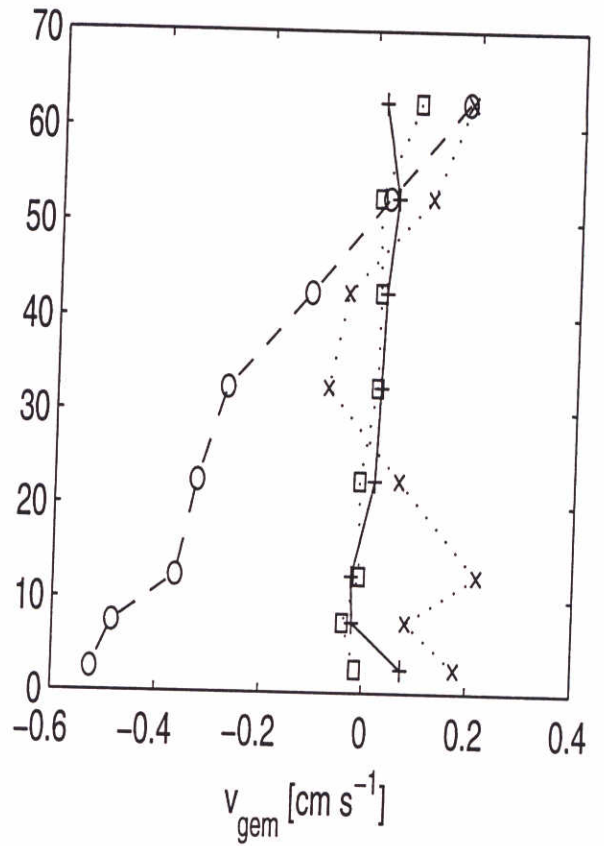
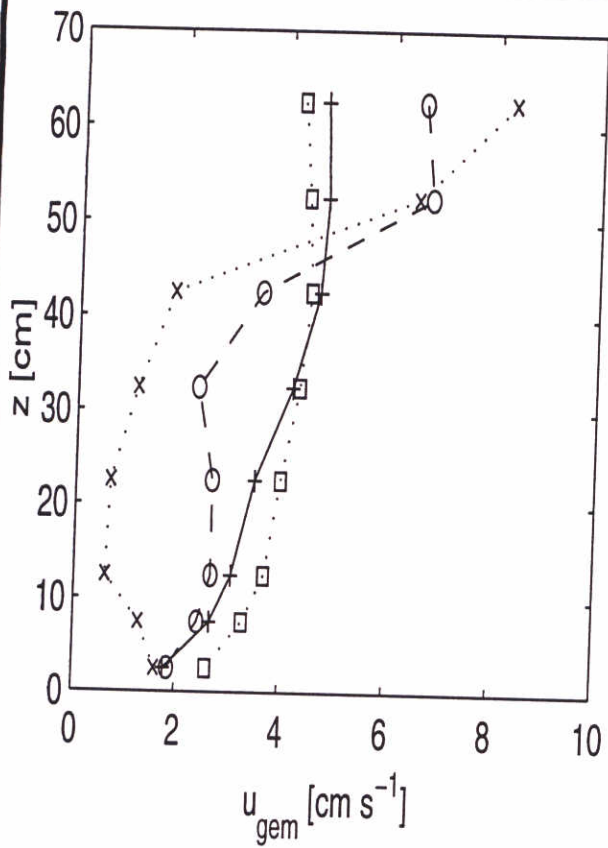
Dimensieloze turbulente mengcoëfficiënten
hoge plantdichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z2473

FIG 3.17



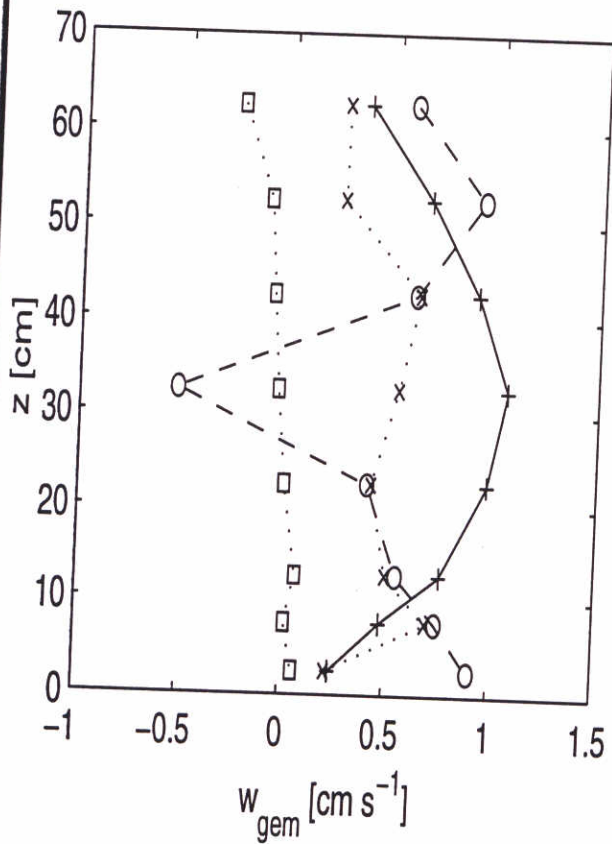
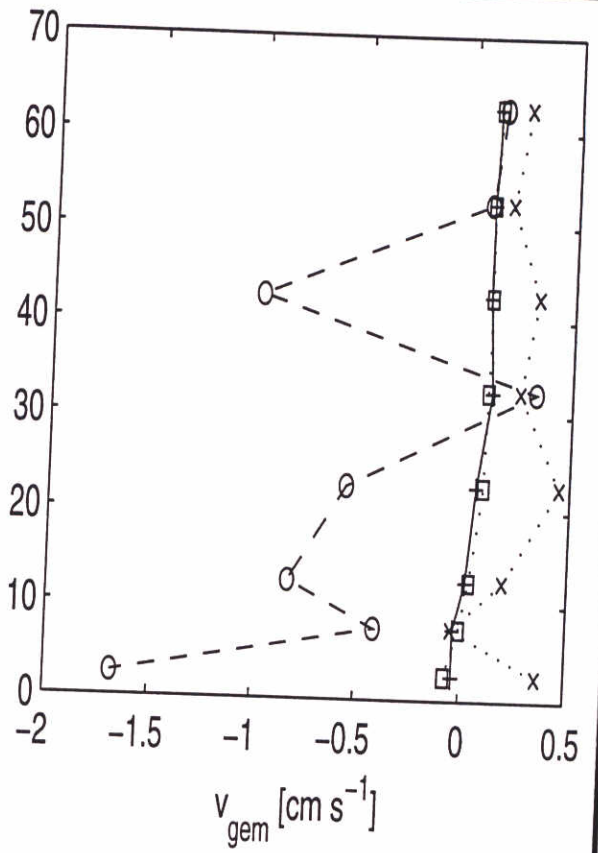
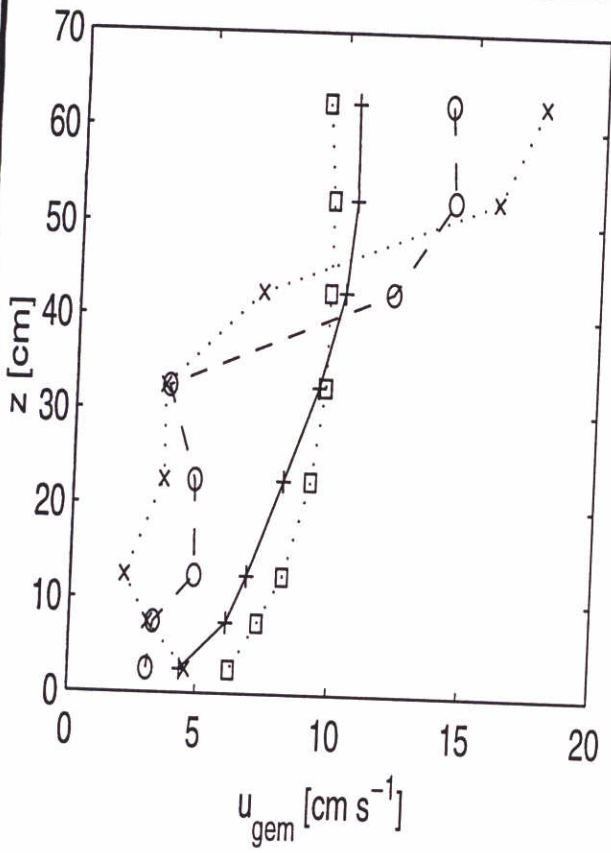
Gemiddelde snelheden
aanstroomsnelheid is 5 cm s⁻¹
lage plant dichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.18



□	$x_p = -2.0$
+	$x_p = 0.0$
○	$x_p = 0.8$
×	$x_p = 2.1$

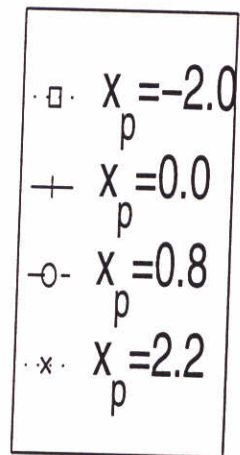
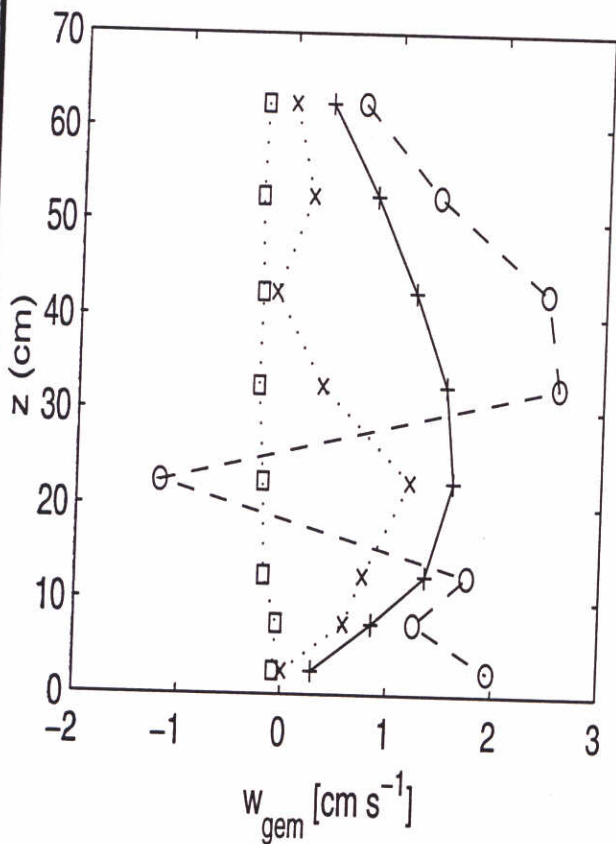
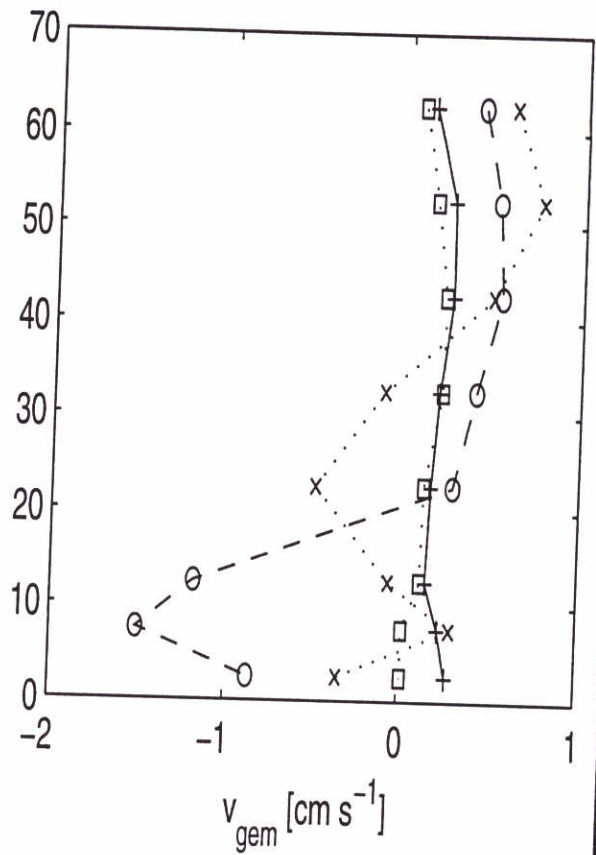
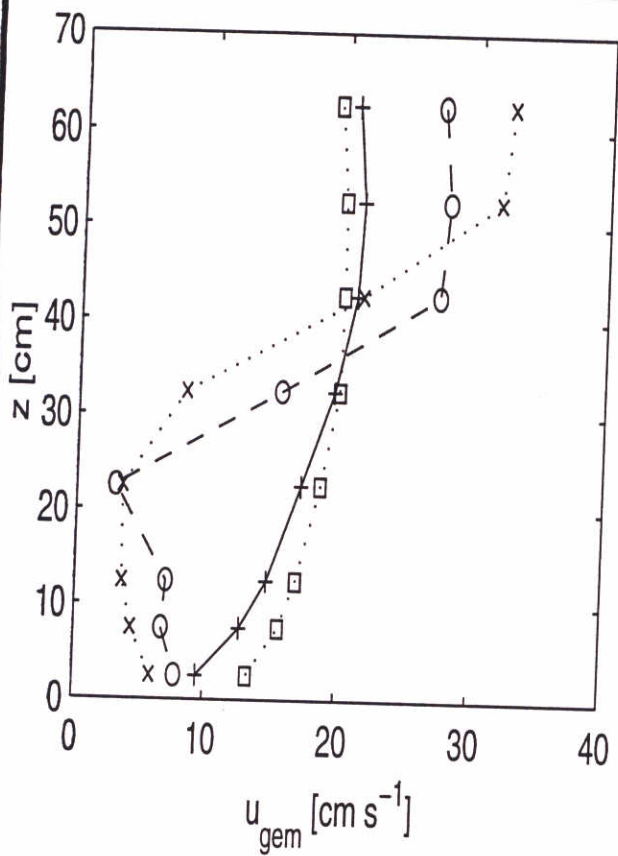
Gemiddelde snelheden
aanstroomsnelheid is 10 cm s⁻¹
lage plant dichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.19



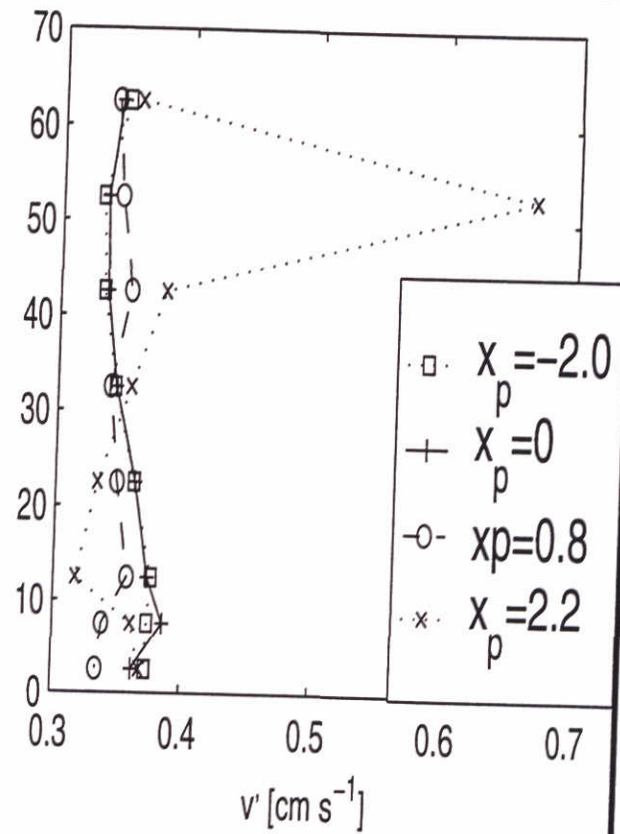
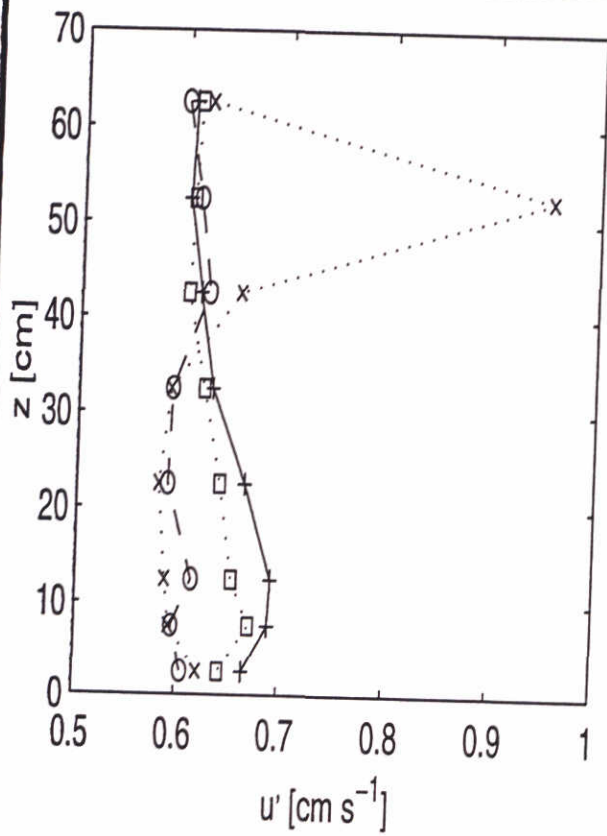
Gemiddelde snelheden
aanstroomsnelheid is 20 cm s⁻¹
lage plant dichtheid

Getijgoot experimenten

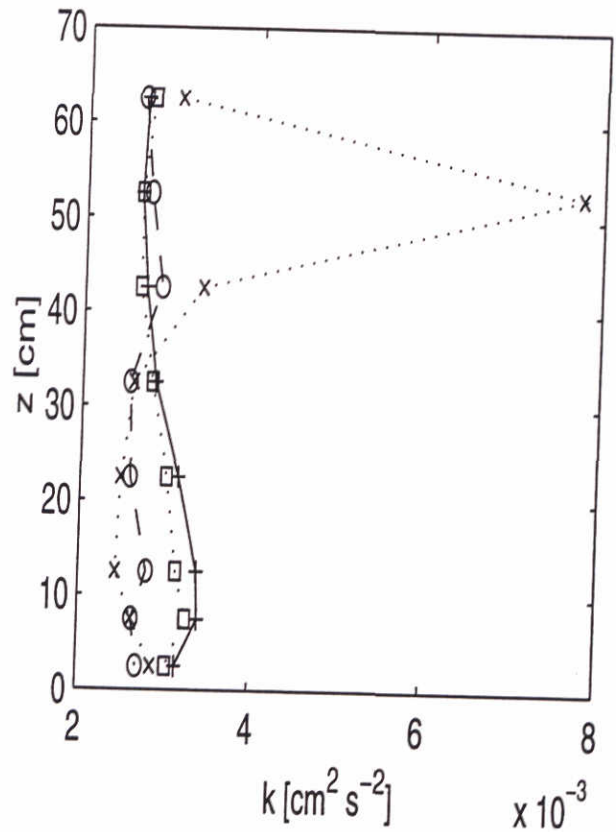
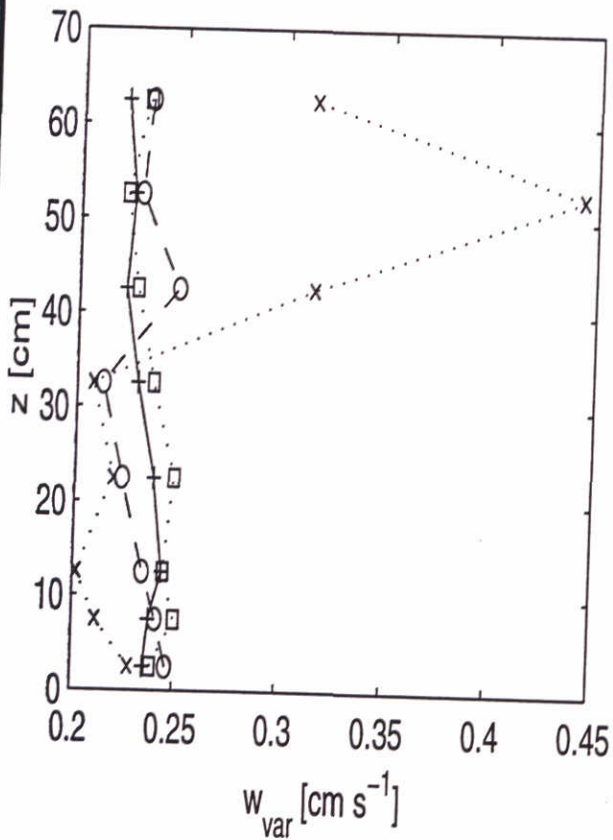
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.20



- $x_p = -2.0$
- + $x_p = 0$
- $x_p = 0.8$
- × $x_p = 2.2$



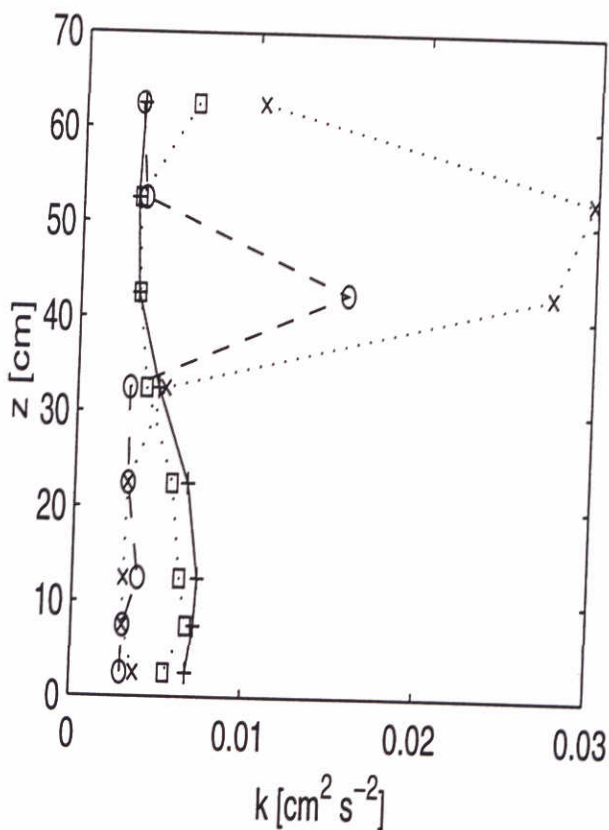
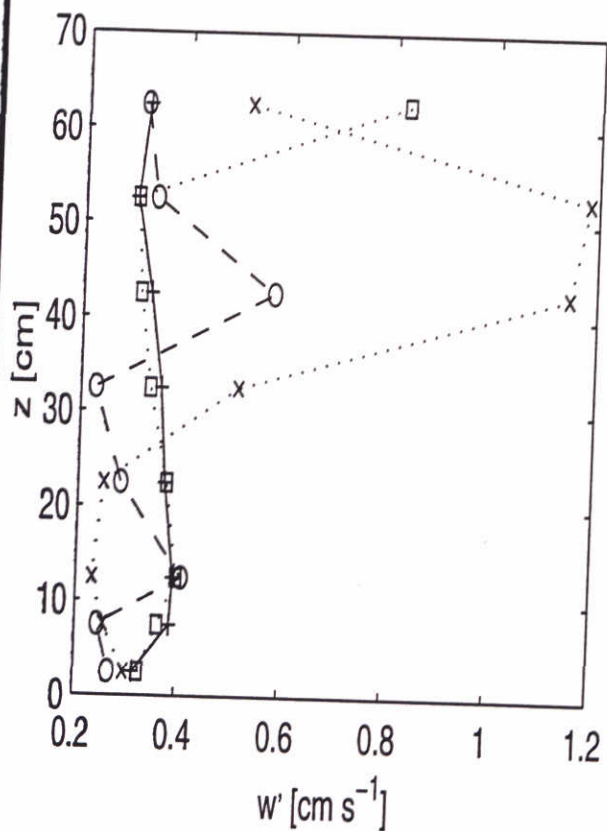
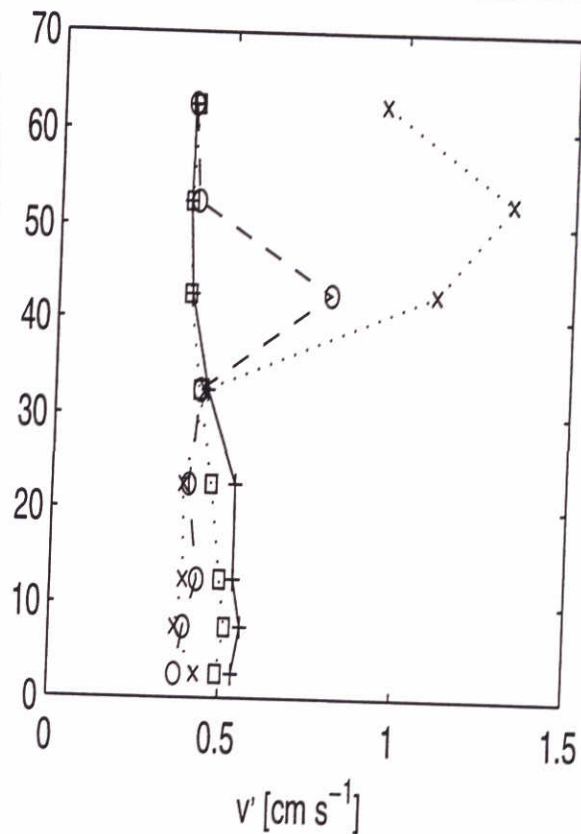
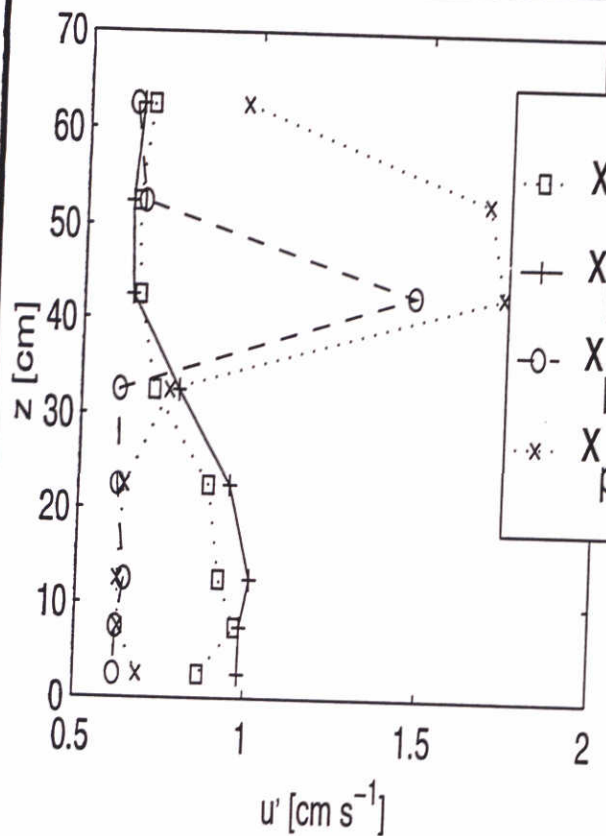
Turbulente intensiteit en kinetische energie
aanstroomsnelheid is 5 cm s^{-1}
lage plant dichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.21



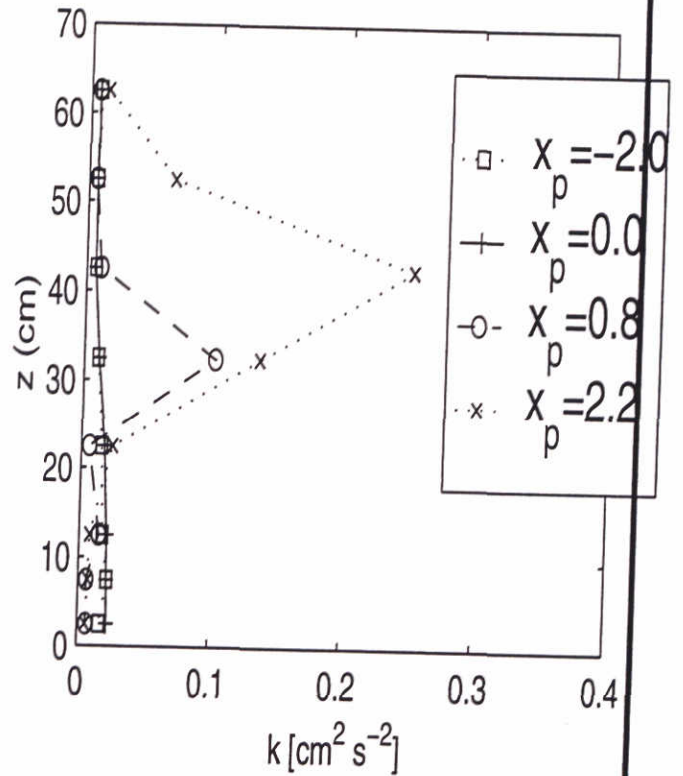
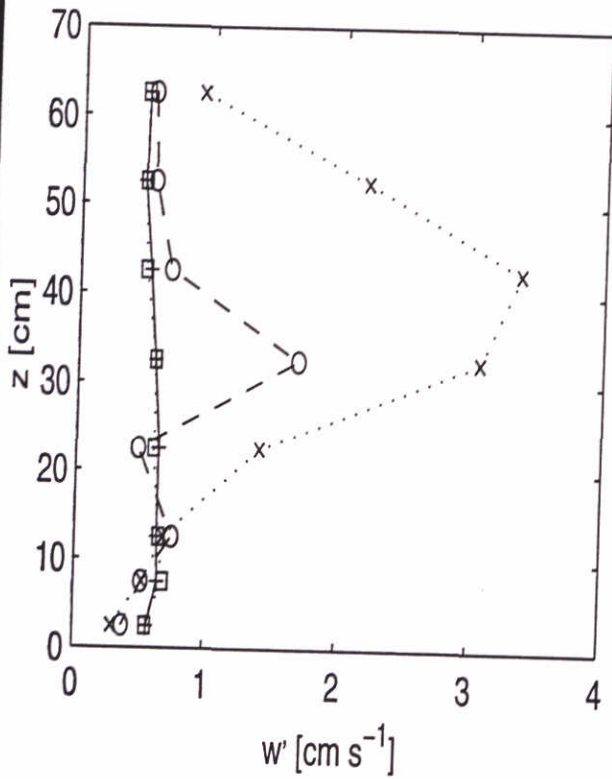
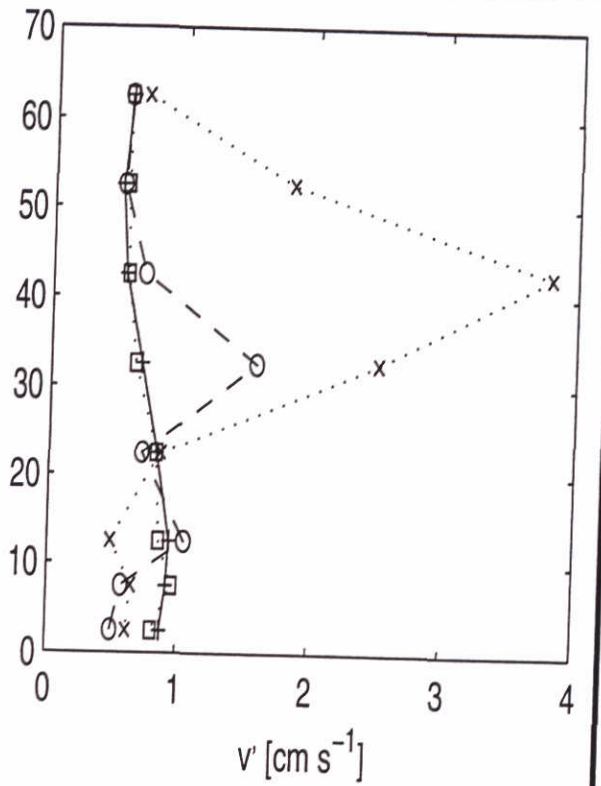
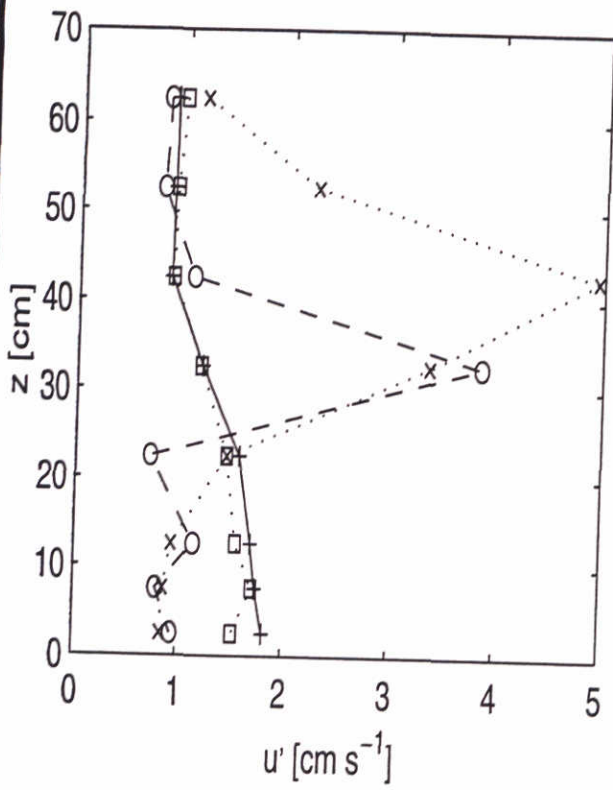
Turbulente intensiteit en kinetische energie
aanstroomsnelheid is 10 cm s⁻¹
lage plant dichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.22



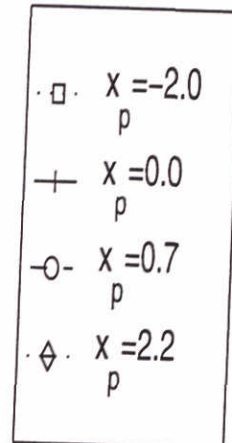
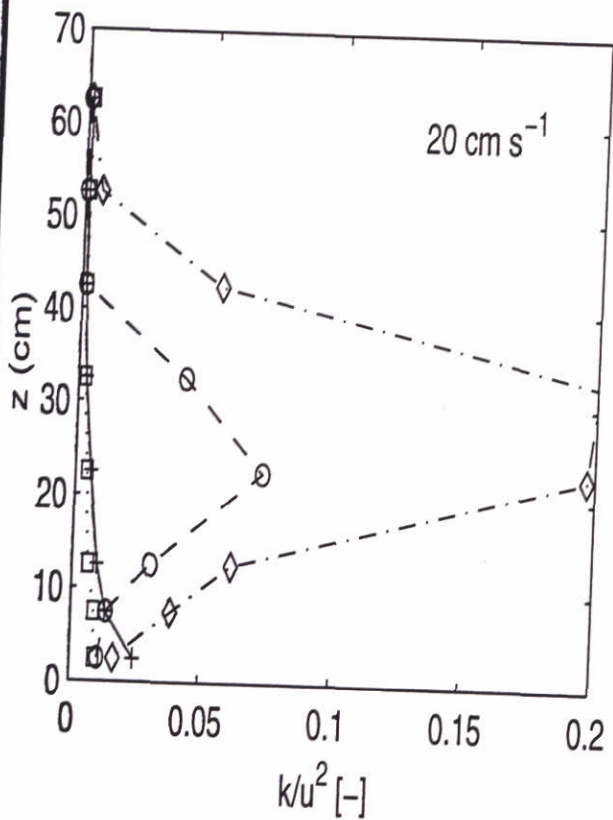
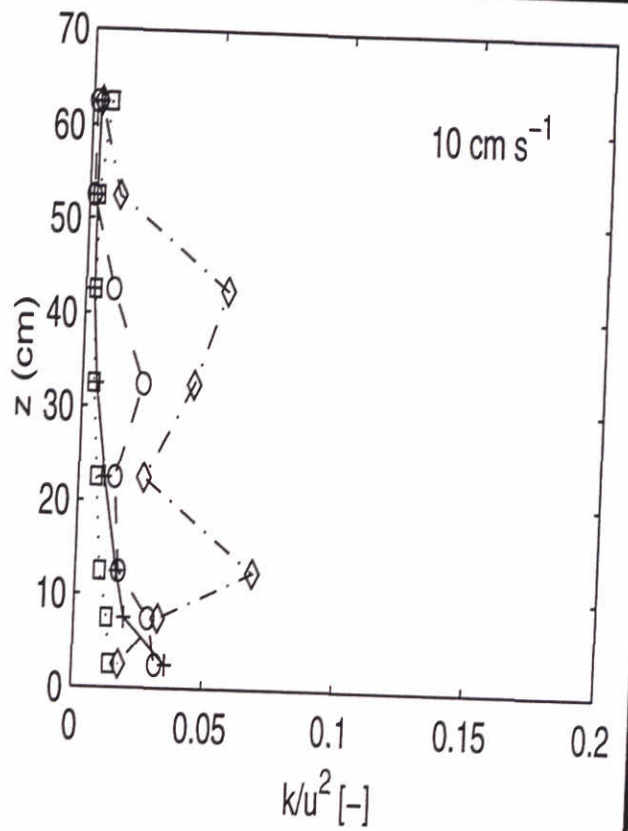
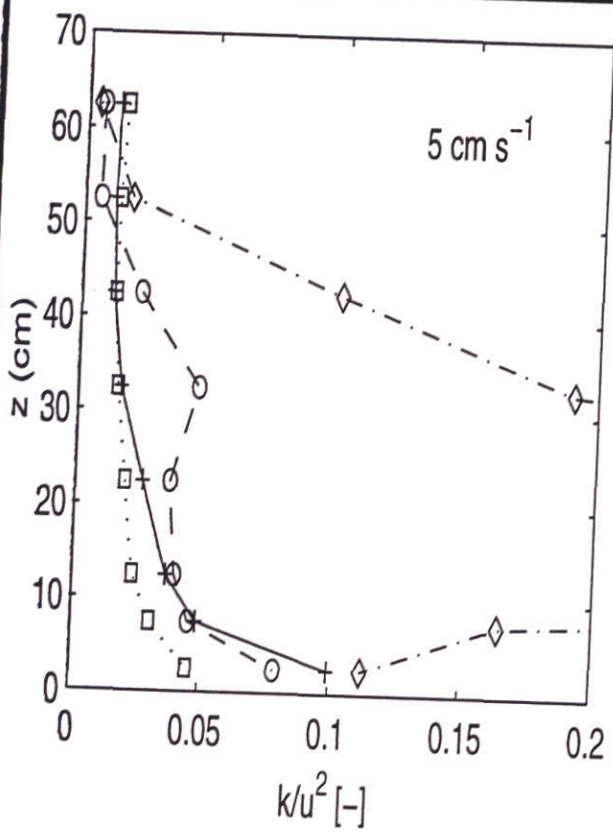
Turbulente intensiteit en kinetische energie
aanstroomsnelheid is 20 cm s^{-1}
lage plant dichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.23



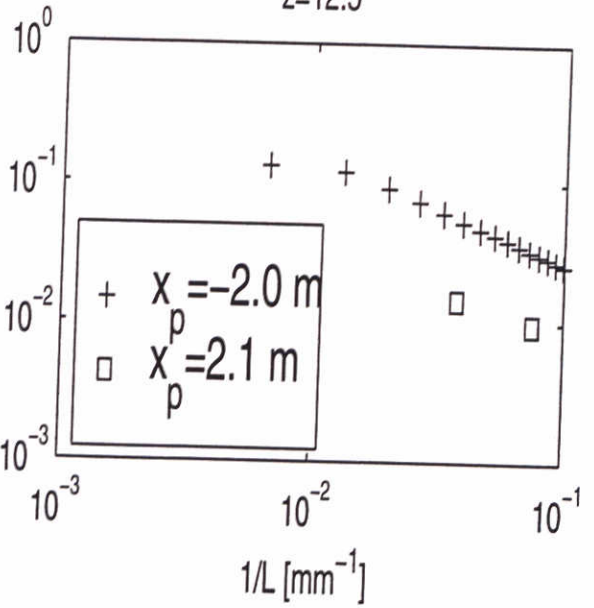
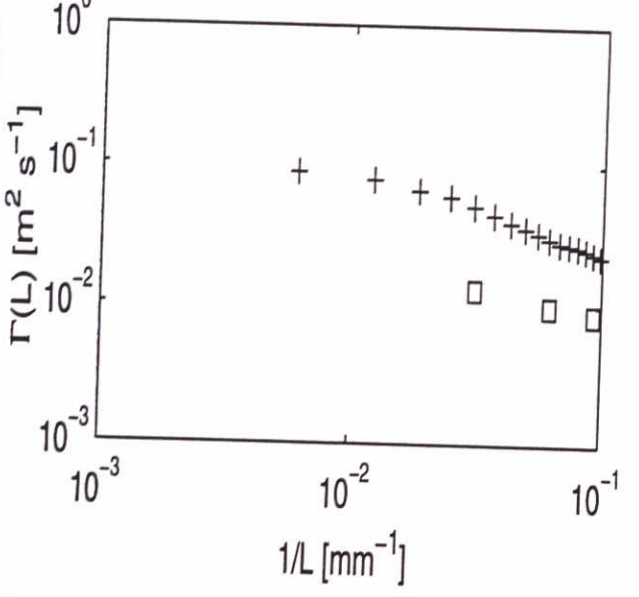
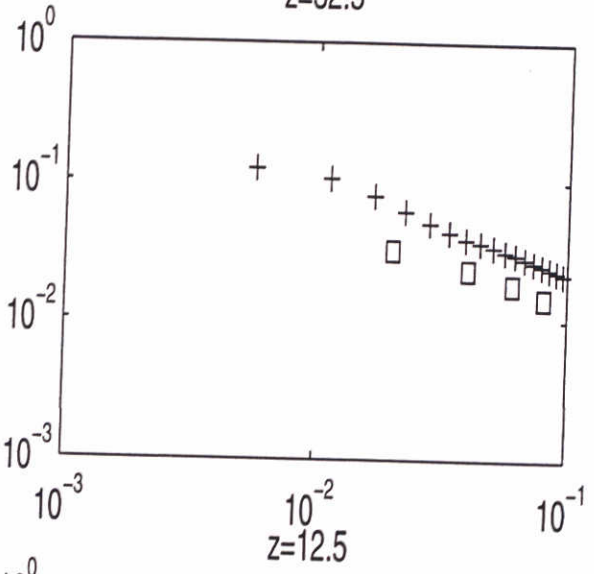
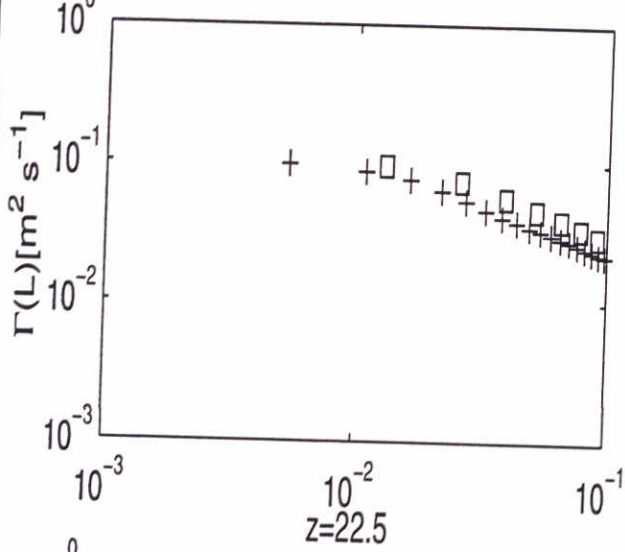
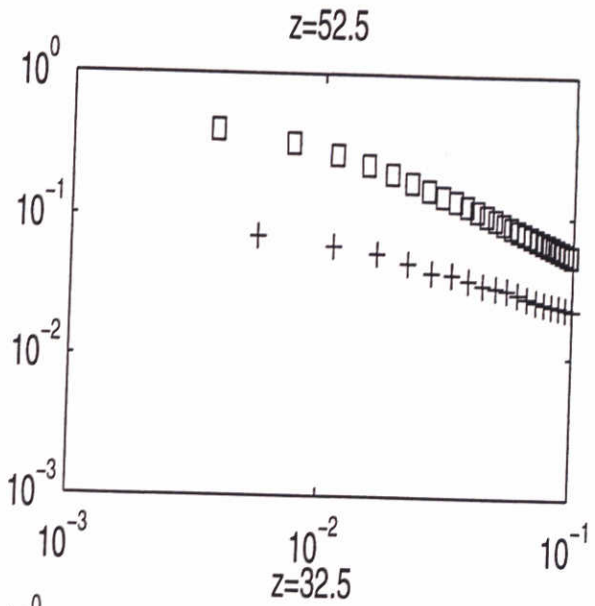
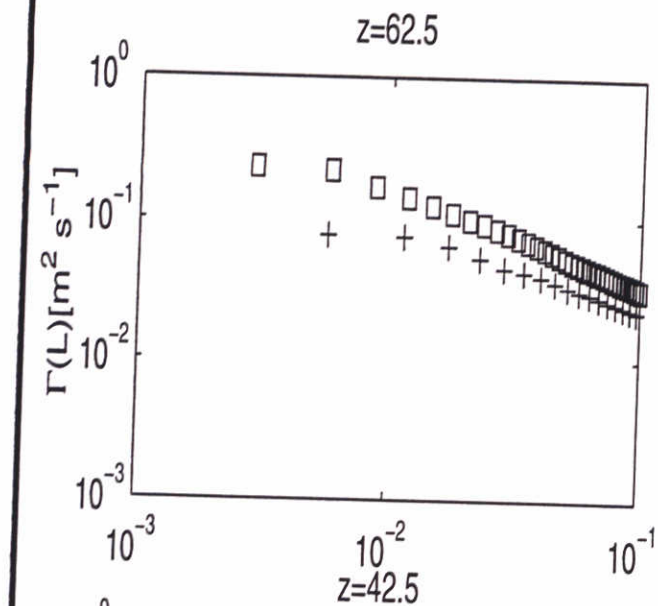
Dimensieloze turbulente kinetische energie
lage plantdichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z2473

FIG 3.24



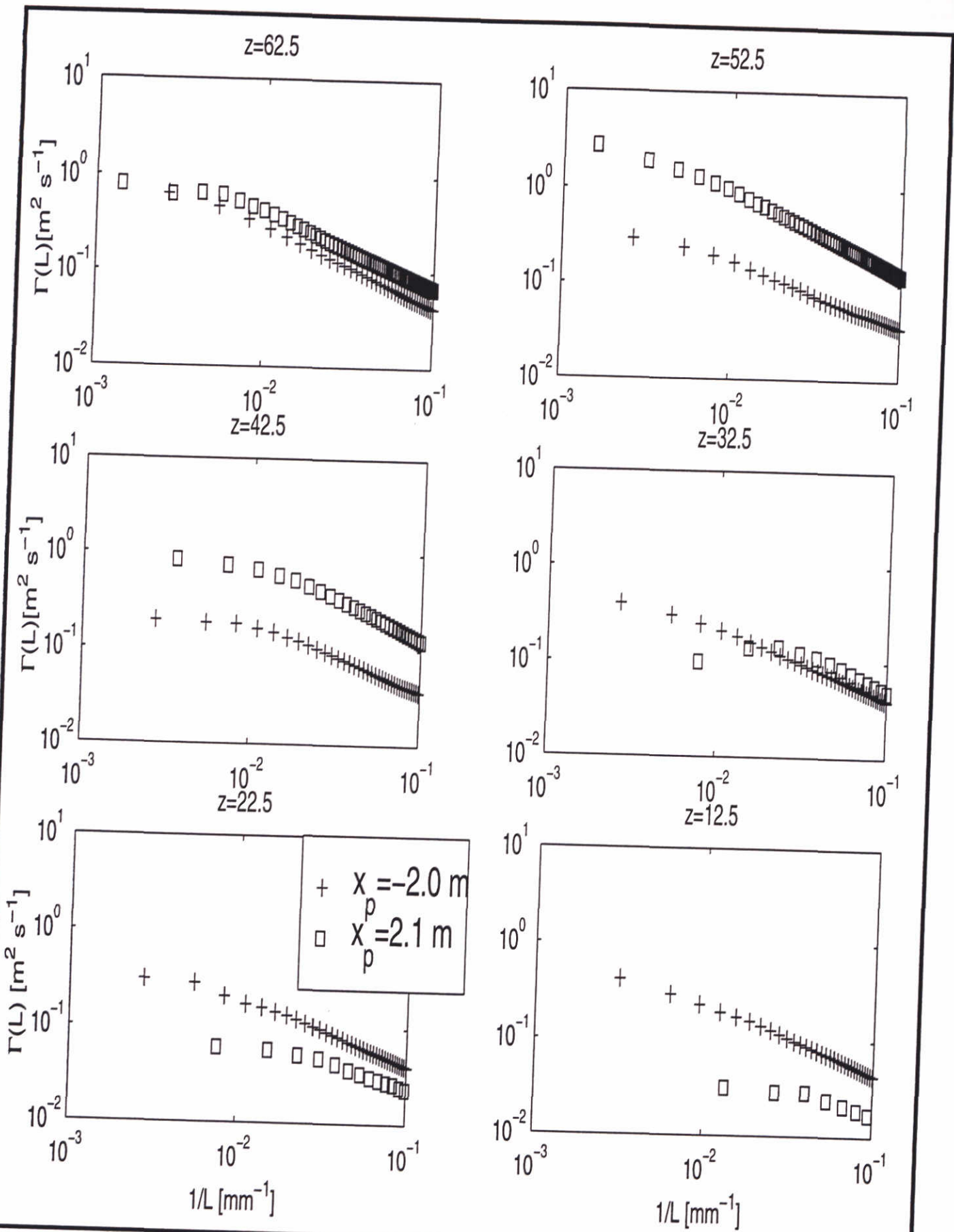
Turbulente mengcoëfficiënten
aanstroomsnelheid is 5 cm s^{-1}
lage plant dichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.25



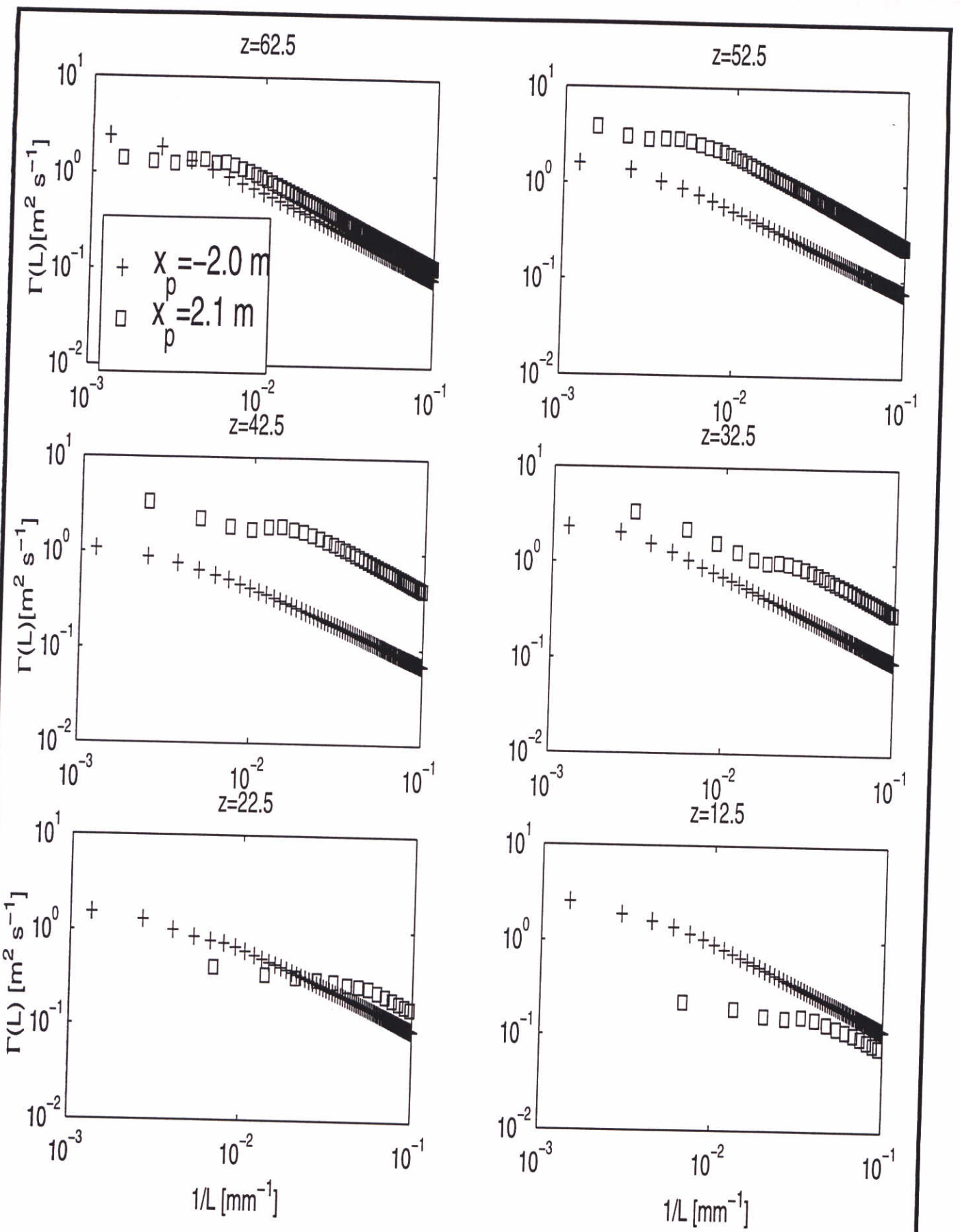
Turbulente mengcoëfficiënten
aanstroomsnelheid is 10 cm s^{-1}
lage plant dichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.26



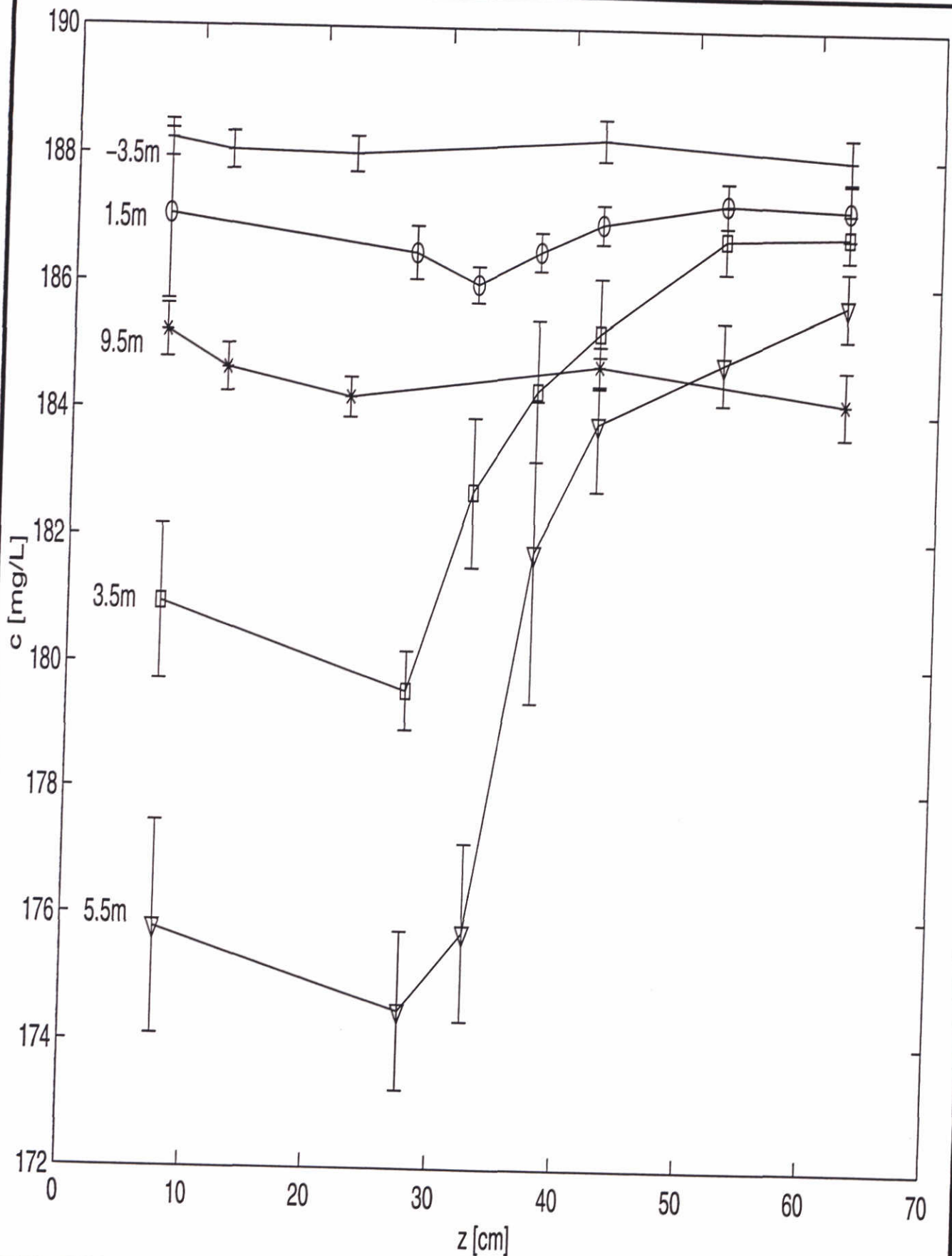
Turbulente mengcoëfficiënten
aanstroomsnelheid is 20 cm s^{-1}
lage plant dichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 3.27



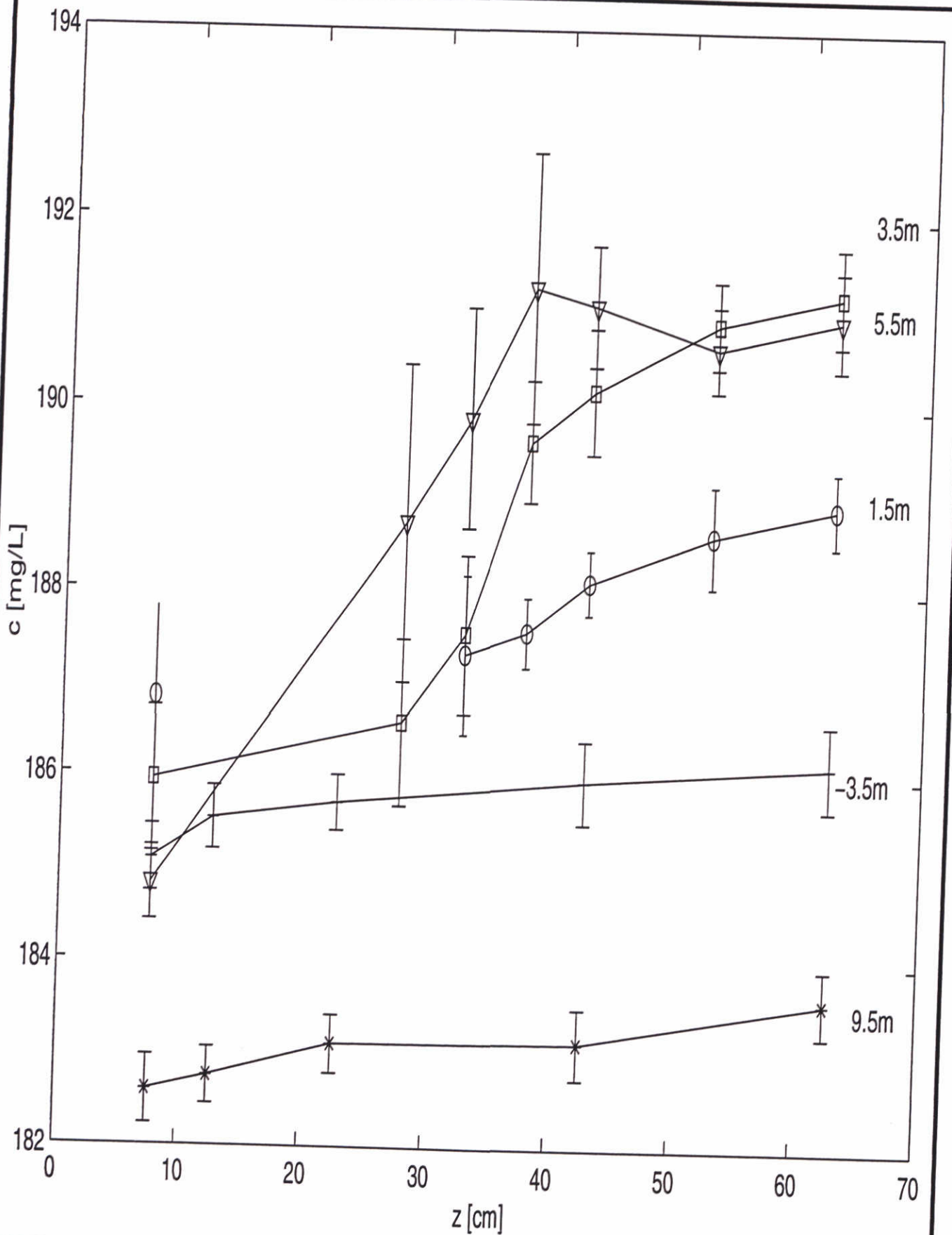
Kaoliniet concentratie profielen
aanstroomsnelheid is 5 cm s^{-1}
hoge plant dichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 4.1



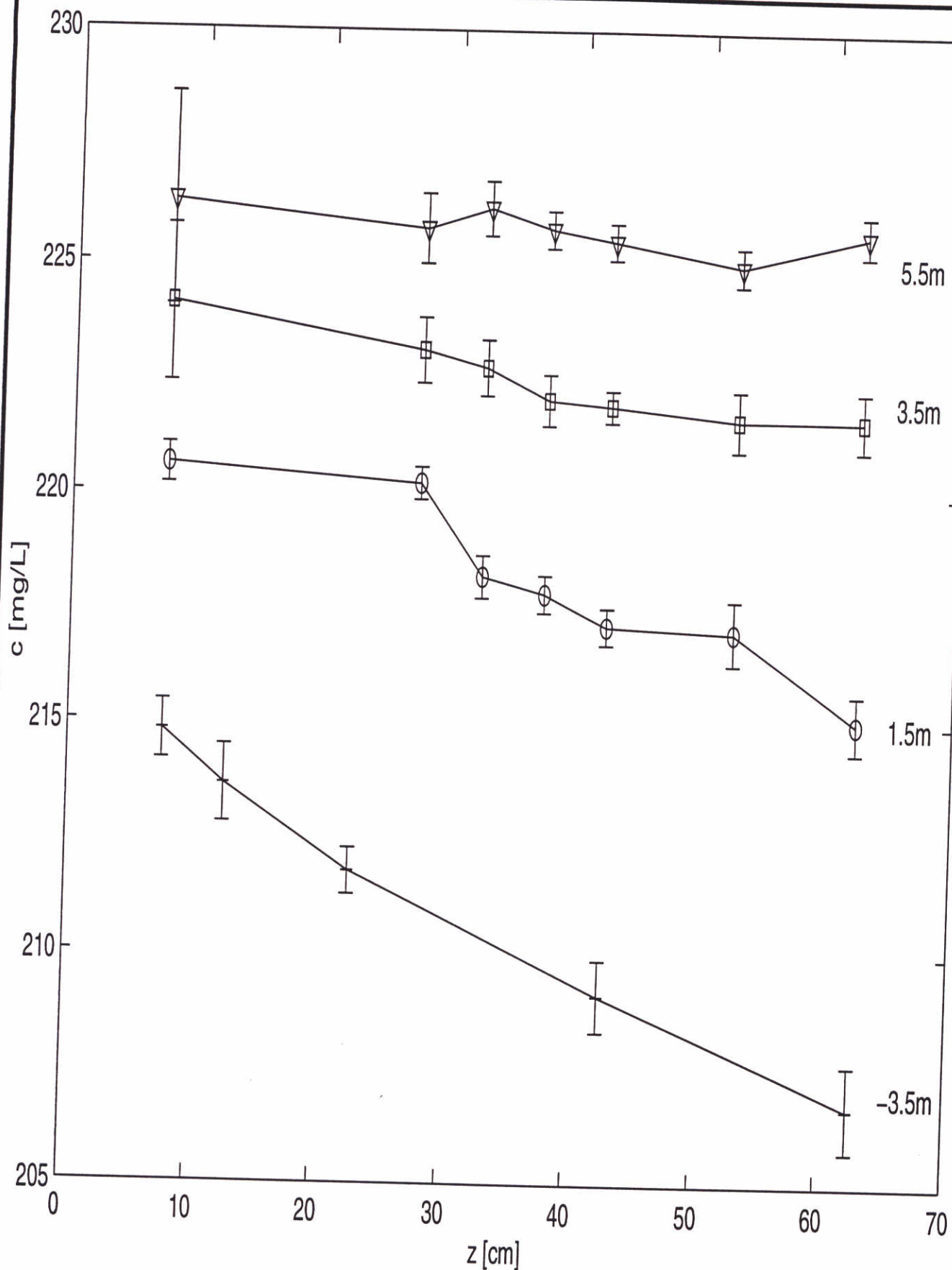
Kaoliniet concentratie profielen
aanstroomsnelheid is 10 cm s^{-1}
hoge plant dichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 4.2



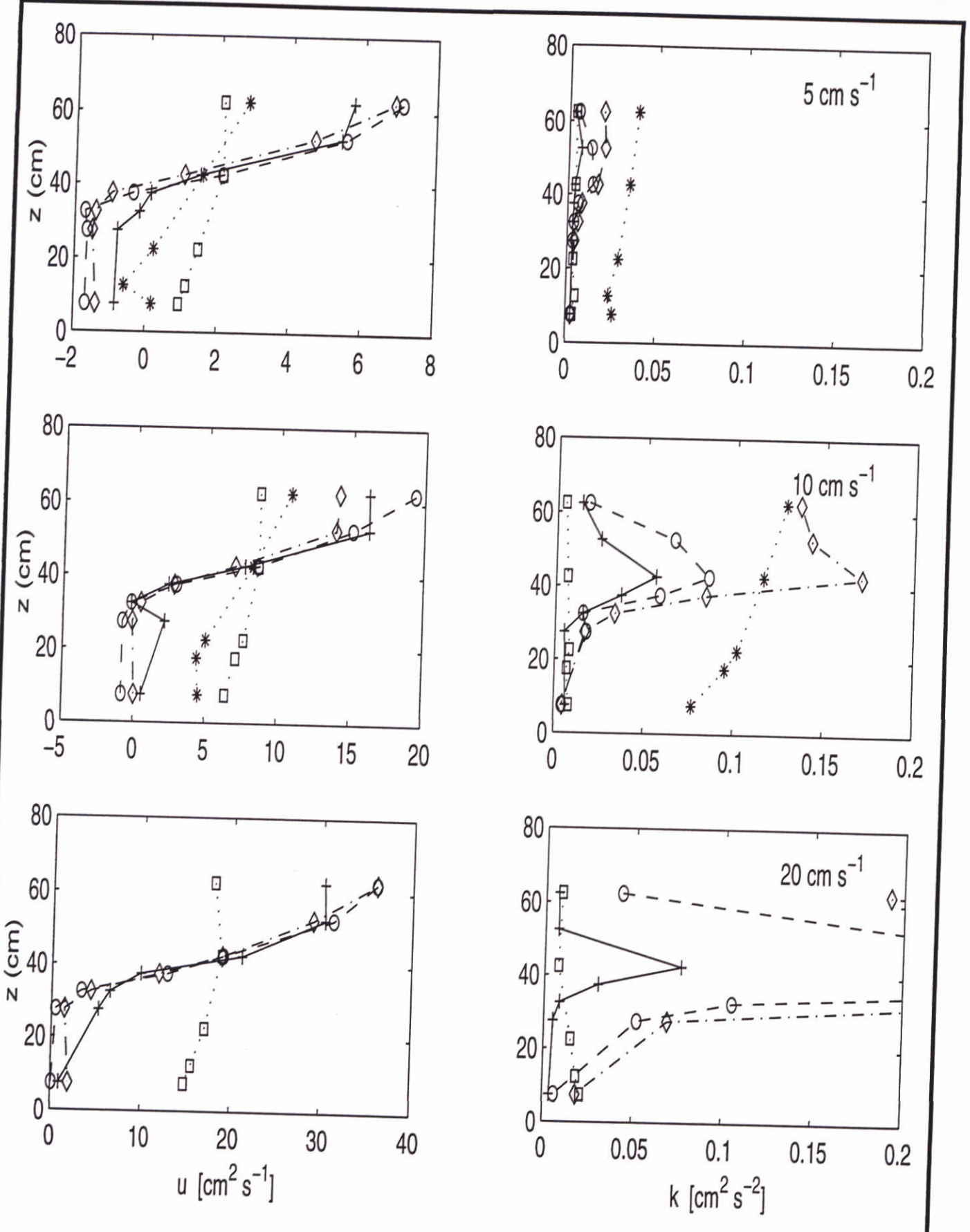
Kaoliniet concentratie profielen
aanstroomsnelheid is 20 cm s^{-1}
hoge plant dichtheid

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

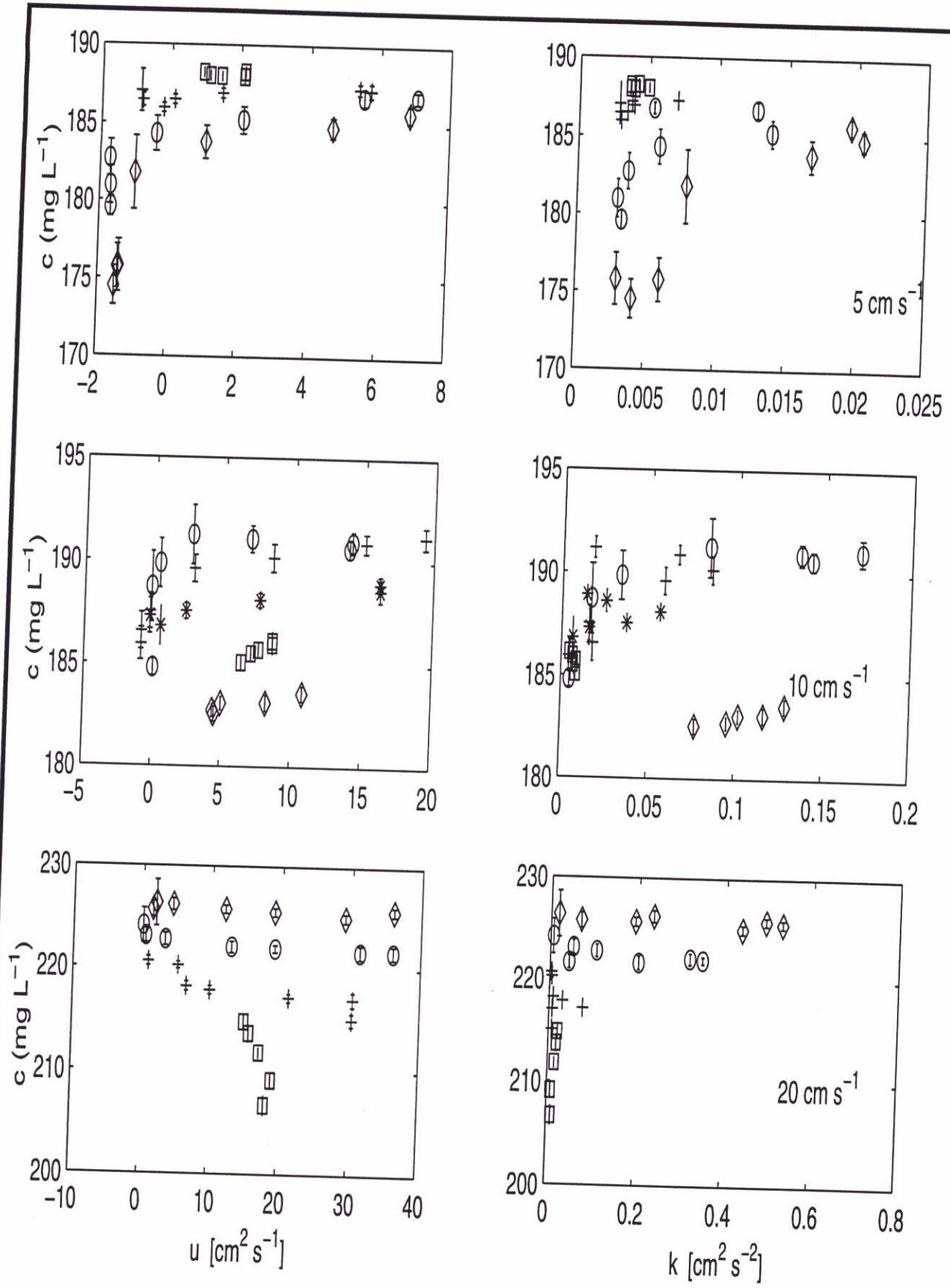
Z 2473

FIG 4.3



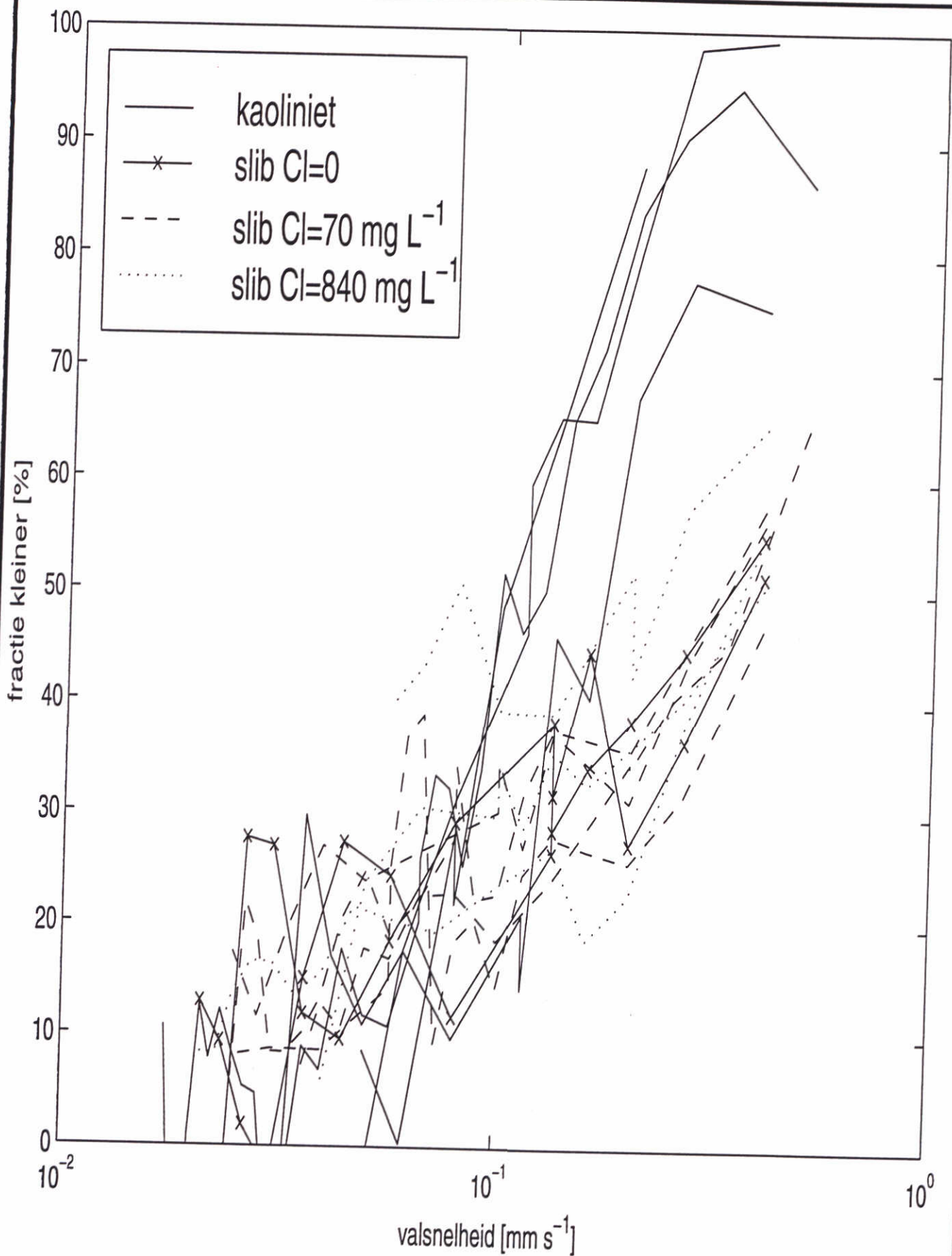
Gemiddelde snelheden en turbulente kinetische energie zoals gemeten tijdens de slobconcentratieproeven.

Getijgoot experimenten	
Z2473	FIG 4.4



Kaoliniet concentraties als functie van de gemiddelde snelheid en turbulente kinetische energie

Getijgoot experimenten



Valsnelheden voor kaoliniet en slib.

Getijgoot experimenten

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 2473

FIG 5.2

Interactie van Submerse Vegetatie en Fysische Processen, 1998; Rapport III

1DV Modeltoepassing

I. Tánczos

maart 1999

Inhoud

Lijst van Figuren

1	Inleiding	1-1
2	Achtergrond van het IDV-model	2-1
2.1	Inleiding.....	2-1
2.2	Theorie.....	2-1
2.3	Toepassing op het submerse vegetatie-probleem.....	2-2
2.3.1	Inleiding.....	2-2
2.3.2	Aangepast model.....	2-2
3	Vergelijking tussen model en experiment	3-1
3.1	Inleiding.....	3-1
3.2	Model vs. Experiment.....	3-1
3.2.1	Geen planten en slib.....	3-1
3.2.2	Wel planten, geen slib.....	3-2
3.2.3	Met slib.....	3-6
3.3	Conclusies.....	3-8
4	De veldsituatie	4-1
4.1	Inleiding.....	4-1
4.2	Resultaten.....	4-1
5	Conclusies en aanbevelingen	5-1
5.1	Conclusies.....	5-1
5.2	Aanbevelingen voor verder onderzoek.....	5-2
	Literatuur	Lit.-1

Lijst van Figuren

- Figuur 3.1 Snelheidsprofiel en turbulente kinetische energie na 500 s bij een gemiddelde snelheid van 10 cm s⁻¹, zonder plantjes of slib.
- Figuur 3.2 Snelheidsprofiel en turbulente kinetische energie na 1000 s bij een gemiddelde snelheid van 5 cm s⁻¹, zonder plantjes of slib.
- Figuur 3.3 Snelheidsprofiel en turbulente kinetische energie boven en tussen de kunstplantjes na 500 s bij een gemiddelde snelheid van 10 cm s⁻¹ en verschillende combinaties van CD en d. Er zit geen slib in de goot.
- Figuur 3.4 Snelheidsprofiel en turbulente kinetische energie boven en tussen de kunstplantjes na 1000 s bij een gemiddelde snelheid van 5 cm s⁻¹ en verschillende combinaties van CD en d. Er zit geen slib in de goot.
- Figuur 3.5 Snelheidsprofiel en turbulente kinetische energie boven en tussen de natuurlijke plantjes na 500 s bij een gemiddelde snelheid van 5 cm s⁻¹, CD= 0.5 en d = 2 mm. Er zit geen slib in de goot.
- Figuur 3.6 Snelheidsprofiel en turbulente kinetische energie boven en tussen de natuurlijke plantjes na 1000 s bij een gemiddelde snelheid van 3 cm s⁻¹, CD= 0.5 en d = 4 mm. Er zit geen slib in de goot.
- Figuur 3.7 Snelheidsprofiel, turbulente kinetische energie, 'eddy diffusivity' en slibconcentratie zonder planten na 100, 300, 400 en 500 s bij een gemiddelde snelheid van 8 cm s⁻¹. De begin-concentratie $c_0 = 190 \text{ mgr L}^{-1}$, CD=0,1, d = 0,03 m, dslib = 10 μm . De sterretjes geven de gemeten waarden aan 3,5 m voor het begin van het plantenveld (foutengrenzen vallen binnen de symbolen).
- Figuur 3.8 Snelheidsprofiel, turbulente kinetische energie, 'eddy diffusivity' en slibconcentratie boven en tussen de planten na 100, 300, 400 en 500 s bij een gemiddelde snelheid van 8 cm s⁻¹. De begin-concentratie $c_0 = 190 \text{ mgr L}^{-1}$, CD=0,1, d = 0,03 m, dslib = 10 μm . De sterretjes geven de gemeten waarden aan 3,5 m voor het begin van het plantenveld (foutengrenzen vallen binnen de symbolen).
- Figuur 3.9 Snelheidsprofiel, turbulente kinetische energie, 'eddy diffusivity' en slibconcentratie zonder planten na 200, 400, 600, 800 en 1000 s bij een gemiddelde snelheid van 3.5 cm s⁻¹. De begin-concentratie $c_0 = 190 \text{ mgr L}^{-1}$, CD=0,1, d = 0,03 m, dslib = 10 μm . De sterretjes geven de gemeten waarden aan 3,5 m voor het begin van het plantenveld (foutengrenzen vallen binnen de symbolen).
- Figuur 3.10 Snelheidsprofiel, turbulente kinetische energie, 'eddy diffusivity' en slibconcentratie boven en tussen de planten na 200, 400, 600, 800 en 1000 s bij een gemiddelde snelheid van 4 cm s⁻¹. De begin-concentratie $c_0 = 190 \text{ mgr L}^{-1}$, CD=0,1, d = 0,03 m, dslib = 10 μm . De sterretjes geven de gemeten waarden aan 3,5 m voor het begin van het plantenveld (foutengrenzen vallen binnen de symbolen).
- Figuur 4.1 Snelheidsprofiel, turbulente kinetische energie, 'eddy diffusivity' en slibconcentratie zonder planten na 200, 1000, 2000 en 3000 s bij een gemiddelde snelheid van 4 cm s⁻¹. De begin-concentratie in de onderste 2.5 cm is 5 gr L⁻¹, CD = 0,1, d = 0,03 m, n =590 m⁻² en dslib = 10 μm .
- Figuur 4.2 Snelheidsprofiel, turbulente kinetische energie, 'eddy diffusivity' en slibconcentratie boven en tussen de planten na 200, 1000, 2000 en 3000 s bij een gemiddelde snelheid van 4 cm s⁻¹. De begin-concentratie in de onderste 2.5 cm is 5 gr L⁻¹, CD = 0,1, d = 0,03 m, n =590 m⁻² en dslib = 10 μm .

I Inleiding

Afgelopen zomer zijn er in de Getijgoot van WL | DELFT HYDRAULICS experimenten uitgevoerd om het effect van submerse vegetatie op slibconcentraties te bestuderen. De nadruk lag hierbij op de invloed van de plantjes op de turbulente menging van gesuspendeerd sediment (De Vries (1998) en Tánčzos (1998)).

Voor de experimenten was er een veld van kunst-/natuurlijke plantjes in de goot aangelegd. Voor, boven, in en achter dit veld zijn er snelheidsmetingen gedaan met de Electro Magnetische Snelheidsmeter (EMS). Hieruit zijn de gemiddelde snelheden, de turbulente kinetische energie en de turbulente mengcoëfficiënten bepaald. Van het kaoliniet dat aan het water is toegevoegd zijn slibconcentratieprofielen gemeten op verschillende posities.

Met een 1DV-model is het mogelijk om stroomsnelheids-, turbulente kinetische energie- en concentratieprofielen uit te rekenen. Invoerparameters zijn onder andere: diepte, gemiddelde stroomsnelheid, bodemruwheid en valsnelheid van het sediment. Het biedt de mogelijkheid de gevolgen van veranderingen in bepaalde parameters op bovengenoemde eigenschappen te bekijken. De vragen die in dit rapport beantwoord zullen worden zijn: Welke parameter(s) is (zijn) bepalend om de gemeten effecten van de submerse vegetatie te kunnen simuleren? Kan de waarde van deze parameter(s), nodig om de gewenste resultaten te verkrijgen, worden gekoppeld aan eigenschappen van de vegetatie zoals lengte, dichtheid, flexibiliteit, etc. Indien het inderdaad mogelijk is om de invloed van submerse vegetatie op de slibconcentraties in een uniforme stroming te modelleren dan is de laatste vraag: is het effect dusdanig dat de helderheid van het water boven een plantenveld wordt verbeterd?

In hoofdstuk 2 zal allereerst het 1DV-model worden geïntroduceerd met (kort) de achterliggende theorie. Daarna zal worden besproken hoe d.m.v een aanpassing in het standaard 1DV-model de situatie met de onderwatervegetatie kan worden gemodelleerd. Deze aanpassing is gemaakt door R.E. Uittenbogaard (WL | DELFT HYDRAULICS). Vervolgens zullen in hoofdstuk 3 de resultaten van de experimenten worden vergeleken met de resultaten van het model. In hoofdstuk 4 zal de toepassing op de veldsituatie worden besproken waarna er in hoofdstuk 5 conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek worden gegeven.

2 Achtergrond van het IDV-model

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zullen kort de belangrijkste onderdelen van de theorie achter het IDV-model worden besproken. Voor meer gedetailleerde informatie wordt naar Winterwerp en Uittenbogaard (1997) en Uittenbogaard *et al.* (1996) verwezen.

2.2 Theorie

Menging van gesuspendeerd sediment in water wordt beschreven door de advection-diffusie vergelijking:

$$\frac{\partial c}{\partial t} - \frac{\partial (w_s c)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (\Gamma + \nu) \frac{\partial c}{\partial z} \right\} \quad (2.1)$$

met c de slib concentratie [kg m^{-3}], w_s de valsnelheid van het sediment [m s^{-1}], Γ de turbulente mengcoëfficiënten [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$], ν de kinematische viscositeit [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$], t de tijd [s] en z de afstand tot de bodem [m]. In deze vergelijking is turbulente menging Γ verantwoordelijk voor de omhoog gerichte menging, welke de naar beneden gerichte valsnelheid tegenwerkt. Om de erosie en depositie van sediment mee te nemen wordt in de bodemlaag een 'source'- (P_c) en 'sinkterm' (ϵ_c) aan de vergelijking toegevoegd

$$\frac{\partial c}{\partial t} - \frac{\partial (w_s c)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (\Gamma + \nu) \frac{\partial c}{\partial z} \right\} + P_c - \epsilon_c \quad (2.2)$$

De turbulente mengcoëfficiënt Γ is proportioneel aan k^2/ϵ , met k de turbulente kinetische energie en ϵ de energie dissipatie per tijdseenheid. Deze twee grootheden worden berekend met het k - ϵ model. In dit model wordt de verticale distributie van de turbulente kinetische energie tijdsafhankelijk opgelost d.m.v. de zogenaamde k -vergelijking. Deze bevat de verticale diffusie van de energie door Γ en de productie van k door de verticale gradiënten in de horizontale stroomsnelheid $\partial u/\partial z$. De productie en dissipatie bij de bodem en het wateroppervlak worden weer gerepresenteerd door een 'source'- en 'sinkterm' welke afhangen van de randvoorwaarden. Deze randvoorwaarden worden bepaald door de bodem- en oppervlakte schuifspanning. Om de snelheid van energiedissipatie ϵ uit te rekenen wordt gebruik gemaakt van een vergelijkbare vergelijking.

2.3 Toepassing op het submerse vegetatie-probleem

2.3.1 Inleiding

De experimenten hebben wat betreft de hydraulica de volgende resultaten opgeleverd: boven het plantenveld neemt de snelheid toe terwijl deze in het plantenveld afneemt. Hoe groot deze toe-/afname is hangt af van de plantdichtheid en vrije waterhoogte. De plantjes produceren turbulente energie in de vorm van kleine wervels. Omdat juist de grotere wervels van belang zijn voor turbulente menging is de mengcapaciteit tussen de plantjes daardoor juist lager. Boven het plantenbed neemt deze echter wel toe; er kunnen zich daar wel grotere wervels ontwikkelen.

Daarnaast zijn er slibconcentratieprofielen gemeten. Afhankelijk van de snelheid werd er hier een af- of toename van de concentraties over het plantenveld gemeten. Dit laatste is waarschijnlijk het gevolg van het weer loskomen van de planten van al neergeslagen slib.

Het doel van de modellering zal zijn om deze resultaten te begrijpen. Hierbij zal er naar worden gestreefd de gemiddelde snelheid, kinetische energie en de 'eddy diffusivity' profielen zo goed mogelijk te simuleren. De gemeten waarden kunnen hierbij voor calibratie worden gebruikt. Vervolgens zullen de berekende slibconcentratieprofielen worden vergeleken met de gemeten waarden. Bij goede resultaten kan het IDV-model worden ingezet bij het ontwerpen van een eventueel vervolg-experiment.

2.3.2 Aangepast model

In het standaard IDV model wordt turbulente kinetische energie gegenereerd door de verticale gradiënt in de horizontale snelheid $\partial u/\partial z$ welke bij de bodem het grootst is. Om de effecten van de submerse vegetatie hier in te brengen zal het model zodanig moeten worden aangepast dat er ook turbulentie door de plantjes zal worden geproduceerd. Dit zal worden gedaan door in dat gedeelte van de waterkolom waar de vegetatie zich bevindt een *vegetatieruwheid* in te brengen. Hierdoor zal daar 1) het water worden afgeremd en 2) turbulente kinetische energie worden geproduceerd. Omdat het debiet constant moet blijven zal als gevolg van de snelheidsdaling in de vegetatie het water boven de plantjes automatisch sneller gaan stromen.

De grootte van deze vegetatieruwheid is afhankelijk van parameters zoals plantdichtheid, stengeldikte, beplantingsgeometrie, flexibiliteit etc. In de literatuur zijn hier een aantal uitdrukkingen voor te vinden (zie Boot (1997)). In het experiment is een aantal van deze parameters gevarieerd: de beplantingsdichtheid, de vrije waterkolom boven de vegetatie en de flexibiliteit. Dit biedt de mogelijkheid om relaties te leggen tussen verkregen vegetatieruwheden en deze parameters.

De waterplanten worden gemodelleerd met drie parameters:

- een weerstands coëfficiënt C_D , 2);
- een (effectieve) plantdiameter d_p [m];
- het aantal stelen per vierkante meter n [m⁻²].

Alle drie de parameters zijn hoogteafhankelijk.

Het ingenomen specifieke plantoppervlak A_p per vierkante meter horizontale doorsnede wordt berekend via:

$$A_p = \frac{\pi}{4} d_p^2 n \quad (2.3)$$

De diepte-gemiddelde stroomsnelheid U in de x -richting wordt nu als debiet geïnterpreteerd en de berekening streeft er naar dat geldt:

$$U = \frac{1}{z_b + \xi} \int_{z_b}^{\xi} (1 - A_p) u dz \quad (2.4)$$

waarbij de bodem gelijk is aan $z = -z_b$ en het wateroppervlak aan $z = \xi$, dus de stroomsnelheid u in (2.4) is de over waterdoorsnede gemiddelde snelheid tussen de takken/bladeren door.

In de impulsvergelijking voor u geldt de volgende weerstandskracht per eenheid van vloeistofvolume (eenheid N m⁻³):

$$F = \frac{1}{2} \rho_0 C_D d_p n |u| u \quad (2.5)$$

met referentiedichtheid ρ_0 en weerstandscoefficiënt C_D (van de orde 1). In de 1DV-impulsvergelijking is de kracht per rekenlaag dan gelijk aan $F\Delta z$ met laagdikte Δz . Vergelijking (2.5) is gebaseerd op turbulente stroming of zog achter elke tak.

Gebruikmakend van de oppervlaktefractie $(1 - A_p)$ van water en $F(z)$ wordt de impulsvergelijking:

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\rho_0}{1 - A_p} \frac{\partial}{\partial z} \{ (1 - A_p) (v + v_r) \frac{\partial u}{\partial z} \} - F \quad (2.6)$$

met v en v_r de moleculaire en turbulente viscositeit, respectievelijk. De horizontale drukgradient in (2.6) wordt zo bijgesteld dat aan (2.4) wordt voldaan, d.w.z. met inbegrip van $(1 - A_p)$.

De vergelijking voor turbulente kinetische energie k wordt nu geschreven als

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{1}{1-A_p} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (1-A_p)(v + \Gamma_k) \frac{\partial k}{\partial z} \right\} + T + P_k - B_k - \varepsilon_k \quad (2.7)$$

waarin weer de oppervlaktefractie $(1-A_p)$ van water verschijnt maar ook een bronterm T . De overige termen zijn productie P_k door snelheidsschering, dissipatie ε_k en omzetting B_k in potentiële energie. De bronterm T is gelijk aan het vermogen besteed door de gemiddelde stroming in arbeid tegen de plantweerstand F :

$$T = Fu \quad (2.8)$$

In (2.8) en (2.5) is aangenomen dat laminaire effecten te verwaarlozen zijn.

Analoog aan (2.7) wordt de volgende vergelijking voor de dissipatie ε uit het k - ε model geschreven als

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{1-A_p} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (1-A_p)(v + \Gamma_\varepsilon) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right\} + T\tau^{-1} + P_\varepsilon - B_\varepsilon - \varepsilon_\varepsilon \quad (2.9)$$

waarin naast de bekende termen nu de bronterm (2.8) verschijnt, maar gedeeld door de tijdschaal τ . Deze tijdschaal hangt af van de grootte L van de door de planten geproduceerde wervels. Er geldt, na de nodige afleidingen:

$$\tau = \frac{1}{c_{2\varepsilon} \sqrt{c_\mu}} \left(\frac{L^2}{T} \right) \quad (2.10)$$

waarin c_μ en $c_{2\varepsilon}$ bekende coëfficiënten zijn.

Tenslotte wordt L gerelateerd aan de kenmerkende horizontale maaswijdte van het water tussen de takken en/of planten onderling en wel volgens:

$$L = \left\{ \frac{1-A_p}{n} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

De uitdrukking (2.11) vormt een benadering: er wordt uitgegaan van voldoende stevige takken zodat deze een tralie of rooster voorstellen. In geval van turbulentie achter een rooster wordt de initiële lengtschaal L ongeveer gelijk aan de maaswijdte. Zodra de takken uiterst dun worden zal hun zog, zo dat al bestaat i.v.m. laminaire effecten, niet samenvloeien en dan geldt (2.11) niet meer.

De vergelijking voor de slibconcentratie c is nu:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{1}{1-A_p} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (1-A_p)w_s c \right\} = \frac{1}{1-A_p} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (1-A_p)(v + \Gamma) \frac{\partial c}{\partial z} \right\} + P_c - \varepsilon_c \quad (2.12)$$

3 Vergelijking tussen model en experiment

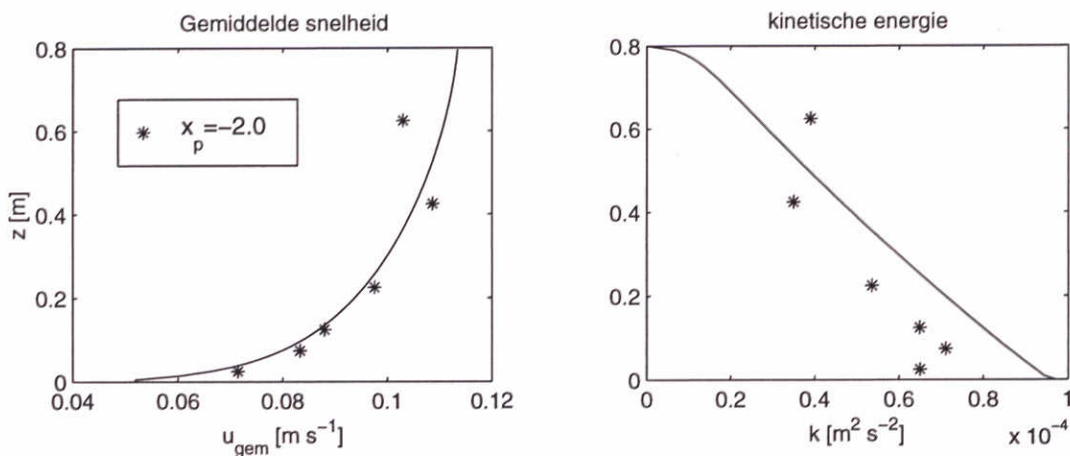
3.1 Inleiding

Met het aangepaste 1DV-model zijn een aantal situaties doorgerekend zoals die ook tijdens het experiment voorkwamen. Deze uitkomsten worden dan vervolgens met de gemeten waarden vergeleken.

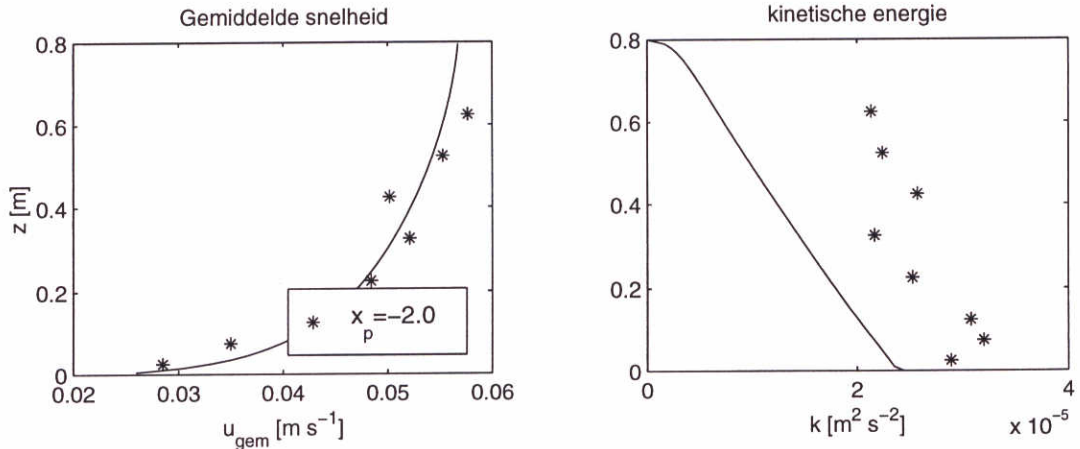
3.2 Model vs. Experiment

3.2.1 Geen planten en slib

Allereerst de ‘nul-situatie’ zonder planten en zonder slib. In de figuren 3.1 en 3.2 staan de resultaten voor gemiddelde snelheden van respectievelijk 10 en 5 cm s⁻¹. De sterretjes geven de gemeten waarden weer en de getrokken lijn de berekende (x_p geeft de positie t.o.v. het plantenbed weer, waarbij $x_p=0$ gelijk is aan het begin van het plantenbed). Omdat er gemeten is na een meter of 50, zijn de berekende profielen het resultaat van 500 en 1000 seconden lang rekenen met een tijdstap van 1 seconde.



Figuur 3.1 Snelheidsprofiel en turbulente kinetische energie na 500 s bij een gemiddelde snelheid van 10 cm s⁻¹, zonder plantjes of slib.



Figuur 3.2 Snelheidsprofiel en turbulente kinetische energie na 1000 s bij een gemiddelde snelheid van 5 cm s^{-1} , zonder plantjes of slib.

De figuren laten zien dat de berekende snelheden goed overeenkomen met de gemeten waarden. Voor de turbulente kinetische energie is dit alleen waar bij een gemiddelde snelheid van 10 cm s^{-1} , bij 5 cm s^{-1} zijn de berekende waarden te laag. Dit kan bijgesteld worden door de bodemruwheid in het model te verhogen met een factor 10. Echter aangezien de bodem in beide gevallen hetzelfde is, is hier geen fysische reden voor. Waarschijnlijk is er, door bijvoorbeeld invloeden van de wanden, in de goot een ‘achtergrond turbulentie’ aanwezig, die in de berekeningen niet wordt meegenomen. Deze heeft relatief minder invloed bij een gemiddelde stroomsnelheid van 10 cm s^{-1} , omdat er dan zo'n 10 keer meer turbulente kinetische energie wordt geproduceerd (zie figuren 3.1 en 3.2). Dit ‘probleem’ kan worden opgelost door een ruwere bodem te gebruiken.

Terwijl de berekende turbulente kinetische energie lineair afneemt met de afstand tot de bodem is dit bij de gemeten waarden niet het geval. Bij de gemeten waarden is het verschil tussen de waarden aan het oppervalk en die bij de bodem niet groot. Ook dit is te verklaren door wandeffecten. Men kan zich voorstellen dat wanneer de afstand tot de bodem ongeveer gelijk wordt aan die tot de zijwanden van de goot dit een niet verwaarloosbaar effect zal hebben. In het model zoals gebruikt voor deze berekeningen is dit effect niet toegevoegd.

3.2.2 Wel planten, geen slib

Zoals in het vorige hoofdstuk is besproken worden de planten door drie parameters gemodelleerd:

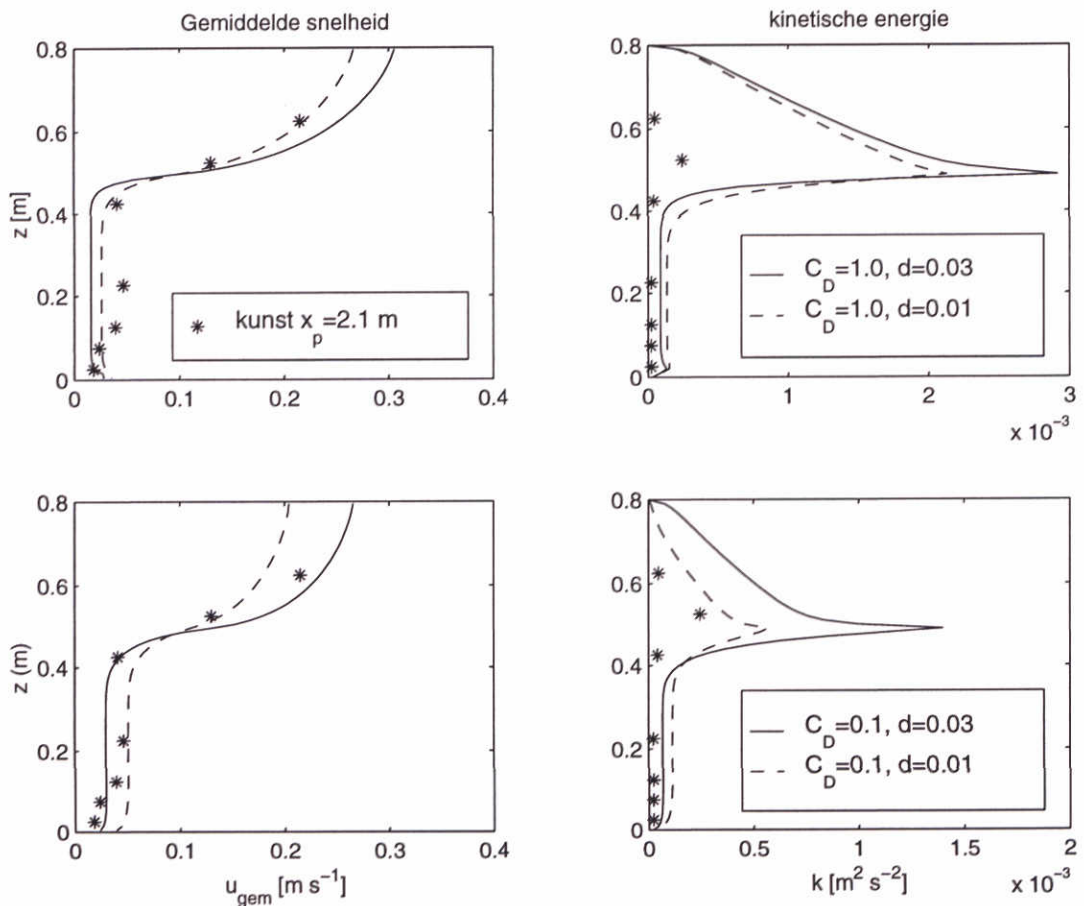
- een weerstands coëfficiënt C_D ;
- een effectieve plantdiameter d
- het aantal stelen per vierkante meter n .

Door de complexe vorm van de plantjes is het bepalen van de gemiddelde weerstandscoëfficiënt C_D niet triviaal. In de literatuur wordt vaak de C_D voor een cylinder gekozen welke van de orde 1 is. Omdat de combinatie van d , n en C_D van belang is, is ervoor gekozen om C_D en d vrije parameters te laten zijn. Aan de hand van planteigenschappen is er natuurlijk wel een onder- en bovengrens voor de diameter d aan te geven.

Voor de bepaling van d en n is gebruikt gemaakt van een aantal gegevens van de kunst- en echte plantjes welke staan in de tabellen 3.1 en 3.2, respectievelijk. Hierin wordt o.a. het plantoppervlak gegeven. Om deze te bepalen zijn van de echte plantjes een aantal steeltjes met de blaadjes zo goed mogelijk uitgespreid op een papier waar vervolgens met een digitale camera een foto van is genomen. Van deze foto is de afmeting van het donker gekleurde oppervlak bepaald. Deze meting is 14 keer uitgevoerd en het uiteindelijke oppervlak is hier een gemiddelde van. Voor de kunstplantjes zijn van een segment van 10 cm de blaadjes afgeknipt welke vervolgens zijn uitgespreid op een vel papier. De rest van de procedure is gelijk aan die bij de echte vegetatie.

Kunstmatige vegetatie

Een kunstplantje bestaat uit een steel met op regelmatige afstanden de blaadjes. Deze blaadjes zijn regelmatig rond de steel verdeeld en vormen zo een stervormig patroon. Omdat deze sterren t.o.v. elkaar verdraaien is het bovenaanzicht grofweg een cirkel met een diameter van twee keer de bladlengte. De gemiddelde plantdiameter ligt dus ergens tussen 0.3 cm (= steeldiameter) en 3 cm (= twee maal de bladlengte). Voor de hoge plantdichtheid is n gelijk aan 590 m^{-2} .



Figuur 3.3 Snelheidsprofiel en turbulente kinetische energie boven en tussen de kunstplantjes na 500 s bij een gemiddelde snelheid van 10 cm s^{-1} en verschillende combinaties van C_D en d . Er zit geen slib in de goot.

Resultaten met verschillende combinaties van C_D en d vergeleken met de gemeten waarden bij gebruik van kunstplanten staan weergegeven in de figuren 3.3 en 3.4. In de berekeningen is het plantenveld 50 cm hoog en zijn er 590 stelen per vierkante meter.

Zoals verwacht komen de berekende stroomsnelheden goed overeen met de gemeten waarden. De uitkomsten zijn betrekkelijk ongevoelig voor de gekozen combinaties van dragcoëfficiënt en plantdiameter. Voor de turbulente kinetische energie is deze gevoeligheid veel groter, maar het is duidelijk dat bij de juiste combinatie van C_D en d de data door het model gereproduceerd kunnen worden.

Bladlengte	1,5 cm
Bladbreedte	0,4 cm
Bladdikte	± 0,2 cm
Steeldiameter	0,3 cm
Steellengte	50 cm
Aantal plantjes per breedte raai	9-10 (hoog) 4-5 (laag)
Aantal stelen per plantje	6
Totaal aantal stelen	1767 (hoog) 837 (laag)
Totaal oppervlak per steel	± 200 cm ²
Bedlengte	3 m
Stelen per vierkante meter	590 (hoog) 295 (laag)

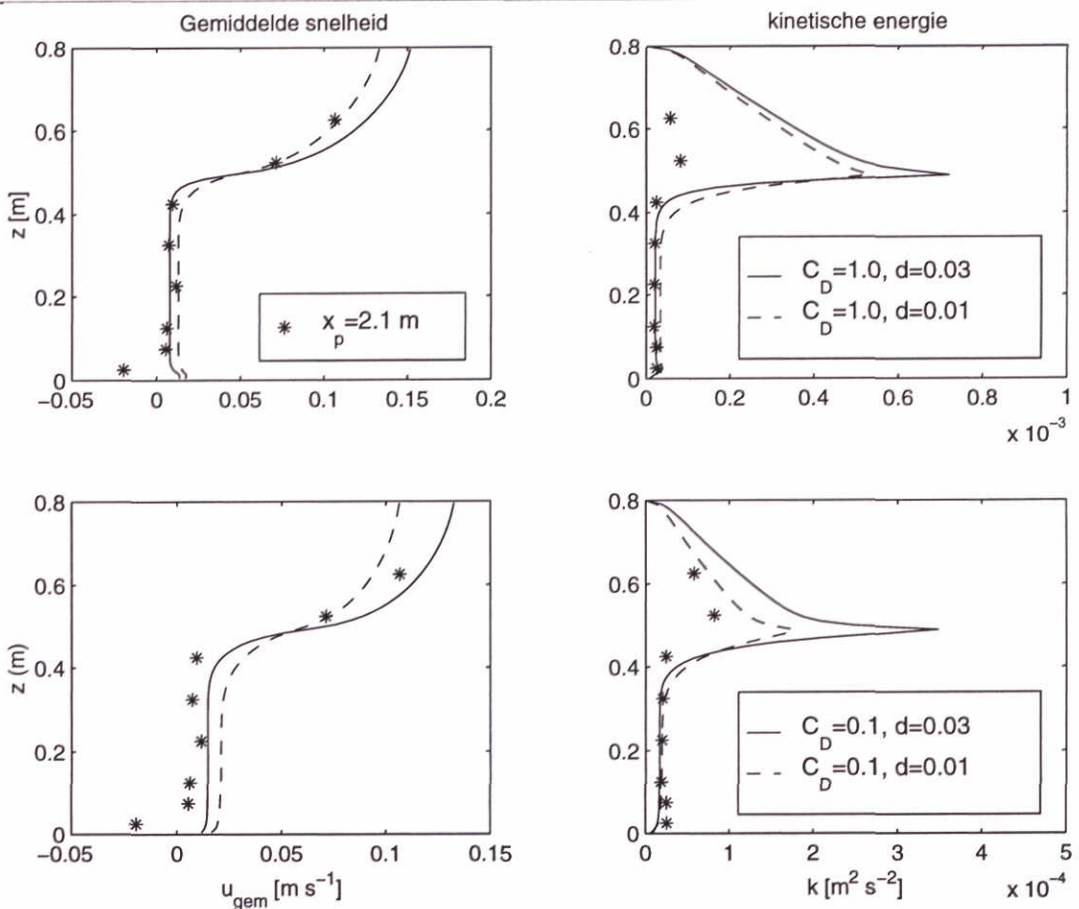
Tabel 3.1 Karakteristieken van de kunstmatige vegetatie. Als er geen onnauwkeurigheid staat opgegeven mag worden aangenomen dat deze 10 % bedraagt. De toevoegingen 'hoog' en 'laag' slaan op de gebruikte hoge en lage plantdichtheid.

Natuurlijke vegetatie

Bij de echte plantjes is de plantdiameter lager en het aantal stelen per oppervlakte veel hoger. Uit tabel 3.2 blijkt dat het oppervlak per steel voor de natuurlijke vegetatie een factor 10 lager is dan voor de kunstmatige vegetatie. Dit zou betekenen dat de diameter ongeveer een factor 3 kleiner zou moeten zijn. Het blijkt dat er een hogere waarde voor de weerstandscoëfficiënt moet worden gekozen dan bij de kunstplantjes het geval was. In de figuren 3.5 en 3.6 worden gemeten waarden vergeleken met modelberekeningen voor een gemiddelde stroomsnelheid 5 cm s⁻¹ en 3 cm s⁻¹, respectievelijk. In beide gevallen is een waarde van $C_D = 0.5$ gebruikt. De gebruikte diameter is niet dezelfde voor de twee berekeningen, bij een snelheid van 5 cm s⁻¹ was deze 2 mm, terwijl voor de lagere snelheid een diameter van 4 mm een betere overeenkomst met de gemeten waarden geeft.

Tabel 3.2 Karakteristieken van de natuurlijke vegetatie. Als er geen onnauwkeurigheid staat opgegeven mag worden aangenomen dat deze 10 % bedraagt.

Gemiddelde nat gewicht per bosje	310 ± 80 gr bosje ⁻¹
Gemiddelde aantal stelen per eenheid van gewicht	1,50 ± 0,15 gr ⁻¹
Gemiddelde oppervlak per gram nat gewicht aan planten	30 ± 3 cm ² gr ⁻¹
Gemiddelde plantlengte	50 cm
Aantal bosjes	100
Totaal aantal stelen	46500
Bedlengte	3,7 m
Stelen per vierkante meter	12500



Figuur 3.4 Snelheidsprofiel en turbulente kinetische energie boven en tussen de kunstplantjes na 1000 s bij een gemiddelde snelheid van 5 cm s⁻¹ en verschillende combinaties van C_D en d. Er zit geen slib in de goot.

De berekende snelheden komen redelijk goed overeen met die gemeten in de goot, maar de berekende turbulente kinetische energie vertoont een minder goede gelijkenis met de experimentele uitkomsten. Het model geeft een scherpe overgang van de hoge energie boven de planten naar de lage waarden tussen de planten. De metingen echter laten een veel geleidelijker overgang zien. Dit verschil heeft waarschijnlijk te maken met 1) de inhomogene bovenkant van het plantenveld, niet alle planten zijn even lang en 2) de hogere flexibiliteit van de natuurlijke vegetatie.

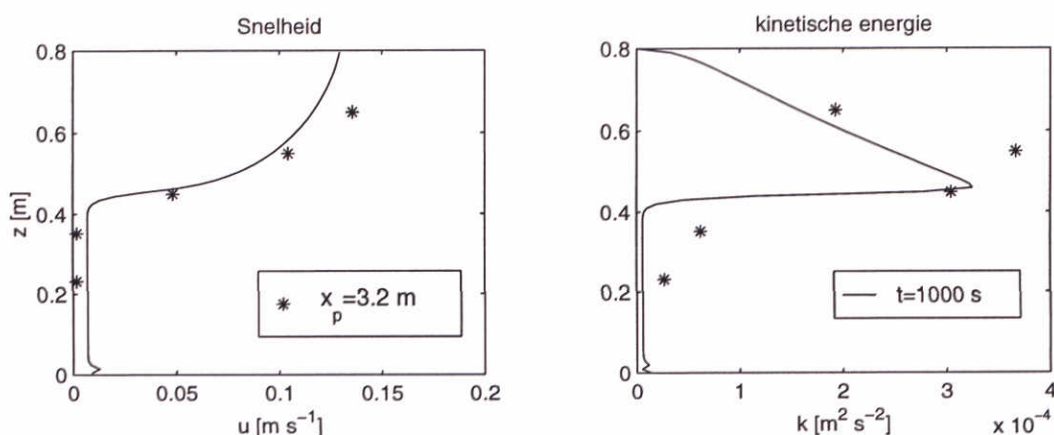
Het aangepaste model gaat uit van vrij starre vegetatie, een benadering die voor de kunstmatige vegetatie veel meer van toepassing is dan bij de gebruikte natuurlijke vegetatie. Daarnaast geeft het model een turbulente kinetische energie tussen de plantjes die veel lager ligt dan de gemeten waarde.

3.2.3 Met slib

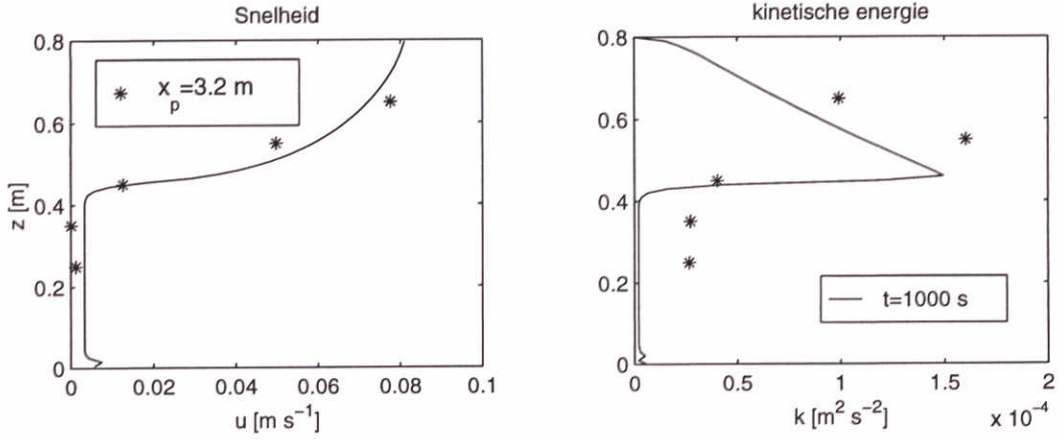
In het model bestaat de mogelijkheid verschillende typen sediment op te geven, namelijk zand (niet cohesief), slib of floccurend materiaal, waarbij de laatste twee bedoeld zijn voor cohesief materiaal. Voor deze berekeningen is gekozen voor de optie 'slib'. Bij deze optie wordt het sediment gerepresenteerd door een dichtheid en een korreldiameter. Verder moeten de kritische bodemschuifspanningen worden opgegeven waarbij het sediment neerslaat en in beweging komt, τ_d en τ_e , respectievelijk.

In de figuren 3.7 en 3.8 worden de resultaten van berekeningen vergeleken met gemeten waarden met gebruik van kunstplanten. Voor de korreldiameter is een waarde van $10 \mu\text{m}$ genomen, wat overeenkomt (wet van Stokes) met een valsnelheid van ongeveer 0.05 mm s^{-1} . De kritische schuifspanningen voor depositie en erosie zijn $\tau_d = 0,05 \text{ Pa}$ en $\tau_e = 0,1 \text{ Pa}$, respectievelijk (Kuijper *et al.*, 1990).

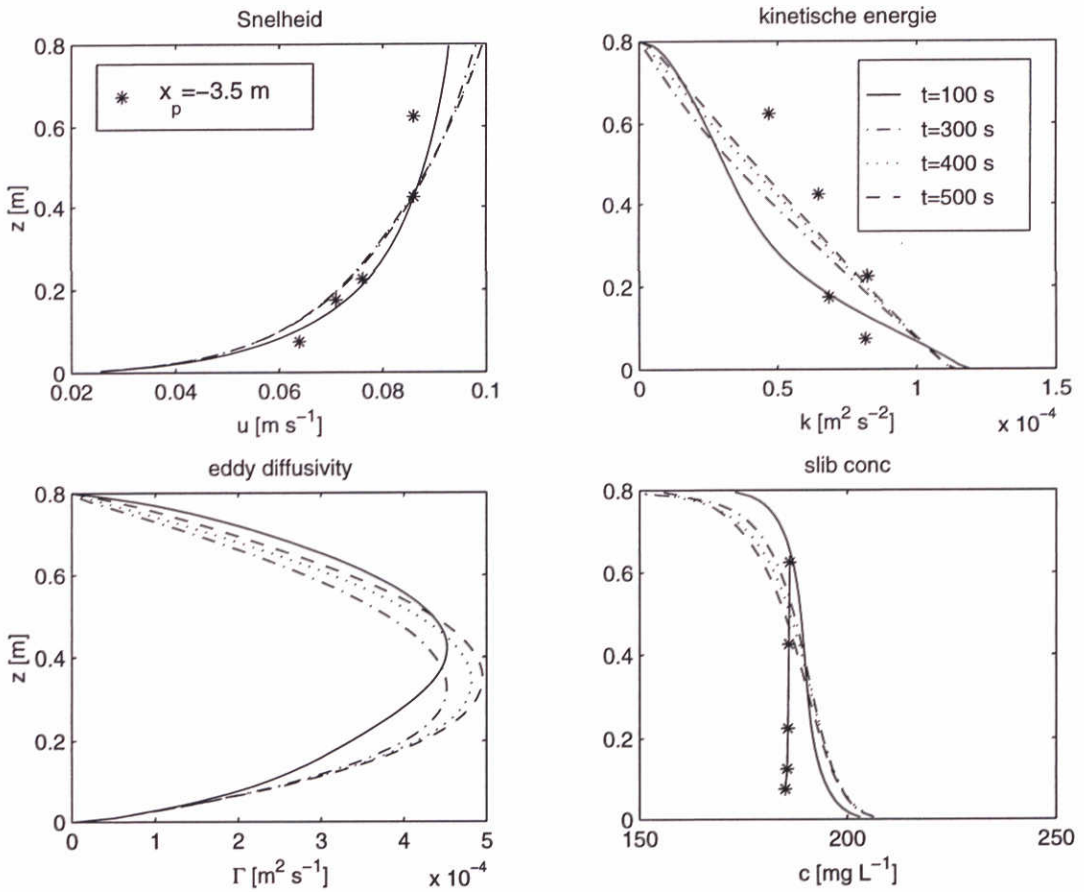
De berekende waarden voor de snelheid, kinetische energie en de 'eddy diffusivity' zijn onafhankelijk van de tijd, wat betekent dat het systeem stationair is. Voor een zo goed mogelijke overeenkomst tussen de gemeten en berekende waarden moest de effectieve plantdiameter d worden verhoogd tot 0.03 m . Tijdens de experimenten zijn (licht) negatieve waarden voor de snelheden gemeten, iets wat door het model zonder de invloed van golven niet kan worden gesimuleerd. Ook duiden de resultaten erop dat er een nog betere overeenkomst tussen data en modeluitkomsten zou zijn met een kortere plantlengte als invoerparameter. Hier is echter geen fysische reden voor, en de verschillen zijn dan ook waarschijnlijk te wijten aan experimentele artefacten. De verschillen zijn echter zo gering dat de overeenkomst tussen gemeten en berekende waardes goed mag worden genoemd.



Figuur 3.5 Snelheidsprofiel en turbulente kinetische energie boven en tussen de natuurlijke plantjes na 500 s bij een gemiddelde snelheid van 5 cm s^{-1} , $C_D = 0.5$ en $d = 2 \text{ mm}$. Er zit geen slib in de goot.



Figuur 3.6 Snelheidsprofiel en turbulente kinetische energie boven en tussen de natuurlijke plantjes na 1000s bij een gemiddelde snelheid van 3 cm s⁻¹, $C_D = 0.5$ en $d = 4$ mm. Er zit geen slib in de goot.



Figuur 3.7 Snelheidsprofiel, turbulente kinetische energie, 'eddy diffusivity' en slibconcentratie zonder planten na 100, 300, 400 en 500 s bij een gemiddelde snelheid van 8 cm s⁻¹. De beginconcentratie $c_0 = 190$ mgr L⁻¹, $C_D = 0,1$, $d = 0,03$ m, $d_{slib} = 10$ μ m. De sterretjes geven de gemeten waarden aan 3,5 m voor het begin van het plantenveld (foutengrenzen vallen binnen de symbolen).

Een vergelijking tussen de situatie zonder en met plantjes laat duidelijk zien dat er (in absolute zin) turbulente kinetische energie wordt gegenereerd door de planten (let op het verschil in schaalbereik op de x-assen). Dit is vooral duidelijk bij de toppen van de planten waar grote snelheidsgradiënten optreden. De mengcapaciteit (eddy diffusivity) is over het deel met vegetatie wel lager. In de bovenste 20 cm is dit niet het geval. Deze lagere mengcapaciteit is het gevolg van de afmetingen van de turbulente wervels, welke in het plantenveld kleiner zijn dan daarbuiten.

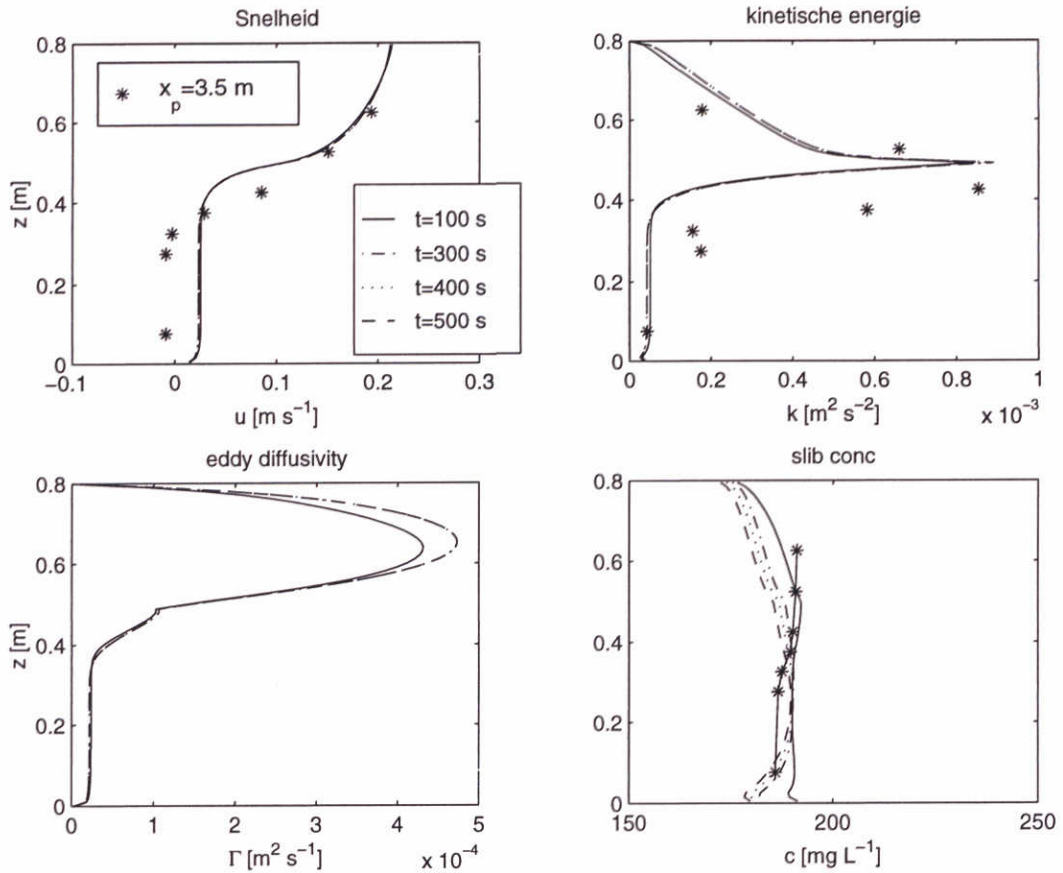
In de plaatjes rechtsonder in de figuren 3.7 en 3.8 staan de slibconcentraties weergegeven. De gemeten en berekende waarden komen redelijk tot goed met elkaar overeen. Zonder vegetatie is de gemeten slibconcentratie constant over de diepte. De berekeningen geven echter aan dat het slib enigzins uitzakt waardoor de concentratie bij het oppervlak wat lager wordt en bij de bodem wat hoger. Dit duidt op een iets te hoge valsnelheid van het slib.

Met plantjes in de goot is het verschil tussen gemeten en berekende waarden groter. De gemeten toename in concentratie in het bovenste gedeelte van de waterkolom wordt niet gereproduceerd door de berekeningen. Dit is geen verrassing omdat deze toename waarschijnlijk te wijten is aan de resuspensie van materiaal dat op de plantjes is blijven liggen, iets wat niet in het model is meegenomen.

Een gemiddelde snelheid van 3.5 cm s^{-1} (met voor de rest gelijke waarden van de invoerparameters) geeft vergelijkbare resultaten als verkregen met een gemiddelde snelheid van 8 cm s^{-1} (zie figuren 3.9 en 3.10). Door wandeffecten is de berekende kinetische energie ook nu weer lager dan die gemeten zonder de aanwezigheid van plantjes (zie ook figuur 3.2). Het berekende effect van de aanwezigheid van planten op de slibconcentraties is nu echter veel sterker dan bij de hogere stroomsnelheid. Het is nu ook duidelijk te zien dat behalve in de onderste 20 cm van de waterkolom de berekende concentraties boven de plantjes hoger zijn dan zonder de aanwezigheid van plantjes.

3.3 Conclusies

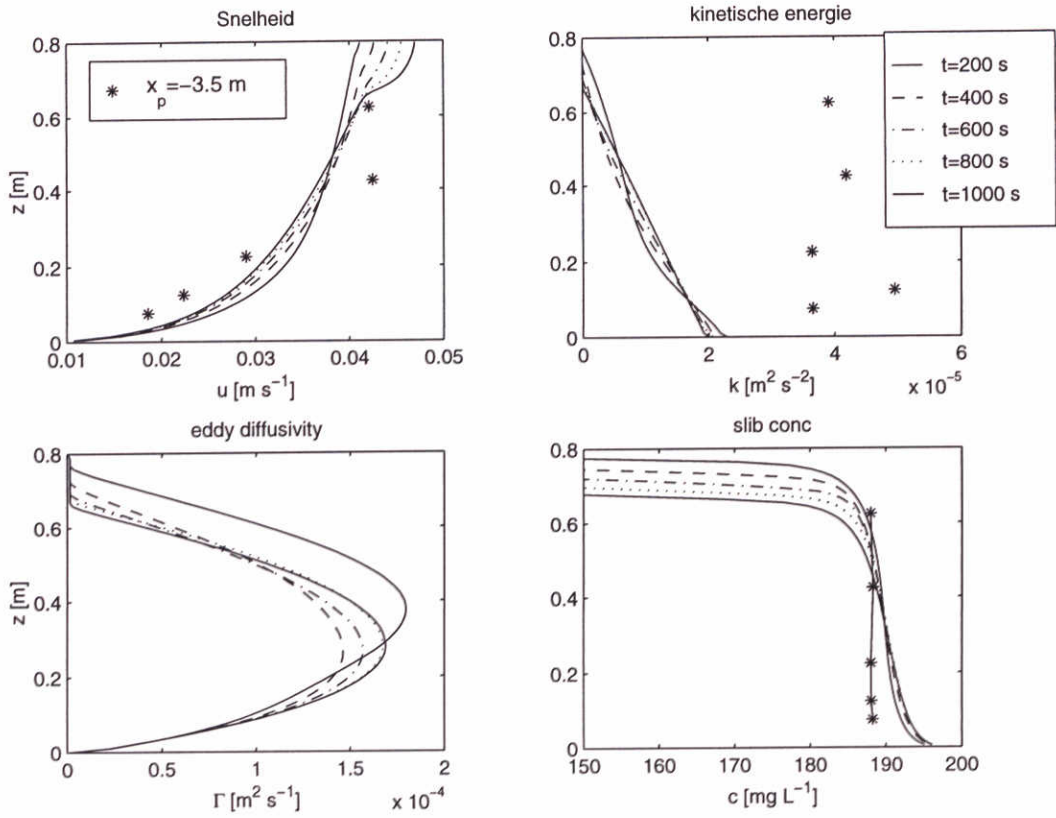
Het is mogelijk de experimenten redelijk tot goed te simuleren met het IDV-model. Voor de kunstplantjes werkt de aanpassing van het model beter dan voor de natuurlijke vegetatie. Dit komt waarschijnlijk doordat het model uitgaat van een vrij starre vegetatie. Bovendien was het natuurlijke plantenveld niet homogeen wat betreft lengte en beplantingsdichtheid. Desondanks is het model goed in staat de waargenomen trends in de gootexperimenten te reproduceren. Dit betekent echter dat ook de modelberekeningen niet verklaren waarom het water boven een submers vegetatieveld helderder is dan buiten dat veld. In tegendeel, de berekende slibconcentraties in het bovenste gedeelte van de waterkolom zijn zelfs hoger in het plantenveld.



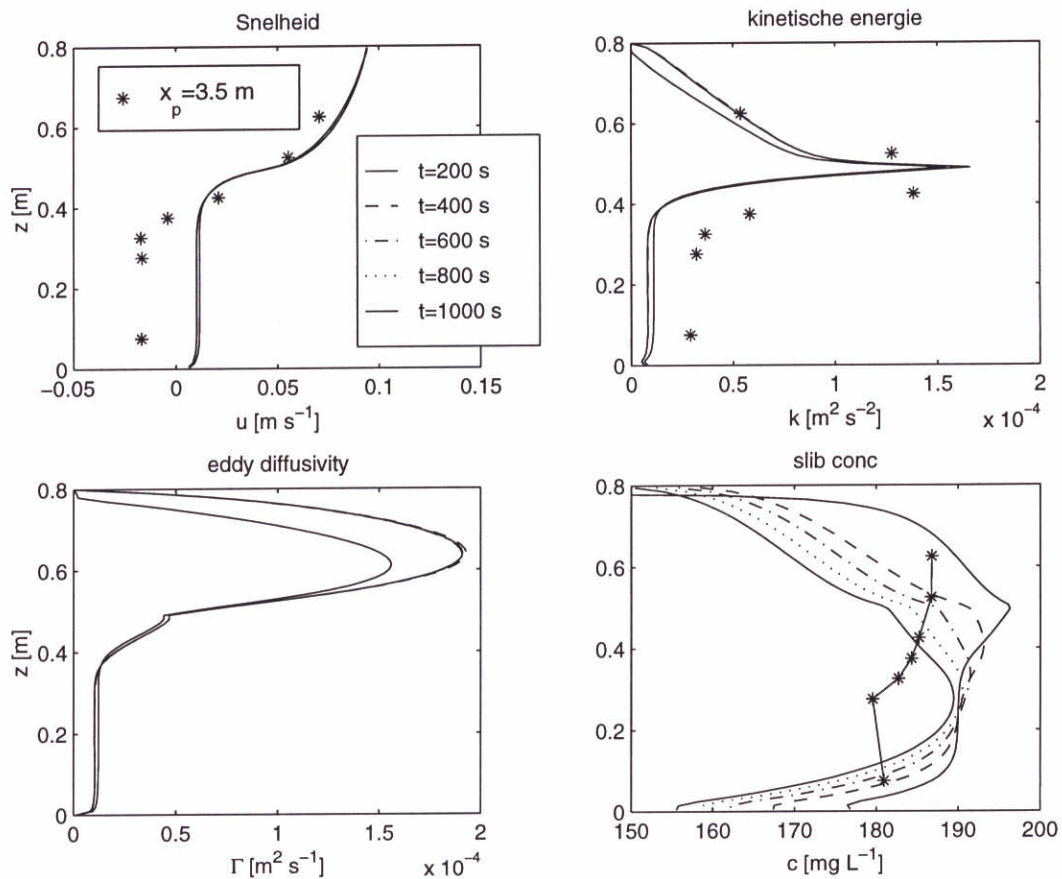
Figuur 3.8 Snelheidsprofiel, turbulente kinetische energie, 'eddy diffusivity' en slibconcentratie boven en tussen de planten na 100, 300, 400 en 500 s bij een gemiddelde snelheid van 8 cm s^{-1} . De beginconcentratie $c_0 = 190 \text{ mgr L}^{-1}$, $C_D=0,1$, $d = 0,03 \text{ m}$, $d_{\text{slib}} = 10 \mu\text{m}$. De sterretjes geven de gemeten waarden aan 3,5 m voor het begin van het plantenveld (foutengrenzen vallen binnen de symbolen).

De hypothese dat bij een veel langer plantenveld er wel een effect zichtbaar zou zijn blijkt ook niet te kloppen. Berekeningen van 2000 seconden bij een gemiddelde stroomsnelheid van 10 cm s^{-1} wat overeen zou komen met een plantenveld van zo'n 200 m, laten een vergelijkbaar beeld zien.

Dit betekent dat versnelde uitzakking van slib in het plantenveld door een lagere turbulentiegraad, niet het mechanisme is dat verantwoordelijk is voor het verhelderende effect van de waterplanten. In het volgende hoofdstuk zal daarom nader worden ingegaan op de veldsituatie en een andere mogelijke verklaring.



Figuur 3.9 Snelheidsprofiel, turbulente kinetische energie, 'eddy diffusivity' en slibconcentratie zonder planten na 200, 400, 600, 800 en 1000 s bij een gemiddelde snelheid van 3.5 cm s^{-1} . De beginconcentratie $c_0 = 190 \text{ mgr L}^{-1}$, $C_D=0,1$, $d = 0,03 \text{ m}$, $d_{\text{slib}} = 10 \mu\text{m}$. De sterretjes geven de gemeten waarden aan $3,5 \text{ m}$ voor het begin van het plantenveld (foutengrenzen vallen binnen de symbolen).



Figuur 3.10: Snelheidsprofiel, turbulente kinetische energie, 'eddy diffusivity' en slibconcentratie boven en tussen de planten na 200, 400, 600, 800 en 1000 s bij een gemiddelde snelheid van 4 cm s^{-1} . De begin-concentratie $c_0 = 190 \text{ mgr L}^{-1}$, $C_D = 0,1$, $d = 0,03 \text{ m}$, $d_{\text{slib}} = 10 \text{ }\mu\text{m}$. De sterretjes geven de gemeten waarden aan 3,5 m voor het begin van het plantenveld (foutengrenzen vallen binnen de symbolen).

4 De veldsituatie

4.1 Inleiding

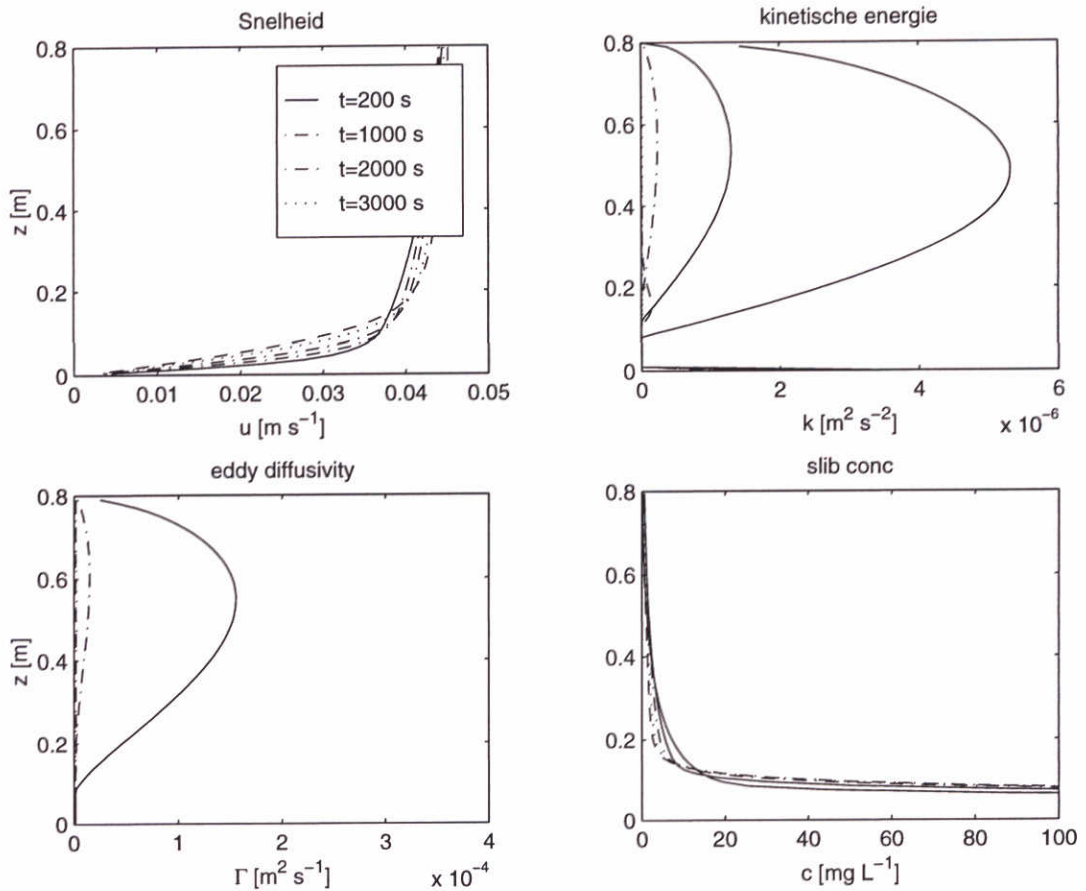
De uitgangssituatie in de gootexperimenten was een constante slibconcentratie over de hele waterkolom. In werkelijkheid wordt materiaal uit de zogenaamde epipelonlaag die boven de bodem zweeft opgewoeld onder invloed van golven en stroming (Vonk en Van Kessel, 1998). Vanuit deze laag gaan fijne deeltjes constant in suspensie, om vervolgens als de omstandigheden dat toelaten weer te sedimenteren. Omdat deze laag niet de vaste bodem is, is er dus geen sprake van erosie. Dit is een belangrijk verschil, omdat er in het laatste geval sprake zou zijn van een eindeloze bron.

Om de aanwezigheid van de epipelonlaag te modelleren in het 1DV-model moet er worden uitgegaan van een begin situatie met een 'hoog' (dit is zeer relatief) geconcentreerde laag in de onderste centimeters en een voor de rest lege waterkolom. Deze aanpak introduceert echter weer een ander probleem: de hoge concentratie slib in het onderste gedeelte van de waterkolom zal het naar boven diffunderen van de aan de bodem geproduceerde turbulente kinetische energie verhinderen (het zogenaamde *buoyancy-effect*). In werkelijkheid echter zal de bodem niet glad zijn en zal er ook turbulentie worden gegenereerd boven de sliblaag.

Een tweede verschil met de situatie in de goot is de opwekking van turbulentie aan het wateroppervlak door wind. In de goot wordt turbulentie opgewekt bij de bodem en door de plantjes wat naar boven diffundeert. In werkelijkheid zal er dus ook turbulentie vanaf het wateroppervlak naar beneden gaan. Men kan zich voorstellen dat hierbij de aanwezigheid van submerse vegetatie een grote rol speelt, deze zal namelijk de turbulente energie voor een gedeelte absorberen zodat het de bodem niet zal bereiken en het slib niet zal opwoelen. Zonder plantjes echter zal de aan het oppervlak gegenereerde turbulentie de epipelonlaag wel in beroering kunnen brengen. Helaas is het inbrengen van door wind gegenereerde turbulentie aan het wateroppervlak in het 1DV-model niet een triviale zaak. Het valt buiten dit project om dit mee te nemen in de modellering.

4.2 Resultaten

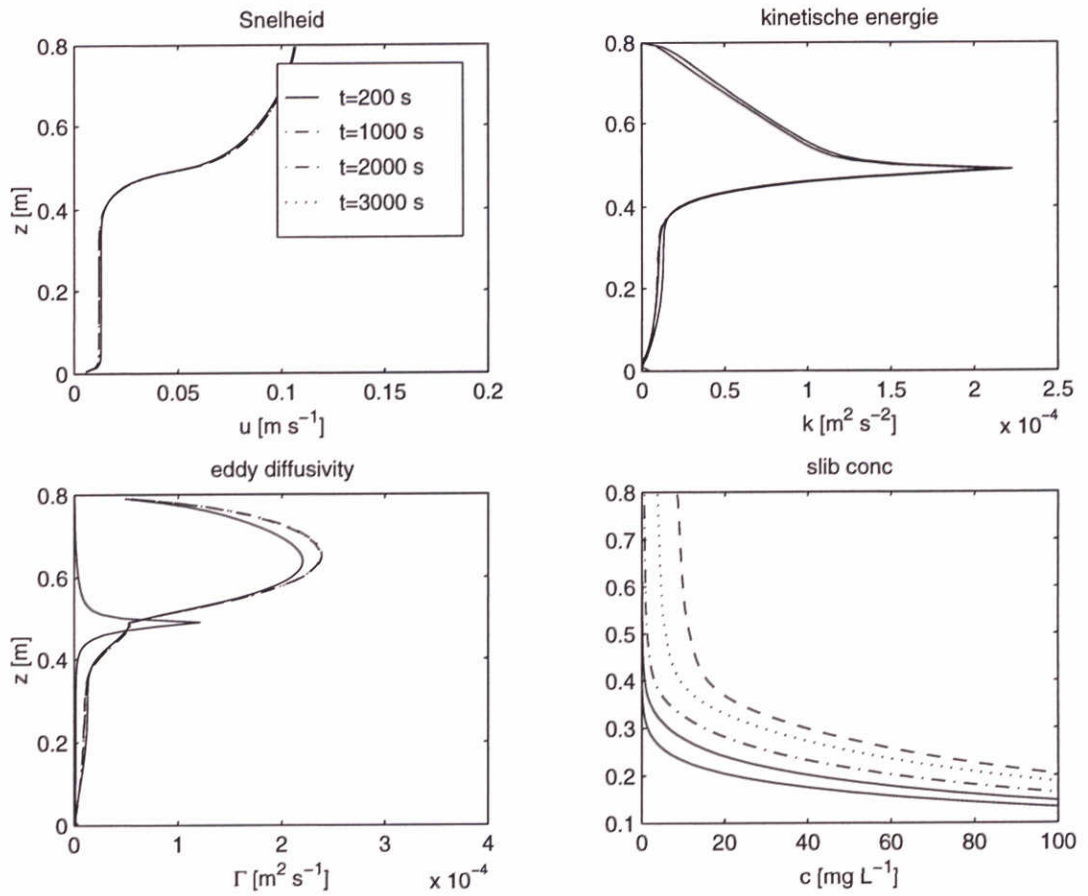
In de figuren 4.1 en 4.2 zijn de weergegeven resultaten verkregen met een beginsituatie zoals geschetst in de inleiding: een hoog geconcentreerde laag van 2,5 cm dik met fijn sediment dicht bij de bodem van 5 gr L^{-1} . De gemiddelde stroomsnelheid is 4 cm s^{-1} , $C_D = 0,1$, $d = 0,03 \text{ m}$ en $n = 590 \text{ m}^{-2}$. Door de kritische schuifspanning voor depositie heel laag te zetten is er geen depositie van slib mogelijk. Er wordt dus verondersteld dat de hoeveelheid slib in het systeem constant blijft.



Figuur 4.1 Snelheidsprofiel, turbulente kinetische energie, 'eddy diffusivity' en slibconcentratie zonder planten na 200, 1000, 2000 en 3000 s bij een gemiddelde snelheid van 4 cm s^{-1} . De beginconcentratie in de onderste 2.5 cm is 5 gr L^{-1} , $C_D = 0,1$, $d = 0,03 \text{ m}$, $n = 590 \text{ m}^{-2}$ en $d_{\text{slib}} = 10 \text{ }\mu\text{m}$.

De resultaten laten zien dat zonder de aanwezigheid van vegetatie na 3000 seconden slechts een klein gedeelte van het slib zich over de waterkolom heeft verspreid. Het grootste gedeelte bevindt zich nog steeds op de bodem. Zoals in de inleiding besproken verhindert de aanwezigheid van de hoog geconcentreerde laag het transport van turbulentie naar boven en is de turbulente menging dus gering. In de aanwezigheid van vegetatie wordt er ook boven de epipelonlaag turbulentie geproduceerd die er voor zorgt dat er wel slib omhoog kan. Hierdoor neemt de concentratie in het bovenste gedeelte van de waterkolom dus veel sneller toe als zonder plantjes het geval is.

Deze resultaten zijn eigenlijk het tegenovergestelde van wat men zou verwachten. Echter, de werkelijke veldsituatie verschilt, zoals al eerder genoemd, op een aantal belangrijke punten van de door het model berekende situatie. Zo zal er geen sprake zijn van een gladde bodem waar een overall even dikke laag slib boven zweeft. Er zal door wind turbulentie worden gegenereerd aan het wateroppervlak welke voor opwoeling van sediment zorgt. Daarbij is de gekozen beginconcentratie bij de bodem mogelijk aan de hoge kant.



Figuur 4.2 Snelheidsprofiel, turbulente kinetische energie, 'eddy diffusivity' en slibconcentratie boven en tussen de planten na 200, 1000, 2000 en 3000 s bij een gemiddelde snelheid van 4 cm s^{-1} . De begin-concentratie in de onderste 2.5 cm is 5 gr L^{-1} , $C_D = 0,1$, $d = 0,03 \text{ m}$, $n = 590 \text{ m}^{-2}$ en $d_{\text{slib}} = 10 \text{ }\mu\text{m}$.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Het is redelijk tot goed mogelijk om de gemeten snelheden, turbulente kinetische energieën en mengcapaciteit met en zonder de aanwezigheid van onderwatervegetatie met het aangepaste IDV-model te berekenen. Wel is het zo dat bij lagere snelheden wandeffecten een relatief grote rol spelen. De representatie van de planten d.m.v. een weerstandscoefficiënt, een diameter en een 'stelendichtheid' werkt goed in het geval van de kunstmatige vegetatie en redelijk voor de natuurlijke. Door de hoge flexibiliteit van de gebruikte plantjes wordt ook niet geheel voldaan aan een van de aannames die ten grondslag ligt aan het model, namelijk dat de vegetatie vrij star is. Desondanks wordt de gemeten trend en de grootte van de gemeten turbulente kinetische energie in het natuurlijke plantenveld goed gereproduceerd.

De effectieve plantdiameter d als invoerparameter is geen constante. Voor het goed reproduceren van alle data was het nodig om de waarde van d aan te passen als bijvoorbeeld de stroomsnelheid veranderde. Een vergelijkbaar effect zou natuurlijk ook bereikt worden met een verandering in de waarde van de weerstandscoëfficiënt C_D . Echter omdat de grootte van de plantdiameter veel nauwer begrensd is, is er voor gekozen deze aan te passen.

De gemeten en berekende slibconcentratieprofielen zonder de aanwezigheid van onderwatervegetatie komen goed met elkaar overeen. Met planten in de goot wordt het verschil groter. In plaats van een toename in concentratie boven de planten zoals gemeten berekent het model een afname. Dit verschil is echter goed te verklaren doordat in het model niet wordt uitgegaan van resuspensie van slib vanaf de planten zelf.

Uit de modelberekeningen blijkt dat het helder worden van het water boven submerse vegetatie niet verklaard kan worden door een versneld uitzakken van het sediment vanwege een lagere turbulentiegraad. Dit betekent dat in de experimentele opzet zoals gebruikt dit effect dan ook niet gereproduceerd zou kunnen worden. Zelfs niet bij een veel groter plantenveld.

In de veldsituatie zal de opwoeling van slib uit de epipelonlaag bij de bodem bepalend zijn voor de lokale slibconcentraties. Hierbij speelt de aan het oppervlak gegenereerde turbulentie door wind (golfwerking) waarschijnlijk een grote rol. In de aanwezigheid van planten zal deze turbulentie worden geabsorbeerd, zodat deze bijna instantane opwoeling niet plaats vindt. Deze situatie is met het huidige model niet makkelijk te simuleren. Bovendien zullen 3D-effecten een rol spelen, water zal om de waterplantvelden heen stromen en niet alleen erdoor of eroverheen.

5.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek

1. Het effect van windgolven op slibconcentratie moet nader worden onderzocht. Hierbij moet worden uitgegaan van een laagje hooggeconcentreerd slib bij de bodem van geringe sterkte ('fluffy layer'). Bij lagere snelheden ($\approx 10 \text{ cm s}^{-1}$) verdient het aanbeveling de bodem ruwer te maken waardoor de invloed van de gootwand relatief klein wordt.
2. Het analyseren van veldmetingen met het IDV-model zou het inzicht vergroten. Hiervoor zouden de volgende parameters moeten worden gemeten:
 - snelheid, turbulente kinetische energie, mengcapaciteit (hiervoor is het noodzakelijk met voldoende resolutie en voldoende lang te meten) en slibconcentraties. Deze parameters zouden op minimaal 2 hoogtes in en buiten een plantenveld moeten worden gemeten;
 - effectieve plantdiameter die als invoerparameter voor het model kan dienen;
 - flexibiliteit van de planten.
3. Voor een goede modellering van de veldsituatie moet de toepasbaarheid van het IDV-model nader worden bekeken en eventueel worden aangepast/uitgebreid. De buyoancy-koppeling zou bijvoorbeeld kunnen worden uitgezet.

Literatuur

- Boot, G. 1997 (April). Interactie van submerse vegetatie en fysische processen: literatuurstudie. Rapport Z2328. WL | DELFT HYDRAULICS, Delft.
- Winterwerp, J.C. en Uittenbogaard, R.E. 1997 (Januari). Sediment transport and fluid mud flow. Rapport Z2005. WL | DELFT HYDRAULICS, Delft.
- De Vries, M.B. 1998 (November). Interactie van submerse vegetatie en fysische processen 1998; Rapport I, Opzet van het experiment. Rapport Z2473.1. WL | DELFT HYDRAULICS, Delft.
- Kuijper, C., Winterwerp, J.C. en Cornelisse, J.M. 1990 (November). Cohesive sediments; Erosion en deposition characteristics of natural muds sediments from Ketelmeer. Rapport 30. Rijkswaterstaat/WL | DELFT HYDRAULICS, Delft.
- Tánczos, I.C. 1998 (November). Interactie van submerse vegetatie en fysische processen 1998; Rapport II, Resultaten van de experimenten. Rapport Z2473.2. WL | DELFT HYDRAULICS, Delft.
- Uittenbogaard, R.E., van Kester, W., Winterwerp, J.C. en Leepel, H.H. 1996. Sediment transport: A preparatory study about implementation in DELFT-3D. Rapport Z1022. WL | DELFT HYDRAULICS, Delft.
- Vonk, M. en van Kessel, T. 1998. Handboek zoetwaterslib. Concept rapport. WL | DELFT HYDRAULICS.

Interactie van submerse vegetatie en fysische processen, 1998; Rapport IV

Resultaten van de experimenten met echte
planten

I. Tánczos

maart 1999

Inhoud

Lijst van Figuren

1	Inleiding.....	1-1
2	Meetopstelling en analysetechnieken.....	2-1
2.1	Meetopstelling.....	2-1
2.1.1	Vegetatie.....	2-1
2.2	Meetprogramma.....	2-2
3	Resultaten.....	3-1
3.1	Effectieve plantlengte.....	3-1
3.2	Serie 1 en 2.....	3-1
3.2.1	Inleiding.....	3-1
3.2.2	Resultaten.....	3-1
3.3	Serie 3 en 4.....	3-3
3.3.1	Inleiding.....	3-3
3.3.2	Resultaten.....	3-4
3.4	Conclusies.....	3-4
4	Vergelijking met de resultaten verkregen met de kunstmatige vegetatie.....	4-1
4.1	Inleiding.....	4-1
4.2	Gemiddelde snelheden.....	4-1
4.3	Turbulente kinetische energie.....	4-1
4.4	Turbulente menging.....	4-2
4.5	Invloed van de wand.....	4-2
5	Conclusies en aanbevelingen.....	5-1
	Literatuur.....	1

Lijst van Figuren

- Figuur 2.1 Schematische weergave van de opstelling met natuurlijke vegetatie
- Figuur 2.2 Haaksterrekroos, *Callitriche hamulata*.
- Figuur 3.1 Gemiddelde snelheden van serie 1. Waterhoogte is 80 cm en aanstroomsnelheid is 5 cm s⁻¹.
- Figuur 3.2 Gemiddelde snelheden van serie 2. Waterhoogte is 80 cm en aanstroomsnelheid is 2,5 cm s⁻¹.
- Figuur 3.3 Turbulente intensiteit en kinetische energie van serie 1. Waterhoogte is 80 cm en aanstroomsnelheid is 5 cm s⁻¹.
- Figuur 3.4 Turbulente intensiteit en kinetische energie van serie 2. Waterhoogte is 80 cm en aanstroomsnelheid is 2,5 cm s⁻¹.
- Figuur 3.5 Dimensieloze turbulente kinetische energie van serie 1 en 2. Waterhoogte is 80 cm en aanstroomsnelheden 5 en 2,5 cm s⁻¹, respectievelijk. De onderste helft van de figuur is een uitvergroting van de bovenste helft.
- Figuur 3.6 Turbulentie spectra op verschillende hoogtes van serie 1 op $x_p = 2,2$ m. Waterhoogte is 80 cm en aanstroomsnelheid is 5 cm s⁻¹.
- Figuur 3.7 Turbulente spectra op verschillende hoogtes van serie 2 op $x_p = 2,2$ m. Waterhoogte is 80 cm en aanstroomsnelheid is 2,5 cm s⁻¹.
- Figuur 3.8 Turbulente mengcoëfficiënten op verschillende hoogtes van serie 1 op $x_p = -2,0$ (+) en 2,2 m. Waterhoogte is 80 cm en aanstroomsnelheid is 5 cm s⁻¹.
- Figuur 3.9 Turbulente mengcoëfficiënten op verschillende hoogtes van serie 2 op $x_p = -2,0$ (+) en 2,2 m. Waterhoogte is 80 cm en aanstroomsnelheid is 2,5 cm s⁻¹.
- Figuur 3.10 Dimensieloze turbulente mengcoëfficiënten op verschillende hoogtes van serie 1 en 2 op $x_p = -2,0$ (+) en 2,2 m. Waterhoogte is 80 cm en aanstroomsnelheid is 5 en 2,5 cm s⁻¹, respectievelijk.
- Figuur 3.11 Gemiddelde snelheden van serie 3. Waterhoogte is 63 cm en aanstroomsnelheid is ± 5 cm s⁻¹.
- Figuur 3.12 Gemiddelde snelheden van serie 4. Waterhoogte is 42 cm en aanstroomsnelheid is ± 5 cm s⁻¹.
- Figuur 3.13 Turbulente intensiteit en kinetische energie serie 3. Waterhoogte is 63 cm en de aanstroomsnelheid is ± 5 cm s⁻¹.
- Figuur 3.14 Turbulente intensiteit en kinetische energie van serie 4. Waterhoogte is 42 cm en de aanstroomsnelheid is ± 5 cm s⁻¹.
- Figuur 4.1 Dimensieloze gemiddelde snelheden in de x-richting zoals gemeten bij kunstmatige en natuurlijke vegetatie. De referentie snelheid u_{ref} is gelijk aan de snelheid zoals gemeten stroom afwaarts in de desbetreffende run. De aanstroomsnelheid is 5 cm s⁻¹ en de waterhoogte is 80 cm. Effectieve plantlengtes: echt leff = 45 cm, kunst hoog leff = 45 cm en kunst laag leff = 46 cm.
- Figuur 4.2 Dimensieloze turbulente kinetische energie gemeten met kunstmatige en echte vegetatie voor vier aanstroomsnelheden 2,5, 5, 10 en 20 cm s⁻¹. De waterhoogte is in alle gevallen 80 cm.
- Figuur 4.3 Dimensieloze turbulente mengcoëfficiënten op $z = 62,5$ en 22,5 cm zoals bepaald voor de kunstmatige vegetatie bij aanstroomsnelheden van 5, 10 en 20 cm s⁻¹. De waterhoogte is 80 cm.

I Inleiding

In dit rapport worden de resultaten van metingen naar het effect van onderwatervegetatie op de turbulente mengcapaciteit van een stroming besproken. Bij de metingen is gebruik gemaakt van natuurlijke vegetatie. Het is een vervolg op het experiment zoals beschreven in de rapporten I en II (De Vries, 1998 en Tánczos, 1998) van deze serie waarin gebruik is gemaakt van kunstmatige vegetatie. Bij die metingen werden naast de turbulente intensiteiten ook kaoliniet concentraties gemeten. Door middel van de huidige metingen is het mogelijk te zien hoe de uitkomsten bij gebruik van kunstmatige vegetatie zich verhouden tot die met natuurlijke vegetatie. Het uiteindelijke doel is een beter begrip te krijgen van het effect van submerse vegetatie op slibconcentraties.

Slib wordt in suspensie gehouden door de turbulente bewegingen van het stromend water. De aanwezigheid van onderwatervegetatie zal deze turbulentie beïnvloeden en daardoor dus de slibconcentraties. Daarnaast zal door de aanwezigheid van onderwaterplanten de resuspensie van sediment worden bemoeilijkt (Boot, 1997). Het experiment, waarvan de resultaten zijn beschreven in dit rapport heeft tot doel de effecten van natuurlijke vegetatie op de turbulente menging te bestuderen; welke parameters zijn van belang en hoe groot is het effect in relatie tot de kunstmatige vegetatie.

De metingen zijn uitgevoerd in de Getijgoot en omvatten snelheids- en turbulentie metingen. Voor de natuurlijke vegetatie is gebruik gemaakt van Haaksterrekroos (*Callitriche hamulata*) afkomstig uit de sloot rondom het kantoor van WL | DELFT HYDRAULICS in Delft. Voor de rest zijn de metingen identiek aan die uitgevoerd met kunstmatige vegetatie met dien verstande dat er geen kaoliniet is gebruikt en slechts met één beplantingsdichtheid is gemeten (Tánczos, 1998).

In Hoofdstuk 2 worden de meetopstelling en de gebruikte analyse technieken besproken. In hoofdstuk 3 worden de resultaten gepresenteerd waarna in hoofdstuk 4 de vergelijking met de resultaten van het vorige experiment zal worden gemaakt. Hoofdstuk 5 bevat de algemene conclusies en aanbevelingen voor eventueel vervolgonderzoek.

2 Meetopstelling en analysetechnieken

2.1 Meetopstelling

De metingen zijn allen uitgevoerd in de Getijgoot met dezelfde opstelling als voor de metingen met de kunstplantjes (Tánczos, 1998). Op de CEMPANEL-platen in het midden van de goot waren nu echte waterplantjes geplaatst. Deze waren afkomstig uit het water op het WL-terrein in Delft. Een bosje plantjes was d.m.v een touwtje en 2 schroeven aan de platen bevestigd met tussenruimtes van 20 cm. De gemiddelde lengte van de vegetatie was ongeveer 50 cm. Om de plantjes zo lang mogelijk te laten overleven waren er boven het plantenbed, in het midden van de goot, TL-buizen geplaatst (zie figuur 2.1). Deze lampen brandden 16 uur per dag. Het nadeel van de aanwezigheid van TL-buizen was dat de snelheidsmeters (EMS) slechts tot 23 cm van de bodem konden meten. Dichterbij was niet mogelijk door de beperkte lengte van de apparatuur.

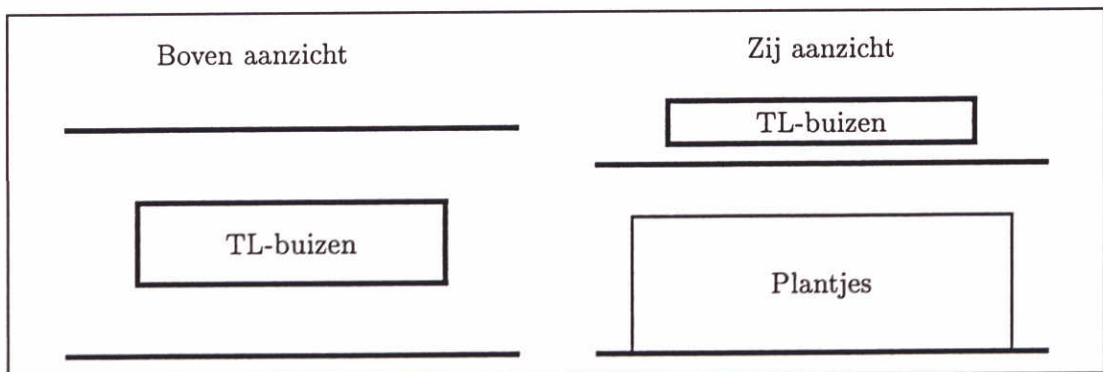
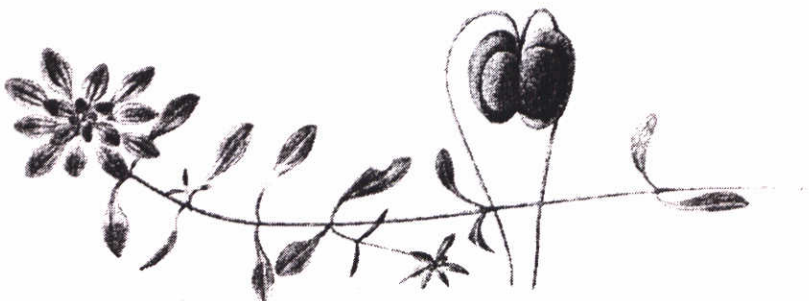


Fig. 2.1 Schematische weergave van de opstelling met natuurlijke vegetatie.

2.1.1 Vegetatie

De gebruikte plantjes waren Haaksterrekroos (zie figuur 2.2). Dit plantje, wat vrij algemeen in Nederland voorkomt, is voornamelijk te vinden in beken, sprengen, afwateringskanaaltjes, kwel sloten en verse zandafgravingen (Weeda *et al.* 1988). Het is dus geen typische randmeer vegetatie.



Figuur 2.2 Haaksterrekroos, *Callitriche hamulata*.

Er zijn twee verschillen aan te geven tussen de gebruikte kunst- en natuurlijke onderwater vegetatie:

- de flexibiliteit;
- de dichtheid.

Ad 1

Sterrenkroos is een erg flexibel plantje in vergelijking met de kunstmatige vegetatie zoals gebruikt in het eerste deel van het experiment (Tánczos, 1998). De steeltjes zijn ongeveer een factor 5 dunner (± 5 en 1 mm, respectievelijk). In stromend water maken ze een wiegende beweging hetgeen bij de kunstplanten in veel mindere mate het geval was (ze zullen dus meer energie opnemen). Bij hogere snelheden gaan de plantjes zo plat liggen dat er genoeg vrije waterhoogte is om het water door te laten. Om de plantjes niet te veel te belasten is alleen met lage snelheden gemeten (maximaal 5 cm s^{-1}).

Ad 2

Een kunstplant bestaat uit 6 stelen van gelijke lengte met daaraan regelmatig verdeeld de blaadjes. Hierdoor is de plantdichtheid vrij uniform over de diepte. Alleen dicht bij de bodem, waar de 6 stelen bij elkaar komen, wijkt deze af. Het Haaksterrekroos, zoals gebruikt in het experiment, bestaat uit een aantal plantjes die niet allemaal even lang zijn. Dit heeft tot gevolg dat de bovenkant van het plantenveld veel minder dicht is. Door het hoge aantal steeltjes per bosje en de hoge flexibiliteit van de plantjes, is het plantenbed echter dichter dan in het geval van de kunstplanten.

Het totale plantenveld was 3.7 m lang en bestond uit zo'n 100 bosjes Haakssterrekroos.

2.2 Meetprogramma

Er is gemeten met waterdieptes van ± 80 , 60 en 40 cm. De stroomsnelheden waren ongeveer $2,5$ en 5 cm s^{-1} . In Tabel 1 staan de meetcondities, zoals gebruikt, samengevat. Per conditie zijn er 5 of 6 verticale snelheidsprofielen gemeten voor, in en achter het plantenveld. Elk profiel bestaat uit 4-8 meetpunten die op 2,5 tot 5 cm uit elkaar liggen. In het geval van de series 1 en 2 waren de meettijden per hoogte 400 s en in de overige 2 series 200 s. Dit betekent dat alleen van de eerste 2 series een uitgebreide turbulentie analyse kan worden gemaakt.

Serie nr.	Waterhoogte [cm]	Debiet [L s^{-1}]	Stroomsnelheid [cm s^{-1}]
1	80	38	± 5
2	80	20	$\pm 2,5$
3	63	29	± 5
4	42	19	± 5

Tabel 1. Meetcondities

Analyse

De snelheidsmetingen zijn op een zelfde manier geanalyseerd als bij de kunstplantjes. Van alle metingen zullen de gemiddelde snelheden in de x - y - en z -richting, u_{gem} , v_{gem} en w_{gem} respectievelijk, worden gegeven plus de turbulente intensiteit (= standaard deviatie van het signaal) in de drie richtingen u' , v' en w' . Zoals gebruikelijk geeft x de lengterichting van de goot aan, y de dwars- en z de verticale richting.

Van de eerste twee series zal met behulp van een Fourier Transformatie een turbulentie spectrum worden gemaakt waaruit de 'turbulente mengcoëfficiënt' Γ kan worden afgeleid. Voor details over de gebruikte methode wordt verwezen naar Tánčzos (1998) en de daarin genoemde referenties.

3 Resultaten

3.1 Effectieve plantlengte

Zoals boven genoemd is de lengte van de planten niet zo goed gedefinieerd als in het geval van de kunstplanten. Dit geldt ook voor de effectieve plantlengte l_{eff} (d.w.z de hoogte van de vegetatie onder de gebruikte stromingscondities). Naast het feit dat de lengte van de afzonderlijke plantjes varieert is het plantenveld ook nog eens veel beweeglijker. Hierdoor wordt het bepalen van de effectieve lengte erg moeilijk. De lengtes zoals staan gegeven in tabel 3.1 hebben daarom een onnauwkeurigheid van ± 5 cm. Uit de tabel blijkt dat zelfs voor meetserie 4, waarbij de plantjes langer zijn dan de waterdiepte, er nog steeds een vrije waterhoogte is van zo'n 10 cm.

Serie nr.	Waterhoogte [cm]	Stroomsnelheid [cm s ⁻¹]	effectieve plantlengte l_{eff} [cm]
1	80	5	± 45
2	80	2,5	± 50
3	63	5	± 45
4	42	5	± 30

Tabel 3.1 Effectieve plantlengtes voor de verschillende serie metingen.

3.2 Serie 1 en 2

3.2.1 Inleiding

Serie 1 en 2 zijn gedaan met beide dezelfde waterhoogte maar met verschillend debiet. Omdat de meettijd lang genoeg is kan hierop een uitgebreide turbulentie analyse worden toegepast. De resultaten van serie 1 kunnen rechtstreeks worden vergeleken met het experiment met de kunstplantjes.

3.2.2 Resultaten

Gemiddelde snelheden

In de figuren 3.1 en 3.2 staan de gemiddelde snelheden zoals gemeten in series 1 en 2 (zie tabel 2.1). Let op dat de verticale as niet tot 0 cm loopt maar slechts tot 20 cm. De onnauwkeurigheid in de gegeven waardes Δu_{gem} wordt berekend met $\Delta u_{\text{gem}} = \Delta u N^{-0.5}$, met Δu de fout per meting en N het aantal metingen. Bij een meettijd van 400 s en een meetfrequentie van 5 Hz geeft dit $\Delta u_{\text{gem}} = 0.03 \text{ cm s}^{-1}$.

Er is weer een zelfde patroon waar te nemen als bij de kunstmatige vegetatie (Tánczos, 1998): een toenemende snelheid in de x-richting boven het plantenveld en een afnemende snelheid in het plantenveld (een uitgebreide vergelijking tussen de resultaten voor de kunstmatige en natuurlijke vegetatie zal worden gegeven in Hoofdstuk 4).

De resultaten voor beide series wijzen erop dat er zich, wat betreft de x-richting, na 2-3 m in het plantenveld een stabiel uniform stromingsprofiel heeft ontwikkeld. Boven de vegetatie is er dan nauwelijks een verandering in de snelheid en tussen de plantjes is de snelheid afgenomen tot vrijwel 0. Het overgangsgebied tussen de lage en hoge snelheden begint al op $z = 65$ cm en loopt tot ongeveer $z = 35$ cm.

In het geval van de stromingscomponenten in de y- en z-richting is het patroon wat minder duidelijk. Voor serie 1 geldt dat de w- component 0 is voor het veld en varieert rond de $0,5 \text{ cm s}^{-1}$ boven/in het plantenveld. Op $x_p = -0,1$ m, bij het begin van de vegetatie, is er een relatief sterke omhooggerichte component met een maximum waarde van iets meer dan 1 cm s^{-1} . De v-component van de stroming is ongeveer 0 voor en aan het begin van het veld om later iets toe te nemen tot een maximum van zo'n 1 cm s^{-1} (in het geval van de y-richting is het teken niet van belang het is immers altijd zijwaarts gericht.).

Bij serie 2 is er 2 m voor de vegetatie over de gehele diepte een naar beneden gerichte stroming van rond de $0,5 \text{ cm s}^{-1}$. Aan het begin van het plantenveld wordt deze dan positief om vervolgens op $x_p = 3,2$ m weer negatief te worden. Voor de stroming in de y-richting is er nu een kleine doch significante stroming voor en aan het begin van het veld. Verderop verandert deze dicht bij het oppervlak van teken. Deze resultaten worden veroorzaakt door 1. het meanderen van de stroom in de goot onafhankelijk van de aanwezigheid plantjes (zie Tánczos (1998)) en 2. het meanderen tussen de plantjes door.

Turbulente intensiteit en kinetische energie

In de figuren 3.3 en 3.4 staan de turbulente intensiteiten en kinetische energieën zoals gemeten in serie 1 en 2. De onnauwkeurigheid in de gegeven waardes $\Delta u'$ wordt berekend met $\Delta u' = \Delta u N^{-1}$, met Δu de fout per meting en N het aantal metingen. Bij een meettijd van 400 s en een meetfrequentie van 5 Hz geeft dit $\Delta u' = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$.

In tegenstelling tot de gemiddelde snelheid blijft de turbulente intensiteit toenemen boven het plantenveld. Voor serie 2 is er zelfs een verhoogde toename in de laatste meter terwijl de gemiddelde snelheid op hetzelfde traject ongeveer gelijk blijft. Dit betekent dat er niet alleen een absolute maar ook een relatieve toename is in de turbulente energie. Het maximum ligt net boven de toppen van de plantjes.

De turbulente kinetische energie kan dimensieloos worden gemaakt door te delen door de lokale snelheid in het kwadraat. In de bovenste helft van figuur 3.5 zijn de resultaten weergegeven voor serie 1 en 2, met aanstroomsnelheden van 5 en $2,5 \text{ cm s}^{-1}$, respectievelijk. Hieruit blijkt dat in het plantenveld de relatieve kinetische energie enorm toeneemt tussen de plantjes, dit als gevolg van de zeer lage snelheden daar (zie figuur 3.1 en 3.2). Om te kunnen zien wat er boven de plantjes gebeurt, is er in de onderste helft van figuur 3.5 een uitvergroting gemaakt.

Hieruit blijkt dat er boven de vegetatie een afname is in de (relatieve) kinetische turbulente energie t.o.v. voor het plantenveld. Deze afname is significant want de onnauwkeurigheid ligt in de orde van 10^{-4} . Ook is het zo dat de energie boven de plantjes min of meer constant blijft. Tussen de vegetatie in, zo'n 10 cm lager dan de toppen van de vegetatie (effectieve plantlengte) is er een enorme toename in de energie op $x_p = 3.2$ m, welke nog dichter bij de bodem weer afneemt.

Turbulentie spectra en mengcoëfficiënten

In de figuren 3.6 en 3.7 staan de turbulentie spectra zoals gemeten op verschillende hoogtes boven en in het plantenveld ($x_p = 2.2$ m) voor serie 1 en 2, respectievelijk. Deze laten heel duidelijk zien dat de grotere wervels tussen de plantjes niet meer voorkomen. Vanaf $z = 40$ cm zit het grootste gedeelte van de turbulente energie in die wervels die buiten het bereik van de EMS vallen doordat ze te klein zijn. Dit laat zien dat de energie die in de grotere turbulente structuren zit wordt geabsorbeerd door de planten. Tegelijkertijd wordt er relatief veel energie geproduceerd in de vorm van kleine werveltjes.

De turbulente mengcoëfficiënten $\Gamma(L)$ voor serie 1 en 2 staan weergegeven in figuren 3.8 en 3.9. In elke plot staan de waarden van 2 m voor het plantenveld vergeleken met die 2,2 m in het veld. Hieruit blijkt weer dat boven de vegetatie de menging toeneemt t.o.v. daarbuiten terwijl tussen de plantjes deze lager wordt. In het geval van de hogere aanstroomsnelheid is de afname tussen $z = 45$ en 25 cm zelfs bijna twee ordes van grootte. Vergelijken we de waardes voor en in het plantenveld op $z = 25$ cm dan is het verschil een factor 10.

Bij de lagere snelheid (serie 2) is de afname met de hoogte ongeveer gelijk maar het verschil tussen de waarden voor en in het plantenveld zijn minder groot. Door de grotere effectieve plantlengte begint de afname in turbulente menging wel hoger (vergelijk de plaatjes voor $z = 45$ cm, linksonder in de figuren 3.8 en 3.9).

Gebruik makend van de effectieve plantlengte l_{eff} kunnen drie stromingsgebieden met bijbehorende "referentie-hoogtes" h_i worden gedefinieerd: 1) de vrije stroming $h_v = 80$ cm, 2) de vrije stroming boven de vegetatie $h_b = h_v - l_{eff}$ en 3) de stroming door de plantjes $h_p = l_{eff}$. Door te delen door het product van de 'referentie-hoogte' en de lokale snelheid kunnen de turbulente mengcoëfficiënten dimensieloos worden gemaakt. De resultaten hiervan staan weergegeven in figuur 3.10. Hieruit blijkt dat de mengcoëfficiënten zowel boven als in het plantenveld groter zijn dan op de zelfde hoogte buiten het veld. Bovendien neemt de menging tussen de planten in toe. Dit geeft aan dat er kinetische energie wordt gegenereerd in het plantenveld die bijdraagt aan de turbulente menging. Echter door de zeer lage snelheden tussen de plantjes is deze in absolute zin veel kleiner dan buiten het veld (zie figuren 3.8 en 3.9).

3.3 Serie 3 en 4

3.3.1 Inleiding

Serie 3 en 4 zijn beide uitgevoerd met lagere waterstanden, 63 en 42 cm, respectievelijk. Door het debiet hierbij aan te passen is de snelheid op ongeveer 5 cm s^{-1} gehouden. Het doel

hiervan was het effect van een kleinere vrije waterhoogte boven de vegetatie te onderzoeken. Door de kortere meettijd van 200 sec kunnen alleen gemiddelde snelheden en de turbulente intensiteit worden berekend.

3.3.2 Resultaten

Gemiddelde snelheden

In de figuren 3.11 en 3.12 staan de gemiddelde snelheden weergegeven zoals gemeten in series 3 en 4. Voor serie 3 met een waterhoogte van 63 cm, waarbij er in stationaire toestand (zonder stroming) nog steeds een stukje vrije waterhoogte is boven de plantjes, zijn de resultaten vergelijkbaar met die van serie 1. Hierbij moet opgemerkt worden dat de piek van de snelheden boven de vegetatie hoger ligt dan het hoogste meetpunt. Hier kon niet meer gemeten worden omdat de nabijheid van het wateroppervlak een verstoring zou kunnen geven. Maar op grond van het debiet kan men berekenen dat de gemiddelde snelheid in de bovenste 10 cm ongeveer 15 cm s^{-1} moet zijn.

Bij deze serie lijkt het erop dat vanaf $x_p = 2,2 \text{ m}$ een stabiele toestand is ontstaan. Het laatste snelheidsprofiel op $x_p = 3,9 \text{ m}$ ligt net achter het plantenbed wat loopt tot $x_p \cong 3,8 \text{ m}$. Opvallend is dat dit profiel praktisch gelijk is aan die gemeten in het plantenbed. Het enige verschil is dat de overgang van hoge naar lage snelheden bijna 10 cm is omhoog geschoven.

Ook voor serie 4 geldt weer dat de hoogste snelheden optreden in de bovenste 10 cm waar niet kan worden gemeten ($\pm 17 \text{ cm s}^{-1}$ op $x_p = 3,2 \text{ m}$). De resultaten zijn weer vergelijkbaar met de vorige 3 series echter met 1 verschil: net aan het begin van het plantenbed ($x_p = -0,1 \text{ m}$) is er een negatieve verticale stroming in plaats van een naar boven gerichte. Verder is het opvallend dat achter het plantenbed $x_p = 3,9 \text{ m}$ de snelheid over de verticaal vrij constant is en veel lager dan er voor ($\pm 0,5 \text{ vs. } \pm 4 \text{ cm s}^{-1}$).

Turbulente intensiteit en kinetische energie

In de figuren 3.13 en 3.14 staan de gemeten turbulente intensiteit en kinetische energie voor serie 3 en 4. Wat hier opvalt is dat de energie tussen de plantjes niet lager wordt dan die voor de plantjes. Hierbij moet dan wel worden aangetekend dat er in de onderste 15-25 cm niet is gemeten. Een ander opvallend punt is dat bij serie 3 in tegenstelling tot de gemiddelde snelheid de turbulente intensiteit achter de vegetatie wel is toegenomen t.o.v. die voor de vegetatie. Hieruit volgt dat er net achter het veld een relatief grote productie van turbulentie plaats heeft.

3.4 Conclusies

De verticale profielen van de gemiddelde snelheden vertonen onder alle omstandigheden een vergelijkbaar patroon als functie van hun positie: de snelheid neemt toe boven de vegetatie en af tussen de vegetatie. Ook bij de twee lagere waterstanden is een dergelijke trend waar te nemen. De resultaten wijzen erop dat er zich na 2 m in het plantenveld, wat de gemiddelde snelheid betreft, een stabiele situatie heeft ontwikkeld; de snelheid neemt niet verder toe.

De turbulente intensiteit over de vertikaal volgt in het algemeen een vergelijkbaar patroon. Echter bij een waterhoogte van 80 cm blijft boven de vegetatie de turbulentie toenemen in tegenstelling tot de gemiddelde snelheid. Dit is goed te zien in figuur 3.5 waar de relatieve turbulente kinetische energie k/u^2 is afgebeeld als functie van de positie. Dit betekent dat er boven de vegetatie turbulente energie wordt geproduceerd. Tussen de plantjes gebeurt dit zelfs in veel grotere mate. Echter door de veel lagere snelheden is deze absoluut genomen heel klein.

Uit de turbulente energie spectra blijkt dat de energie die geproduceerd wordt door de plantjes in kleine wervels zit (zie figuren 3.16 en 3.17). Deze zijn zo klein dat ze voor het grootste gedeelte buiten het meetbereik van de EMS vallen. De turbulente menging is tussen de planten lager dan daarbuiten (zie figuren 3.8 en 3.9). Dit komt voornamelijk door de zeer lage snelheden aldaar want in relatieve zin is de turbulente menging tussen de planten hoger (zie figuur 3.10).

De series 3 en 4 met de lagere waterstanden van respectievelijk 63 en 42 cm, geven vergelijkbare resultaten met de series 1 en 2.

4 Vergelijking met de resultaten verkregen met de kunstmatige vegetatie

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zullen de overeenkomsten en verschillen tussen het experiment waar gebruik is gemaakt van kunstmatige vegetatie (Tánczos, 1998) en het huidige experiment waarbij gebruik is gemaakt van natuurlijke vegetatie worden besproken. Wat absolute waarden betreft is het alleen mogelijk een vergelijking te maken tussen de proeven met een aanstroomsnelheid van 5 cm s^{-1} en een waterhoogte van 80 cm.

4.2 Gemiddelde snelheden

In figuur 4.1 staan verticale snelheidsprofielen voor de x -richting zoals gemeten bij een aanstroomsnelheid van 5 cm s^{-1} en een waterhoogte van 80 cm. In elk plaatje staan de waarden voor kunstmatige (hoge en lage dichtheid) en natuurlijke vegetatie met elkaar vergeleken. De waarden zijn allen dimensieloos gemaakt door te delen door een referentie snelheid u_{ref} . Hiervoor is de snelheid genomen zoals gemeten op $z = 40 \text{ cm}$ door de vaste EMS aan de stroomafwaartse kant van het plantenbed in de desbetreffende run.

In grote lijnen zijn de resultaten van de drie experimenten vergelijkbaar. Het grootste onderscheid is zichtbaar op $x_p = 0,8 \text{ m}$, waar, in het geval van de natuurlijke vegetatie, de snelheden tussen de plantjes tot bijna 0 zijn gedaald terwijl bij de kunstmatige vegetatie de afname slechts ongeveer een factor 2 is. Ook lijkt het erop dat het overgangsgebied van de hoge naar de lage snelheden breder is in het geval van de echte vegetatie. Verderop, op $x_p = 2,1 \text{ m}$, zijn de verschillen tussen de kunstmatige en natuurlijke vegetatie al een stuk minder (er is op deze positie geen meting gedaan bij een kunstmatig plantenveld met een lage dichtheid).

De verschillen zijn terug te voeren op de verschillen in dichtheid en flexibiliteit van de vegetatie. Daarnaast is de bovenkant van het natuurlijke plantenveld minder homogeen dan in het geval van de kunst plantjes doordat de plantjes niet allemaal identiek zijn. Dat het verschil stroomafwaarts afneemt is niet verrassend: ten eerste neemt de snelheid in de kunstmatige vegetatie steeds verder af en komt dus dichterbij de snelheid gemeten in de natuurlijke vegetatie en ten tweede zal het natuurlijke plantenbed aan de bovenkant gelijkmatiger worden doordat de plantjes enigszins ombuigen.

4.3 Turbulente kinetische energie

In figuur 4.2 staan de dimensieloze turbulente kinetische energieën weergegeven zoals gemeten met kunstmatige en echte vegetatie voor de vier gebruikte aanstroomsnelheden 2.5, 5, 10 en 20 cm s^{-1} . De waterhoogte is in alle gevallen 80 cm.

De figuur laat zien dat er kwalitatief geen echte verschillen zijn tussen de resultaten verkregen met de kunst- en die met natuurlijke vegetatie. In beide gevallen is er productie van turbulente kinetische energie door de vegetatie. In kwantitatieve zin zijn er wel verschillen:

1. De natuurlijke vegetatie produceert (relatief) meer turbulente kinetische energie; en
2. Boven de natuurlijke vegetatie neemt het energie niveau af totdat het significant lager is dan die van de vrije stroming voor de plantjes. Bij de kunstmatige vegetatie is dit verschil niet significant. De natuurlijke vegetatie zoals gebruikt in dit experiment dempt dus beter.

Het tweede verschil is het gevolg van de grotere flexibiliteit van de natuurlijke vegetatie waardoor de plantjes mee gaan wiegen met de stroming. Op deze wijze wordt natuurlijk meer energie geabsorbeerd dan door de veel stijvere kunstmatige vegetatie.

4.4 Turbulente menging

Ook wat betreft de turbulente menging zijn de verschillen tussen de kunstmatige en natuurlijke vegetatie niet groot. Figuur 3.13 uit Rapport II laat de turbulente menging zien bij kunstmatige vegetatie. Deze is te vergelijken met figuur 3.8 uit dit rapport. Daaruit blijkt dat qua (absolute) grootte er weinig onderscheid is. Wel is goed te zien dat in het geval van de echte plantjes de turbulentie in de vrije stroom tot op grotere dieptes lager is dan die in de vegetatie. Dit wordt veroorzaakt doordat het Haaksterrekroos een stuk flexibeler is dan de gebruikte kunstplantjes.

Ook de relatieve of dimensieloze mengcoëfficiënten zijn met elkaar vergelijkbaar. In figuur 4.3 zijn de dimensieloze mengcoëfficiënten zoals gemeten met de kunstmatige vegetatie (bij hoge plantdichtheid) weergegeven. Helaas is er voor een aanstroomsnelheid van 10 cm s^{-1} op $z = 22.5 \text{ cm}$ geen meting gedaan. Deze figuur kan vergeleken worden met figuur 3.10. In beide experimenten zijn de waarden tussen en boven de plantjes hoger dan daarbuiten op dezelfde dieptes. Wat betreft de grootte van de wervels is er wel wat verschil op te merken. In het geval van de natuurlijke vegetatie hebben de wervels kleinere afmetingen.

4.5 Invloed van de wand

Turbulente energie wordt behalve door de bodem ook door de wanden van de goot opgewekt. Om de werkelijke invloed van de plantjes op de turbulente energie te bekijken moet in het geval van een smalle goot, waarin de wand een relatief groot aandeel heeft t.o.v. de bodem, de grootte van de invloed van de wand worden geschat. Een vaak gebruikte methode daarvoor is die van Vanoni & Brook (1957). Hieruit blijkt dat de invloed van de wand naar alle waarschijnlijkheid niet zo groot is hetgeen betekent dat de veranderingen het gevolg zijn van de vegetatie.

5 Conclusies en aanbevelingen

De resultaten van de experimenten met de natuurlijke vegetatie geeft een vergelijkbaar beeld als dat verkregen uit de experimenten met de kunstmatige vegetatie. Een verhoogde turbulente menging boven het plantenveld en een verlaagde tussen de plantjes in. Het laatste geldt overigens alleen in absolute zin; relatief gezien neemt de turbulente energie toe en blijft de menging vrijwel gelijk of neemt ook toe. Echter door locale gemiddelde snelheden is het uiteindelijke resultaat een veel lagere menging in dan buiten het plantenveld en een hogere menging boven het veld.

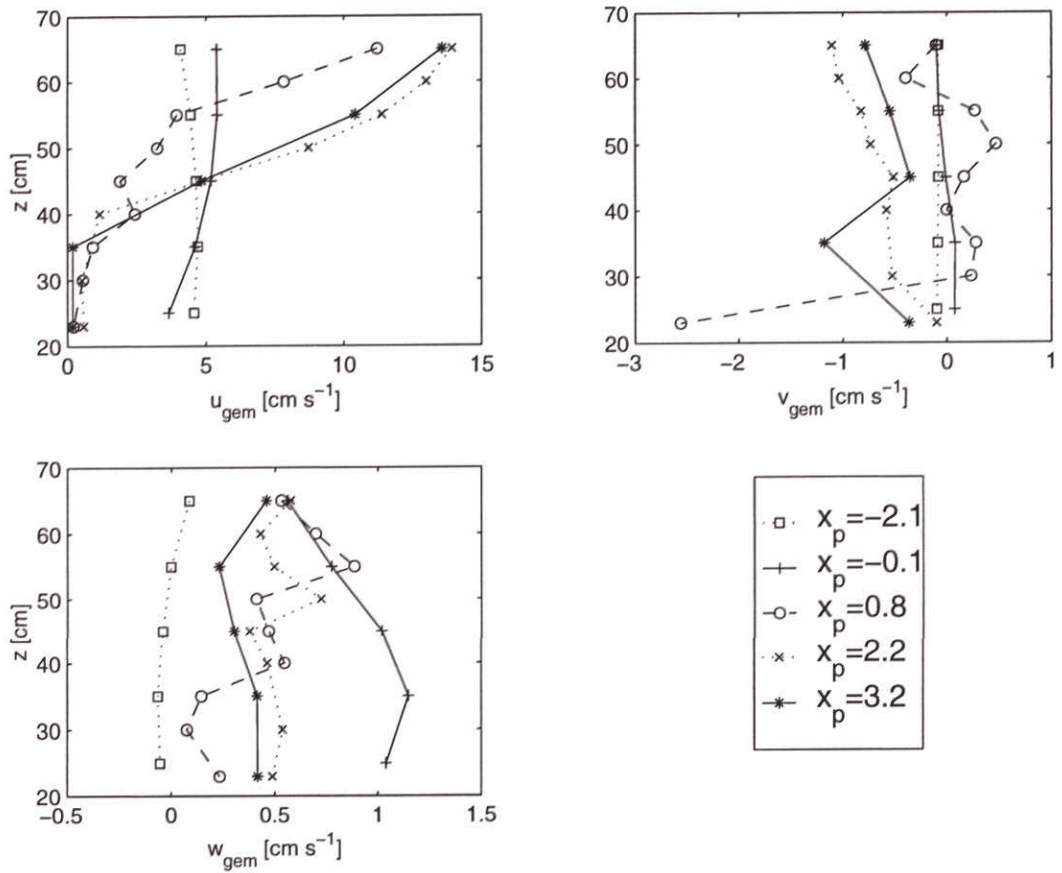
Verschillen tussen de resultaten van beide experimenten zijn voornamelijk terug te voeren tot verschillen in de mate van afremming in het plantenveld, de effectieve plantlengte en de produktie van turbulente kinetische energie. Voor alle drie de factoren geldt dat deze te ondervangen zijn door een juiste keuze van de kunstmatige vegetatie. Hierbij moet gelet worden op de flexibiliteit en afmetingen van de planten en de beplantings dichtheid. De 1DV-modellering kan mogelijk een rol spelen bij het maken van een goede keuze.

Op grond van bovenstaande is de algemene conclusie dat de effecten op de slibconcentraties zoals waargenomen in het eerste gedeelte van het experiment met kunstmatige vegetatie ook te verwachten zijn bij het experiment zoals beschreven in dit rapport met natuurlijke vegetatie.

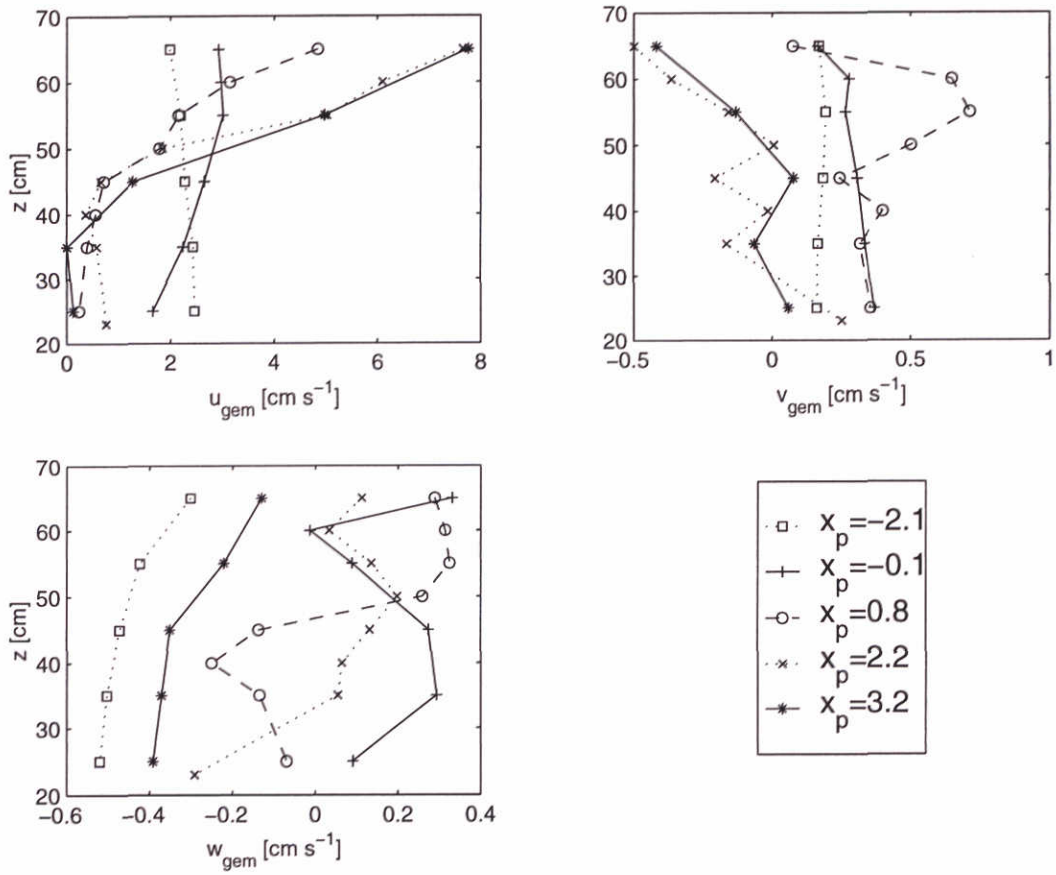
Voor beide experimenten is het duidelijk dat er zich aan het einde van het plantenveld nog geen uniforme situatie heeft ingesteld. Alhoewel de snelheden al na 2 m boven het veld constant bleven nam de turbulente kinetische energie nog steeds toe. Voor eventueel toekomstige experimenten is het dan ook aan te raden om met een langer plantenveld te werken. Een schatting van de benodigde lengte om tot een uniforme situatie te komen is 10 tot 20 keer de vrije waterhoogte hetgeen betekent dat een veld in de orde van 6-8 m zou voldoen (bij een vrije waterhoogte boven de planten van 30-40 cm).

Literatuur

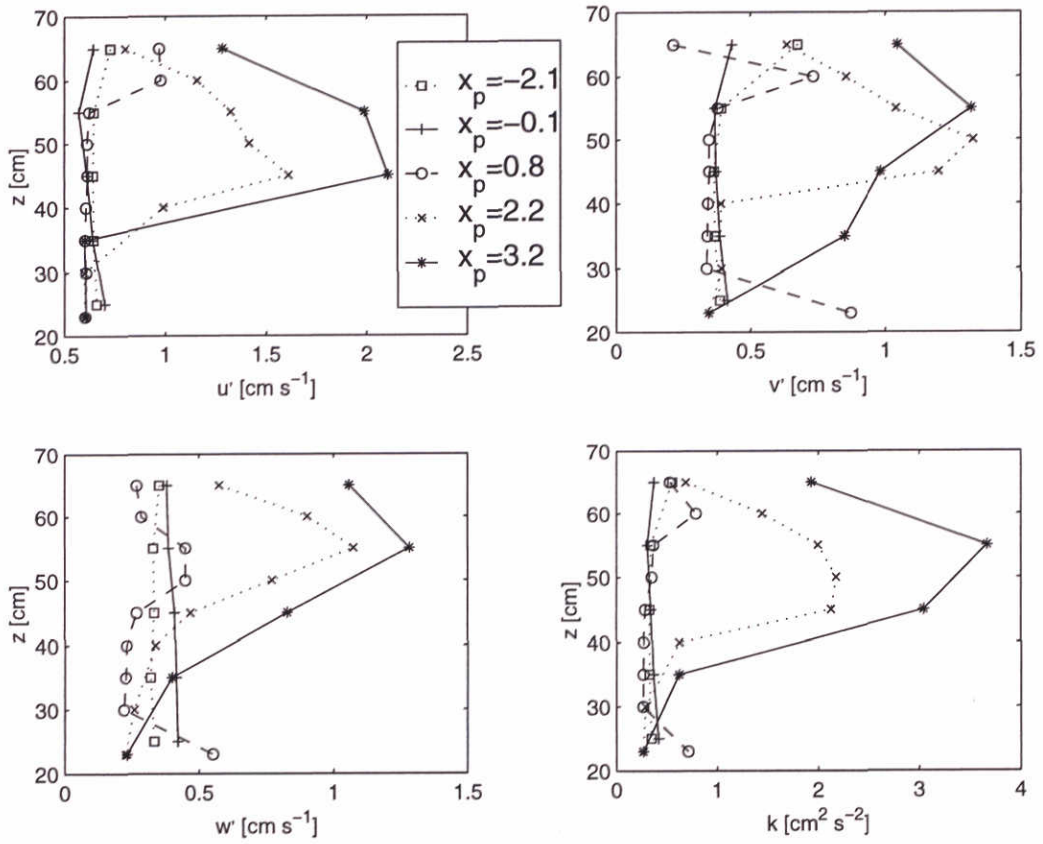
- Boot, G. 1997 (april). Interactie van submerse vegetatie en fysische processen: literatuurstudie. Rapport Z2328. WL | DELFT HYDRAULICS, Delft.
- Weeda, E.J., Westra, R., Westra, Ch. en Westra T. 1998. Nederlandse oecologische FLORA, wilde planten en hun relaties. Vol. 3 IVN i.s.m. de VARA en VEWIN.
- Tánczos, I.C. 1998 (november). Interactie van submerse vegetatie en fysische processen 1998: Rapport II, Resultaten van de experimenten. Rapport Z2473. WL | DELFT HYDRAULICS.
- Vanoni, V.A., en Brooks, N.H. 1957. Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams. Rapport E-68. Sedimentation Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, USA.
- Vries, M.B. de, 1998 (november). Interactie van Submerse vegetatie en Fysische processen 1998: Rapport I, Opzet van het experiment. Rapport Z2473. WL | DELFT HYDRAULICS.



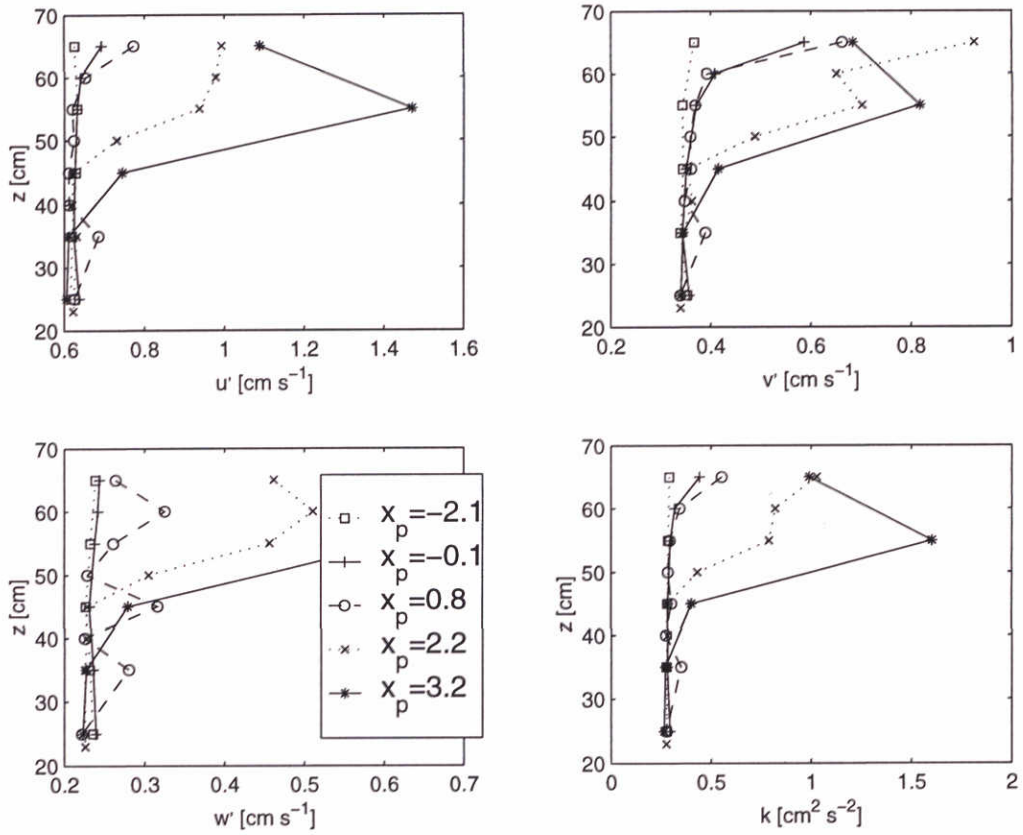
Figuur 3.1 Gemiddelde snelheden van serie 1. Waterhoogte is 80 cm en aanstroomsnelheid is 5 cm s⁻¹.



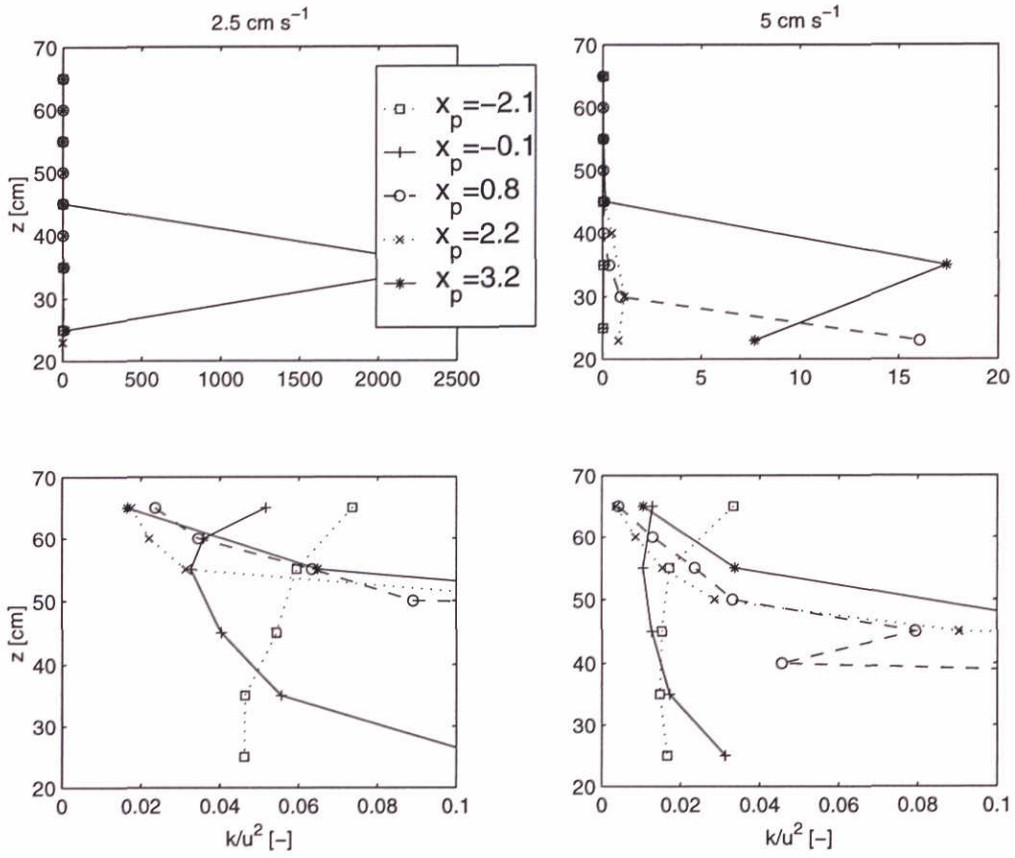
Figuur 3.2 Gemiddelde snelheden van serie 2. Waterhoogte is 80 cm en aanstroomsnelheid is 2.5 cm s-1.



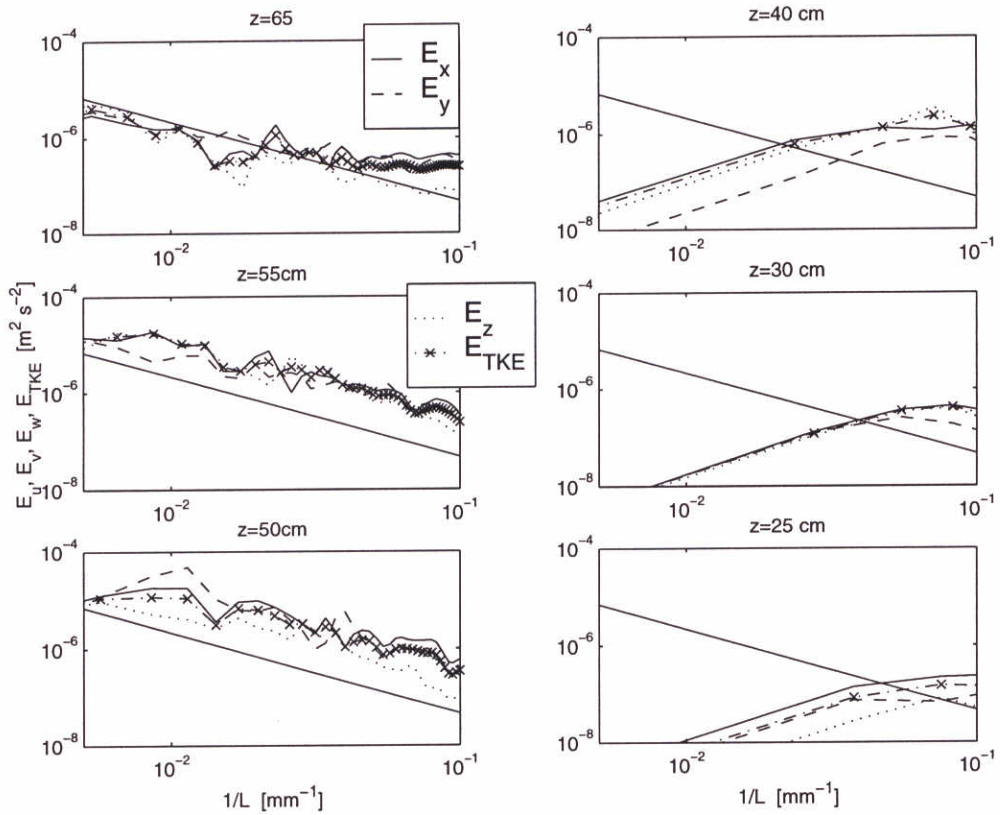
Figuur 3.3 Turbulente intensiteit en kinetische energie van serie 1. Waterhoogte is 80 cm en aanstroomsnelheid is 5 cm s⁻¹.



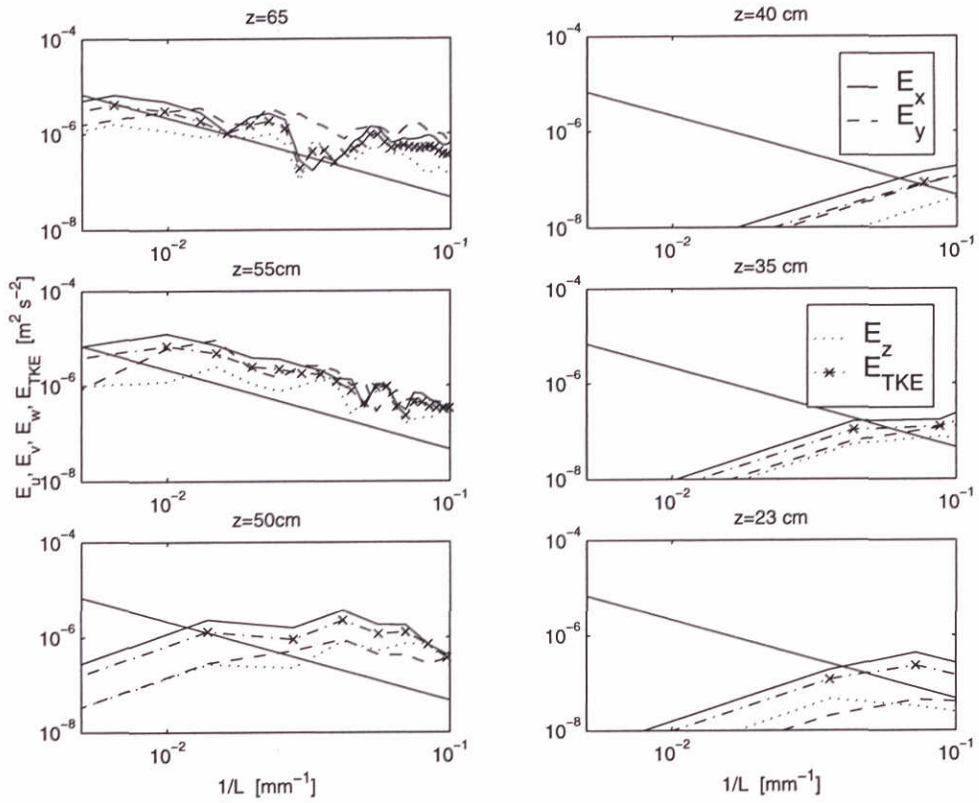
Figuur 3.4 Turbulente intensiteit en kinetische energie van serie 2. Waterhoogte is 80 cm en aanstroomsnelheid is 2,5 cm s-1.



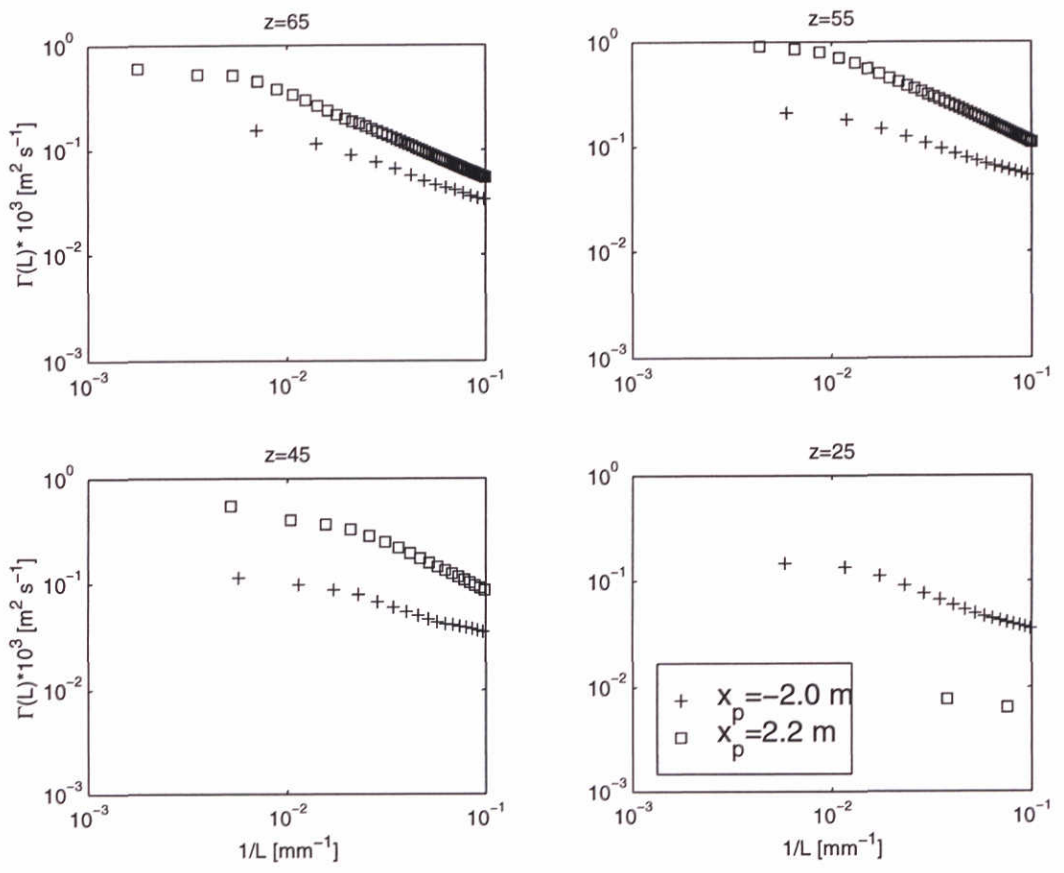
Figuur 3.5 Dimensieloze turbulente kinetische energie van serie 1 en 2. Waterhoogte is 80 cm en aanstroomsnelheden 5 en 2.5 cm s⁻¹, respectievelijk. De onderste helft van de figuur is een uitvergroting van de bovenste helft.



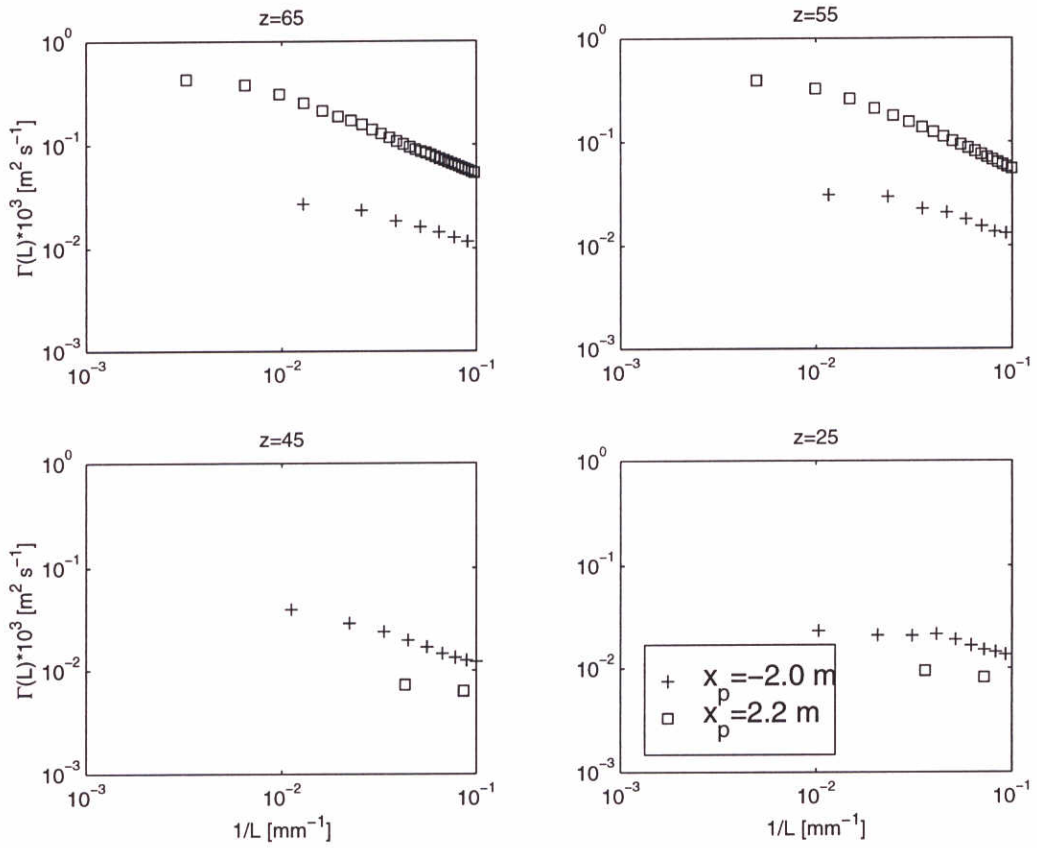
Figuur 3.6 Turbulentie spectra op verschillende hoogtes van serie 1 op $x_p=2,2$ m. Waterhoogte is 80 cm en aanstroomsnelheid is 5 cm s⁻¹.



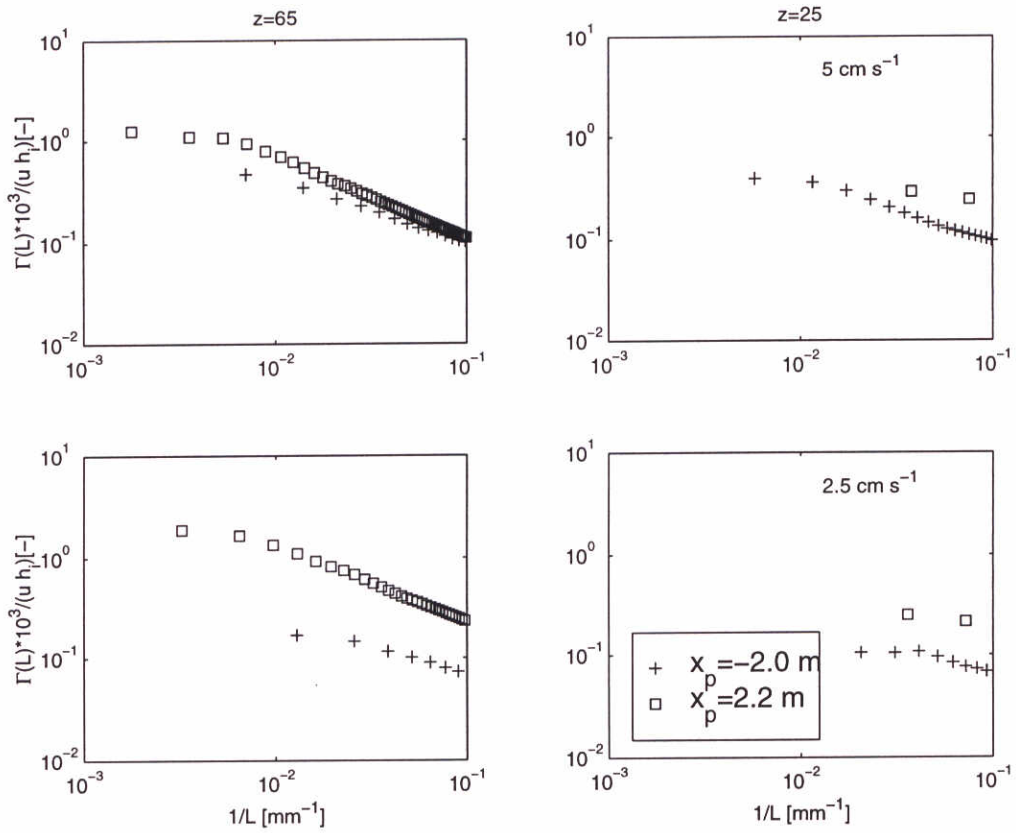
Figuur 3.7 Turbulente spectra op verschillende hoogtes van serie 2 op $x_p = 2,2$ m. Waterhoogte is 80 cm en aanstroomsnelheid is 2,5 cm s⁻¹.



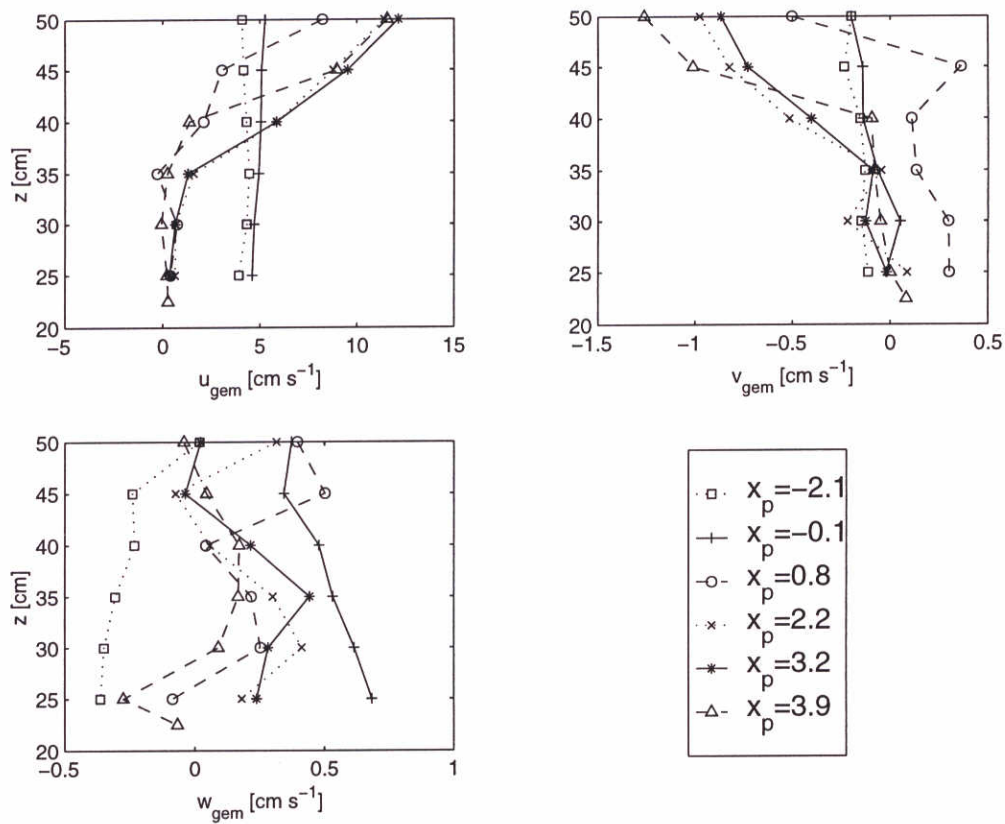
Figuur 3.8 Turbulente mengcoëfficiënten op verschillende hoogtes van serie 1 op $x_p = -2,0$ (+) en $2,2$ m. Waterhoogte is 80 cm en aanstroomsnelheid is 5 cm s⁻¹.



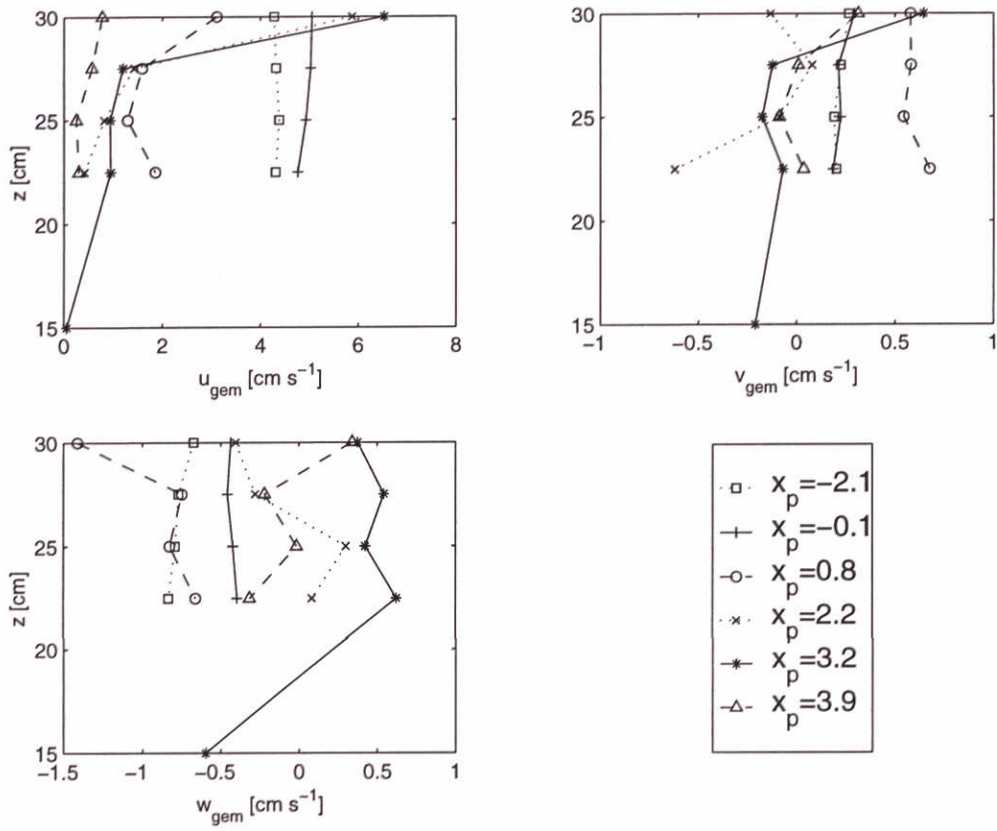
Figuur 3.9 Turbulente mengcoëfficiënten op verschillende hoogtes van serie 2 op $x_p = -2,0$ (+) en $2,2$ m. Waterhoogte is 80 cm en aanstroomsnelheid is $2,5$ cm s⁻¹.



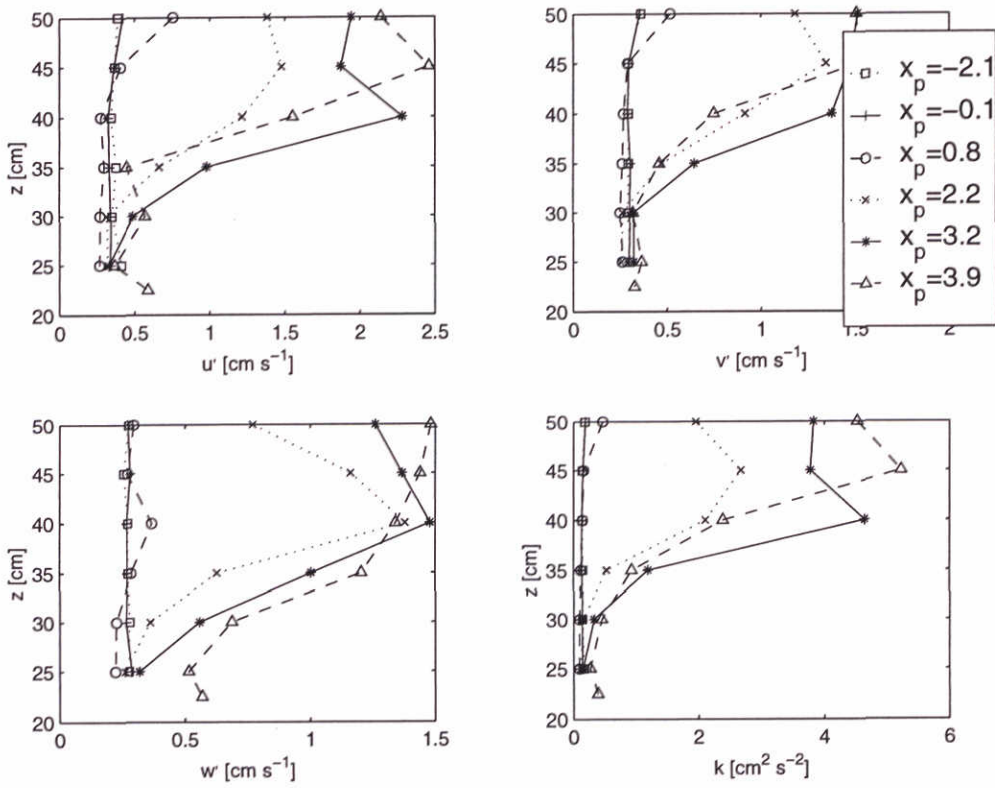
Figuur 3.10 Dimensieloze turbulente mengcoëfficiënten op verschillende hoogtes van serie 1 en 2 op $x_p = -2,0$ (+) en $2,2$ m. Waterhoogte is 80 cm en aanstroomsnelheid is 5 en $2,5 \text{ cm s}^{-1}$, respectievelijk.



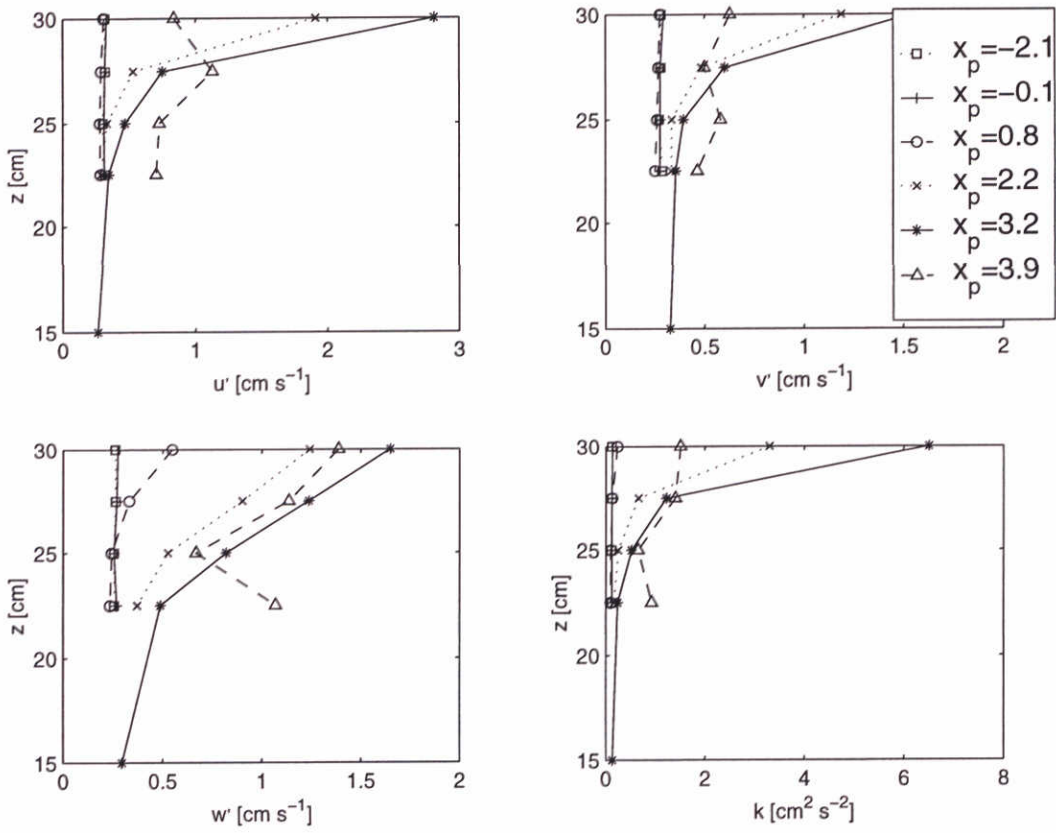
Figuur 3.11 Gemiddelde snelheden van serie 3. Waterhoogte is 63 cm en aanstroomsnelheid is ± 5 cm s⁻¹.



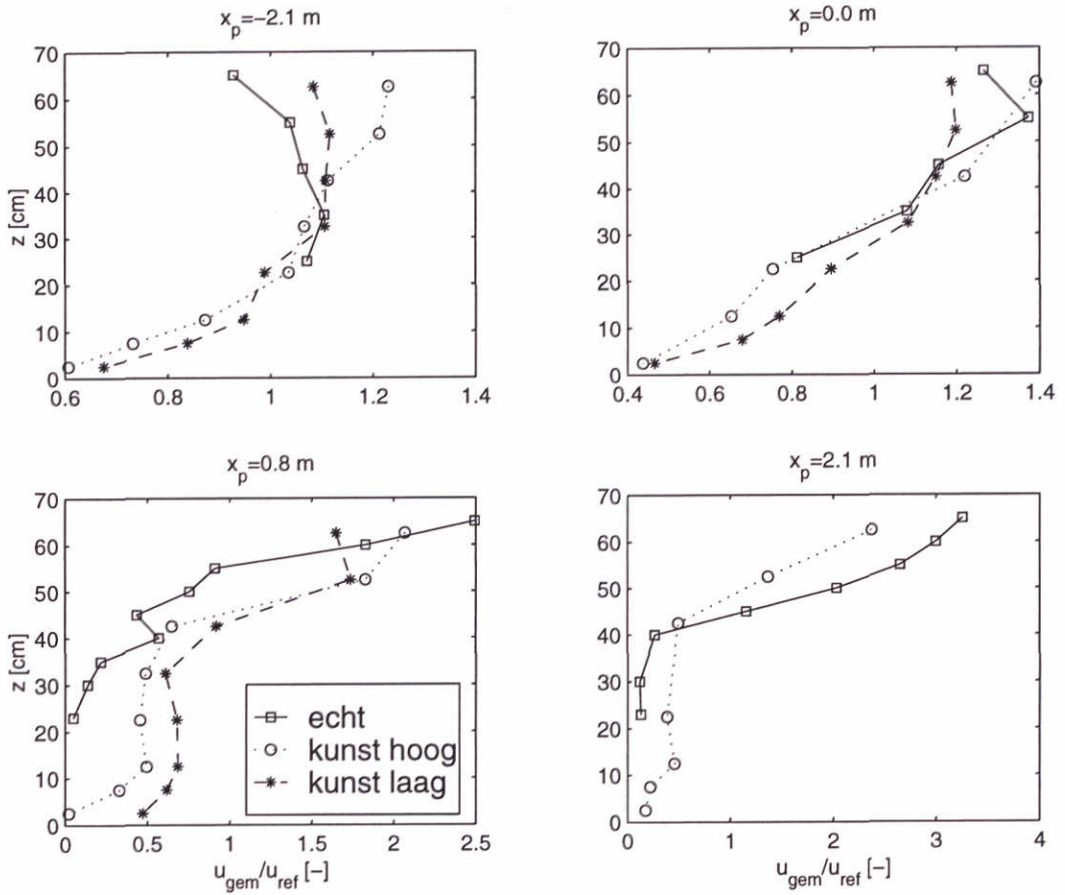
Figuur 3.12 Gemiddelde snelheden van serie 4. Waterhoogte is 42 cm en aanstroomsnelheid is $\pm 5 \text{ cm s}^{-1}$.



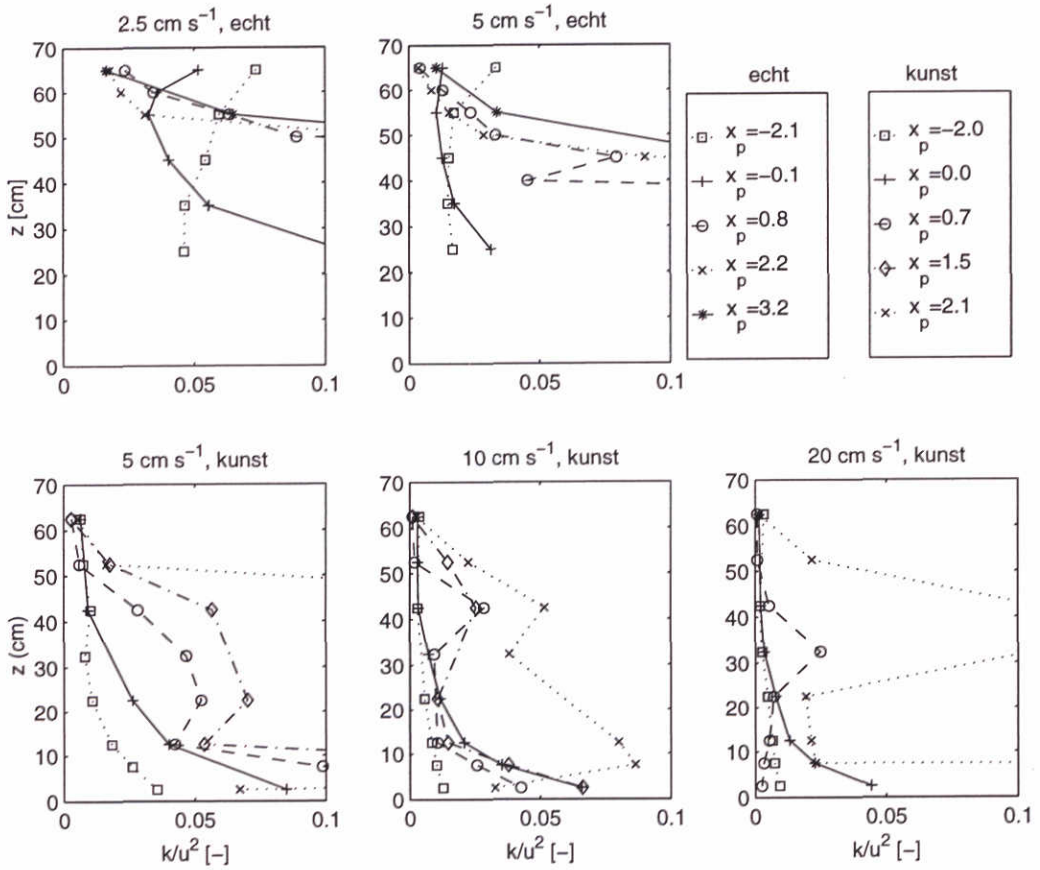
Figuur 3.13 Turbulente intensiteit en kinetische energie serie 3. Waterhoogte is 63 cm en de aanstroomsnelheid is ± 5 cm s⁻¹.



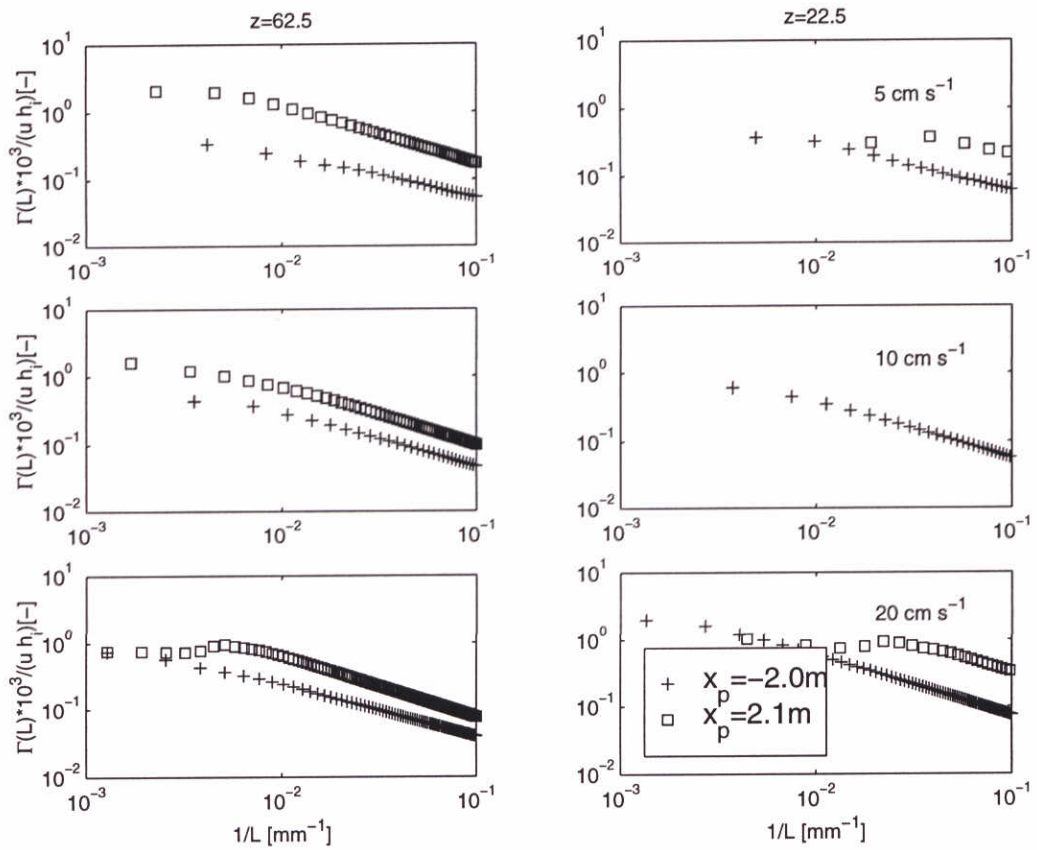
Figuur 3.14 Turbulente intensiteit en kinetische energie van serie 4. Waterhoogte is 42 cm en de aanstroomsnelheid is ± 5 cm s⁻¹.



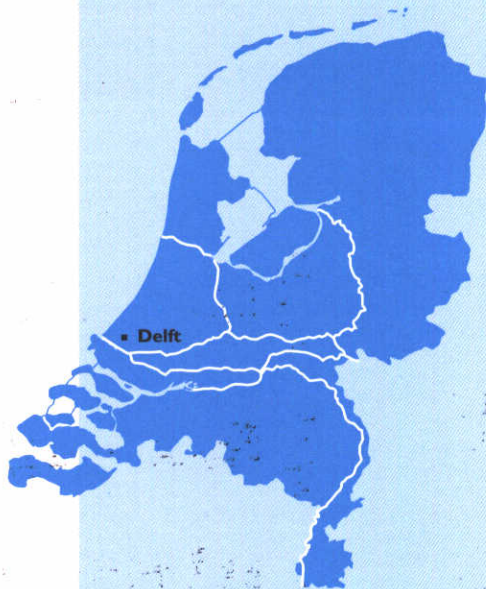
Figuur 4.1 Dimensieloze gemiddelde snelheden in de x-richting zoals gemeten bij kunstmatige en natuurlijke vegetatie. De referentie snelheid u_{ref} is gelijk aan de snelheid zoals gemeten stroom afwaarts in de desbetreffende run. De aanstroomsnelheid is 5 cm s⁻¹ en de waterhoogte is 80 cm. Effectieve plantlengtes: echt $l_{eff} = 45$ cm, kunst hoog $l_{eff} = 45$ cm en kunst laag $l_{eff} = 46$ cm.



Figuur 4.2 Dimensieloze turbulente kinetische energie gemeten met kunstmatige en echte vegetatie voor vier aanstroomsnelheden 2,5, 5, 10 en 20 cm s⁻¹. De waterhoogte is in alle gevallen 80 cm.



Figuur 4.3 Dimensieloze turbulente mengcoëfficiënten op $z= 62.5$ en 22.5 cm zoals bepaald voor de kunstmatige vegetatie bij aanstroomsnelheden van 5, 10 en 20 cm s⁻¹. De waterhoogte is 80 cm.



wl | delft hydraulics

**Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon 015 285 85 85
telefax 015 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl**

**Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 285 85 85
telefax +31 15 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl**

