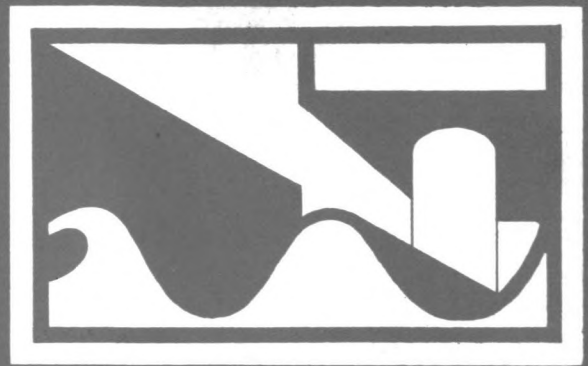


598



**Sedimentsuspensie in een oscillerende
waterbeweging vlak boven het zandbed**

H.J. Steetzel

oktober 1984

D 85
tow

toegepast onderzoek
waterstaat

Technische Hogeschool Delft

Afdeling der Civiele Techniek

Vakgroep Kustwaterbouwkunde

Sedimentsuspensie in een oscillerende
waterbeweging vlak boven een zandbed

H. Steetzel

september 1984

DEEL A

INHOUD

blz.

Voorwoord

1.	<u>Inleiding</u>	1
1.1	Algemeen.....	1
1.2	Doelstelling.....	1
1.3	Transportverdelingsafschatting.....	2
1.4	Samenvatting.....	7
1.5	Aanbevelingen.....	9
2.	<u>Invloed waterbeweging op bodemgebeuren</u>	11
2.1	Algemeen.....	11
2.2	Shieldparameter.....	12
2.3	Bodemgeometrie.....	16
2.3.1	Algemeen.....	16
2.3.2	Bedvormen.....	16
2.3.3	Ribbelgeometrie.....	18
2.3.3.1	Algemeen.....	18
2.3.3.2	Ribbelhoogte.....	19
2.3.3.3	Ribbellengte.....	21
2.3.3.4	Ribbelsteilheid.....	23
2.4	Concentratieverdeling.....	26
2.4.1	Algemeen.....	26
2.4.2	Diffusiemodellen.....	27
2.4.3	Experimentele modellen.....	30
2.4.4	Bodemconcentraties.....	32
2.5	Begin van beweging.....	33
2.6	Uitzeving.....	37
3.	<u>Concentraties in de bodemlaag</u>	38
3.1	Algemeen.....	38
3.2	Visuele beschrijving.....	38
3.3	Suspensiemechanisme.....	41
3.3.1	Algemeen.....	41

INHOUD (vervolg)

3.3.2	Korrelbewegingen.....	41
3.3.3	Wervels.....	43
3.3.4	Korrelbeweging in een wervel.....	44
3.3.5	Concentratie als kans.....	48
3.4	Concentratiemetingen.....	49
3.4.1	Algemeen.....	49
3.4.2	Momentane lokale concentraties.....	49
3.4.3	Tijdsgemiddelde lokale concentraties.....	50
3.4.4	Bedgemiddelde concentraties.....	51
3.4.5	Tijds- en bedgemiddelde concentraties.....	51
3.5	Concentratieverloop.....	52
3.5.1	Beschrijvend verband.....	52
3.5.2	Bodemconcentratie: C_0	54
3.5.3	Concentratieafnamelengte: r_c	55
3.5.4	Gesuspendeerde load: L_s	56
4.	<u>Uitvoering proeven</u>	58
4.1	Algemeen.....	58
4.2	Variabelen.....	58
4.3	Golftunnel.....	59
4.3.1	Algemeen.....	59
4.3.2	Beschrijving.....	60
4.3.3	Snelheidssturing.....	61
4.3.4	Bereik.....	61
4.3.5	Verschillen lopende golf.....	62
4.4	Afzuigstelsel.....	63
4.4.1	Algemeen.....	63
4.4.2	Dwars afzuiging in oscillerende stroom.....	63
4.4.3	Tijds- en bedmiddeling.....	64
4.5	Concentratiemeting.....	65
4.5.1	Algemeen.....	65
4.5.2	Reproductie.....	66
4.5.2.1	Algemeen.....	66
4.5.2.2	Randvoorwaarden.....	67
4.5.2.3	Lijnfitting.....	69

INHOUD (vervolg)

4.5.2.4	Afzuigsysteem.....	69
4.5.2.5	Bedinvloeden.....	71
4.5.2.6	Referentieniveau.....	74
4.5.2.7	Samenvatting.....	75
4.5.3	Individuele verticalen.....	75
4.5.4	Karakteristieke verticalen.....	76
4.6	Ribbelgeometrie.....	78
4.7	Kritieke snelheden.....	79
4.8	Uitzeving.....	79
5.	<u>Resultaten</u>	80
5.1	Algemeen.....	80
5.2	Duurmetingen.....	82
5.2.1	Algemeen.....	82
5.2.2	Ribbelgeometrie.....	83
5.2.3	Concentratieverticaal.....	83
5.2.3.1	Algemeen.....	83
5.2.3.2	Random error.....	83
5.2.3.3	Afnamelengte.....	84
5.2.3.4	Bodemconcentratie.....	84
5.2.3.5	Total load.....	85
5.2.4	Conclusies.....	85
5.3	Ingolftijd.....	85
5.4	Correlaties.....	87
5.5	Bodemlaag.....	89
5.5.1	Algemeen.....	89
5.5.2	Bodemlaagdikte/ribbelhoogte.....	89
5.6	Ribbelgeometrie.....	90
5.6.1	Algemeen.....	90
5.6.2	Ribbelhoogte.....	91
5.6.3	Ribbellengte.....	92
5.6.4	Ribbelsteilheid.....	93
5.6.5	Conclusies.....	94
5.7	Random error.....	94
5.8	Afnamelengte.....	95

INHOUD (vervolg)

5.8.1	Algemeen.....	95
5.8.2	Karakteristieke spreiding.....	95
5.8.3	Snelheidsafhankelijkheid.....	96
5.8.4	Periode-afhankelijkheid.....	98
5.8.5	Totaalafhankelijkheid afnamelengte.....	98
5.8.6	Afnamelengte/ribbelhoogte.....	99
5.9	Bodemconcentraties.....	99
5.9.1	Algemeen.....	99
5.9.2	Karakteristieke spreiding.....	100
5.9.3	Snelheidsafhankelijkheid.....	101
5.9.4	Periode-afhankelijkheid.....	104
5.9.5	Totaalafhankelijkheid voor bodemconcentratie.....	104
5.9.6	Relatie Shieldsparameter.....	105
5.10	Total load.....	106
5.10.1	Algemeen.....	106
5.10.2	Karakteristieke spreiding.....	107
5.10.3	Snelheidsafhankelijkheid.....	107
5.10.4	Periode-afhankelijkheid.....	108
5.10.5	Totaalafhankelijkheid voor total load.....	109
5.11	Kritieke snelheden.....	109
5.12	Uitzeving.....	111
6.	<u>Conclusies</u>	116
6.1	Algemeen.....	116
6.2	Concentraties in de bodemlaag.....	116
6.3	Suspensiemechanisme in de bodemlaag.....	118
6.3.1	Algemeen.....	118
6.3.2	Bodemconcentratie: fase I.....	120
6.3.3	Afnamelengte: fase II.....	120

Overzicht symbolen

Literatuur

DEEL B

Appendices

Tabellen

Figuren

VOORWOORD

Dit verslag vormt het hoofddeel van het afstudeerwerk zoals dat door ondergetekende in de periode september '83 tot mei '84 werd verricht.

Het onderzoek is uitgevoerd in samenwerking tussen de Technische Hogeschool Delft en het Waterloopkundig Laboratorium in het kader van het TOW-Kustonderzoek, Werkgroep Zandtransport (M 1695). Het onderzoek is begeleid door Ir. J. v.d. Graaff (THD) en dr. J.J. Bosman (WL).

Ter wille van de hanteerbaarheid is het verslag opgedeeld in twee losse delen. Deel A bevat de tekst, terwijl in deel B de appendices (rekenwerk), de tabellen en een groot aantal figuren zijn ondergebracht.

Literatuurverwijzingen zijn gegeven door middel van de naam van de auteur en het jaar van publicatie of door het nummer van het modelonderzoek.

Tot besluit zou ik het Waterloopkundig Laboratorium in het algemeen en J. Bosman en T. van Maar in het bijzonder willen bedanken voor hun bereidwillige en prettige samenwerking.

H.J. Steetzel

Delft, september 1984

1. Inleiding

1.1 Algemeen

In het kader van TOW-Kustonderzoek van de Rijkswaterstaat is een van de studiegroepen (Werkgroep Zandtransport) bezig met de bestudering van het sedimenttransport.

Dit transport speelt een belangrijke rol in vrijwel elk kustwaterbouwkundig probleem. Transportverschillen geven aanleiding tot (meestal ongewenste) erosie of aanzanding. Een voorspelling van de hoeveelheid getransporteerd sediment is op dit moment nog maar met geringe nauwkeurigheid mogelijk.

Uit onderzoek blijkt dat de invloed van golven op het transport zeer groot is. Door de golfwerking wordt het sediment vanaf de bodem opgewoeld en over de verticaal verdeeld.

Omdat de sedimentconcentraties vaak snel afnemen met de hoogte boven de bodem lijken concentraties vlakbij de bodem (verder bodemlaag genoemd) bepalend voor het transport.

Het hier beschreven onderzoek heeft ten doel iets meer te weten te komen over de concentratieverdeling in deze bodemlaag en is uitgevoerd in de Golftunnel van het Waterloopkundig Laboratorium.

1.2 Doelstelling

Het (uiteindelijke) doel van het onderzoek is te komen tot een aanzet tot een model dat de concentratieverdeling in de bodemlaag als functie van de hydraulische (en geometrische) omstandigheden beschrijft.

De golfbeweging uit zich vlak boven de bodem als een (bij benadering) horizontale oscillerende waterbeweging boven een zandbed (Fig. 1a).

Het huidige onderzoek heeft zich beperkt tot:

- een horizontale, sinusvormige, oscillerende waterbeweging,
- geen netto stroom,
- één soort bodemmateriaal, te weten ongezeefd duinzand ($D_{50} = 218 \mu\text{m}$).

Het ligt in de bedoeling om in vervolgonderzoek ook niet-sinusvormige waterbewegingen met netto stroom te bekijken en de invloed van het bodemmateriaal te onderzoeken.

De doelstelling van het hier beschreven onderzoek is:

Bepaling van het concentratieverloop in de bodemlaag als functie van een zuiver sinusvormige, horizontale waterbeweging.

De reden achter deze doelstelling is twee-ledig, te weten:

- aanzet naar sedimenttransportformule,
- vergroting van het inzicht in de processen die het bodemgebeuren beheersen.

De beperking tot de onderste laag nabij de bodem zal, met behulp van een in de volgende paragraaf gegeven transportverdelingsafschatting, nader worden gemotiveerd.

1.3 Transportverdelingsafschatting

Het transportprofiel kan worden beschouwd als zijnde opgebouwd uit het produkt van een (gemiddeld) snelheidsprofiel met een (mede) door golven opgewekt gemiddeld concentratieprofiel zoals geschetst in Fig. 1b.

In een evenwichtssituatie berust het transportprofiel dus op twee randvoorwaarden, te weten:

- het (gemiddeld) stroomsnelheidsprofiel,
- het (gemiddeld) concentratieprofiel.

Tegenwoordig kan de waterbeweging, en dus het snelheidsprofiel, redelijk goed worden beschreven. In schril contrast hiermee staat de kennis van het concentratieprofiel. Kennis over de transportverdeling kan verkregen worden door meer aandacht te besteden aan het concentratieprofiel. Men moet dus het concentratieverloop qua vorm en grootte, bij verschillende hydraulische (en geometrische) omstandigheden, vastleggen.

De transportafschatting heeft ten doel de verdeling van het transport over de hoogte vast te leggen om zodoende de aandacht die besteed wordt aan het concentratieprofiel doelgerichter en efficiënter te gebruiken.

Voor het rekenwerk behorende bij deze afschatting wordt verwezen naar Appendix I.

Metingen aan het verloop van het gemiddeld snelheidsprofiel (bij golven en stroom) laten zien dat de gemiddelde snelheid toeneemt met de afstand tot de bodem. Het verloop wordt weergegeven door:

$$u(z) = \frac{U_*}{\kappa} \cdot \ln(z/z_0), \quad (1.1)$$

waarin:

- U_* = bodemschuifspanningsnelheid,
- κ = constante van Von Kàrmàn,
- z = verticale ordinaat (bodem $z=0$),
- z_0 = niveau waarop $u=0$.

De concentratie is bij de bodem maximaal en neemt, naar boven toe, bij benadering exponentieel af:

$$C(z) = C_0 \exp(-z/r_c), \quad (1.2)$$

waarin:

- C_0 = de concentratie op het niveau $z=0$ (Par. 3.5.2),
 - r_c = de lengteschaal van de relatieve concentratiegradiënt (Par. 3.5.3),
- Op dit verband komen we later (Par. 3.5) nog uitgebreid terug.

Blijkens eerder onderzoek (Bosman, M 1875) vertoont de relatieve concentratiegradiënt op een zekere hoogte meestal een plotselinge verandering.

De helling van het concentratieverloop laat op half-logarithmisch papier een sterke verandering zien over een relatief klein stuk van de verticaal wat geschematiseerd kan worden tot een knik.

Het concentratieverloop is dan in goede benadering te schrijven als:

$$C(z) = C_0 \cdot \exp(-z/r_{cl}) \quad \text{voor } z < A \quad (\text{lower part}), \quad (1.3)$$

$$C(z) = C_A \cdot \exp(-(z-A)/r_{cu}) \quad \text{voor } z > A \quad (\text{upper part}), \quad (1.4)$$

waarin:

- A = het niveau waarop de r_c -waarde verandert,
- C_A = de concentratie op niveau $z=A$.

Het bestaat dus uit een samenstelling van twee exponentiële verbanden.

Gaan we in eerste instantie uit van een enkelvoudig exponentieel verband, zoals dat alleen in het ondergebied geldt, dan vinden we volgens de in Fig. 1b gegeven transportbenadering (transport = concentratie * snelheid):

$$S_1(z) = C(z) u(z) = \left[\frac{U_*}{\kappa} \cdot C_0 \right] \left[\frac{\ln(z/z_0)}{\exp(z/r_c)} \right]. \quad (1.5)$$

De eerste term laat zien dat de concentratie aan de bodem (C_0) evenals de bodemschuifspanningssnelheid (U_*) belangrijk zijn voor de grootte van het transport. Het transport op niveau z en dus ook het totale transport is recht evenredig met de bodemconcentratie (U_* valt buiten het onderzoekskader). Bij de laatste term zien we dat de grootte van het transport afneemt voor toenemende z -waarde. Deze term geeft de verdeling van het transport over de hoogte aan.

Het vastleggen van de concentraties onderin de verticaal is belangrijk omdat door extrapolatie van dit verloop de bodemconcentratie gevonden kan worden die direkte invloed heeft op de grootte van het transport. Bovendien lijkt het aandeel van deze concentraties relatief groot, wat nader onderzocht zal worden aan de hand van de tweede term.

De verdeling van het transport over de hoogte wordt beschreven door het verband:

$$S_2(z) = \exp(-z/r_c) \cdot \ln(z/z_0). \quad (1.6)$$

Hierin zijn r_c en z_0 voorlopig nog onbepaald. Om de afschatting bruikbaar te maken, is gebruik gemaakt van de volgende schattingen:

$$\begin{aligned} z_0 &= r/33 & \text{met: } r &= \text{bedruwheid,} \\ \alpha &= r_c/r & \alpha &= \text{dimensieloze verhouding,} \\ y &= z/r & y &= \text{aantal bedruwheidshoogten.} \end{aligned}$$

Substitutie levert het onderstaande verband waarin $S_\alpha(y)$ het transport geeft op niveau y voor een gegeven waarde van α :

$$S_\alpha(y) = \exp(-y/\alpha) \cdot \ln(33y). \quad (1.7)$$

De parameter $S_\alpha(y)$ heeft alleen betekenis bij vergelijking van transporten en is dus alleen te gebruiken voor afschatting van de transportverdeling!

Fig. 2 geeft enkele transportverticalen voor diverse waarden van α . Betrekken we r_c en r op de ribbelhoogte η dan geldt voor de orde van grootte:

$r \approx \eta$ r is van de orde van grootte van de ribbelhoogte η ,

$r_c \approx \eta$ r_c is ook van de orde van grootte van de ribbelhoogte η
(Nielsen, 1982; Bosman, 1982).

Opgemerkt moet worden dat het concentratieprofiel, en dus de waarde van r_c , onder golven voor de gevallen met en zonder stroom verschillend is! (Bosman; M 1875) Het concentratieverloop wordt door toevoeging van een stroom steiler, wat resulteert in een iets grotere waarde van r_c .

Stel de orde van grootte: $\alpha = \frac{r_c}{r} \approx \frac{\eta}{\eta} = 1$ (zie ook Par. 5.8.6).

De gevoeligheid van deze keuze moet bekeken worden door voor zowel grotere als kleinere α -waarden de transportverdeling te onderzoeken. Fig. 5a geeft de verdeling van het transport over de hoogte gebruikmakend van het geïntegreerde transport volgens:

$$I_\alpha(y) = \int_{y_0}^y S_\alpha(y) \cdot dy, \quad (1.8)$$

waarin: $y_0 = z_0/r = 1/33$.

De berekening van deze integraal is terug te vinden in Appendix I.

Uit de figuur blijkt dat het significante transport zich helemaal afspeelt in het gebied bij de bodem.

Van het totale transport bevindt zich 80% in een laag die aan de bovenzijde begrensd is door twee ruwheidshoogten (voor $\alpha=1$).

Een kleinere α levert een nog lagere begrenzing (voor 80%). Bij een steiler concentratieverloop met $\alpha=2$ ($\alpha=5$) zit 95% (68%) nog onder $z=7r$.

Geconcludeerd kan worden dat concentraties vlakbij de bodem relatief van groot belang zijn. Bepaling van de concentraties op hogere niveau's (bijv. boven $10r$) t.b.v. het transport lijkt weinig zinvol aangezien de bijdrage aan het totale transport op die niveau's zeer klein is.

Concentratiemeting in de bodemlaag (b.v. $z < 10r$) legt het totaaltransport op meer dan voldoende wijze ($>85\%$ voor $\alpha < 5$) vast.

Deze conclusies zijn gerechtvaardigd mits:

- het snelheidsverloop goed beschreven is,
- $\alpha < 5$,
- het concentratieverloop volledig beschreven is door een exponentieel verband.

Zoals vermeld, is de juistheid van de laatste voorwaarde aanvechtbaar, vandaar dat dezelfde afschatting gemaakt zal worden voor een twee-lagenmodel.

Bekijken van het realistischere twee-lagenmodel levert op analoge wijze de bijdrage aan het totaaltransport. In App. I is dit nader uitgewerkt.

Parameters die van belang zijn:

- α_1 : voor de onderlaag (lower part),
- α_u : voor de bovenlaag (upper part),
- β : de spronghoogte ($y=\beta$).

Deze parameters moeten weer worden afgeschat:

- α_1 : $\alpha_1 = \alpha \approx 1$ analoog aan het vorige geval,
- α_u : uit onderzoek (Bosman, M 1875) blijkt dat globaal geldt:

$$\frac{r_{cu}}{r_{c1}} \approx 10 \rightarrow \alpha_u \approx 10\alpha_1 \approx 10,$$

- β : het sprongniveau bevindt zich globaal op 4 ribbelhoogten boven de bodem

$$z = 4\eta \approx 4r \rightarrow y = \beta = \frac{z}{r} \approx 4.$$

Fig. 5b geeft de verdeling van het transport over de hoogte voor diverse waarden van β (voor $\alpha_1=1$ en $\alpha_u=10$).

Beneden het sprongniveau zit, afhankelijk van β , 48% ($\beta=3$) tot 87% ($\beta=5$).

Voor $\beta=4$ zit 80% van het transport onder $z=8r$.

Het aandeel van het transport in de bodemlaag is bij een twee-lagenmodel dus minder in vergelijking tot het eerste enkel-laagmodel, maar blijft toch overheersend.

Gesteld dat de gedane aannamen (voldoende) goed zijn dan blijkt uit deze kwalitatieve afschatting dat de concentraties in een laag vlak bij de bodem bepalend zijn voor het totale transport, zowel in absolute, als in relatieve zin. Vastleggen van de concentraties nabij de bodem verdient (voor wat betreft het transport) dus de voorkeur boven concentratiemetingen hogerop in de verticaal. Kennis van deze concentraties (afhankelijk van hydraulische en geometrische omstandigheden) kan een sedimenttransportvoorspelling opleveren die de transporten qua grootte redelijk goed zou kunnen voorspellen.

1.4 Samenvatting

Dit verslag heeft tot doel het inzicht in de suspensies vlak boven het zandbed in een oscillerende stroming te vergroten.

Hoofdstuk 1 is inleidend en werkt de doelstelling van het onderzoek verder uit. Ook is, aan de hand van een transportverdelingsafschatting, aannemelijk gemaakt dat concentraties vlak boven de bodem van relatief groot belang zijn.

Hoofdstuk 2 laat zien wat er op basis van de literatuur bekend is over het gebeuren vlak bij de bodem. De interactie tussen bodemmateriaal en waterbeweging resulteert in enerzijds een bodemgeometrie en anderzijds een suspensievorming. Over de bodemgeometrie is veel bekend, de concentratieverdeling a.g.v. deze suspensievorming is een minder bekend terrein.

De concentraties in de laag vlak boven het bed, verder bodemlaag genoemd, komen in hoofdstuk 3 nader aan de orde.

Eerst via een verhandeling over de aanwezige wervels die bepalend lijken te zijn voor de suspensievorming en -verdeling in deze laag. Vervolgens is stapsgewijs aannemelijk gemaakt dat aan waterbeweging en bodemmateriaal gerelateerde concentratieverticalen alleen kunnen worden verkregen door uitvoeren van een middeling over tijd en bed. Tenslotte is een concentratieverloopbeschrijvend model aangenomen waarbij de concentratie op het nulniveau (C_0) en een afnamelengte (r_c) de twee enige parameters zijn in een enkelvoudig exponentieel model.

Hoofdstuk 4 behandelt de uitvoering van het onderzoek en de daarbij gebruikte faciliteiten en apparatuur, o.a. de golftunnel (realisatie waterbeweging) en

het afzuigstelsel (concentratieingen). Het komen tot een volledig reproducterende concentratieverticaal die karakteristiek is voor de omstandigheid en de oorzaken die daartoe bijdragen komen vervolgens aan de orde. Belangrijke factoren zijn het aantal ribbelformen waarover de bedmiddeling plaatsvindt en de mate waarin het referentieniveau bekend is.

In hoofdstuk 5 vinden we de resultaten van het onderzoek. Door uitvoering van herhaalde metingen boven eenzelfde bed (duurmetingen) is een indruk gekregen van de spreiding waaraan de parameters onderhevig zijn. De invloed van toevallige bedvormen blijkt erg groot. Een karakteristieke concentratieverticaal kan derhalve pas worden verkregen door combinatie van meerdere individueel gemeten verticalen. De hoeveelheid gesuspendeerd sediment blijkt wel redelijk constant.

De dikte van de bodemlaag, waarin een enkelvoudig exponentieel verband van toepassing is, is goed gerelateerd aan de ribbelgeometrie (drie ribbelhoogten). De ribbelgeometrie als functie van de waterbeweging laat zien dat resultaten van metingen boven snelheden waarbij de ribbels gaan afvlakken niet erg betrouwbaar zijn.

Het al genoemde exponentiële verband blijkt in de bodemlaag uitstekend te voldoen.

De afnamelengte (r_c) vertoont een sterke afhankelijkheid van de periode. Voor de korte perioden geldt dat r_c evenredig toeneemt met de periode.

De verhouding afname/ribbelhoogte verschilt nauwelijks van één.

De spreiding in de afnamelengte is sterk afhankelijk van de periode en beantwoordt aan de verwachting.

Bodemconcentraties (C_0) vertonen een nette afhankelijkheid van periode en snelheid die zich eenvoudig laat beschrijven. Een simpele relatie met de Shieldsparameter lijkt niet aanwezig. De spreiding is vooral afhankelijk van de snelheid van de waterbeweging.

De total load (L_s) vertoont wel een systematische periode- en snelheidsafhankelijkheid, maar hiervoor kon geen eenvoudige beschrijving worden gevonden.

Kritieke snelheden beantwoorden aan in de literatuur gevonden verbanden en onderschrijven nog eens de slechte definiëring ervan.

Zeefresultaten laten zien dat de uitzeving van het sediment in de bodemlaag veroorzaakt wordt door de afhankelijkheid van de afnamelengte van de korrel-diameter: r_c lijkt omgekeerd evenredig met de valsnelheid. De bodemlaag is ook herkenbaar in de resultaten van zeefanalyses van afgezogen monsters. De mate van uitzeving in de bodemlaag lijkt constant.

Hoofdstuk 6 vat de conclusies voor de suspensievorming in de bodemlaag samen. Tot besluit is een schematisch model gegeven dat in de afzonderlijke fasen de bodemconcentratie C_0 en de afnamelengte r_c bepaalt.

De bodemconcentratie wordt gerelateerd aan de vortex load (L_v); de hoeveelheid zand die in één wervel achter een ribbel kan worden gevangen.

De afnamelengte r_c is gerelateerd aan de mate waarin de korrels met de wervels mee omhoog worden gevoerd; de relatieve verblijftijd.

Het model geeft een verklaring voor de waargenomen relaties uitgaande van de veronderstelling dat de wervels dominant zijn in het bodemgebeuren. Het karakter van het suspensiemechanisme lijkt overheersend convectief te zijn.

1.5 Aanbevelingen

Gezien de bemoedigende resultaten van dit onderzoek is voortzetting ervan zeker aan te bevelen.

Een eerste stap kan zijn het gebruik van een andere zandsort, die dan bij voorkeur fijner en gezeefd moet zijn. Naar verwachting zullen de resultaten voor de afnamelengte hierbij geen "opzet" meer vertonen en zullen de spreidingen in de parameters afnemen (zie Par. 5.8.3).

In later stadium kan men denken aan de toevoeging van een netto stroom, waarbij men echter al gauw tot de conclusie zal komen dat de tunnellenlengte een beperkende factor zal zijn met het oog op de benodigde instroomlengte. Bovendien zullen er praktische problemen optreden als gevolg van het verdwijnen van sediment in de ketels.

Een uitbreiding naar onregelmatige waterbewegingen zal, praktisch gezien, minder problemen opleveren.

Een andere mogelijkheid is de uitbreiding van het huidige onderzoek naar hogere snelheden m.b.v. de vernauwde sectie van de tunnel. Interpretatie van resultaten is echter gevaarlijk.

Wat betreft metingen zal uitbreiding naar andere zandsorten en waterbewegingen met dezelfde technieken als beschreven kunnen gebeuren.

Aanbevelingen voor wat betreft theoretisch onderzoek zijn vooral van toepassing op de wervels. Periode- en snelheidsafhankelijkheid van een vortex load

en concentratieverdeling op basis van beschreven relatieve verblijftijden behoren tot de mogelijkheden. Het zo keurig voldoen aan een exponentieel verband (concentratieverdeling) en de nette relaties voor de bodemconcentratieafhankelijkheid, vraagt immers om een theoretische verklaring!

Voor de koppeling met transportverdeling kan gekeken worden naar de verhouding tussen de afnamelengte en de bedruwheid.

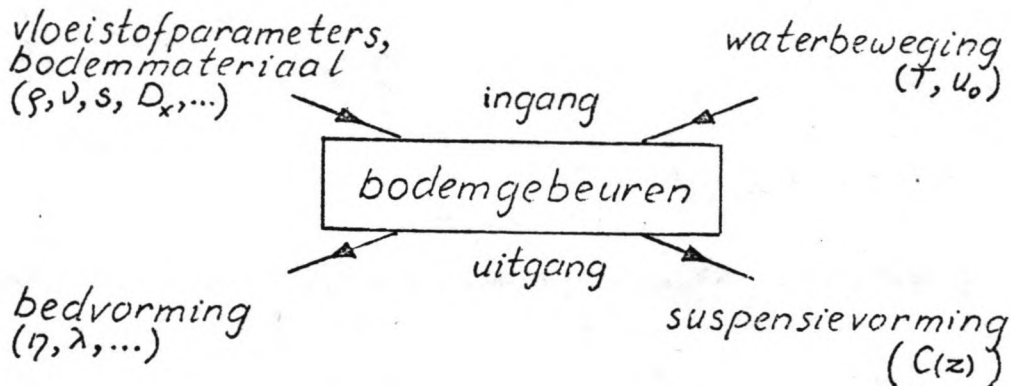
Verder is er nog de uitzeping van materiaal in de bodemlaag die de nodige aandacht verdient.

2. Invloed waterbeweging op bodemgebeuren

2.1 Algemeen

Kent men aan de term "bodemgebeuren" alle processen toe die zich afspelen in de bodemlaag onder invloed van de waterbeweging, dan blijkt dat suspensie- en bedvorming niet los van elkaar staan.

In schema:



De eerste ingangparameters zijn hierin de materiaalconstanten van de vloeistof en het bodemmateriaal. Beide zijn in dit onderzoek constant.

De tweede parameter is de waterbeweging die, in geval van een sinusvorm, volledig gekarakteriseerd is door de periode T en de snelheidsamplitude U_0 .

De twee uitgangsgrootheden zijn de bed- en de suspensievorming. Wil men de suspensievorming onderzoeken als functie van de waterbeweging dan is het niet noodzakelijk ook iets van de optredende bedvorming te weten.

Het toch "meenemen" van de bedvorming geeft echter wel inzicht in het systeem waar zowel suspensie- als bedvorming het resultaat van zijn.

De suspensievorming uit zich in het aanwezig zijn van sedimentconcentraties op niveau's boven het zandbed. Het verloop van deze concentraties over de hoogte is karakteristiek voor de beide ingangsgrootheden.

Zowel deze bodemgeometrie als de concentratieverdeling zullen in de volgende paragrafen worden bekeken en door middel van verschillende parameters worden gekarakteriseerd.

De concentraties in de bodemlaag komen in Hfdst. 3 nog eens uitgebreider aan de orde, aangezien bepaling ervan het doel van dit onderzoek is.

Het tot op heden relatief geringe inzicht in het bodemgebeuren onder invloed van oscillerende waterbewegingen betekent veelal dat de hierbij optredende verschijnselen worden gekoppeld aan fysische grootheden die ontleend zijn aan de kennis over stationaire stroming.

Het gebruik maken van schuifspanningen is hiervan een goed voorbeeld.

In de volgende Par. (2.2) zal derhalve eerst aandacht worden besteed aan de Shieldsparameter, aangezien veel in de literatuur te vinden verbanden hieraan zijn gerelateerd.

Bij de omwerking van in de literatuur gegeven verbanden naar een relatie voor ongezeefd duinzand is steeds gebruik gemaakt van de in Par. 4.2 vermelde gegevens die er voor zorgen dat de sediment/vloeistof parameters uit de verbanden verdwijnen.

2.2 Shieldsparameter

Het al dan niet in beweging komen van een korrel onder invloed van een waterbeweging kan afhankelijk worden geacht van de verhouding tussen optredende schuifkrachten en de weerstandskracht werkend op de korrel. Deze "dimensieloze schuifspanning", de zogenaamde Shieldsparameter is gedefinieerd door:

$$\theta = \frac{\tau}{\rho \cdot g \cdot (s-1) \cdot D} \quad , \quad (2.1)$$

waarin:

θ = Shieldsparameter,

s = relatieve dichtheid ρ_s / ρ ($\sim 2,65$),

D = representatieve korrelafmeting; meestal D_{50} ,

τ = bodemschuifspanning.

Voor een gegeven zandsoort is de schuifspanning de enige onbekende (afgezien van de niet exact gedefinieerde D). Voor een éénparige stroming is af te leiden:

$$\tau = g/C^2 \cdot \rho U^2, \quad (2.2)$$

waarin:

C = Chézy-wrijvingsfactor,

U = (gemiddelde) watersnelheid.

Een uitdrukking voor de maximale schuifspanning onder golven werd gegeven door Jonsson (1966):

$$\hat{\tau} = \text{constante} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (U_0)^2, \quad (2.3)$$

waarin U_0 de snelheidsamplitude van de watersnelheid bij de bodem.

De evenredigheidsconstante is hierin een dimensieloze coëfficiënt f_w die nog nader zal worden toegelicht.

De U_0 heeft in het geval van een zuiver sinusvormig oscillerende waterbeweging betrekking op de ongestoorde stroom. Dus:

$$\tau = \frac{1}{2} f_w \rho U_0^2. \quad (2.4)$$

De grootte van f_w is door Jonsson op semi-empirische wijze vastgesteld en gegeven door het impliciete verband:

$$\frac{1}{4/f_w} + \log\left(\frac{1}{4/f_w}\right) = -0,08 + \log\left(\frac{x_0}{k}\right), \quad (2.5)$$

waarin:

x_0 = verplaatsingsamplitude,

k = ruweidswaarde.

Een beter bruikbaar, expliciet verband werd gegeven door Swart (1974):

$$f_w = \exp(-5,977 + 5,213 \left(\frac{x_0}{k}\right)^{-0,194}). \quad (2.6)$$

Bij lage waarden van de verhouding (x_0/k) krijgt f_w een constante waarde:

$$f_w = 0,32 \quad \text{voor} \quad \left(\frac{x_0}{k}\right) < 1,47.$$

De laatste formule is volgens Dingler en Manohar ook te benaderen door:

$$f_w = 0,1 \left(\frac{x_0}{k}\right)^{-1/3} \quad \text{voor } 70 < \frac{x_0}{k} < 2000. \quad (2.7)$$

Deze benadering wijkt minder dan 5% af van het oorspronkelijke verband en is dus goed te gebruiken voor de afschatting van het gedrag van aan Shieldswaarden gerelateerde parameters.

Voor wat betreft de ruheidswaarde k is in de literatuur sprake van twee verschillende uitgangspunten, te weten:

- k op basis van korrelinvloeden, dus iets met een korreldiameter (korrelruheid),
- k gebaseerd op de bed-oneffenheden, dus iets met de ribbelafmetingen (vormruheid).

Het is duidelijk dat de vaststelling van k op basis van verschillende methoden, ook verschillende resultaten oplevert. Toepassing van de vorm in plaats van de korrelruheid levert een grotere k -waarde, een kleinere (x_0/k) -verhouding en dus een grotere f_w -waarde op.

Voor vastleggen van het begin van beweging is de keuze minder moeilijk, er zijn immers nog geen ribbels aanwezig, zodat de koppeling aan de korrelruheid voor de hand ligt.

Baseert men de ruheidswaarde op de bedruheid, dan vindt men formules volgens:

$$k = r = F(\eta, \eta/\lambda, \dots) \quad (2.8)$$

Enkele verbanden zijn:

$$r = 25\eta^2/\lambda, \quad (\text{Swart, 1976}) \quad (2.9)$$

$$r = 8\eta^2/\lambda + 190 D \sqrt{\theta' - 0,05}, \quad (\text{Madsen en Grant}) \quad (2.10)$$

waarin: θ' de Shieldswaarde betrokken op de korrels met $k = 2,5D_{50}$.

Gebruikmakend van de korrelafmetingen vindt men:

$$k = F(D). \quad (2.11)$$

Het baseren van de ruwheidswaarde op de korrelafmetingen gebeurt onder andere door Nielsen. Een eenvoudige betrekking is:

$$k = D_{50} \quad (\text{Nielsen, 1979}) \quad (2.12)$$

Later vinden we:

$$k = 2,5D_{50} \quad (\text{Nielsen, 1982}) \quad (2.13)$$

Welke betrekking men gebruikt, doet er in principe minder toe, mits men maar vermeldt welke is gebruikt. Wel is het zo dat gevonden verbanden in verschillende gevallen van de k-keuze meer of minder kunnen kloppen.

Omdat Nielsen veel resultaten heeft verzameld zal hier gewerkt worden met de korrelruwheid. Deze keuze is gedaan om aansluiting te vinden bij in de literatuur gegeven verbanden.

Fig. 6a geeft het verband tussen f_w en $U_0 T$ gebruikmakend van $k = 2,5 D_{50}$ en $D_{50} = 218 \mu\text{m}$.

De voor ons interessante omstandigheden zijn (zie Par. 4.2):

$$0,2 \text{ m} < U_0 T < 2,2 \text{ m}.$$

De benadering volgens Swart, Vgl. (2.6), levert:

$$f'_w = \exp[-5,977 + 1,733 (U_0 T)^{-0,194}]. \quad (2.14)$$

De benadering volgens Dingler, Vgl. (2.7), is toelaatbaar voor:

$$70 < \left[\frac{U_0 T}{2\pi \cdot 2,5 \cdot D_{50}} \right] < 2000 \rightarrow 0,24 \text{ m} < U_0 T < 6,8 \text{ m},$$

zodat:

$$f'_w = 0,015 (U_0 T)^{-1/3}. \quad (2.15)$$

In Fig. 6a zijn beide verbanden geschetst. De onderlinge verschillen beperken zich tot 4% (voor $0,25 \text{ m} < U_0 T < 2,5 \text{ m}$).

Berekening van de Shieldsparameter, Vgl. (2.1) en (2.4), levert op basis van de benadering door Vgl. (2.15):

$$\theta' = 141,7 \cdot f'_w \cdot U_0^2 = 2,14 U_0^{5/3} T^{-1/3}. \quad (2.16)$$

In Fig. 6b is dit verband gegeven voor diverse waarden van de periode. Op deze Shieldswaarden komen we later terug (zie Par. 2.4.4).

2.3 Bodemgeometrie

2.3.1 Algemeen

De waterbeweging boven een zandbed heeft boven een zekere waarde invloed op de bodemgeometrie. Deze invloed is afhankelijk van de waterbeweging over de zandbodem en het bodemmateriaal (en van vloeistofparameters analoog aan Par. 2.1).

De invloed op de bodem uit zich wat betreft de geometrie in:

- bedvormen (grootschalig beeld),
- ribbelvormen (op kleinere schaal).

De bedvormen kunnen variëren van een volledig vlak bed tot iets met bulten en duinen. De vorm van de oneffenheden is gekarakteriseerd door de ribbelgeometrie.

Voor het onder een gemeenschappelijke noemer brengen van in de literatuur gevonden verbanden is steeds gebruik gemaakt van de in Par. 4.2 vermelde gegevens, waarbij een bepaalde parameter gerelateerd wordt aan de waterbeweging.

2.3.2 Bedvormen

De vorm van het bed doorloopt bij toenemende intensiteit van de waterbeweging diverse stadia. Uitgaande van een bepaalde zandsoort en een vaste periode van de waterbeweging ziet men bij toenemende pieksnelheid achtereenvolgens:

- geen beweging : Alle korrels op het bed zijn in rust.
- oppervlaktebeweging: De korrels beginnen in beweging te komen: "begin van beweging".

- quasi ribbels : De start van ribbelvorming waarbij de ribbel bestaat uit een relatief iets hogere concentratie aan sediment met een laagdikte van slechts enkele korrel-diameters. Bij verhoging van de snelheid zal hieruit de uiteindelijke ribbelvorm volgen (in literatuur vaak: "rolling-grain-ripples").

- ribbels (vortex ripples) : Ribbelvormen met onderlinge afstanden van 0,05 à 0,5 m, te onderscheiden in:
 - 2-dim. - in bovenaanzicht zijn ribbelkammen te onderscheiden,
 - 3-dim. - geen kammen maar individuele bultjes.

- duinen : De ribbels zijn uitgegroeid tot bulten met grote onderlinge afstanden (> 0,5 m).

- sheetflow : Hierbij beweegt een laag met een hoge sedimentconcentratie over een relatief vlakke bodem.

Bij aanwezigheid van ribbels lijkt een grote samenhang aanwezig tussen ribbels en de wervels die achter ribbeltoppen gevormd worden. Op deze "vortex ripples" wordt later uitgebreid teruggekomen (Hfdst. 3).

De fase waarbij de korrels in beweging beginnen te komen lijkt moeilijk te beoordelen en is, evenals de andere overgangen, niet scherp te definiëren. Over het begin van beweging volgt meer in Par. 2.5.

Fig. 7a geeft een beeld van de bedvorm van ongezeefd zuinzand als functie van de periode en de snelheidsamplitude van de waterbeweging. Deze resultaten zijn afkomstig uit een beginstadium van onderzoek M 1695 (Bosman, 1981). Hierbij valt op dat er een scherpe overgang aanwezig is voor gebieden met 2- en 3-dimensionale ribbels. Boven $T = 1,8$ s zouden geen 2-dimensionale ribbels meer voorkomen. Dit lijkt onwaarschijnlijk aangezien hier in de natuur wel sprake van is.

Carstens (1969) geeft voor de overgang van 2- naar 3-dimensionale ribbelvormen op basis van zijn experimenten een verband volgens:

$$\frac{x_0}{D} = 775. \quad (2.17)$$

Omgewerkt levert dit voor ongezeefd duinzand ($D_{50} = 218 \mu\text{m}$):

$$U_0 T \approx 1 \text{ m.} \tag{2.18}$$

Werkt men met Shieldsparameters dan zou globaal moeten gelden (Nielsen, 1979):

$\theta' < 0,05$	geen beweging,	
$0,05 < \theta' < 1,0$	ribbelforming,	
$\theta' > 1,0$	sheetflow,	(2.19)

waarin θ' op basis van $k = 2,5D_{50}$.

Zet men de verbanden $\theta' = 0,05$ en $\theta' = 1,0$ ook in Fig. 7b dan vindt men twee lijnen, te weten:

$\theta' = 0,05$: ~ begin van beweging


$\theta' = 1,0$: ~ overgang van ribbels naar sheetflow

Hierbij is gebruik gemaakt van de in Par. 2.2 gegeven formules.

2.3.3 Ribbelgeometrie

2.3.3.1 Algemeen

De beschrijving van de geometrie van een ribbel is te onderscheiden in:

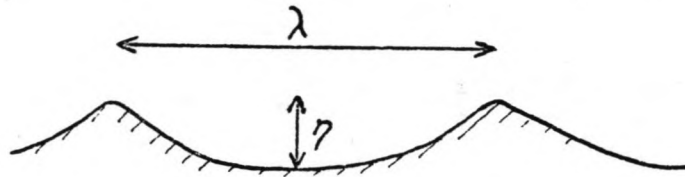
- ribbelafmetingen 
 - ribbelhoogte
 - ribbellengte
- ribbelvorm
 - ribbelsteilheid

Deze ribbelkarakteristieken zullen achtereenvolgens nader worden bekeken.

2.3.3.2 Ribbelhoogte

De ribbelhoogte η is gedefinieerd door de verticale afstand tussen het dal en de top van een ribbel. Deze waarde zal voor elke ribbel (iets) anders zijn. Daarom moet η ook worden gezien als een gemiddelde waarde.

De η -waarde lijkt van groot belang met het oog op de wervels achter de ribbeltoppen en de daarmee samenhangende concentraties.



In de literatuur zijn verschillende onderzoeksresultaten te vinden waarin de ribbelhoogten als functie van diverse parameters gegeven is. Fig. 8 toont enkele van deze relaties.

Mogridge en Kamphuis (1972) geven een grafisch verband tussen η en de maximale orbitaalverplaatsing van het water $2x_0$ (Fig. 8a).

Het verband is gegeven voor diverse waarden van een parameter. Voor ongezeefd duinzand is deze alleen afhankelijk van de periode.

Bijvoorbeeld: $T = 0,5 \text{ s}$ $P_{MK} \approx 50 \cdot 10^6$,
 $T = 5 \text{ s}$ $P_{MK} \approx 0,5 \cdot 10^6$.

Bij vaste periode (vaste P_{MK}) neemt bij toenemende snelheid (verplaatsingsamplitude) de ribbelhoogte toe: Deze groei gaat door tot een bepaald maximum waarna het bed weer wordt afgevlakt.

Voor deze maximale ribbelhoogte vinden we bijvoorbeeld:

$T = 0,5 \text{ s}$ $\eta_{\max} \sim 20D \sim 0,5 \text{ cm}$.

$T = 5 \text{ s}$ $\eta_{\max} \sim 250D \sim 5,5 \text{ cm}$.

Een grotere periode levert blijkbaar ook hogere ribbels. De snelheid waarbij dit maximum optreedt ligt onafhankelijk van de periode bij ongeveer 0,35 m/s. Het grafische verband is goed te gebruiken voor het afschatten van globale verbanden, maar is verder, o.a. vanwege de logaritmische schalen, minder goed bruikbaar.

Een ander bezwaar lijkt het gebruik van η/D als maat. Deze parametercombinatie, afkomstig uit de dimensie-analyse, vertoont erg grote schaalverschillen.

η : orde cm^2/s ,

D : orde 0,1 mm.

Het relateren van een korreldiameter aan een verschijnsel op een 100-voudige schaal lijkt minder geslaagd.

Nielsen (1979) geeft een verband voor zand onder laboratoriumcondities.

Fig. 8b geeft een grafische weergave van het verband:

$$\eta/x_0 = 0,275 - 0,022 \cdot \frac{U_0}{\sqrt{(s-1)gD}}. \quad (2.20)$$

Een eerste opmerking betreft het gebruik van x_0 in de formule. Uitgaande van een constante pieksnelheid U_0 zal bij toenemende periode de ribbelhoogte evenredig groter worden. Dit resulteert dus in het geval van stationaire stroming ($T \rightarrow \infty$) in onmogelijk grote ribbels.

Het lijkt beter een ribbelafmeting te koppelen aan, wat betreft de waterbeweging, T en U_0 in plaats van aan x_0 .

Omgewerkt levert dit verband (voor ongezeefd duinzand):

$$\text{Voor: } 5 < \frac{U_0^2}{(s-1)gD} < 100 \rightarrow 0,13 \text{ m/s} < U_0 < 0,60 \text{ m/s}.$$

$$\begin{aligned} \eta &= \left(0,275 - 0,022 \frac{U_0}{\sqrt{(s-1)gD}} \right) \cdot \frac{U_0 T}{2\pi} \approx \\ &= T \cdot [0,043U_0 - 0,059U_0^2] = \\ &= T [0,0078 - (0,243U_0 - 0,089)^2]. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Ook hier is bij kleine U_0 , η evenredig met T (lijnen onder $\sim 45^\circ$ van Mogridge en Kamphuis) en bij grotere U_0 's neemt de ribbelhoogte via een maximum weer af.

Grotere perioden leveren evenredig grotere ribbelhoogten.

De maximale ribbelhoogt ligt onafhankelijk van de periode bij $U_{0m} = 0,36 \text{ m/s}$. Snelheden boven U_{0m} leveren volgens Nielsen afnemende ribbelhoogten.

Fig. 11a geeft het verband $\eta/T = F(U_0)$ zoals dat volgens Nielsen zou gelden voor ongezeefd duinzand.

Voor de maximale ribbelhoogte geldt globaal:

$$\eta_{\max} \approx 0,0078T. \quad (2.22)$$

De waarden van η_{\max} (0,004 m en 0,04 m voor $T = 0,5$ en 5 s) komen redelijk overeen met die van Mogridge en Kamphuis, evenals de afhankelijkheid van de snelheid en periode.

2.3.3.3 Ribbellengte

De ribbellengte is gedefinieerd als de horizontale afstand tussen opeenvolgende ribbelkammen (zie schets op Blz. 19), ook hier weer gemiddeld over meerdere ribbels.

In de literatuur worden veel verbanden gevonden voor de verhouding tussen de ribbellengte en de slaglengte van de orbitale waterbeweging (het dubbele van de waterbewegingsamplitude x_0).

Brebner (1980) geeft een verband tussen genoemde verhouding en de snelheidsamplitude U_0 in de vorm $U_0^2 / ((s-1)gD)$.

Het verband is gegeven in Fig. 9a en is afhankelijk van een sediment-vloeistofparameter volgens:

$$P_B = \left[\frac{\gamma_{\text{subm}} D^3}{\rho \nu^2} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{(s-1)gD^3}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (2.23)$$

Ons geval levert: $P_B \approx 13$.

In eerste instantie blijft $\lambda/(2x_0)$ constant op ongeveer 0,68. Bij hogere U_0 -waarden neemt de verhouding snel af.

Volgens Brebner geldt voor duinzand:

$$\frac{\lambda}{2x_0} \approx 0,68 \quad \text{voor} \quad \frac{U_0^2}{(s-1)gD} < 8,5 \rightarrow$$

$$\lambda \approx 0,22 U_0 T \quad \text{voor} \quad U_0 < 0,17 \text{ m/s}. \quad (2.24)$$

Bij constante T geeft een verdubbeling van de orbitaalsnelheidsamplitude U_0 een toename van de ribbellengte, die afhangt van U_0 . De λ -toename is in het begin nog bijna 100% (evenredigheid), maar neemt daarna af tot een maximum ribbellengte bereikt is.

Het verband in het rechter gedeelte van de grafiek (Fig. 9a) lijkt gezien het aantal meetpunten ter plaatse niet overtuigend.

Morgridge en Kamphuis (1972) geven een ander verband, namelijk tussen λ/D en $2x_0/D$ als functie van een parameter:

$$P_{MK} = \frac{D}{(s-1)gT^2} \quad (2.25)$$

Ons geval: $P_{MK} = \frac{13,5}{T^2} 10^{-6}$.

Het grafische verband is gegeven in Fig. 9b.

Bij een gegeven periode T zal de ribbellengte eerst toenemen met U_0 en daarna asymptotisch verzadigen op een vast niveau. Nog hogere snelheden zorgen voor het verdwijnen van de ribbels (sheetflow), zodat λ ongedefinieerd wordt. De maximale ribbellengte is slechts een functie van de parameter P_{MK} en dus de periode. Bijvoorbeeld:

T (s)	$P_{MK} 10^6$	$\lambda/D (-)$	$\lambda_{max} (m)$
1	13,5	~ 400	0,09
5	0,5	~1500	0,33

Het in eerste instantie evenredige verband tussen λ en U_0 volgt uit de helling van de lijn (45° en de twee logaritmische schalen).

Nielsen (1979) geeft een verband tussen λ/x_0 en de snelheidsamplitude U_0 in de vorm $U_0^2/((s-1)gD)$. Het verband toont een gelijkenis met dat van Brebner (1980). Het verband voldoet volgens Nielsen aan:

$$\frac{\lambda}{x_0} = 2,2 - 0,345 \left[\frac{U_0^2}{(s-1)gD} \right]^{0,34} \quad (2.26)$$

Dit op basis van vele laboratoriumproeven gevonden verband is gegeven in Fig. 9d.

Voor ons geldt:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{U_0 T}{2\pi} [2,2 - 0,345 ((s-1)gD)^{-0,34} \cdot U_0^{0,68}] = \\ &= T (0,35U_0 - 0,375U_0^{1,68}). \end{aligned} \quad (2.27)$$

Blijkbaar $\lambda \sim T$.

Het berekende verband lijkt redelijk goed (zie grafiek) voor:

$$5 \lesssim \frac{U_0^2}{(s-1)gD} \lesssim 100 \rightarrow 0,13 \text{ m/s} \lesssim U_0 \lesssim 0,60 \text{ m/s}.$$

Fig. 11b geeft het verband $\lambda/T = F(U_0)$ zoals dat volgens Nielsen zou gelden voor ongezeefd duinzand. In het begin is ook hier $\lambda \sim U_0$, terwijl voor $U_0 \approx 0,40 \text{ m/s}$ een verzadigingsniveau bereikt wordt volgens:

$$\lambda_{\max} \approx 0,059T. \quad (2.28)$$

De waarden voor de maximale ribbellengte komen redelijk goed overeen met die volgens Mogridge en Kamhuis evenals de snelheidsafhankelijkheid.

Bosman (1981) vond als resultaat van enige proeven uitgevoerd in de golftunnel de resultaten als gegeven in Fig. 9c.

Hier werd gevonden:

$$\lambda \sim U_0 T. \quad (2.29)$$

2.3.3.4 Ribbelsteilheid

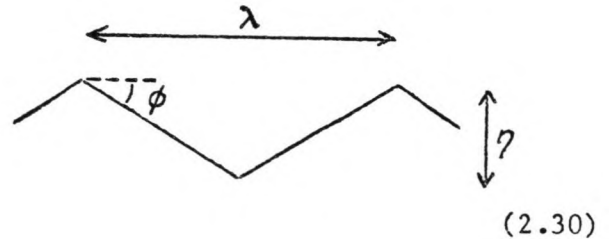
Een parameter die wordt gebruikt om de ribbelvorm te beschrijven is de ribbelsteilheid. Dit is de verhouding tussen de ribbelhoogte η en de ribbellengte λ , gemiddeld over meerdere ribbels.

Bij de aanwezigheid van ribbels kan op voorhand al iets gezegd worden over de maximaal mogelijke waarde van η/λ . Uitgaande van een zandsoort met een hoek van inwendige wrijving (ϕ) van ongeveer 30° en een geschematiseerde ribbelvorm vindt men:

- driehoekig ribbelpatroon:

$$\tan\phi = \frac{\eta}{\lambda/2},$$

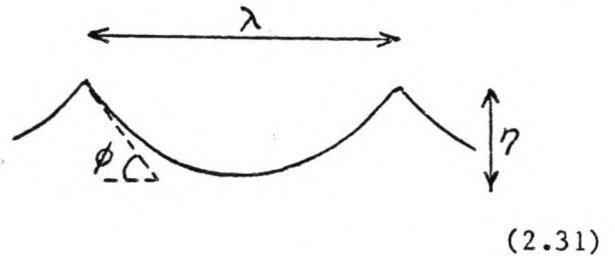
$$\text{dus: } \eta/\lambda = \frac{1}{2} \cdot \tan\phi \approx 0,29,$$



- parabolvormig volgens $y=x^2$:

$$\tan\phi = \frac{\eta}{\lambda/4},$$

$$\text{dus: } \eta/\lambda = \frac{1}{4} \cdot \tan\phi \approx 0,15.$$



Op analoge wijze vindt men voor trochoïdale ribbelvormen een ribbelsteilheid van ongeveer 0,14.

Concluderend mag worden gesteld dat voor de maximale ribbelsteilheid geldt:

$$0,14 \lesssim (\eta/\lambda)_{\max} \lesssim 0,29.$$

Hierbij ligt de echte maximale waarde waarschijnlijk dicht bij de ondergrens. De bedvormen vertonen onder golven immers meer gelijkenis met parabolen (o.i.d.) dan met driehoeken!

Verder is het aannemelijk dat bij toenemende waterbeweging η/λ zal afnemen tot nul bij sheetflow. Bij toenemende U_0 vonden we immers een uiteindelijk afnemende η en een min of meer constante λ tot het verdwijnen van de ribbels.

In Fig. 10 zijn diverse verbanden voor de ribbelsteilheid gegeven.

Opgemerkt moet worden dat de ribbelsteilheid zoals hier beschreven betrekking heeft op de gemiddelde verhouding tussen de ribbelhoogte en de ribbellengte. Het quotiënt van gemiddelde ribbelhoogte en gemiddelde ribbellengte geeft slechts een schatting van de gemiddelde ribbelsteilheid.

Dingler (1976) vond dat $\eta/\lambda \approx 0,15$ tot een bepaalde waarde van een parameter en daarna, bij verder toenemende waterbeweging, afnam tot nul bij sheetflow, dit onafhankelijk van de periode. De gebruikte parameter is:

$$P_D = \frac{U_0^2}{(s-1)gD}. \quad (2.32)$$

Afwijking van $\eta/\lambda \approx 0,15$ treedt in bij:

$$P_D = 40 \rightarrow U_0 \approx 0,38 \text{ m/s.}$$

Een vlak bed vinden we volgens Dingler voor:

$$P_D = 240 \rightarrow U_0 \approx 0,92 \text{ m/s.}$$

Hierbij is geen sprake van periode-afhankelijkheid (Fig. 10a).

Bekijken we nu nog eens de verbanden die gevonden werden met behulp van formules volgens Nielsen (Fig. 11a en b). Voor η/T en λ/T ziet men dat bij $U_0 \approx 0,40$ m/s de verhouding η/λ inderdaad verandert. Bovendien valt bij de deling de invloed van de periode inderdaad weg. Extrapolerend voor $(\eta/\lambda) \approx 0$ lijkt $U_0 \approx 0,90$ m/s ook heel redelijk.

Fig. 11c geeft dus een goede benadering van de ribbelsteilheid als functie van de waterbeweging.

Nielsen (1979) gaf ook een resultaat van de analyse van vele direct bepaalde (η/λ) -verhoudingen. Het verband van deze laboratoriummetingen is gegeven door:

$$\eta/\lambda = 0,182 - 0,24 (\theta')^{1,5}, \quad (2.33)$$

waarin: $\theta' =$ Shieldsparameter met $k = 2,5D_{50}$.

Het verband is gegeven in Fig. 10b. De geldigheid van dit verband is globaal beperkt tot:

$$0,05 \lesssim \theta' \lesssim 0,8,$$

en met het oog op de spreiding in de grafiek, met een geringe nauwkeurigheid.

Bepaalt men de waarde van de ribbelsteilheid als functie van U_0 voor verschillende perioden, dan vindt men voor ongezeefd duinzand het in Fig. 10a geschetste verband.

Het verband volgens Nielsen (2.33) levert een kleinere steilheid voor kortere perioden.

Bosman (1981) vond op basis van enkele proeven met ongezeefd duinzand voor de benaderde ribbelsteilheid.

$\eta/\lambda = (0,18 \pm 0,03)$ voor 2-dimensionale, en

$\eta/\lambda = (0,15 \pm 0,02)$ voor 3-dimensionale ribbels. (2.34)

Het betref hier slechts het gedeelte van het traject ver voor optreden van sheetflow, dus bij globaal constante ribbelsteilheid. Het lijkt erop dat grotere perioden een kleinere ribbelsteilheid leveren, dit in tegenstelling tot de resultaten volgens Nielsen.

In Fig. 10a zijn ook deze resultaten toegevoegd in de grafiek. Gezien de nauwkeurigheid lijkt de overeenkomst met het eerdere verband redelijk.

Samenvattend geeft Fig. 11 een goed beeld van de ribbelgeometrie als functie van U_0 en T . De ribbelsteilheid als gegeven in Fig. 11c is als vergelijkingsmateriaal goed bruikbaar, omdat ook bij onze proeven slechts naar het quotiënt van gemiddelde ribbelhoogte en gemiddelde ribbellengte gekeken is.

2.4 Concentratieverdeling

2.4.1 Algemeen

De beschrijving van de sedimentverdeling over de hoogte is al heel lang een onderwerp van studie. In geval van een stationaire storming is vrij veel bekend over het concentratieverloop. Uitbreiding van de kennis naar concentraties onder golven levert, blijkens de literatuur, toch veel problemen op. Als oorzaak van deze moeilijkheden is waarschijnlijk de verificatie van veronderstelde modellen aan te wijzen. Het komen tot eenduidige concentratiemetingen blijkt veelal op grote praktische problemen te stuiten. Het bewijs

van de geldigheid van een model dat de concentratieverdeling beschrijft, is dan ook veelal zwak.

Een direct gevolg hiervan is dat door gebrek aan kennis over concentratieverdeling onder oscillerende waterbeweging steeds aansluiting is gezocht bij modellen voor stationaire stroming.

De praktische beperkingen die optreden bij het meten van concentraties zitten met name in de bodemlaag. In de onderste paar centimeters boven het bed is immers een zeer intensieve plaats- en tijdsafhankelijke interactie tussen zand en water. De concentraties zullen dus in de tijd en per plaats zeer sterk variëren.

Het doel van dit onderzoek is de bepaling van de concentratieverdeling in de onderste paar centimeters boven het zandbed onder invloed van een oscillerende waterbeweging.

Eerst zal enige aandacht besteed worden aan de modellen die de concentratieverdeling onder golven beschrijven, zowel gebaseerd op een diffusiemodel, als op basis van experimentele resultaten.

Daarna zal gekeken worden naar enkele resultaten van concentratiemetingen nabij de bodem, met name metingen die door Nielsen verzameld zijn.

De uitgebreidere behandeling van de concentraties in de bodemlaag komt dan in Hfdst. 3 aan de orde.

2.4.2 Diffusiemodellen

Gemeenschappelijk uitgangspunt voor de beschrijving van een concentratieverdeling is altijd:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \left[w \cdot c + D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] = 0, \quad (2.35)$$

waarin:

c = de concentratie,

u = de horizontale snelheid,

w = valsnelheid van het sediment,

D_z = turbulente diffusiecoëfficiënt in z-richting.

Maken we de stap van momentane concentraties naar tijd- en bed-gemiddelde concentratie dan vervallen de afgeleiden naar de tijd en de plaats. Er rest dus:

$$\frac{\partial}{\partial z} [w \cdot \bar{c} + D_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z}] = 0, \quad (2.36)$$

waarin: \bar{c} de gemiddelde concentratie.

Het gedeelte tussen haken is dus onafhankelijk van de hoogte. Integratie levert onder de voorwaarde dat er geen sediment door het oppervlak verdwijnt:

$$w \cdot \bar{c} + D_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = 0. \quad (\text{Schmidt-vergelijking}) \quad (2.37)$$

De turbulente diffusiecoëfficiënt D_z is hierbij de onbekende.

De waarde ervan wordt beïnvloed door de stroming bij de bodem en is dus afhankelijk van de hoogte boven de bodem en de waterbeweging (Booy, 1983).

Andere gebruikelijke notaties zijn:

$$D_z \rightarrow v_t \rightarrow \epsilon_s \rightarrow \epsilon.$$

Hierbij is gebruik gemaakt van de Reynoldsanalogie. De diffusiecoëfficiënt D_z is hierbij gelijkgesteld aan de turbulente viscositeit v_t , dit is vanwege het feit dat het zelfde turbulentiemechanisme bepalend is. De aanduiding ϵ_s staat dus voor de turbulente viscositeit betrokken op het sediment en is gemakshalve aangeduid met ϵ .

De standaardvergelijking is, uitgaande van de diffusievergelijking, met gebruik van diverse aannamen:

$$\frac{dC}{dz} = - \frac{w}{\epsilon(z)} \cdot C, \quad (2.38)$$

waarin:

- C = de gemiddelde concentratie,
- w = de valsnelheid van het sediment,
- $\epsilon(z)$ = de turbulente diffusiecoëfficiënt voor het sediment.

De diverse modellen zijn gebaseerd op verschillende aannamen voor $\epsilon(z)$.

In het algemeen geldt (ontwikkeling in machtreeks vanuit $z=0$):

$$\epsilon(z) = \epsilon_0 + \epsilon_1 \cdot z + \epsilon_2 \cdot z^2 + \dots \quad (2.39)$$

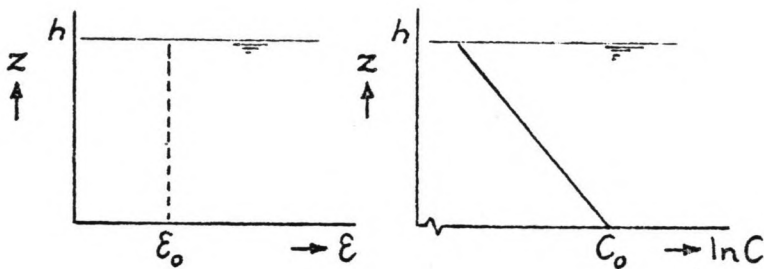
Indeling van de modellen kan gebeuren aan de hand van de orde van de hoogste orde term die voor $\varepsilon(z)$ is meegenomen.

Bekijken we eerst enkele modellen voor de concentratieverdeling onder golven.

Een nulde orde model (ongeveer volgens Coleman) gaat er van uit dat ε constant is over de hoogte, zodat:

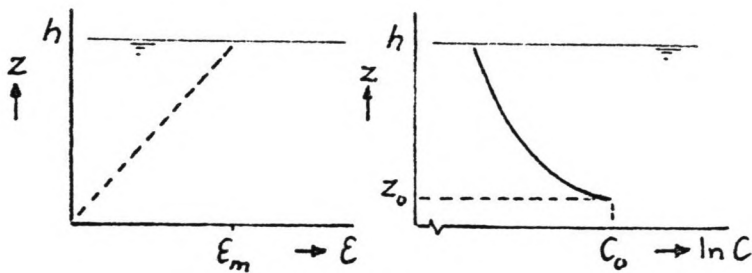
$$C(z) = C_0 e^{-\frac{w}{\varepsilon_0} z}, \quad (2.40)$$

wat op halflogaritmisch papier rechte lijnen te zien geeft.



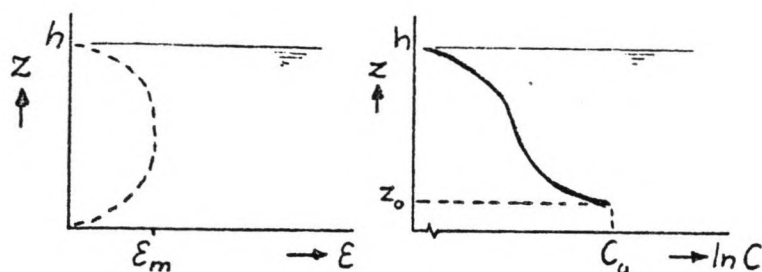
$$\begin{aligned} \varepsilon(z) &= \varepsilon_0 \\ C(z) &= C_0 \cdot e^{-\frac{w}{\varepsilon_0} z} \end{aligned}$$

Verder zijn er nog eerste orde modellen (Bhattacharya) waarbij ε evenredig toeneemt vanaf de bodem.



$$\begin{aligned} \varepsilon(z) &= \varepsilon_0 + \frac{z}{h} \cdot \varepsilon_m \quad (\varepsilon_0 = 0) \\ C(z) &= \begin{cases} C(z_0) \\ C(z_0) \cdot \left(\frac{z_0}{z}\right)^{\frac{h \cdot z}{\varepsilon_m}} \end{cases} \\ &\quad (z_0 \leq z \leq h) \end{aligned}$$

Het tweede orde model (Rouse-Einstein) neemt een parabolisch verloop van de ε -waarde aan.



$$\varepsilon(z) = 4 \cdot \varepsilon_m \cdot \frac{z}{h} \cdot \left(1 - \frac{z}{h}\right)$$

$$C(z) = \begin{cases} C(z_0) \\ C(z_0) \cdot \left[\frac{h-z}{z} \cdot \frac{z_0}{h-z_0}\right]^{\frac{w \cdot h}{4 \cdot \varepsilon_m}} \end{cases} \quad (z_0 \leq z \leq h)$$

De twee laatste modellen zijn slechts geldig vanaf een zeker arbitrair gekozen niveau z_0 , waaronder de concentratie veelal constant is verondersteld. De bodemconcentratie is afhankelijk van de keuze van z_0 . Mede gelet op het belang van juist het onderste deel van de verticaal zijn deze modellen dus minder geschikt.

Bovendien moet de concentratie aan het oppervlak in principe vrij zijn (zeker als men gaat middelen over een langere tijd).

2.4.3 Experimentele modellen

Gaat men uit van experimentele resultaten zonder daarbij gebruik te maken van een diffusiemodel dan vindt men:

$$\frac{dC}{dz} = \gamma(z) \cdot C. \tag{2.41}$$

waarin:

$\gamma(z)$ = de relatieve concentratiegradiënt (m^{-1}),

C = de gemiddelde concentratie.

Gerelateerd aan een diffusiemodel geldt:

$$\gamma(z) = \frac{w}{\varepsilon(z)}$$

Ook hierbij kan men weer modellen indelen naar de orde van $\gamma(z)$:

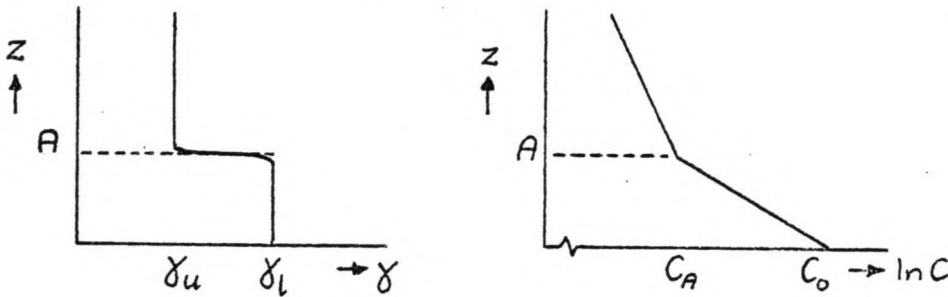
$$\gamma(z) = \gamma_0 + \gamma_1 \cdot z + \gamma_2 \cdot z^2 + \dots \tag{2.42}$$

Bosman (1982) concludeerde uit metingen dat de meest reële representatie van het concentratieverloop wordt gegeven door een zogenaamd dubbel-nulde-orde-model. Hierbij is:

$$\begin{aligned} \gamma(z) &= \gamma_l \quad (\text{lower}) \quad \text{voor } 0 < z < A, \\ &= \gamma_u \quad (\text{upper}) \quad \text{voor } A < z < h, \end{aligned}$$

met γ_l en γ_u onafhankelijk van z .

In een semi-logarithmische plot zien we een knik of beter een snelle verandering over een relatief kleine verticale afstand.



Het feit dat in een laag γ onafhankelijk is van de hoogte levert een doorzichtige relatie op, immers:

$$\Delta C \sim \Delta z \cdot C$$

De concentratieverandering is recht evenredig met de verschuiving in de hoogte (Δz) en de aanwezige concentratie (C).

Het model omvat twee verschillende gebieden met elk een eigen suspensiemechanisme en dus een eigen γ -waarde.

De waarde van A ligt in de orde van grootte van enkele ribbelhoogten en geeft de hoogte waarop het mechanisme in het ondergebied zijn invloed verliest en die van het bovengebied overheersend wordt.

Suggesties voor de aanwezige mechanismen zijn:

ondergebied: de suspensie als gevolg van de aanwezigheid van wervels is bepalend,

bovengebied: bepalend zijn hier het aanbod van het ondergebied en de verticale componenten van de orbitaalbeweging (en turbulente diffusie).

Blijkens de gemaakte transportverdelingsafschatting is het ondergebied van relatief groot belang.

Wat verder bekeken dient te worden is het concentratieverloop in dit ondergebied, wat verder is aangeduid als bodemlaag. Dus:

- Bodemlaag: - dat gedeelte van de concentratieverticaal vlak bij de bodem waarin γ nog onafhankelijk is van z , met $\gamma = \gamma_1$.
- de invloed van de wervels lijkt overheersend t.o.v. de invloed van verticale componenten van de orbitaalbeweging.

Het beperken tot deze bodemlaag, waarin de invloed van de verticale componenten van de golfbeweging ondergeschikt is, betekent dat voor deze laag blijkbaar hoofdzakelijk de horizontaal oscillerende waterbeweging van belang is.

Het uitvoeren van onderzoek naar concentratieverdelingen in de bodemlaag onder oscillerende stroming, zoals dat in een golftunnel (Par. 4.3) gebeuren kan, is dus zinvol omdat dit nog veel te maken heeft met het gebeuren onder een golf.

2.4.4 Bodemconcentraties

Zoals al vermeld is over concentraties vlakbij de bodem weinig bekend. Nielsen (1979 en 1982) geeft echter wel twee verbanden voor de concentratie vlak boven een ribbeltop. De relaties zijn ontstaan op basis van samenvoegen van vele afzonderlijke metingen.

De eerste relatie (1979):

$$C_N = K \cdot (\theta' - \theta_c) \cdot \left[\frac{2}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{\theta_c}{\theta'}} \right], \quad (2.43)$$

waarin:

- K = experimentele constante = 0,028 voor positie boven ribbel,
 θ' = Shieldsparameter op basis van $2,5D_{50}$,
 θ_c = bijbehorende kritieke waarde ($\approx 0,05$),
 C_N = concentratie (in m^3/m^3) op het ribbeltopniveau boven een ribbel.

In deze formule is het gedeelte tussen rechte haken te zien als het percentage van de tijd waarin $\theta' > \theta_c$. Fig. 12 toont dit verband. Het laat ook zien dat slechts sprake is van een geringe nauwkeurigheid.

Nielsen (1982) geeft een eenvoudiger verband voor dezelfde concentraties:

$$C_N = 0,036 (\theta')^{1,7}. \quad (2.44)$$

Er is, blijkens Fig. 12, sprake van een grote spreiding. Het verband (2.44) is nauwelijks anders dan het eerder genoemde. De werkelijke concentraties zijn op deze wijze blijkbaar niet eenduidig vast te leggen.

Nader bekijken van het laatste verband laat wel de globale afhankelijkheid van de periode en snelheid zien.

Gebruikmakend van het in Par. 2.2 afgeleide verband voor de Shieldsparameter, Vgl. (2.16), vinden we:

$$C_N = 0,036 \cdot [2,14 \cdot U_0^{5/3} \cdot T^{-1/3}]^{1,7} \cong 0,13 \cdot U_0^{2,8} \cdot T^{-0,6}. \quad (2.45)$$

Langere perioden resulteren dus in een lagere concentratie en bij gelijkblijvende periode zal de concentratie snel met de snelheid toenemen.

Bij het eerste verband (2.43) krijgen we globaal hetzelfde resultaat. Uit vergelijking van beide verbanden zien we dat de macht van de Shieldsparameter langzaam verloopt en afneemt bij toenemende waterbeweging.

Nielsen merkt overigens op dat het er op lijkt dat langere perioden toch nog systematisch lagere concentraties geven, m.a.w. de invloed van de periode lijkt niet voldoende in de verbanden tot uitdrukking te zijn gebracht.

Concluderend kan men stellen dat de gegeven formules slecht voldoen.

2.5 Begin van beweging

Naar het begin van beweging is al veel onderzoek gedaan. Voordat er literatuurresultaten worden gegeven moet eerst de nadruk worden gelegd op de subjectieve beoordeling ervan.

Gaat men uit van een vlak zandbed dan zal er bij toenemende waterbeweging (T constant) een snelheid optreden waarbij korrels in beweging komen. Het aantal korrels dat per oppervlak-eenheid in beweging mag zijn voor van beweging sprake is, is enerzijds niet standaard en anderzijds moeilijk te beoordelen. Dit resulteert in een subjectieve beoordeling van het begin van beweging.

Wat ook van belang is, is het bed zoals dat er aan het begin van de proef uitziet, een geribbeld bed zal immers een lagere U_i -waarde geven.

In het algemeen geldt voor een bepaalde zandsort:

$$U_i = F(T \mid \text{bed}).$$

Indien wordt uitgegaan van een volledig vlak bed dan blijft over:

$$U_i = F(T).$$

De in de literatuur vermelde verbanden zijn alle op basis van de laatstgenoemde relatie, waaraan sediment/vloeistofparameters zijn toegevoegd.

Omgewerkt naar een relatie voor ongezeefd duinzand zijn enkele verbanden gegeven in Fig. 13a.

Komar (1972) gaf voor korreldiameters kleiner dan 0,5 mm de relatie:

$$\frac{U_0^2}{(s-1)gD} = 0,21 \sqrt{\frac{2x_0}{D}},$$

$$\text{omgewerkt: } U_i \approx 0,093T^{1/3}. \quad (2.46)$$

Bij toenemende periode neemt U_i toe. De toename is het sterkst bij de kortere perioden, een beeld dat in vrijwel alle verbanden terugkeert.

Swart (1976) geeft een relatie volgens:

$$U_i = 4,58 \cdot D_{50}^{0,38} \cdot T^{0,043}.$$

Voor ongezeefd duinzand levert dit:

$$U_i = 0,186 \cdot T^{0,043}. \quad (2.47)$$

Brebner (1980) geeft een verband waaruit zou kunnen worden berekend bij welke snelheid bedvormen kunnen gaan optreden:

$$\frac{U_0^2}{(s-1)gD} = 3 \rightarrow U_0 \approx 0,10 \text{ m/s.}$$

Dit verband lijkt onjuist, bedvormen treden immers pas op voorbij het begin van beweging. Bovendien is er geen afhankelijkheid van de periode aanwezig!

Hallermeier (1980) geeft op basis van de veronderstelling dat sprake is van een laminaire stroming over de korrels en een relatief hoge ω :

$$U_i = \frac{0,33 ((s-1)g)^{0,75} \cdot D^{0,25}}{\omega^{\frac{1}{2}}}$$

Omgewerkt vinden we:

$$U_i \approx 0,13T^{\frac{1}{2}}. \quad (2.48)$$

Nielsen (1979) maakt gebruik van de Shieldsparameter gebaseerd op de korrelruwheid ($k = 2,5D_{50}$). Het begin van ribbelvorming ligt globaal bij $\theta'_i = 0,05$, en valt samen met het begin van beweging.

Bosman (1981) vond voor ongezeefd duinzand:

$$U_i = (0,123 \pm 0,006)T^{\frac{1}{2}} \text{ m/s} \quad \text{voor} \quad 1 \text{ s} < T < 5 \text{ s},$$

en

$$U_i = (0,30 \pm 0,01) \text{ m/s} \quad \text{voor} \quad T > 7 \text{ s}. \quad (2.49)$$

Voor $T > 7\text{s}$ is er geen afhankelijkheid meer van de periode.

In Fig. 13a zijn de genoemde verbanden bij elkaar gebracht. Opvallend is hierbij de zeer grote spreiding, waarbij het verband volgens Brebner zeer bedenkelijk overkomt.

Madsen en Grant (1976) hebben verschillende laboratoriumresultaten bekeken en deze vergeleken met Shieldswaarden voor een eenparige stroming.

Fig. 13b laat zien dat de waarden (op basis van $\hat{\tau}$) voor een oscillerende stroming globaal iets hoger liggen.

Voor ongezeefd duinzand volgt:

$$P_{MG} = \frac{D}{4\nu} \cdot \sqrt{(s-1)gD} = 3,2, \text{ waarvoor } \theta_i \approx 0,07 \text{ (i.p.v. } \theta'_i = 0,05). \quad (2.50)$$

Fig. 13a geeft $U_i(T)$ voor $k = D_{90}$ volgens bovenstaande relatie.

Madsen concludeert verder dat er op basis van vele verschillende onderzoeksresultaten nauwelijks meer sprake is van een algemene trend, hiermee nog eens de subjectiviteit van de beoordeling onderschrijvend.

Zou er echter inderdaad sprake zijn van een directe relatie met de Shields-parameter dan geldt er dus:

$$\theta' = \text{constant voor alle } T.$$

$$\text{Dus: } f_w \cdot U_0^2 = \text{constant.}$$

Op basis van het afgeleide verband voor f_w (Par. 2.2) vinden we nu:

$$T^{-1/3} \cdot U_0^{5/3} = \text{constant,}$$

$$\text{zodat: } U_i \sim \sqrt[5]{T}. \quad (2.51)$$

Dit verband vinden bij Nielsen.

Maakt men gebruik van een laminaire afschatting voor f_w volgens Lamb (1932):

$$f_w = 2/\sqrt{Re},$$

$$\text{waarin: } Re = \frac{U_0 \cdot x_0}{\nu} = \frac{U_0^2}{\omega \cdot \nu}. \quad (\text{golf-Reynoldsgetal})$$

Dan volgt:

$$\frac{2}{U_0} \sqrt{\frac{2\pi}{T}} \nu \cdot U_0^2 = \text{constant,}$$

$$\text{zodat: } U_i \sim \sqrt{T}. \quad (2.52)$$

Deze relatie vinden we zowel bij Hallermeier (op basis van dezelfde afleiding) als bij Bosman (experimenteel).

2.6 Uitzeving

Voor elk materiaal in suspensie zal uitzeving van de deeltjesgrootte over de hoogte plaatsvinden.

Een afname van de gemiddelde deeltjesdiameter zal resulteren in een afname van de gemiddelde valsnelheid.

Voor deze valsnelheid geldt:

$$w^2 = \frac{4(s-1)gD}{3C_D}, \quad (2.53)$$

waarin de coëfficiënt C_D afhankelijk is van het korrel-Reynoldsgetal volgens een verband als gegeven in Fig. 14a.

$$C_D = F(Re) = F\left(\frac{w \cdot D}{\nu}\right). \quad (2.54)$$

In Par. 5.12 wordt hier nog uitgebreid op teruggekomen.

3. Concentraties in de bodemlaag

3.1 Algemeen

Eerst zal een poging gedaan worden om de processen in de bodemlaag aan de hand van enige schetsen kwalitatief te beschrijven.

De aanwezigheid van wervels lijkt dominant voor het suspensiemechanisme zodat ook hier iets over gezegd zal worden. Het meevoeren van korrels van het bodemmateriaal met over het zandbed rollende wervels lijkt te zorgen voor de verdeling ervan over de hoogte in de bodemlaag.

Dat het meten van een representatieve gemiddelde concentratie niet eenvoudig is, blijkt uit de in Par. 3.4 geschetste ontwikkeling van het concentratiemeten. Tenslotte wordt het verder gehanteerde concentratieverloop-model nader bekeken, waarbij de gebruikte parameters nader aan de orde komen.

3.2 Visuele beschrijving

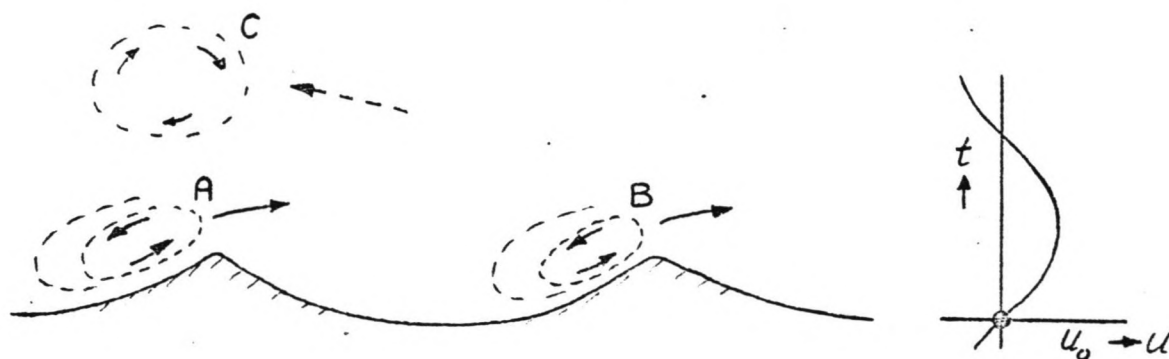
Als de waterbeweging voldoende is ($0,2 \text{ m/s} \lesssim U_0 \lesssim 0,5 \text{ m/s}$), zullen er ribbels en suspensie aanwezig zijn. Een en ander blijft gemiddeld genomen in evenwicht, waarbij de mate van suspensievorming en de bodemgeometrie afhankelijk zijn van de waterbeweging en het bodemmateriaal (en vloeistofparameters) analoog aan het schema van Par. 2.1.

Het bodemgebeuren laat zich in een evenwichtssituatie tijdens een waterbewegingsperiode als volgt beschrijven.

Stel snelheidsverloop:

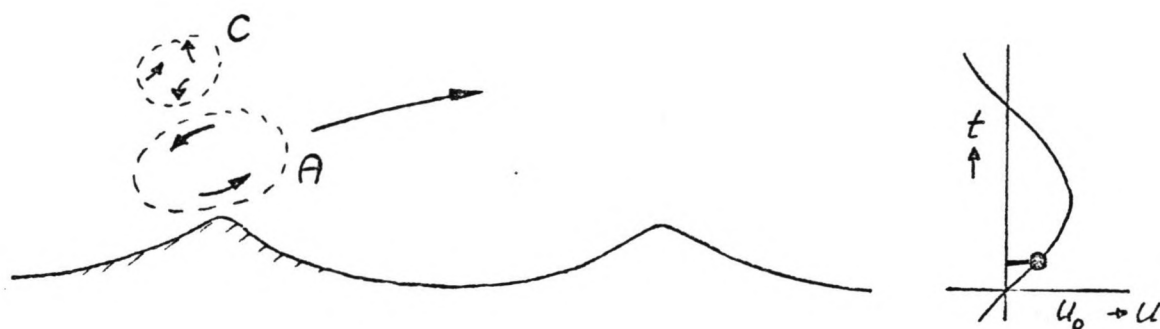
$$U(t) = U_0 \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{t}{T}\right). \quad (3.1)$$

Beschouw nu het deel van het verloop waarin $U(t)=0$ via $U(t)=+U_0$ naar $U(t)=0$ gaat.

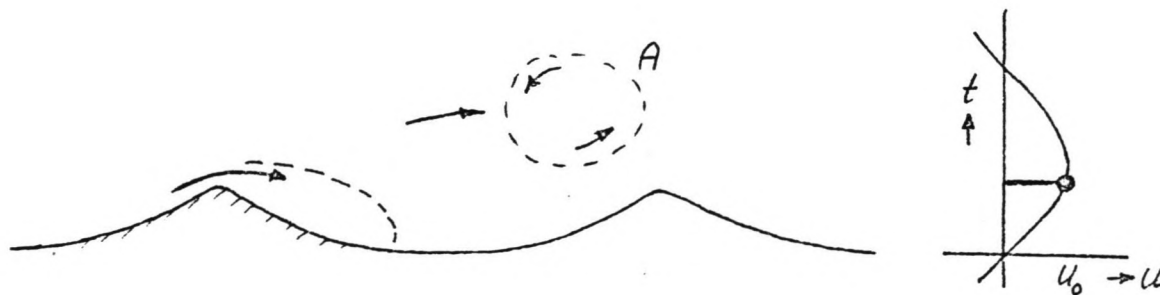


De stroomrichting draait om naar rechts en de tijdens het naar links stromen achter de ribbels ontstane wervels (A en B) bewegen zich naar rechts. Boven de ribbeltop zit nog een oude wervel (C) die afkomstig is uit de vorige bewegingsfase.

De draairichting van wervels A en C is tegengesteld, zodat bij de passage van A een deel van C kan worden geabsorbeerd.

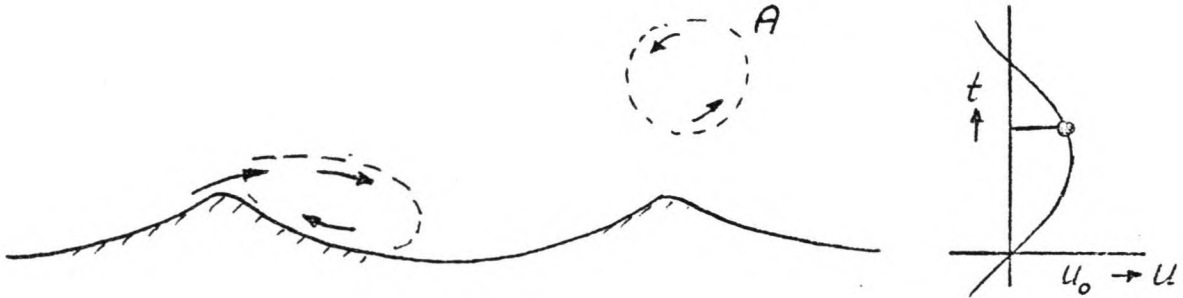


Wervel A beweegt verder naar rechts, terwijl C lijkt te verdwijnen. De restinhoud beweegt zich willekeurig alle kanten op en de systematische rotatie verdwijnt.



De snelheid van de ongestoorde stroom nadert het maximum.

Ter plaatse van de ribbeltop treedt een sterke erosie op, van een wervelvorming is echter nog nauwelijks sprake.



De snelheid is over het maximum en begint weer langzaam af te nemen. Er is nu wel sprake van wervelvorming. Een groot deel van het bovenstrooms geërodeerde zand wordt gevangen in deze wervel.



De stroomrichting draait weer om. De wervel heeft inmiddels zijn maximale rotatie bereikt en zal naar links gaan bewegen.

Er is sprake van een sterke erosie onder de wervel resulterend in het behoud van de ribbelvorm.

In de volgende halve snelheidsperiode herhaalt zich het beschreven proces, zij het met de beweging naar links.

Geconcludeerd kan worden dat de verdeling van het sediment in het door wervels beheerste gebied vlak boven de ribbels berust op meevoering van korrels door de wervels.

De optredende korrelbeweging is gerelateerd aan de waterbeweging en lijkt, zeker relatief gezien, weinig te maken te hebben met turbulente uitwisseling tussen verschillende niveau's.

Voor de beschrijving van een gemiddeld concentratieverloop lijkt de diffusie-theorie als uitgangspunt (Par. 2.4.2) minder geslaagd.

Een andere conclusie is dat de hoogte waarop de wervels hun invloed verliezen, is gerelateerd aan de bedgeometrie, of meer specifiek aan de ribbelhoogte. Verondersteld kan worden dat er bij verschillende waterbewegingen sprake is van een schaalverandering van het bodemgebeuren, hetgeen betekent dat de verhouding tussen bodemlaagdikte en ribbelhoogte redelijk constant zal zijn. Het nader bekijken van deze parameter-verhouding lijkt daarom zinvol (zie Par. 5.5.2).

3.3 Suspensiemechanisme

3.3.1 Algemeen

Op basis van visuele waarneming ziet men dat de korrels door de wervels worden meegevoerd.

Zou men iets meer te weten willen komen over de meevoering van korrels in de waterbeweging, dan zal men er iets aan moeten proberen te rekenen.

Eerst zal aandacht worden geschonken aan de korrelbeweging onder invloed van de waterbeweging.

Vervolgens zal aan de hand van de waterbeweging in een wervel de mogelijkheid van zandvangen in een wervel worden onderzocht op basis van door Nielsen gegeven berekeningen.

3.3.2 Korrelbewegingen

Een korrel zal in het algemeen pas in beweging komen als de externe krachten op de korrel groter zijn dan de weerstandskrachten ten gevolge van het bed. Is een korrel echter in suspensie, dat wil zeggen vrij van andere korrels volledig omgeven door water, dan zal de beweging van een korrel afhankelijk zijn van een tweetal zaken:

- de valsnelheid van het deeltje,
- de waterbeweging.

De valsnelheid w is voor stilstaand water redelijk goed bekend. Fig. 14b geeft het verband tussen de korreldiameter en de valsnelheid zoals dat voor ons van toepassing is.

Uitgaande van een enkele korrelgrootte, met een bekende waarde voor de valsnelheid W in stilstaand water, wordt de snelheid van de korrel \vec{U}_p volledig bepaald door de waterbeweging \vec{U} .

In geval van een onversnelde waterbeweging is de snelheid van de korrel (particle) samengesteld uit:

$$\vec{U}_p = \vec{W} + \vec{U}. \quad (3.2)$$

Is er sprake van versnellingen dan moet een extra term worden toegevoegd, omdat de korrel de waterbeweging niet exact kan volgen (traagheid):

$$\vec{U}_p = \vec{W} + \vec{U} + \vec{V}. \quad (3.3)$$

Uitgaande van een algemene bewegingsvergelijking kan \vec{V} worden bepaald. In Appendix II-a is dit nader uitgewerkt.

Als resultaat vinden we voor het geval van kleine korrel-Reynoldswaarden (Stokes-gebied):

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = - \left(\frac{s-1}{s+C_m} \right) \left\{ \frac{d\vec{U}}{dt} + \frac{g}{w} (\vec{W} + \vec{V}) - \vec{g} \right\}. \quad (3.4)$$

Uit deze vergelijking kan door lineaire benadering \vec{V} worden afgeschat, hetgeen resultaten levert als gegeven in Appendix II-b.

In eerste orde benadering vinden we, met $\alpha = (s-1/s+C_m)$:

$$\begin{aligned} \frac{dV_x^{(1)}}{dt} &= - \alpha \left\{ \frac{dU_x}{dt} + \frac{g}{w} \cdot V_x^{(1)} \right\}, \\ \frac{dV_z^{(1)}}{dt} &= - \alpha \left\{ \frac{dU_z}{dt} + \frac{g}{w} \cdot V_z^{(1)} \right\}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Als de versnellingen van de waterbeweging klein zijn ten opzichte van de versnelling van de zwaartekracht, d.w.z. $|du/dt| < g$, dan geldt in goede benadering:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = - \alpha \cdot \frac{g}{w} \cdot \vec{V}, \quad (3.6)$$

zodat:

$$\vec{V}(t) = \vec{V}(t_0) \exp\left(-\frac{\alpha g}{w} \cdot (t-t_0)\right). \quad (3.7)$$

De tijdschaal $w/\alpha g$ geeft aan hoe snel de versnellingen door korrels gevolgd kunnen worden. Is de aanpassing langzaam dan zal er terdege rekening mee moeten worden gehouden. Een snelle aanpassing betekent echter dat er slechts minimaal wordt afgeweken van het simpele verband zonder \vec{V} . (Vgl. 3.2)

Bij kleine zandkorreltjes is de tijdschaal van de faseverschuiving in de orde van 10^{-3} s, zodat de simpele benadering al heel goed zou kunnen voldoen, dus:

$$\vec{U}_p = \vec{U} + \vec{W}. \quad (3.2)$$

Samenvattend is de bovenstaande vergelijking goed bruikbaar om het gedrag van zandkorrels in een waterbeweging te onderzoeken.

Het inbrengen van de traagheid en het aftasten van het effect ervan op de korrelbeweging kan worden afgeschat met de eerste orde benadering. (Vgl. 3.5)

3.3.3 Wervels

Een beschrijving van de waterbeweging boven een geribbeld zandbed is zeer moeilijk (Longuet-Higgins 1981). Duidelijk lijkt, dat korrels met wervels mee bewegen. Een eerste stap kan dus zijn de beschrijving van het snelheidsveld in een wervel.

Het snelheidsveld in een stilstaande stationair ronddraaiende wervel (standaard wervel) wordt weergegeven door:

$$\vec{U} \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} = \Omega \cdot \begin{pmatrix} -z \\ x \end{pmatrix}, \quad (3.8)$$

of wel:

$$\begin{aligned} U_x(t) &= -\Omega \cdot r \cdot \sin \omega t, \\ U_z(t) &= \Omega \cdot r \cdot \cos \omega t, \end{aligned} \quad (3.9)$$

waarin:

(0,0) = hart van de wervel,

Ω = hoekfrequentie.

In deze eenvoudige beschrijving neemt de snelheid in de wervel evenredig toe met de straal.

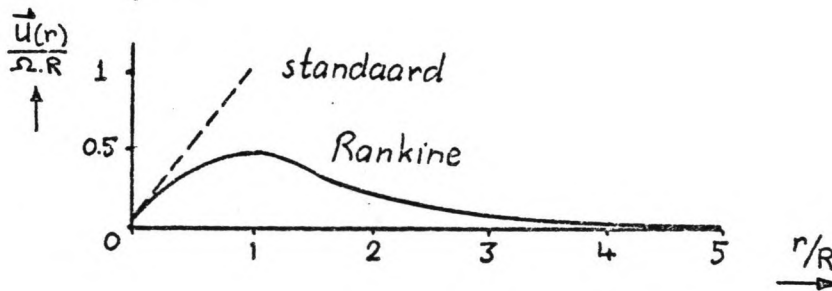
$$|\vec{U}(r)| = \Omega \cdot r. \quad (3.10)$$

Een reëler beeld geeft de zogenaamde Rankine-wervel:

$$\vec{U} \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} = \frac{\Omega}{1+(r/R)^2} \cdot \begin{pmatrix} -z \\ x \end{pmatrix}. \quad (3.11)$$

Hiervoor geldt:

$$|\vec{U}(r)| = \frac{\Omega}{1+(r/R)^2} \cdot r. \quad (3.12)$$



De standaardwervel lijkt goed bruikbaar om het effect ervan af te schatten. In het hart ervan is de snelheidsverdeling nagenoeg gelijk aan die van de Rankinewervel.

3.3.4 Korrelbeweging in een wervel

Combinatie van de beide vorige paragrafen geeft een beschrijving van de beweging van een korrel in een wervel.

Ga eerst uit van de aanname dat de korrelbeweging voldoende wordt weergegeven door:

$$\vec{U}_p = \vec{U} + \vec{W}. \quad (3.2)$$

Fig. 15 geeft een grafische voorstelling van een aantal korrelbanen in respectievelijk een standaard- en een Rankinewervel.

Beschouwing van de standaardwervel (15a) laat zien dat korrels zich bewegen in cirkelvormige banen rond een punt waarop de valsnelheid in evenwicht is met de opwaartse snelheid in een wervel:

$$(x_0, 0) \text{ met } \Omega \cdot x_0 = w \rightarrow x_0 = \frac{w}{\Omega}. \quad (3.13)$$

In Appendix III-a is dit nader uitgewerkt.

Korrels kunnen blijkbaar in een wervel worden opgenomen waarbij de beschreven korrelbanen in de wervel bestaan uit een verzameling cirkelbanen met willekeurige straal R , maar met een van de korrelgrootte afhankelijk centrum $(x_0, 0)$. In geval van een verzameling korrelgrootten zal er dus ook spreiding zijn in het centrum waarom de verschillende korrels draaien.

Concluderend lijkt het er op dat elk soort zand in een wervel gevangen kan worden, waarbij alle afzonderlijke korrels cirkelvormige banen beschrijven rond een punt in het opgaande deel van de wervel.

In geval van de Rankinewervel (Fig. 15b) vertonen de banen in het hart van de wervel gelijkenis met die van de standaardwervel, namelijk ook cirkelvormig. Appendix III-b laat zien dat de korrels omhoog kunnen bewegen in het gebied binnen de gestippelde cirkel.

Ook is duidelijk dat het beeld van de korrelbanen volledig symmetrisch moet zijn ten opzichte van de x -as. Bij een Rankinewervel kunnen op dezelfde manier korrels worden gevangen mits dit gebeurt ergens nabij het hart van de wervel. De beschreven korrelbanen worden als gevolg van de snelheidsverdeling enigszins ei-vormig (Nielsen 1982).

Een wervel kan dus een verzameling korrelgrootten (zandmengsel) in zich opnemen in het opgaande deel van de wervel, waarbij de korrels zich bewegen in cirkel- tot ei-vormige banen om een van de korreldiameter afhankelijk centrum.

Van groot belang is de hoeveelheid sediment die opgenomen kan worden, verder aangeduid met L_v (vortex load).

Afschatting van de afhankelijkheid van de waterbeweging is nogal moeilijk, zodat slechts een indicatie gegeven zal worden.

Uit de in Appendix II-b gegeven afschatting volgt dat de ruimte voor de opname van korrels sterk toeneemt met de snelheid:

$$\text{opp} \approx (\Omega \cdot R)^2. \quad (3.14)$$

Met: $\Omega \sim U_0 / r_w$ en $R \sim r_w$, met r_w = wervelstraal,

vinden we:

$$\text{opp} \approx \left(\frac{U_0}{r_w} r_w \right)^2 \sim U_0^2. \quad (3.15)$$

De vortex load L_v zal dus sterk toenemen met de snelheid.

Rest nog de invloed van het weglaten van de derde term, dus nu:

$$\vec{U}_p = \vec{U} + \vec{W} + \vec{V}. \quad (3.3)$$

Bekijkt men daartoe de standaardwervel (identiek aan het hart van een Rankine-wervel) dan kan \vec{V} worden afgeschat op basis van de in Par. 3.3.2 gegeven eerste orde benadering. (Vgl. 3.5)

In Appendix III-c is de uitwerking gegeven resulterend in:

$$\vec{V} \approx \frac{\Omega^2 \cdot w \cdot R}{g} \begin{pmatrix} \cos \Omega t \\ \sin \Omega t \end{pmatrix}. \quad (3.16)$$

Hieruit volgt dat blijkbaar geldt (Appendix III-c):

$$R(t) = R(t=0) \cdot \exp\left(-\frac{t-t_0}{t_t}\right), \quad (3.17)$$

$$\text{waarin: } t_t = \frac{g}{\Omega^2 \cdot w}.$$

Het effect van het niet kunnen volgen van de versnellingen door de korrels, is dat de korrelbanen steeds groter worden. De tijd t_t is hierbij de tijdschaal waarover de straal van een korrelbaan met een factor e toeneemt.

Een interessante verhouding is t_t/T . Deze zegt namelijk iets over de mate waarin korrels met de wervels mee omhoog gevoerd kunnen worden.

Een relatief grote waarde van t_t betekent dat de korrelbanen slechts langzaam groter worden en dat de korrels derhalve langer in de omhoog bewegende wervel opgenomen blijven.

Een mogelijk verband met de afnamelengte r_c (Par. 3.5.3) lijkt niet ondenkbaar:

$$r_c \propto t_t/T. \quad (3.18)$$

Het verder uitwerken van deze verhouding levert, met de aanname dat de snelheden in de wervel van de orde van de ongestoorde stroom zijn (Tunsdall en Inman 1975):

$$\begin{aligned}\Omega &\sim U_0/r_w, \\ r_w &\sim \eta, \\ \eta &\sim x_0 \sim U_0 T.\end{aligned}$$

Zodat uiteindelijk geldt:

$$t_t/T = \frac{g}{\Omega^2 \cdot w \cdot T} \sim \frac{U_0^2 \cdot T^2}{U_0^2 \cdot w \cdot T} \sim \frac{T}{w} \quad (3.19)$$

Blijkens deze afschatting zou de afnamelengte r_c in benadering recht evenredig zijn met de periode T en omgekeerd evenredig met de valsnelheid van het gesuspendeerde sediment.

Langere perioden volgen niet meer de evenredigheid met de periode. De ribbelhoogte is niet meer recht evenredig met de periode maar neemt minder sterk toe, zodat dit ook voor de afnamelengte zou moeten gelden.

Opvallend is ook dat de op deze wijze afgeschatte afnamelengte onafhankelijk is van de snelheidsamplitude U_0 .

Voor de resultaten betreffende de afnamelengte kan voor wat betreft de afhankelijkheid van de waterbeweging verwezen worden naar Par. 5.8. De invloed van de valsnelheid komt in Par. 5.12 aan de orde.

Aangezien er een verband bestaat tussen de bereedeneerde afnamelengte en de ribbelhoogte lijkt het zinvol om deze verhouding op dezelfde wijze af te schatten:

$$r_c/\eta \sim \frac{t_t/T}{\eta} \quad (3.20)$$

Met $\eta \sim x_0 \sim U_0 T$:

$$r_c/\eta \sim \frac{T}{w \cdot U_0 T} \sim \frac{1}{w \cdot U_0} \quad (3.21)$$

De verhouding is omgekeerd evenredig met de snelheidsamplitude U_0 en de valsnelheid. De periode-invloed is niet aanwezig. Voor de resultaten wordt verwezen naar Par. 5.8.6.

3.3.5 Concentratie als kans

Een andere kijk op concentraties is het beschouwen van een aanwezige concentratie als een kans op het aanwezig zijn van sedimentdeeltjes.

In het algemeen geldt dat de tijdfractie waarin op een bepaald niveau korrels aanwezig zijn (τ) in verhouding tot een tijdsinterval (T), waarover men kijkt, een maat is voor de concentratie (C) op het beschouwde niveau:

$$C = \frac{\tau}{T}. \quad (3.22)$$

Ter verduidelijking van dit principe eerst de twee randgevallen.

Als op een bepaald niveau gedurende een zeker interval T geen enkele keer een korrel voorkomt is de tijdfractie $\tau=0$ zodat de concentratie nul is.

Het andere uiterste treedt op bij maximale concentratie als $\tau=T$.

Een ander aspect is dat men bij deze benadering voldoende heeft aan een enkele korrel, dit in tegenstelling tot het oorspronkelijk beeld.

Hiervoor moet wel worden voldaan aan de veronderstelling dat er geen onderlinge beïnvloeding van de korrels aanwezig is.

Omdat in de bodemlaag de beweging van de waterwervels bepalend kan worden geacht en de korrelsnelheden qua richting goed gecorreleerd zijn, lijkt deze veronderstelling redelijk.

In principe kan bij een gegeven waterbeweging de plaats van een korrel als functie van de tijd worden berekend. Het percentage van de tijd waarop de korrel zich op een bepaald niveau bevindt is een maat voor de concentratie.

Omdat de concentratie op deze wijze niet absoluut bepaald kan worden maar wel relatief, kan de concentratieverdeling worden afgeschat:

$$\frac{\tau(z)}{T} = \text{concentratieverdeling } C(z).$$

In Fig. 16 is dit voor enkele korrelbewegingen uitgewerkt.

Hierin staan achtereenvolgens:

- de korrelbeweging,
- plaatshoogte z als functie van t ,

- de fractie $\Delta\tau$ waarbinnen de korrel zich op een niveau-interval Δz bevindt,
- de sommatie van de fracties tot τ/T per niveau-interval,
- het concentratieverloop zoals dit afgeleid is uit de vorige stap.

Het principe is eenvoudig. Een grillig verloop van de korrelbaan als gevolg van een ingewikkelde waterbeweging levert, blijkens het derde voorbeeld, geen problemen op. Het lijkt denkbaar dat, op basis van een goed beschreven waterbeweging boven een geribbeld zandbed, men op analoge wijze de concentratieverdeling in de bodemlaag zou kunnen berekenen. Het random inpluggen van een korrel in de waterbeweging en het volgen ervan over meerdere perioden levert informatie op over de concentratiegradiënt in de bodemlaag.

3.4 Concentratiemetingen

3.4.1 Algemeen

Het uitvoeren van metingen aan concentraties vlak boven de bodem kent een relatief korte geschiedenis.

Het probleem zit meestal in de praktische uitvoering van een meting.

Het meten zelf lijkt nog wel te doen, maar bij een herhaling van de meting vindt men veelal weer een ander resultaat. De wijze waarop in ons geval de concentraties bepaald zijn is gebaseerd op de ontwikkeling van het concentratiemeten zoals deze in de komende paragrafen aan de orde zal komen.

Reproducerende waarden zijn pas te vinden door uitvoeren van een tijds- en bedmiddeling, een conclusie die op basis van het schema van Par. 2.1 voor de hand ligt.

3.4.2 Momentane lokale concentraties

Bekijkt men de lokale sedimentconcentraties in een bepaald punt boven een ribbel als functie van de tijd, dan zou men kunnen verwachten dat bij een stabiel zandbed en bij een exact reproducerende waterbeweging een duidelijk herhalend patroon van de lokale concentratie als functie van de tijd aanwezig is.

Uit proeven blijkt dat dit patroon niet zo duidelijk is en dat zelfs voor opeenvolgende perioden grote verschillen kunnen optreden, zie Fig. 18 (boven).

Bekijkt men bijvoorbeeld de met een optische concentratimeter (OPCON) bepaalde concentraties op 10 mm boven een ribbeltop van een stabiel 2-dimensionaal bed dan vindt men concentraties als gegeven in Fig. 17.

Redenerend zou men kunnen verwachten dat:

- Eigenlijk alles symmetrisch zou moeten zijn vanwege de symmetrie van de meting ten opzichte van waterbeweging en bodemgeometrie.
- De concentraties moeten variëren met de halve snelheidsperiode, zodat het aantal pieken per hele periode even zou moeten zijn.
- De corresponderende pieken even hoog zouden moeten zijn.

De figuur laat zien dat een en ander nauwelijks het geval is. De concentraties vertonen een zeer grote scatter met afwijkingen ten opzichte van het gemiddelde van 40 tot 80%.

In geval van een instabiel 3-dimensionaal bed bedraagt de scatter zelfs 100 tot 200%.

De oorzaak van de aanwezige scatter is onder andere te vinden in:

- statistische fluctuaties (random)
- kleine variaties in de waterbeweging in de buurt van de meetpositie
- idem voor de bedgeometrie.

Hierbij is een grote correlatie aanwezig tussen de twee laatstgenoemde factoren.

Hoger in de verticaal is de optredende scatter kleiner door afname van de invloed van het bed.

Op lagere niveaus lijkt de invloed van de laatste twee overheersend (Bosman, M 1695-2).

Lokale, momentane concentraties zijn dus zeer gevoelig voor de omgevingscondities, zowel strikt lokaal als in de onmiddellijke omgeving.

Een bedgeometrie die iets afwijkt zal aanleiding geven tot kleine verschillen in de waterbeweging en vice versa, met als resultaat grote invloed op de hoeveelheid suspensie.

3.4.3 Tijdsgemiddelde lokale concentraties

De momentane concentraties vertonen een grote random scatter die door middeling over de tijd verdwijnt.

Dan rijst de vraag over welke tijd men moet middelen (hoeveel perioden). Te weinig perioden geeft nog een te grote spreiding, maar te veel perioden geeft de mogelijkheid dat het bed tussentijds essentieel gaat veranderen. Afweging resulteert in een aantal perioden waarover moet worden gemiddeld dat ligt in de orde van 100 (Bosman, M 1695-II en M 1875).

Fig. 18 laat zien dat ook de op deze wijze gemiddelde concentratie nog flink varieert. De bovenste afbeelding geeft de momentane waarden. De figuren daaronder geven een middeling over respectievelijk 1 en 3 minuten.

3.4.4 Bedgemiddelde concentraties

Er is een sterke afhankelijkheid van de toevallige positie van het meetpunt ten opzichte van de naburige bedgeometrie. De ene ribbel is net weer even anders en levert bij kleine verschillen aanzienlijke veranderingen in de concentraties op. Bovendien is een bed voortdurend aan het veranderen.

Een bedgemiddelde waarde zal dus beter reproduceren en concentraties opleveren die gerelateerd zijn aan het gemiddelde bed.

3.4.5 Tijds- en bedgemiddelde concentraties

Als de randominvloeden van zowel tijd als bed voldoende zijn uitgemiddeld moeten bij gelijke hydraulische omstandigheden de concentraties van onafhankelijk van elkaar uitgevoerde proeven reproduceren.

Bedmiddeling dient te gebeuren in de richting van de waterbeweging, loodrecht op de ribbelvormen, over een aantal ribbels.

Op deze wijze wordt de gemeten concentratie gerelateerd aan een specifiek bed.

In de rest van dit verslag wordt met concentratie steeds tijds- en bedgemiddelde waarde bedoeld:

$\bar{C}(z)$ = tijds- en bedgemiddelde concentratie.

Gemakshalve wordt de dubbele overstreping weggelaten.

Dat concentraties pas karakteristiek zijn voor een bepaalde hydraulische omstandigheid na uitvoering van een tijds- en bedmiddeling ligt eigenlijk voor de hand. Met het schema van Par. 2.1 in het achterhoofd, zijn ribbelgeometrie en suspensie twee resultaten van één proces. Ribbelgeometrie en suspensievorming zijn zeer sterk gekoppeld. Een karakteristieke ribbelgeometrie wordt gevonden door middeling over meerdere ribbelvormen. Hierbij gebruikt met in feite ook een tijd- en bedmiddeling.

De voor de hand liggende conclusie is dat ook voor het andere resultaat van het bodembegeuren, namelijk de concentraties, tijds- en bedmiddeling een voorwaarde is voor het komen tot karakteristieke, reproducerende waarden.

3.5 Concentratieverloop

3.5.1 Beschrijvend verband

De concentraties in de bodemlaag zullen worden getoetst aan het experimentele model volgens Bosman:

$$\frac{dC}{dz} = -\gamma_1 \cdot C, \text{ met } \gamma_1 \text{ onafhankelijk van } z. \quad (3.23)$$

Uitgewerkt levert dit:

$$\ln C = -\gamma_1 \cdot z + \text{constante}. \quad (3.24)$$

Stel: constante $\equiv \ln C_0$, dan:

$$C(z) = C_0 \cdot \exp(-\gamma_1 \cdot z). \quad (3.25)$$

Fig. 19a geeft hiervan een voorstelling.

C_0 is de geëxtrapoleerde waarden van het concentratieverloop op het vlakbed-niveau in kg/m^3 en γ_1 is de relatieve concentratiegradiënt in m^{-1} .

Een hier gebruikte maat voor de beschrijving van de helling van het concentratieverloop is de reciproke waarde van γ_1 , aangeduid met r_c .

Het gehanteerde verband is dus:

$$C(z) \equiv C_0 \cdot \exp\left(\frac{-z}{r_c}\right). \quad (3.26)$$

Het gebruik van r_c in plaats van γ_1 heeft enkele voordelen:

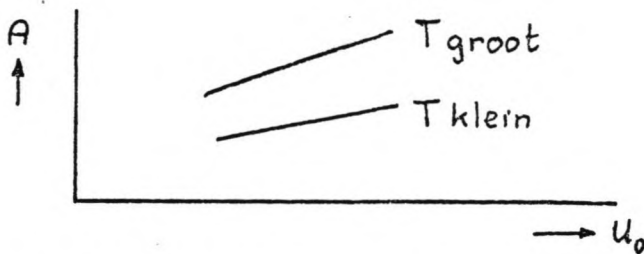
- $\dim[r_c] = \text{meters}$ en dus veel beter te hanteren,
- r_c lijkt qua grootte overeenkomst te vertonen met de ribbelhoogte η en de bedruwheid r ,
- r_c zegt meer direct iets over de verspreiding van de concentraties in de verticaal.

Het concentratieverloop in de bodemlaag wordt dus eenduidig vastgelegd door twee parameters, te weten:

- C_0 - de vlak-bij-bedconcentratie of kortweg bodemconcentratie (in kg/m^3),
- r_c - de lengteschaal van de relatieve concentratiegradiënt (in m), verder afnamelengte genoemd.

Over de dikte van de bodemlaag is op voorhand weinig te zeggen.

Wel is aannemelijk dat bij toenemende waterbeweging (U_0 groter) eveneens de dikte van de bodemlaag zal toenemen.



Het afgeschatte gedrag zal waarschijnlijk zijn zoals aangegeven in de schets. De ontwikkeling van de bodemlaagdikte lijkt iets te maken te hebben met de ribbelhoogte. Beiden zijn immers bepaald door eenzelfde mechanisme. Het nader bekijken van de verhouding A/η lijkt derhalve zinvol.

In Fig. 19b is op schematische wijze nog eens aangegeven op welke wijze de doelstelling van het onderzoek vorm heeft gekregen.

Samenvattend moet dus bepaald worden:

$$C_0, r_c = F(U_0, T). \quad (3.27)$$

De relaties in het bodemgebeuren zijn aangegeven met een vraagteken.

3.5.2 Bodemconcentratie: C_0

De bodemconcentratie is een parameter die gebruikt is om het concentratieverloop vast te leggen en is te zien als een referentieconcentratie op het niveau $z=0$.

Enig inzicht over het verloop van C_0 als functie van de waterbeweging kan worden gekregen door de extremen van het concentratieverloop te beschouwen, dat wil zeggen:

- geen zandbeweging,
- heftige bewegingen (sheetflow).

In eerste geval is er nog geen zand in beweging gekomen en dus zeker geen zand gesuspenseerd in de verticaal. Van een concentratieverloop is nog geen sprake en dus is C_0 per definitie gelijk aan nul.

Bij opvoeren van de watersnelheid U_0 tot voorbij U_i zal er wel zand in de verticaal aanwezig zijn en dus zal C_0 een waarde krijgen.

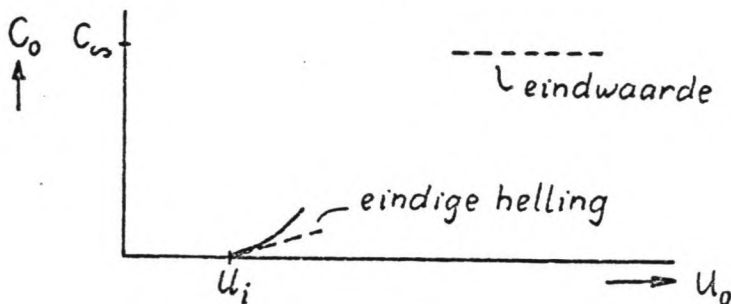
De toename van de concentratie is in ieder geval begrensd zodat dC_0/dU_0 positief en eindig verondersteld kan worden.

(Opgemerkt moet worden dat er ook concentraties bestaan voor $U_0 < U_i$. Dit is mogelijk door het bij geribbeld bed laten afnemen van de watersnelheden!)

Is de waterbeweging erg heftig (sheetflow) dan zal de bodemconcentratie beperkt zijn tot een waarde welke gerelateerd is aan het sediment in het zandbed zelf ($C_0 \approx \rho_b \approx 1600 \text{ kg/m}^3$).

Het ligt voor de hand te veronderstellen dat deze eindwaarde geleidelijk zal worden bereikt, m.a.w. $dC_0/dU_0 \rightarrow 0$ voor grote U_0 .

Het aldus afgeschatte C_0 -gedrag is hieronder nog eens weergegeven.



Opgemerkt moet worden dat het niveau $z=0$ betrekking heeft op het niveau van het vlakke bed zonder waterbeweging en niet een gemiddeld geribbeld bed tijdens de waterbeweging. Het in de verticaal aanwezige sediment geeft immers een verlaging van het bed afhankelijk van de hoeveelheid sediment dat in suspensie is (zie Par. 3.5.4).

De bodemconcentratie C_0 zal veel te maken hebben met de vortex load L_v (Par. 3.3.4).

Het onderlinge verband tussen de bedgemiddelde bodemconcentratie en de hoeveelheid sediment in een enkele wervel zou kunnen zijn:

$$C_0 \sim L_v / \lambda. \quad (3.28)$$

Hierin is λ (ribbellengte) de onderlinge afstand tussen de wervels. De resultaten voor de bodemconcentraties zijn te vinden in Par. 5.9.

3.5.3 Concentratieafnamelengte: r_c

De concentratieafnamelengte, kortweg afnamelengte, r_c , is maatgevend voor de steilheid van het concentratieverloop in de bodemlaag.

De waarde ervan komt overeen met de afstand waarover de concentratie met een factor e is gereduceerd (Fig. 19a).

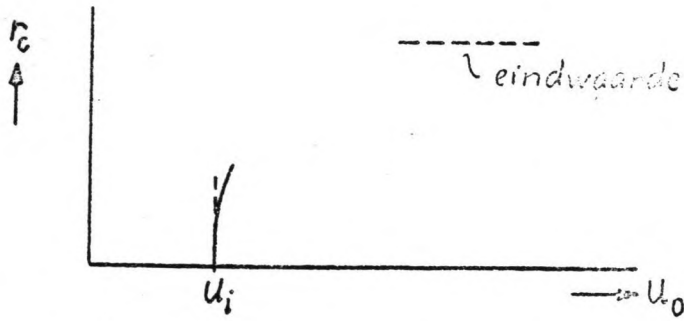
De waarde van r_c is in de bodemlaag onafhankelijk van de hoogte.

Maakt men een afschatting van het verloop van r_c als functie van U_0 dan zal er onder het begin van beweging geen suspensie zijn (dus $r_c=0$).

Passeren van U_i geeft een concentratieverloop dat zeer snel in de hoogte afneemt, met andere woorden $r_c \rightarrow 0$ voor $U_0 \rightarrow U_i$. Naar verwachting zal Δr_c ten opzichte van ΔU_0 relatief groot zijn zodat ook geldt:

$$dr_c / dU_0 \rightarrow +\infty \text{ voor } U_0 \rightarrow U_i.$$

Omdat de concentratie naar boven toe altijd afneemt (in evenwichtssituaties), is r_c begrensd bij hogere snelheden. Het bereiken van deze maximumwaarde zal waarschijnlijk geleidelijk gebeuren, zodat $dr_c / dU_0 \rightarrow 0$ voor grote U_0 .



Het afgeschatte gedrag van r_c is gegeven in de bovenstaande schets.

De afschatting op basis van de korrelbeweging in een wervel (Par. 3.3.4) leverde al een afhankelijkheid met de periode en de valsnelheid.

In Par. 5.8 zijn de resultaten gegeven.

In plaats van r_c zou men kunnen overwegen een $r_{\frac{1}{2}}$ te gebruiken, de concentratiehalveringslengte, dat is de afstand waarover de concentratie halveert.

De onderlinge betrekking is:

$$r_{\frac{1}{2}} = 0,69 r_c \quad (3.29)$$

Het voordeel is dat de betekenis van de parameter duidelijker is.

3.5.4 Gesuspenderde load: L_s

Een parameter die tevens in het onderzoek meegenomen is, is de zogenaamde "total load" L_s . Dit is een maat voor de totale hoeveelheid opgewoelde sediment en per definitie gelijk aan het oppervlak van het concentratieprofiel. Maakt men gebruik van de in de transportverdelingsafschatting geïntroduceerde parameters (Par. 1.3):

$$C(z) = \begin{cases} C_0 \cdot \exp(-z/r_{cl}) & \text{voor } z < A, \\ C_0 \cdot \exp(-A/r_{cl}) \cdot \exp(-(z-A)/r_{cu}) & \text{voor } z > A, \end{cases} \quad (3.30)$$

dan:

$$\begin{aligned} L_s &= \int_0^A C_0 \cdot \exp\left(-\frac{z}{r_{cl}}\right) dz + \int_A^h C_0 \cdot \exp\left(-\frac{A}{r_{cl}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{(z-A)}{r_{cu}}\right) dz = \\ &= C_0 \cdot r_{cl} \left[1 - \exp\left(-\frac{A}{r_{cl}}\right)\right] + C_0 \cdot \exp\left(-\frac{A}{r_{cl}}\right) \cdot r_{cu} \left(1 - \exp\left(-\frac{(h-A)}{r_{cu}}\right)\right). \end{aligned} \quad (3.31)$$

Doorgaans: $\frac{h-A}{r_{cu}} \gg 1$, zodat:

$$\begin{aligned} L_s &\approx C_0 \cdot r_{cl} \left[1 - \exp\left(-\frac{A}{r_{cl}}\right) + \frac{r_{cu}}{r_{cl}} \cdot \exp\left(-\frac{A}{r_{cl}}\right) \right] \\ &= C_0 \cdot r_{cl} \left[1 + \left(\frac{r_{cu}}{r_{cl}} - 1\right) \exp\left(-\frac{A}{r_{cl}}\right) \right]. \end{aligned} \quad (3.32)$$

Daar $r_{cu}/r_{cl} \approx 10$ en $A/r_{cl} \approx 4$:

$$\left(\frac{r_{cu}}{r_{cl}} - 1\right) \exp(-A/r_{cl}) \approx 0,150. \quad (3.33)$$

De totale hoeveelheid opgewoeld sediment is dus goed te benaderen door:

$$L_s = C_0 \cdot r_c \quad (\text{kg/m}^2). \quad (3.34)$$

De benadering is beter naarmate r_{cl} en r_{cu} meer gelijk zijn en/of A groter is.

Maakt men een afschatting van het verloop van L_s als functie van U_0 , dan vindt men hetzelfde verloop voor L_s als voor C_0 .

De resultaten betreffende de op deze manier berekende hoeveelheid gesuspendeerd sediment zijn gegeven in Par. 5.10.

Is er veel sediment in suspensie dan zal het gemiddeld bedniveau onder het als referentievlak aangenomen vlakbedniveau liggen. Bij $L_s = 8 \text{ kg/m}^2$ vindt men bijvoorbeeld een verlaging van 0,5 cm ($\rho_b = 1600 \text{ kg/m}^3$).

4. Uitvoering proeven

4.1 Algemeen

De wijze waarop de doelstelling van het onderzoek is gerealiseerd zal in de volgende paragrafen nader worden toegelicht.

De gebruikte apparatuur valt uiteen in twee onderdelen, te weten:

- de golftunnel
- het afzuigstelsel

De golftunnel is hierbij het apparaat dat zorgt voor de oscillerende waterbeweging boven het zandbed.

Het afzuigstelsel zorgt voor het meten van de concentraties.

4.2 Variabelen

Het huidige onderzoek beperkt zich tot slechts één zandsort en een zuiver sinusvormige, horizontale waterbeweging. De invloed van de waterbeweging op de concentraties is zeer groot en een goede beschrijving er van is dus belangrijk.

De waterbeweging is te karakteriseren volgens:

$$U(t) = U_0 \cdot \cos \omega t, \quad (4.1)$$

waarin:

$$\begin{aligned} U_0 &= \text{snelheidsamplitude,} \\ \omega &= 2\pi/T \text{ met } T = \text{periode.} \end{aligned}$$

Een combinatie (T, U_0) staat voor een bepaalde hydraulische omstandigheid.

De uitwijking van de waterbeweging is gegeven door:

$$x(t) = x_0 \cdot \sin \omega t, \quad (4.2)$$

$$\text{met } x_0 = \frac{U_0 \cdot T}{2\pi} = \text{verplaatsingsamplitude in m.}$$

Voor het zandbed is ongezeefd duinzand gebruikt zoals dit wordt gevonden langs de Nederlandse kust.

Een representatieve zeefkromme is gegeven in Fig. 20.

De karakteristieke diameters zijn:

$$D_{10} = 0,153 \text{ mm},$$

$$D_{50} = 0,218 \text{ mm},$$

$$D_{90} = 0,310 \text{ mm}.$$

De D_{10} is hierbij de zeefdiameter waardoor nog 10% van de massa passeert.

De massadichtheid is niet experimenteel bepaald maar bedraagt (uit literatuur):

$$\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3.$$

Verdere constanten zijn:

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ (s = 2,65),}$$

$$\nu \approx 1.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2,$$

$$\text{SF} = 0,7 \text{ (shape factor).}$$

Een begrenzing voor de snelheidsamplitude bij een vaste periode is gegeven in Fig. 7.

Bij lage snelheden is er geen sediment in beweging en is er dus geen concentratie.

Bij grote snelheden worden de ribbelvormen zo woest en groot dat er niet meer representatief gemeten kan worden. Bij sheetflow is de concentratie in een dunne laag heel erg groot en eveneens niet representatief te meten.

4.3 Golftunnel

4.3.1 Algemeen

Bij de uitvoering van de proeven is gebruik gemaakt van de golftunnel.

De tunnel blijkt geschikt voor weergave van het wervel-ribbelgebied, o.a. vanwege de gemakkelijke faciliteit (geringe omvang, overdrukafzuiging, bedvlakking,...) en de goed gedefinieerde waterbeweging.

4.3.2 Beschrijving

Het apparaat bestaat uit een tunnelbuis waardoor water heen en weer kan stromen. Onder in de buis, dus op de bodem, bevindt zich een zandbed. De waterbeweging kan worden opgelegd door de periode (T) en de snelheidsamplitude (U_0).

Fig. 21a geeft de schematische opzet van de golftunnel. De meetsectie is te zien in Fig. 21b. De afmetingen zijn inwendig 0,30 x 0,40 m met daaronder een 0,20 m dik zandbed.

Via een hydraulisch servosysteem wordt olie in de membraanketel heen en weer geperst. Via een membraan volgt het water in de watersectie de opgelegde beweging. Door zuigerbewegingen wordt het water in de meetsectie op de gewenste wijze oscillerend heen en weer bewogen.

Eventueel kan via een circulatiepomp ook nog een netto debiet worden toegevoegd.

De hoeveelheid getransporteerd sediment kan bepaald worden door aftappen uit de aan weerszijden van het zandbed gemonteerde zandvangen.

Omdat het in deze proeven gaat om concentraties en niet om transporten is het zandbed over de maximale lengte van 4,06 m doorgetrokken.

Aan weerszijden van de meetsectie bevinden zich aanstroomsecties bestaande uit stalen roosters en pijpen om wervelvorming tegen te gaan en de stroom te geleiden.

De golftunnel staat onder overdruk. De reden hiervoor ligt in het feit dat anders als gevolg van door waterbeweging onstane onderdrukken de kans bestaat op implosie.

Een en ander heeft tot gevolg dat de meetsectie bestaat uit een stalen frame met 1,9 cm dikke ruiten aan weerszijden. Aan de bovenzijde is het inwendige van de tunnel bereikbaar via zware stalen luiken.

Fig. 22 geeft een schema van de tunnel met de van belang zijnde elementen.

4.3.3 Snelheidssturing

De snelheid in de tunnel is rechtstreeks afhankelijk van de ingestelde zuigerbeweging. De fout in de zuigerpositie is slechtstienenden van mm's hetgeen betekent dat de snelheid goed te beschrijven is op basis van de zuigerbeweging.

De verhouding zuiger/waterbeweging is echter afhankelijk van het doorstroomprofiel t.p.v. het zandbed. Verschillen in hoogteligging van het bed leveren dus afwijkingen in de snelheid op (3% per cm).

Beter is dus het t.p.v. de meetsectie meten van de optredende snelheden. Dit gebeurt hier met behulp van een Laser-Doppler snelheidsmeter (LDV), die de snelheid meet op 20 cm boven het gemiddeld bed op circa een halve meter (practische beperking) afstand van het "meetverticaaltraject".

De LDV heeft een zeer goede meetnauwkeurigheid (orde 0,005 m/s).

De combinatie (T, U_0) levert de waterbeweging in de ongestoorde stroom boven het zandbed.

4.3.4 Bereik

Beperkt men zich tot de onversmalde doorstroomsectie van 0,30 x 0,40 m, dan kan men de periode en de snelheidsamplitude variëren binnen de in Fig. 23a aangegeven grenzen. Bij kortere perioden wordt U_0 beperkt door de beschikbare kracht en bij langere perioden door de beperkte slaglengte van de zuiger.

Reduceert men de breedte van de tunnel tot 0,04 m dan kunnen bij eenzelfde periode hogere snelheden in de meetsectie bereikt worden, zodat andere (T, U_0) -combinaties mogelijk worden.

In ons geval is alleen gebruik gemaakt van de onversmalde sectie.

4.3.5 Verschillen lopende golf

Er zijn verschillen tussen het tunnelgebeuren en dat onder een lopende golf.

Ten eerste is er een verschil wat betreft de verticale gradiënten. Onder een lopende golf zijn er als gevolg van de orbitaalbeweging snelheden in verticale richting aanwezig. In de tunnel ontbreken die, natuurlijk met uitzondering van de door bedvormen opgewekte wervels.

De indruk bestaat, mede op grond van gedaan onderzoek, dat de concentraties in de onderste regionen nauwelijks bepaald worden door de verticale componenten van de orbitaalbeweging. Enerzijds omdat de orbitaalellipsen steeds vlakker worden naar de bodem toe (Fig. 10). Anderzijds zijn de wervelsnelheden veroorzaakt t.p.v. de bodemribbels vele orden groter dan die welke het gevolg zijn van de verticale orbitaalbeweging.

Een tweede verschil uit zich in het ontbreken van faseverschillen in de horizontale richting.

In de tunnel beweegt het water zich als een blok heen en weer, dus zonder faseverschil.

Onder de lopende golf zijn er in de oscillatierichting wel fase verschillen: een halve golflengte verder is de fase tegengesteld.

Het zandgedrag lijkt toch nauwelijks afwijkingen te vertonen, dit als gevolg van de grote verhouding tussen de golflengte enerzijds en de ribbel- en wervelafmetingen anderzijds. Het zandbed in een bepaald punt onder een lopende golf wordt in de tunnel als het ware getransformeerd in een zandbed over een lengte van 4 m in de tunnel.

Bosman (1983) concludeerde naar aanleiding van een vergelijkend onderzoek dat er geen aanleiding was om te vrezen dat het gebeuren in de tunnel veel verschilde met een lopende golf.

Zowel de bodemgeometrie als de concentraties in de bodemlaag vertoonden geen duidelijke afwijking met het gebeuren onder een golf.

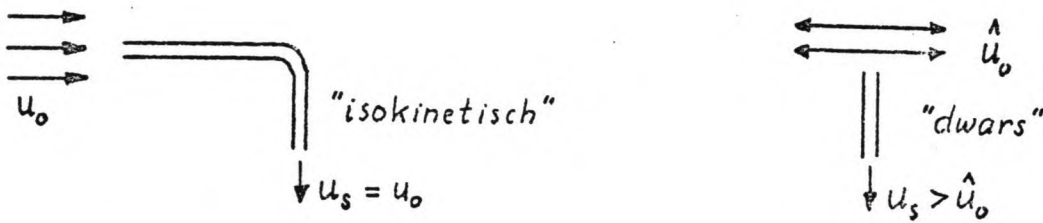
Voorlopig wordt uitgegaan van de veronderstelling dat het bodemgebeuren in de tunnel de werkelijkheid (voldoende) reproduceert.

In een later stadium lijkt meer onderzoek hieromtrent echter wel raadzaam. In Par. 5.6.5 komen we hierop nog terug.

4.4 Afzuigstelsel

4.4.1 Algemeen

Afzuiging is een veel beproefde en uiterst simpele methode ter bepaling van de tijdsgemiddelde concentratie in een permanente stroming. Een pijpje, met niet al te grote afmetingen, wordt in het water gestoken. het afzuigen gebeurt in dezelfde richting en met dezelfde snelheid als van de ongestoorde stroom. Dit zogenaamde isokinetische afzuigen voldoet uitstekend.



4.4.2 Dwarse afzuiging in oscillerende stroom

Om nu op dezelfde manier te werk te gaan bij een oscillerende stroming waarbij de stroomrichting en -snelheid voortdurend veranderen is moeilijk. Het isokinetisch afzuigen vereist moeilijke apparatuur, zeker bij onregelmatige oscillaties, en biedt dus geen soelaas.

Steekt men de vangbuis zomaar in het water dan introduceert men daarmee ongewild maar onvermijdelijk een voorkeur voor het vangen van zand dat zich precies naar de zuigmond toe beweegt, terwijl het zand uit de andere richtingen zich minder gemakkelijk laat vangen.

De hier toegepaste methode van dwarse afzuiging is gebaseerd op het vermijden van deze richtingsgevoeligheid door de zuigbuis dwars op de stroomrichting te plaatsen.

Het spreekt vanzelf dat de afgezogen sedimentconcentratie afwijkt van de werkelijk aanwezige concentratie in de ongestoorde stroom. De mate van afwijking is afhankelijk van parameters die de water- en sedimentbeweging.

De afwijking blijkt sterk afhankelijk van de verhouding tussen de afzuigsnel-

heid (U_s) en de snelheid van de (permanente) stroom (U_0). Bij een verhouding groter dan 1 blijkt het quotiënt afgezogen/werkelijke concentratie nagenoeg constant (Fig. 23b).

Uit testresultaten voor het toegepaste duinzand blijkt dat voor $U_s/U_0 > 1$ geldt (Hulsbergen, 1981):

$$C_s/C = 0,73 \pm 0,03. \quad (4.3)$$

Voor een oscillerende stroming zal, als de snelheid van afzuigen groter is dan de snelheidsamplitude van de waterbeweging, deze verhouding altijd boven de kritieke waarde liggen.

De afzuigsnelheid bij proeven in de golftunnel wordt bepaald door de in de tunnel aanwezige overdruk. Het openen van de afzuigbuis geeft een afzuigsnelheid van ongeveer 3,6 m/s.

Uit vergelijkende proefresultaten van dwarse afzuiging en de met een optische concentratiemeter (OPCON) bepaalde gemiddelde concentraties blijkt dat het dwarse afzuigen ook in oscillerende stromingen dezelfde ijking geeft (Bosman; M 1695-II).

Het gebruikte afzuigstelsel bestaat uit een 10-tal op verschillende hoogte boven het bed geplaatste afzuigmondjes (afzuigkam). Hiermee wordt het concentratieverloop over de verticaal bepaald.

De geringe pijpjesdiameter (3 mm) geeft, mits niet te dicht op elkaar geplaatst, geen onderlinge beïnvloeding.

4.4.3 Tijds- en bedmiddeling

De tijdsduur van de middeling is constant gehouden op ca. 6½ minuut, waarin 10 liter zandwatermengsel wordt afgetapt.

De bedmiddeling wordt gerealiseerd door de afzuigkam over het bed heen en weer te bewegen. Het traject in de richting van de waterbeweging, waarover de afzuigkam beweegt dient minimaal 3 à 4 ribbelafstanden te omvatten en is aangeduid met d_m .

De snelheid van de beweging moet groot zijn t.o.v. de snelheid waarmee het bed

verandert en klein t.o.v. de waterbewegingssnelheid, dus orde 1 cm/s. Meer over de tijds- en bedmiddeling volgt in de paragraaf over de reproduceerbaarheid van concentraties (4.5.2).

4.5 Concentratiemeting

4.5.1 Algemeen

Een enkele meting verloopt als volgt.

Na een volledig geautomatiseerde opstartprocedure is de tunnel gereed voor gebruik. De gewenste periode T en de snelheidsamplitude U_0 kunnen nu worden ingesteld. De uitgangspositie is een volledig vlak bed waarop dan tevens het nul-niveau van de afzuigkam wordt geijkt.

Nadat de concentratiemeter omhooggebracht is, wordt ingegolfd totdat het zandbed (op het oog) stabiel blijft. Deze ingolftijd is sterk afhankelijk van de uiteindelijke bedvorm en de periode van de waterbeweging.

De afzuigkam wordt dan op het laagst mogelijk niveau, d.w.z. vlak boven de ribbeltoppen, gebracht en de horizontale beweging wordt gestart.

Gedurende ongeveer $6\frac{1}{2}$ minuut wordt van alle aftappunten simultaan 10 liter water/zandmengsel afgenomen. Per aftappunt wordt via een meetglas de hoeveelheid sediment bepaald (in cm^3). Via speciaal geijkte bewerkingen wordt dit omgerekend naar een concentratie in kg/m^3 .

Tijdens de proef wordt door opmeting met een duimstok, de gemiddelde ribbel-lengte en -hoogte bepaald.

Het opnieuw vlakken van het bed kan gebeuren door instelling van een kleine U_0 en een korte periode T . Proefondervindelijk werd vastgesteld dat bij zo'n instelling het zandbed wordt geschud en na enkele ogenblikken volledig vlak is.

4.5.2 Reproductie

4.5.2.1 Algemeen

Een ideale situatie voor de concentratiemeting is dat een onafhankelijk uitgevoerde meting bij identieke omstandigheden dezelfde concentraties levert,

m.a.w. reproducerende concentratieverticalen. Dit aspect heeft in het begin van het onderzoek veel tijd in beslag genomen, vandaar dat dit in deze paragraaf uitgebreid aan de orde zal komen.

In het algemeen zijn er twee oorzaken die invloed hebben op de spreiding in een gemeten variabele, te weten:

- spreiding t.g.v. de meetmethode (nauwkeurigheid afzuigmethode e.d.),
- spreiding t.g.v. de random bijdrage in de te meten concentraties (bedgeometrie, etc.).

Het geschikt uitvoeren van een tijds- en bedmiddeling als beschreven in de vorige paragraaf zou bij een betrouwbare meetmethode moeten resulteren in een geringe (d.w.z. aanvaardbare) spreiding.

De nauwkeurigheid van een concentratiemeting kan worden afgeschat door het uitvoeren van N onafhankelijke herhalingen.

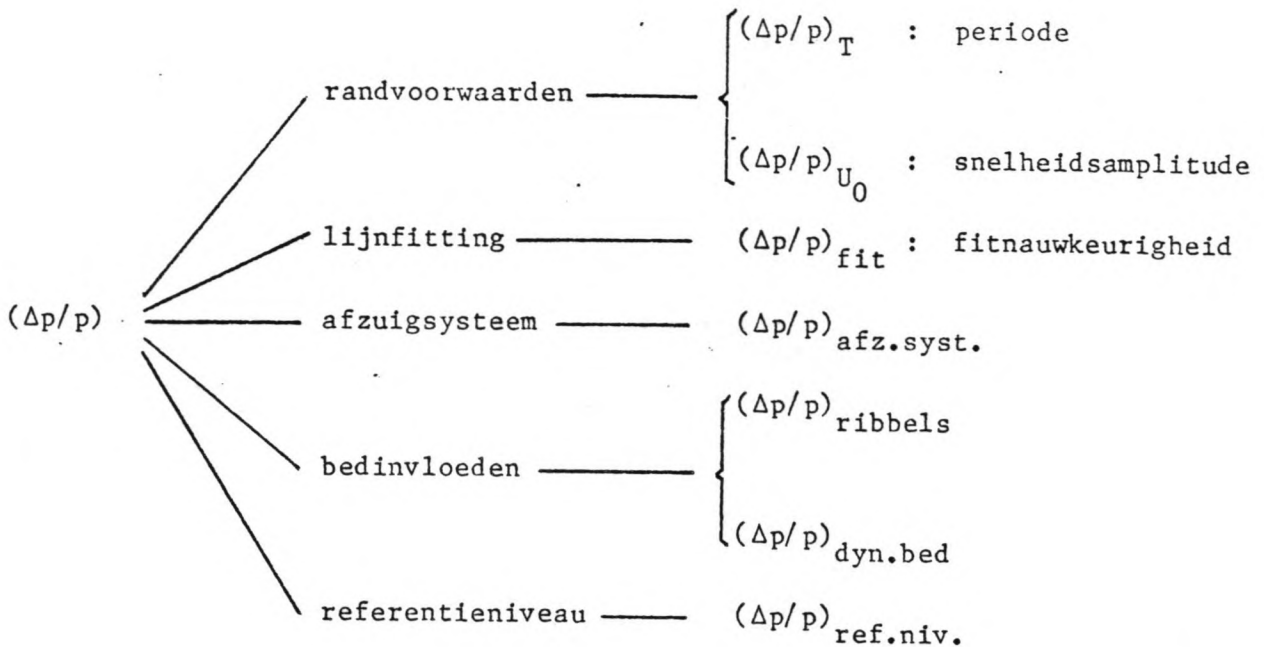
Leveren onafhankelijke, individuele metingen (globaal) gelijke concentraties op dan is een individuele verticaal blijkbaar voldoende goed om te dienen als karakteristieke verticaal voor de gegeven toestand (T, U_0). Is de spreiding in de individuele verticalen groot dan zal een karakteristieke verticaal moeten volgen uit middeling van meerdere individuele verticalen ($N > 1$).

Een concentratieverticaal ligt vast in vorm en grootte door zijn r_c - en C_0 -waarde.

Blijven de spreidingen in beide parameters binnen een redelijke grenswaarde (bijvoorbeeld 10%) dan mag men stellen dat er sprake is van voldoende reproductie. Men moet dus proberen de relatieve onnauwkeurigheid voor beide parameters acceptabel klein te krijgen.

In ons geval is $(\Delta p/p)$ samengesteld uit verschillende bijdragen, waarin p staat voor een parameter. Door deze bijdragen te onderzoeken en te beschrijven kan per bijdrage gekeken worden naar de herkomst ervan en kunnen eventuele maatregelen ter beperking van $(\Delta p/p)$ worden genomen.

In schema zijn de bijdragen aan $(\Delta p/p)$ afkomstig van:



In de volgende paragrafen zullen de verschillende bijdragen aan $(\Delta p/p)$ voor de bodemconcentratie C_0 en de afnamelengte r_c worden bekeken.

4.5.2.2 Randvoorwaarden

Als de waterbeweging niet goed vast ligt kan er bij uitvoering van een herhalingsproef een spreiding $(\Delta p/p)$ ontstaan uit een kleine afwijking van de oorspronkelijk bedoelde waterbeweging.

a) De periode:

De periode van de waterbeweging ligt zéér nauwkeurig vast, zodat deze bijdrage gelijk aan nul is:

$$\left(\frac{\Delta C_0}{C_0}\right)_T = \left(\frac{\Delta r_c}{r_c}\right)_T \approx 0. \quad (4.4)$$

b) De snelheidsamplitude:

De sturing d.m.v. de zuiger geeft zeer nauwkeurige snelheden. Het probleem is echter dat door een verandering in de hoogte van het zandbed het doorstroomprofiel in de tunnel wijzigt en daarmee dus ook de snelheid een iets andere waarde aanneemt.

Dit is opgelost door de tunnelsturing af te regelen op de snelheid zoals die boven het bed gemeten wordt.

M.b.v. een Laser-Doppler snelheidsmeter wordt de snelheid gemeten op een positie zo dicht mogelijk tegen de plaats van de concentratiemeting aan. De uitsturing van de zuiger wordt ingesteld op de werkelijk optredende snelheid boven het bed.

Een klein hoogteverschil tussen het gemiddeld bedniveau t.p.v. de LDV en de meetlocatie kan nu nog een afwijking in de snelheid geven.

Er geldt:

$$\frac{\Delta U}{U_0} \approx \frac{\Delta z}{h}, \quad (4.5)$$

waarin:

h = tunnelhoogte (inw.) = 40 cm,

Δz = niveauverschil tussen meetlocatie en LDV-locatie.

Voor $\Delta z = 3$ mm (geschat maximum) vinden we $\Delta U/U_0 = 0,7\%$.

Globaal geldt verder (zie Par. 2.4.4 en 5.9.3):

$$C_0 \sim U_0^3 \rightarrow \Delta C_0/C_0 = 3 \cdot \Delta U_0/U_0. \quad (4.6)$$

Volgens deze afschatting is de relatieve fout in de bodemconcentratie als gevolg van een onjuiste U_0 hooguit enkele procenten.

Omdat r_c globaal onafhankelijk lijkt van U_0 (zie Par. 3.5.3 en 5.8.3) levert dit geen bijdrage van betekenis op ($< 1\%$).

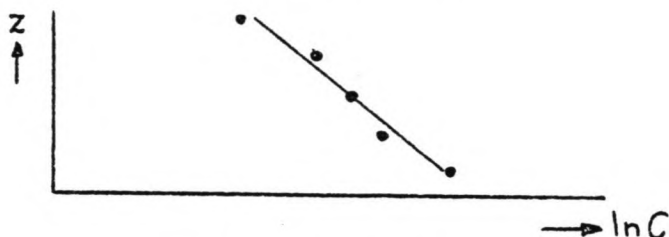
Concluderend kan men dus stellen:

$$(\Delta C_0/C_0)_{U_0} \lesssim 2\%, \quad (4.7)$$

$$(\Delta r_c/r_c)_{U_0} = 0. \quad (4.8)$$

4.5.2.3 Lijnfitting

Bij het fitten van een verband (in dit geval een exponentiëel verband) door een serie punten zal de vergelijking van het verband niet exact vastliggen, t.g.v. random variaties in de meetpunten. Naarmate deze variaties kleiner zijn zal het verband beter vastliggen.



Dit heeft te maken met de tijd van middeling. Is deze kort (te weinig golven) dan kan het toevallig passeren van zanddeeltjes en zandwervels een springerig verband in de verticaal geven. De afzuigtijd is constant $6\frac{1}{2}$ min., zodat het aantal golven varieert met de periode:

$T = 1 \text{ s}$	~ 400 golven,
$T = 2 \text{ s}$	~ 200 golven,
$T = 4 \text{ s}$	~ 100 golven.

Een maat voor het "netter" worden van de puntenreeks is dus de verhouding tussen de afzuigtijd en de periode van de waterbeweging, ofwel het aantal golven waarover wordt gemiddeld.

Uit proeven blijkt dat het verder opvoeren van het aantal golven boven ca. 200 nauwelijks invloed heeft op de "netheid" van de puntenreeks. De netheid neemt zelfs af. (Dit komt door essentiële bed-veranderingen.)

Bij de afschatting van $(\Delta p/p)_{\text{fit}}$ is gebruik gemaakt van lineaire regressie-analyse. Deze is in Appendix IV nader uitgewerkt.

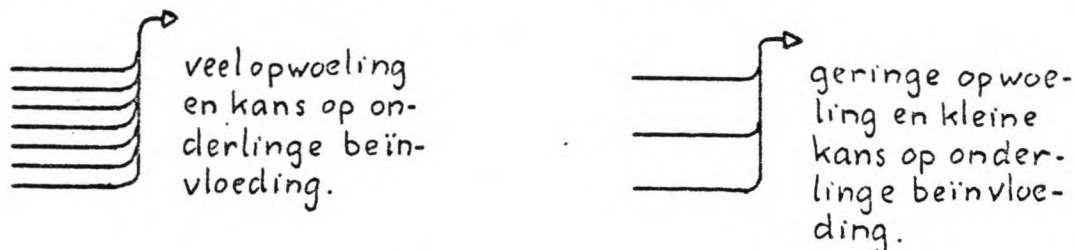
In Par. 4.5.3 komen we hierop terug.

4.5.2.4 Afzuigstelsel

Verondersteld wordt dat afzuiging door een enkel buisje een concentratie oplevert die karakteristiek is voor de aanwezige concentratie. De aanwezigheid van veel buisjes boven elkaar kan echter tot gevolg hebben dat er meer zand naar hogere regionen wordt opgewoeld.

Dit zal dus uitmonden in een andere ligging van de puntenreeks met een steiler verlopende concentratieverticaal.

Zitten de afzuigmondjes extreem dicht bij elkaar dan is de verstoring groot en kunnen de afzuigmondjes elkaar ook onderling beïnvloeden.



De onderlinge afstand die verwaarloosbare afwijkingen geeft is gevonden door vergelijking van simultaan gemeten concentraties met:

- Twee kleine openingen (\emptyset 2mm) op grote verticale afstand, dus met minimale verstoring.
- Kam (pijpjes \emptyset 3 mm) met kleinere afstanden.

Dit leverde voor wat betreft de gradiënt van de concentratieverticaal geen noemenswaardige verschillen op. De extra opwoeling speelt in de bodemlaag blijkbaar geen rol van betekenis. Hogerop in de verticaal kunnen de concentraties wel vergroot worden door de aanwezigheid van de afzuigkam in de bodemlaag (kleine gradiëntverschillen geven door exponentiële verband significante verschillen over grotere afstand).

N.B.: Absolute verschillen in concentraties konden niet worden vastgesteld door ontbreken van calibraties voor de 2 pijpdiameters. Dus is alleen relatief gekeken (gradiënt).

De mate van onderlinge beïnvloeding is afgeschat door vergelijkende metingen met een afzuigkam met veel buisjes met kleine onderlinge afstanden.

- alle afzuigmondjes "in bedrijf",
- afzuigmondjes om en om open/gesloten.

De concentratieverticalen bleken in goede benadering gelijk, zodat de onderlinge beïnvloeding zelfs bij afstanden van 10 mm nihil mag worden verondersteld.

Concluderend wordt een afzuigkam met onderlinge afstanden van 10 mm geacht de concentraties in de bodemlaag op geloofwaardige wijze weer te geven.

4.5.2.5 Bedinvloeden

Het zandbed is voortdurend aan veranderingen onderhevig en bevindt zich in een dynamisch evenwicht. Het gevolg hiervan is dat geen enkele ribbel gelijk is (op een bepaalde tijd) en dat de ribbel zelf ook steeds verandert (in de tijd).

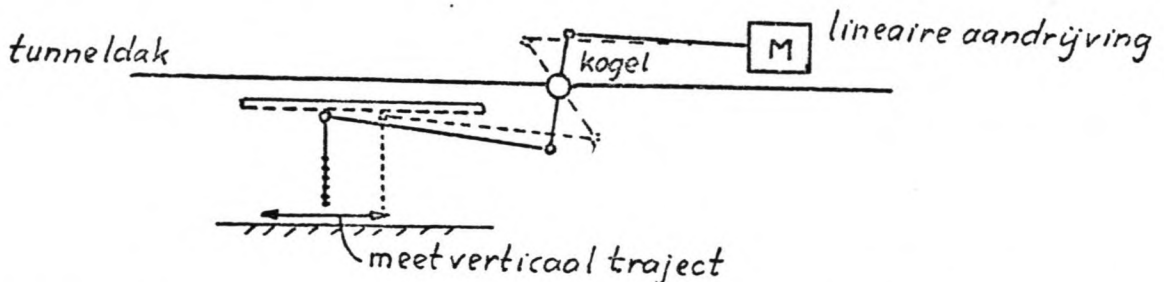
a) Momentane ribbelvormen

Op een willekeurig tijdstip zijn nauwelijks 2 ribbels in het zandbed identiek; elke ribbel is net even anders.

Een kleine variatie van de vorm heeft echter al een zeer grote invloed op de concentratie.

Wil men een goede indruk krijgen over een karakteristiek concentratieverloop dan zal men moeten middelen over meerdere ribbels i.p.v. slechts een enkele ribbel (liefst over het totale bed).

I.v.m. de tunnelconstructie is de slaglengte (van de bedmiddelaarstang) beperkt tot circa 30 cm (zie schets). Door op de bedmiddelaarstang twee afzuigkammen te plaatsen neemt de lengte van de bedmiddeling (d_m) toe, zodat deze maximaal 60 cm bedraagt.



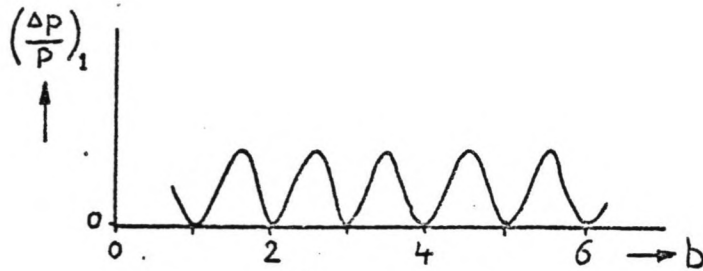
De totale lengte van de bedmiddeling mag niet te groot worden i.v.m. het mogelijk scheef liggen van het zandbed (instroom-effecten).

Een eis die gesteld moet worden aan de aandrijving van de bedmiddelaar is dat deze lineair is, daar anders bepaalde plaatsen worden "overmeten" (gelijke weging van alle posities boven bed).

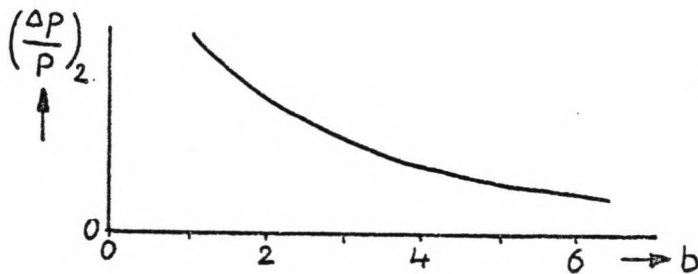
Een kwantitatieve afschatting van de invloed van de bedmiddelingslengte is wat moeilijker, kwalitatief kan echter wel iets worden gezegd.

Gesteld dat alle ribbels gelijk zijn komen we tot het beste resultaat als de ribbelafstand (λ) een geheel aantal malen past in de bedmiddelingsafstand (d_m), dus:

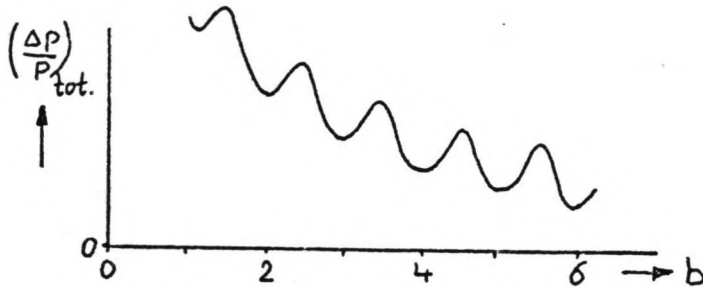
$$b = \frac{d_m}{\lambda} = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (4.9)$$



Omdat alle ribbels verschillen wordt de gemiddelde toestand het best weergegeven bij een zo groot mogelijk b -waarde.



Het totaalresultaat is dus:



Bij vaste bedmiddellingsafstand neemt de $(\Delta p/p)$ dus toe bij toenemende ribbelafstanden, dus bij toename van snelheid en/of periode. Deze conclusie geldt zowel voor C_0 als r_c en is experimenteel bevestigd (zie Par. 5.8.2 en 5.9.2).

Dat de reproduceerbaarheid van de metingen toeneemt met de slaglengte van de bedmiddelaar wordt duidelijk uit het proevenverloop in het beginstadium van het onderzoek, waarbij de slaglengte van de afzuigkam (d_m) steeds werd vergroot.

- stilstaande concentratiemeter,
- bewegende concentratiemeter met slaglengte van ongeveer 17 cm (sinus),

- idem, met 30 cm (lineair),
- idem, met 60 cm.

Bij een herhaling van een meting met stilstaande concentratiemeter op een zelfde punt boven een onveranderd bed blijkt dat er sprake is van een zeer goede reproductie met spreidingen binnen de 10%. Daarbij valt dan bovendien op dat er geen sprake is van scattering als gevolg van de wijze van meten (aantal golven). De resultaten vertonen eerder een systematische relatieve afwijking (bijv. alle concentraties iets lager) als gevolg van iets gewijzigde bed-omstandigheden.

Wordt voor uitvoering van een proef het bed gevlakt dan gaan grotere systematische afwijkingen optreden. De reproduceerbaarheid valt in duigen vanwege de toevallige bedvormen ter plaatse van de meetpositie. Dit wordt erger bij toenemende woestheid van de ribbelvormen.

Conclusie: De fouten ten gevolge van de methode van concentratiebepaling zijn relatief zeer klein, maar voor de reproduceerbaarheid is bedmiddeling nodig!

De bedmiddeling geeft betere resultaten. Wordt de verhouding tussen de bedmiddelingslengte en de ribbellengte kleiner dan is de reproduceerbaarheid weer slecht. Het aantal ribbels waarover gemiddeld wordt is dan te klein.

b) Ribbelvorm in de tijd

Omdat elke ribbel in de tijd gezien in een dynamisch evenwicht verkeert zal de concentratieverticaal zoals die op een bepaalde tijd bepaald is afwijken van die bij een proefherhaling.

Dit effect is random.

Deze variaties zijn in te perken door:

- Over zeer lange tijd een middeling uit te voeren.
Zeer lang afzuigen heeft echter consequenties voor de hoeveelheid zand dat zich in de tunnel bevindt. Het bed zal gaan zakken (zandverlies) en de definitie van het referentieniveau wordt hierdoor slechter.
- Het herhalen van metingen die, gemiddeld een karakteristieke verticaal opleveren. Deze methode is gevolgd en zal in Par. 4.5.4 nader worden toegelicht.

Opgemerkt kan nog worden dat het dynamisch zandbedgedrag wordt versterkt door de tunnel zelf. De beide uiteinden introduceren storingen die zich verplaatsen naar de meetsectie.

Samenvattend worden beide bedinvloeden op een goede manier uitgemiddeld door toepassing van een constante middelingstijd ($6\frac{1}{2}$ min.) en een constante bedmiddeling lengte (60 cm). Eventueel zullen karakteristieke waarden pas volgen uit de combinatie van onafhankelijk herhaalde metingen.

4.5.2.6 Referentieniveau

De concentratieverticaal moet worden vastgelegd aan een zeker referentieniveau (gekozen: vlak bed).

Door het dynamische gedrag van het zandbed is het vlakbedniveau niet constant. (Zand dat door de waterbeweging tijdens de meetserie naar de ketels verdwijnt geeft een beddaling!)

Een koppeling van een van de parameters aan een referentieniveau geeft een spreiding als de ligging van dit niveau minder goed bekend is.

Omdat de afnamelengte (bepaald door C-gradiënt) onafhankelijk is van de hoogte, geldt:

$$(\Delta r_c / r_c)_{\text{ref.niv.}} = 0, \quad (4.10)$$

Voor de concentratie geldt echter:

$$dC_0/dz = C_0/r_c \quad \text{dus} \quad \left(\frac{\Delta C_0}{C_0}\right)_{\text{ref.niv.}} = \frac{\Delta z}{r_c}. \quad (4.11)$$

Deze bijdrage is vrij groot. Als de variatie Δz in het referentieniveau 2 mm is en $r_c = 20$ mm (gangbare waarde) vindt men een spreiding van 10%. Het vastleggen van het referentieniveau is daarom erg belangrijk, met name voor de omstandigheden met kleine r_c -waarden.

4.5.2.7 Samenvatting

Samenvattend geldt dus dat in het algemeen:

$$(\Delta p/p) = \sum (\text{bijdragen}). \quad (4.12)$$

Gesteld dat alle bijdragen onafhankelijk zijn, geldt als goede benadering voor de belangrijkste bijdragen:

Afnamelengte r_c :

$$(\Delta r_c/r_c)_{\text{tot}}^2 = (\Delta r_c/r_c)_{\text{fit}}^2 + (\Delta r_c/r_c)_{\text{bed}}^2. \quad (4.13)$$

De linker term volgt uit de uitvoering van onafhankelijk herhalingen van een meting, terwijl de fitnauwkeurigheid per proef te bepalen is (App. IV).

De karakteristieke spreiding in de afnamelengte zal bij overheersing van de tweede bijdrage een verloop als functie van de b-waarde vertonen als geschetst in Par. 4.5.2.5.

Bodemconcentratie C_0 :

$$\begin{aligned} (\Delta C_0/C_0)_{\text{tot}}^2 &= (\Delta C_0/C_0)_{\text{fit}}^2 + (\Delta C_0/C_0)_{\text{bed}}^2 + (\Delta C_0/C_0)_{\text{ref.niv.}}^2 \\ &= (\Delta C_0/C_0)_{\text{fit}}^2 + (\Delta C_0/C_0)_{\text{rest.}}^2. \end{aligned} \quad (4.14)$$

In vergelijking tot r_c is er een extra term die ervoor zou kunnen zorgen dat de totale spreiding in C_0 groter is dan die in r_c .

4.5.3 Individuele verticalen

De werkwijze bij de verwerking van een enkele verticaal is schematisch aangegeven in Fig. 24.

Als resultaat krijgt men dus:

A: de bodemlaagdikte, ofwel het niveau waarop de gemeten concentraties af gaan wijken van het enkelvoudige exponentiële verband gebaseerd op een getekend plotje.

Op basis van lineaire regressie (Appendix IV) toegepast op de onderste n punten:

- r_c : de best-fitwaarde voor de afnamelengte (least-squares),
- Δr_c : random error in r_c op grond van regressie-analyse,
- C_0 : idem voor de bodemconcentratie,
- ΔC_0 : idem voor de bodemconcentratie,
- L_s : idem voor de total load,
- $\frac{\Delta L^s}{C}$: de relatieve random error in gemeten concentraties; volgens regressieanalyse de gemiddelde relatieve spreiding van de meetpunten t.o.v. het exponentiële verband,
- R^2 : de mate waarin de variatie van $C(z)$ over de hoogte wordt verklaard door het regressie-model (exponentiële verband).

Voor de parameters (r_c , C_0 en L_s) die de concentratieverticaal beschrijven, lijkt het doen van één enkele proef voor de omstandigheid (T, U_0) onvoldoende.

4.5.4 Karakteristieke verticalen

Er zijn meerdere individuele verticalen nodig om iets te kunnen zeggen over de karakteristieke concentratieverticaal voor omstandigheid (T, U_0).

Als een proef bestaat uit N onafhankelijke metingen dan vinden we als totaalresultaat voor omstandigheid (T, U_0) voor wat betreft de concentratieresultaten:

A_i ,

$(r_c)_i, \left(\frac{\Delta r_c}{r_c}\right)_i$,

$(C_0)_i, \left(\frac{\Delta C_0}{C_0}\right)_i$,

$(L_s)_i, \left(\frac{\Delta L^s}{L_s}\right)_i$,

$(\Delta C_0/C_0)_i$,

$(R^2)_i$,

met $i = 1, 2, \dots, N$

Karakteristieke waarden zijn:

$$A_k = \text{gemiddelde van de } A_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i,$$

$$r_{c,k} = \text{gemiddelde van de } r_{c,i},$$

$\Delta r_{c,k}$ = een karakteristieke nauwkeurigheid voor een individuele meting uit de spreiding van de $(r_c)_i$ (standaard-afwijking) uit:

$$\Delta r_{c,k} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (r_{c,k} - r_{c,i})^2},$$

(N.B. De nauwkeurigheid van $r_{c,k}$ bedraagt $\Delta r_{c,k}/\sqrt{N}$),

$(\frac{\Delta r_c}{r_c})_{f,k}$ = een karakteristieke waarde voor de fitnauwkeurigheid van r_c uit de gemiddelde fitnauwkeurigheid:

$$(\frac{\Delta r_c}{r_c})_{f,k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\frac{\Delta r_c}{r_c})_i,$$

$$\left. \begin{aligned} C_{0,k} &= \\ \Delta C_{0,k} &= \\ (\frac{\Delta C_0}{C_0})_f &= \end{aligned} \right\} \text{ analoog aan } r_c,$$

$$\left. \begin{aligned} L_{s,k} &= \\ \Delta L_{s,k} &= \\ (\frac{\Delta L_s}{L_s})_f &= \end{aligned} \right\} \text{ analoog aan } r_c,$$

$(\Delta C_0/C_0)_k$ = een karakteristieke waarde voor de relatieve random concentratie error volgens:

$$(\frac{\Delta C}{C})_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\frac{\Delta C}{C})_i,$$

$(R^2)_k$ = een karakteristieke waarde voor de mate van verklaarde variatie volgens:

$$(R^2)_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R^2)_i.$$

De waarden die in de eindanalyse worden gebruikt zullen gemakshalve weer zijn aangeduid met weglating van de onder-index k.

Met behulp van deze gegevens kan men een goede indruk krijgen over de herkomst van de spreiding. In het geval van de afnamelengte is bijvoorbeeld gevonden (Vgl. 4.13):

$$\left(\frac{\Delta r_c}{r_c}\right)_{\text{tot}}^2 = \left(\frac{\Delta r_c}{r_c}\right)_{\text{fit}}^2 + \left(\frac{\Delta r_c}{r_c}\right)_{\text{bed}}^2. \quad (4.13)$$

De eerste twee termen zijn bekend, want:

$$\left(\frac{\Delta r_c}{r_c}\right)_{\text{tot}} = \frac{\Delta r_{c,k}}{r_{c,k}}$$

$$\left(\frac{\Delta r_c}{r_c}\right)_{\text{fit}} = \left(\frac{\Delta r_c}{r_c}\right)_{f,k}$$

Een indruk van deze nauwkeurigheden is verkregen door voor een bepaalde omstandigheid (T, U₀) vele keren (in de tijd) een concentratiemeting uit te voeren (N = 10 à 20). In Par. 5.2 wordt op deze "duurmetingen" nog uitgebreid teruggekomen.

4.6 Ribbelgeometrie

Betreffende de ribbelgeometrie moet worden opgemerkt dat de nauwkeurigheid gering is vergeleken met die van de concentratiemetingen. De reden hiervan is dat de nauwkeurigheid afkomstig is van een werkelijk aanwezige spreiding in de ribbelgeometrie die niet afhankelijk is van de meetmethode, en evenmin door hethaling van metingen kan worden gereduceerd.

Bijvoorbeeld de ribbelhoogte wordt geschat:

$$\eta = \eta_{i,1} \text{ à } \eta_{i,2} \rightarrow \eta = \eta_i \pm \Delta\eta_i$$

De spreiding (variatie) in N is een reëel optredende spreiding d.w.z. N is niet éénduidig bepaald.

Voor de resultaten wordt verwezen naar Par. 5.6.

4.7 Kritieke snelheden

Bij elke golfperiode (T) is een kritieke snelheid bepaald die maatgevend is voor een omslagpunt in de bedgeometrie.

In dit geval is als definitie voor kritieke snelheid genomen de snelheidsamplitude van de waterbeweging waarbij de korrelbeweging juist op gang komt of stil valt.

Uitgaande van een vlak bed zal er bij toenemende waterbeweging een moment zijn waarop de korrels in beweging beginnen te komen:

$U_0 = U_i$: begin van beweging.

Uitgaande van een waterbeweging waarbij zand in suspensie is en er eveneens ribbelvormen aanwezig zijn, kan men de snelheidsamplitude langzaam laten afnemen totdat alle zand stilvalt:

$U_0 = U_c$: grens van beweging

In het algemeen is $U_c < U_i$ omdat in het geval van U_c het bed niet noodzakelijk vlak is, zodat men kan concluderen dat er onder het begin van beweging wel beweging mogelijk is, al lijkt dit in eerste instantie vreemd.

De gedachte achter deze parameters is dat concentraties gekoppeld kunnen zijn zowel aan U_i als aan U_c .

De resultaten zijn gegeven in Par. 5.11 in de vorm van twee machtsverbanden.

4.8 Uitzeving

Om een indruk te krijgen over de mate van uitzeving van het bodemmateriaal over de hoogte zijn van een aantal proeven de afgezogen monsters onderworpen aan een zeefanalyse.

Om voldoende materiaal voor een zeefanalyse te krijgen moeten er voldoende herhalingen van eenzelfde omstandigheid zijn. Het materiaal afkomstig van de duurmetingen ($N > 10$) is daarvoor geschikt.

De resultaten zijn gegeven in Par. 5.12.

5. Resultaten

5.1 Algemeen

Bij de analyse van bedvormen en concentraties is het van belang onderscheid te maken tussen twee groepen parameters:

- onafhankelijke parameters
- afhankelijke parameters

Tot de onafhankelijke parameters behoren in dit verband de snelheidsamplitude U_0 en de periode T . Beiden worden per proef ingesteld. Andere onafhankelijke parameters zijn bijvoorbeeld de massadichtheid van het sediment ρ_s , de korrel-diameter D , de versnelling van de zwaartekracht g , enz. Deze zijn in de proeven onveranderd gebleven.

De afhankelijke parameters zijn een functie van de onafhankelijke parameters:

$$\text{afh.Par.} = F(\text{onafh.Par.}) = F(T, U_0 | \rho_s, D, g, \dots). \quad (5.1)$$

De wijze waarop een parameter afhankelijk is van T en U_0 kan ook weer onderverdeeld worden in:

- expliciete afhankelijkheid,
- impliciete afhankelijkheid.

De expliciete afhankelijkheid betekent dat de verandering in een afhankelijke parameter het directe gevolg is van een wijziging van een van de onafhankelijke parameters. De uitwijkingamplitude x_0 is hiervan een voorbeeld:

$$x_0 = \frac{T \cdot U_0}{2\pi} \quad \text{dus} \quad x_0 = F(T, U_0). \quad (5.2)$$

In het bodembegeuren als beschreven in hoofdstuk 2 zijn alle parameters nauw verwant, zodat er ook sprake zal zijn van impliciete afhankelijkheid.

Hierbij is een wijziging van een parameter niet het exclusieve gevolg van de verandering van een onafhankelijke parameter. Bijvoorbeeld: bij een gelijke golfschot-uitsturing in een golfgoet gaan de ribbels veranderen als de waterdiepte wordt vergroot. De ribbel-verandering wordt niet exclusief veroorzaakt door de waterdiepte (daar hebben de ribbels geen weet van). Door de verhoogde

diepte veranderen de golven en dus de watersnelheden. De ribbels veranderen expliciet door de snelheid en de waterdiepte speelt een impliciete rol.

Doorgaans worden grootheden zowel expliciet als impliciet bepaald.

Bijvoorbeeld, stel variabele C (b.v. concentratie):

$$C = (U_0, T, \eta, \lambda, \dots) \quad (5.3)$$

Bij wijziging van U_0 verandert ook C:

$$\frac{dC}{dU_0} = \frac{\partial C}{\partial U_0} + \frac{\partial C}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial U_0} + \frac{\partial C}{\partial \lambda} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial U_0} + \dots \quad (5.4)$$

De eerste term van het rechterlid geeft de expliciete afhankelijkheid van C t.o.v. U_0 , terwijl de rest het impliciete deel weergeeft. $\partial C / \partial \eta$ geeft de expliciete afhankelijkheid van C t.o.v. η , en η is veranderd t.g.v. U_0 . Dus $\partial C / \partial \eta \cdot \partial \eta / \partial U_0$ geeft de impliciete U_0 -afhankelijkheid van C via de ribbelhoogte η . In de uitproeven is alleen het totaal in het linkerlid te zien. Daarom zijn de te vinden verbanden zeker niet altijd netjes (b.v. met afgeronde machten).

Alle te bepalen parameters geschreven als functie van T en U_0 (totale afhankelijkheid: expliciet + impliciet):

$$\text{Par.} = F(U_0 | T). \quad (5.5)$$

De wijze van resultatenverwerking en proefuitvoering levert eerst verbanden volgens $F(U_0 | T)$ op, die in later stadium worden gebruikt om $F(U_0, T)$ verbanden te bepalen.

Fig. 25 geeft een grafisch overzicht van alle gemeten omstandigheden.

Terwille van de verwerking zijn de diverse proeven voorzien van een codenummer gebaseerd op de periode en de snelheidsamplitude.

Bijvoorbeeld:

$$T = 2,0 \text{ s} \quad U_0 = 0,35 \text{ m/s} \quad \rightarrow \quad \text{code 2035}$$

In geval van een duurmeting (zie Par. 5.2) is een letter D aan de code toegevoegd.

In Tabel 1 zijn de voornaamste resultaten gegeven.

De resultaten van de duurmetingen staan in Tabel 1a en 1b, het totaal is gegeven in Tabel 1c. Fig. 19c geeft een aantal concentratieverticalen.

5.2 Duurmetingen

5.2.1 Algemeen

De achtergrond van duurmetingen is in Par. 4.5.4 toegelicht, namelijk inzicht krijgen in de representativiteit van een enkele concentratieverticaal voor de hydraulische omstandigheid (T, U_0).

Een overzicht van de uitgevoerde duurmetingen is te vinden in genoemde Fig. 25 en Tabel 2a. De resultaten er van zijn gegeven in Tabel 1a.

Per duurmeting is boven hetzelfde zandbed N maal dezelfde meting uitgevoerd steeds resulterend in waarden voor η , λ , η/λ , r_c/η , C_0 , r_c , L_s , $\Delta C/C$ en R^2 . Spreidingen per meting in de bedgeometrie-beschrijvende parameters zijn het gevolg van werkelijk aanwezige spreiding, terwijl die van de concentratieverticaal afkomstig zijn uit de fit (zie Par. 4.5 en 4.6).

Tabel 1a en Fig. 26 geven de resultaten. De figuur geeft per duurmeting de parameters als functie van het tijdstip van de meting. Het tijdstip waarop de waterbeweging op een vlak bed werd gestart is $t=0$.

De verticale (logarithmische) schaal levert voor eenzelfde procentuele spreiding altijd een "error-bar" van gelijke lengte.

De karakteristieke waarde van een parameter is gevonden door middeling over alle metingen met uitzondering van die met de open symbolen. Redenen voor dit weglaten kunnen variëren van te korte ingolftijd tot een vermoede (meet)fout (zie Tabel 1a).

Wat betreft de ingolftijd kan verwezen worden naar Par. 5.3.

Voor definities en relaties betreffende de spreiding wordt verwezen naar Par. 4.5 en Fig. 26a.

5.2.2 Ribbelgeometrie

Voor $T = 1,0$ s bleven η en λ binnen de meetnauwkeurigheid constant, zodat de grafische weergave weinig zin had.

In tabelvorm (Tabel 2b) zien we, evenals in Tabel 1a en de grafieken, dat de spreiding per meting de karakteristieke spreiding overtreft, zeker bij kortere perioden.

Grotere periöden leveren grotere procentuele spreidingen in η en λ . In een ruiger bed zijn η en λ immers meer random dan bij een keurig 2-dimensionaal bed.

De spreiding in de benaderde ribbelsteilheid is relatief natuurlijk groter en overtreft de karakteristieke waarde nog meer.

Gevoelsmatig zal de afnamelengte r_c wel iets te maken hebben met de ribbelhoogte η zodat ook hun verhouding is bekeken.

Hierop wordt later teruggekomen (Par. 5.2.3.3).

5.2.3 Concentratieverticaal

5.2.3.1 Algemeen

De waarden van $\Delta C/C$, r_c , C_0 en L_s zijn in Fig. 26 grafisch weergegeven. Opvallend is dat de "error-bars" kort zijn t.o.v. de karakteristieke spreiding, m.a.w. de fitnauwkeurigheid lijkt vrij groot. De absolute waarden van de parameters komen later uitgebreid aan de orde, voorlopig wordt alleen gekeken naar de relatieve nauwkeurigheden.

5.2.3.2 Random error

De random concentratie error $\Delta C/C$ bedraagt altijd 3 à 5% met uitzondering van $T = 1$ s (zie Tabel 2c). Een mogelijke verklaring is te vinden in het feit dat er bij deze periode slechts 3 punten aan de bodemlaag voldoen. Het derde punt zou derhalve best wel eens net niet meer in de bodemlaag kunnen vallen waardoor de random error sterk verhoogd wordt. Ook zou het kunnen dat het eenvoudige exponentiële model niet meer voldoet in een zeer dunne laag zoals dat bij $T = 1$ s het geval is ($A \approx 3$ cm).

5.2.3.3 Afnamelengte

De afnamelengte r_c is per meting goed bepaald met uitzondering van $T = 1$ s. In tabelvorm (Tabel 2d) zijn de procentuele spreidingen voor zowel de fit- als karakteristieke waarde gegeven. Opvallend is de fitspreiding bij $T = 1$ s ($\sim 12\%$) die natuurlijk gerelateerd is aan de grote random error (18,5%). Laten we deze periode buiten beschouwing dan kan spreiding als gevolg van de beddynamiek berekend worden gebruik makend van de relaties en definities uit Par. 4.5.2. (Vgl. 4.13).

De beddynamiek is zo goed als volledig verantwoordelijk voor de spreiding in de karakteristieke waarde (zie Tabel 2d).

Het uitvoeren van een enkele meting is dus onvoldoende zelfs als men fitspreiding gelijkstelt aan een karakteristieke spreiding.

Een redelijk karakteristiek beeld is pas te krijgen door uitvoering van 3 à 4 onafhankelijke metingen.

Voor de verhouding r_c/η wordt de grote fitnauwkeurigheid van r_c teniet gedaan door de spreiding in η zodat de spreiding per meting groter wordt dan de karakteristieke spreiding. Dezelfde conclusies als voor de ribbelgeometrie worden derhalve van kracht.

5.2.3.4 Bodemconcentratie

De bodemconcentratie C_0 (Tabel 2e) is per meting goed bepaald, zij het met minder nauwkeurigheid dan de afnamelengte r_c . Ook hier zien we weer een grote afwijking voor de korte periode. Laten we $T = 1$ s buiten beschouwing dan zien we dat de fitspreiding altijd ongeveer 7% bedraagt, maar dat de karakteristieke spreiding toeneemt met de periode.

Berekening van de invloed van het bed volgens de relaties uit Par. 4.5.2, laat zien dat de restinvloed (bed- en referentieniveau) bepalend is voor de karakteristieke spreiding. Het uitvoeren van meerdere metingen ter bepaling van een karakteristieke waarde van C_0 is dus noodzakelijk.

De karakteristieke spreidingen voor C_0 zijn in vergelijking met r_c groter. Een reden hiervoor kan zijn de afhankelijkheid van C_0 van het niet nauwkeurig bekende referentieniveau (zie Par. 4.5.2.6).

5.2.3.5 Total load

De karakteristieke spreiding van L_s is in vergelijking met C_0 en r_c relatief klein! De total load is als product van C_0 en r_c blijkbaar vrij constant (Tabel 2f).

Laat men de $T = 1$ s weer buiten beschouwing dan lijkt de fitspreiding met de periode af te nemen. De karakteristieke spreiding wordt, evenals bij C_0 en r_c , slechts in beperkte mate bepaald door de fitnauwkeurigheid.

Op het relatief vrij constant zijn van de total load wordt nog teruggekomen, o.a. in Par. 5.4, waar de correlaties tussen de verschillende parameters aan de orde komen.

5.2.4 Conclusies

De voorlopig conclusie is dat ondanks de gebruikte tijds- en bedmiddeling de parameters die de concentratieverticaal beschrijven aan een spreiding onderhevig zijn van orde 10%. Uitvoering van meerdere metingen bij een omstandigheid (T, U_0) is dus noodzakelijk.

Hoewel deze conclusie in principe alleen gerechtvaardigd is voor de gegeven snelheidsamplitudes zal ook in andere gevallen, zeker voor de hogere snelheden, een enkele meting onvoldoende zijn.

5.3 Ingolftijd

Uit Fig. 26 blijkt dat een zekere tijd nodig is voordat sprake is van een stabiele situatie.

De tijdsduur die verstrikt tussen het starten van de waterbeweging over een vlak bed en het bereiken van een stabiele toestand is aangeduid met t_i .

Bekijken van de ribbelgeometriebeschrijvende (η en λ) en de concentratieverticaalbeschrijvende parameters (r_c , C_0 en L_s) laat zien dat elke parameter (een eigen) tijd nodig heeft om op evenwicht te komen.

Voor een afschatting van de ingolftijd is de tijd genomen waarop de gemeten variabele de karakteristieke spreidingsbreedte bereikt (zie Fig. 27a).

Zijn zowel de ribbelgeometrie als de concentratieverticaal in evenwicht dan is sprake van de eindsituatie. Deze wordt door ribbels en concentratie ongeveer tegelijkertijd bereikt, iets wat gezien de veronderstelde samenhang niet vreemd is.

De ribbellengte is vaak eerder op evenwicht dan de ribbelhoogte (zie bijv. Fig. 26d) zodat de laatste, voor wat betreft de ribbelgeometrie, als kritisch beschouwd kan worden. Dit is overigens bij alle metingen waargenomen.

Betreffende de afnamelengte en de bodemconcentratie lijkt de afnamelengte eerder op evenwicht, de bodemconcentratie blijft langer toenemen. De total load ($L_s = C_0 \cdot r_c$) heeft nog meer tijd nodig. De total load wordt immers door meerdere parameters bepaald en zal dus voor het ingolven kritiek zijn.

Totaal zijn bepalend voor de kritische ingolftijd de ribbelhoogte en de total load, waarbij de laatste gezien zijn grotere nauwkeurigheid en belang zwaarder moet wegen.

In Fig. 27b zijn de afgeschatte t_i -waarden per parameter tesamen in een grafiek ondergebracht.

De t_i neemt toe met de golfperiode T . In de grafiek zien we dat deze toename ongeveer recht evenredig is volgens:

$$t_i = 450T. \quad (5.6)$$

Deze rechtevenredigheid betekent in feite dat het aantal golven dat nodig is voor het bereiken van een stabiele stationaire situatie, onafhankelijk van de periode is (Fig. 27c):

$$N_i = \frac{t_i}{T} = 450. \quad (5.7)$$

Concluderend is (voor $U_0 = 0,30 \text{ à } 0,40 \text{ m/s}$) een aantal van (afgerond) 500 golfbewegingen voldoende voor het bereiken van een stationaire toestand.

De onderlinge samenhang tussen bodemgeometrie en concentratieverticaal lijkt door de resultaten van deze paragraaf onderschreven.

5.4 Correlaties

Een correlatie tussen twee parameters, zeg X en Y, laat zien op welke wijze de ene parameter (Y) reageert op een verandering in de ander (X).

Geen onderling verband levert een correlatie nul. Een toename van Y gelijktijdig met een toename van X levert een positieve correlatie (+1). Een negatieve correlatie (-1) krijgen we als een toename van X samengaat met een afname van Y.

Dit is alleen zinvol voor omstandigheden waarbij tenminste 3 metingen zijn uitgevoerd.

Het resultaat is echter pas redelijk betrouwbaar als er sprake is van vele metingen, zodat de resultaten van de duurmetingen vrij betrouwbare correlaties te zien zullen geven. Deze resultaten zijn gegeven in Tabel 1b.

De parameters waarvan de onderlinge correlaties zijn onderzocht, zijn:

- r_c/η verhouding afnamelengte/ribbelhoogte,
- r_c de afnamelengte,
- C_0 de bodemconcentratie,
- L_s de total load,
- $\Delta C/C$ de random error,
- R^2 de mate van verklaarde variatie.

De correlatiecoëfficiënten van de duurmetingen zijn samengebracht in Tabel 3a. Uitgaande van de (voorlopige) veronderstelling dat er geen afhankelijkheid is van periode en snelheidsamplitude kan men we het volgende concluderen:

Nergens blijkt uit dat een van de vier eerste parameters een zekere correlatie vertoont met de random error $\Delta C/C$, iets wat ook niet te verwachten was. De random error vertoont, volgens de tabel, wel een zeer duidelijke negatieve correlatie met de verklaarde variatie R^2 ; neemt de random error in de concentratie toe dan zal de mate van verklaring van het verband door het opgelegde exponentiële model minder worden.

Dat r_c/η sterk positief gecorreleerd blijkt met r_c ligt voor de hand omdat het eigenlijk de correlatie van r_c met zichzelf is (η ongeveer constant ondanks de grote spreiding).

De correlatie van r_c en C_0 is duidelijk negatief; $(-65 \pm 25)\%$. Een vergroting van de een gaat gepaard met een gelijktijdige verkleining van de ander.

Omdat $L_s = r_c C_0$ ongeveer de hoeveelheid opgewoeld sediment is lijkt deze correlatie fysisch niet vreemd.

De hoeveelheid opgewoeld sediment lijkt, op grote schaal, redelijk constant, alleen de verdeling ervan over de verticaal kan blijkbaar plaatselijk en tijdelijk verschillen.

Dat de bodemconcentratie C_0 sterk positief gecorreleerd is met de total load L_s lijkt gezien de formulering van L_s te begrijpen. Een toename van C_0 geeft ondanks de afname van r_c de negatieve correlatie tussen C_0 en r_c toch een duidelijke toename van het product L_s .

Tabel 3a laat verder zien dat r_c nauwelijks $(-11 \pm 44\%)$ gecorreleerd is met L_s terwijl men juist, analoog aan C_0 , een positieve correlatie zou verwachten. Blijkbaar wordt een toename van r_c in L_s gecompenseerd door een afnemende C_0 , terwijl een toenemende C_0 niet volledig wordt gecompenseerd door een afnemende r_c . Dit kan worden verklaard als een (schijnbare) C_0 -toename slechts deels fysisch is en voor het overige het gevolg is van een veranderd referentieniveau (zie Par. 4.5.2).

Samengevat wordt de spreiding in r_c geheel bepaald door het plaatselijk anders verdeeld zijn van een constante hoeveelheid sediment over de hoogte.

De spreiding van C_0 komt voort uit de zelfde oorzaak als bij r_c , maar tevens uit de spreiding in het referentieniveau.

Bekijken we het totaal van de correlaties van alle omstandigheden (T, U_0) met voldoende metingen $(N > 3)$.

Per periode vertoont geen enkele correlatie een duidelijk afhankelijkheid van de snelheidsamplitude. Gewogen middeling van een correlatie over een periode levert als functie van de periode ook geen duidelijke trend zodat, zoals verondersteld, correlaties waarschijnlijk onafhankelijk van de omstandigheid (T, U_0) zijn (over het onderzochte gebied).

De correlatieresultaten van alle metingen (Tabel 3b) zijn consistent met die van de duurmetingen. De correlaties lijken in het onderzochte gebied dus niet afhankelijk van de hydraulische condities.

5.5 Bodemlaag

5.5.1 Algemeen

De bodemlaag wordt aan de bovenzijde mathematisch begrensd door het niveau waarop niet meer aan het enkelvoudige exponentiële verband voor de concentraties wordt voldaan. Onder dit niveau is de afnamelengte r_c onafhankelijk van de hoogte (zie Par. 3.5.1 en Fig. 19a/c).

Per meting volgt deze waarde uit het plotje van de concentratieverticaal. Per omstandigheid (T, U_0) is een gemiddelde van de metingen berekend.

Het verloop van deze A-waarde als functie van de snelheid is doorgaans netjes, d.w.z. zonder gekke sprongen. Fig. 28a geeft een totaalbeeld van de resultaten.

De bodemlaagdikte neemt, zoals al werd verondersteld, toe met snelheidsamplitude en periode.

Ook is duidelijk dat bij een te korte ingolftijd deze dikte ook te klein is ($T = 7$ s).

5.5.2 Bodemlaagdikte/ribbelhoogte

Bekeken is de verhouding A/η voor $U_0 < 0,5$ m/s.

De resultaten staan in Fig. 28b.

Deze verhouding blijkt redelijk constant. Dit verband heeft tot gevolg dat de hoogte van het gebied waarin de wervels als dominerend gezien kunnen worden een vast aantal ribbelhoogten is.

Buiten beschouwing laten van $T = 1$ s levert:

$$A/\eta = 3,0 \pm 0,5. \quad (5.8)$$

Langere perioden geven systematisch een iets lagere verhouding, de toename van de afzonderlijke parameters met de periode is in geval van de bodemlaagdikte blijkbaar iets minder sterk.

Ook is de verhouding voor lage snelheden iets groter. Een verklaring voor dit laatste ligt misschien in het iets spitsers zijn van de ribbeltoppen, waarbij de wervels hoger reiken en dus een relatief dikkere bodemlaag leveren.

Terugkomend op de in Par. 1.3 gegeven transportverdelingsafschatting is gebruik gemaakt van een parameter β ($= A/r \approx A/\eta$).

Gebruikmakend van de resultaten betekent dit dus voor gevallen zonder netto stroom: $\beta = 3$.

Toevoeging van een netto stroom zou kunnen zorgen voor een toename van β als gevolg van het feit dat de wervels hierbij over de ribbeltoppen omhoog worden gestuwd. De gedane aanname van $\beta = 4$ lijkt dan redelijk.

Zoals al gesuggereerd in Par. 3.2 lijkt het constant zijn van deze verhouding consistent met het wervelgebeuren. Het suspensiemechanisme, zoals beschreven in Par. 3.3, wordt hiermee onderschreven.

5.6 Ribbelgeometrie

5.6.1 Algemeen

Omdat de spreiding in de ribbelhoogte en -lengte nogal groot is, zijn de resultaten per periode gefit door een meest waarschijnlijk verloop; dit geeft het beeld voor het η - en λ -verloop van Fig. 29.

Zowel η als λ nemen toe met de periode van de waterbeweging.

Deze toename ontbreekt voor $T = 7$ s t.o.v. 6 s in geval van de ribbelhoogte. Zowel η als λ nemen eveneens toe met vergroting van de snelheidsamplitude U_0 . Deze afhankelijkheid is duidelijk tot ongeveer $U_0 = 0,5$ m/s.

Vervolgens neemt η zeer snel toe, iets wat ook geldt voor de ribbellengte λ . Het veronderstelde uitvlakken van het bed blijft vooralsnog achterwege. Bij korte perioden (waarbij nog flinke snelheden te bereiken zijn) lijkt het er op dat bij de grote snelheden ($U_0 > 0,5$ m/s) de ribbelvorming niet meer representatief is voor de omstandigheden.

Toename van de snelheid resulteert in het wegvagen van ribbels waarvan het materiaal wordt toegevoegd aan de naastliggende ribbelvorm.

Zowel de ribbelhoogte als de ribbellengte nemen zeer snel toe. De onderlinge afstanden tussen de tot duinen uitgegroeide ribbels worden gelijk aan meerdere slaglengtes. De vorming van de ribbels gebeurt ook niet meer random, zoals onder andere blijkt uit de systematische vorming van een groot duin precies in het midden van de tunnel bij $T = 3$ s.

Het verschijnsel zal gemakshalve worden aangeduid met de benaming "tunnel-effect". De ribbelsteilheid η/λ voor de hogere snelheden wordt niet meer als geloofwaardig aangenomen.

Voor de conclusies over de verschillende parameters wordt dus alleen $U_0 \lesssim 0,5$ m/s als betrouwbaar aangenomen.

5.6.2 Ribbelhoogte

De ribbelhoogte η vertoont een langzame groei bij toename van de snelheid en lijkt te verzadigen voor $U_0 \approx 0,5$ m/s, onafhankelijk van de periode (Fig. 29a). Toename van periode geeft eveneens een vergroting van de ribbelhoogte, met uitzondering van $T = 7$ s (ingolftijd te kort).

Bekijken van de afhankelijkheid van de periode leert dat de ribbelhoogte evenredig toeneemt met de periode voor $T < 5$ s (Fig. 30a).

Deze relatie komt op basis van eerder onderzoek (Par. 2.3.3.2) betrouwbaar over. De verhouding η/T is nog snelheidsafhankelijk (Fig. 30b).

Fitten van een verband analoog aan Vgl. 2.2.1 levert (de langere perioden vormen een uitzondering):

$$\eta/T = 0,011 - (0,233U_0 - 0,105)^2 \approx 0,05U_0 (0,9 - U_0). \quad (5.9)$$

De snelheid, waarbij de ribbelhoogte maximaal is, is $U_0 \approx 0,45$ m/s waarvoor $\eta/T \approx 0,011$ m/s.

In vergelijking tot het verband volgens Nielsen is de waarde van de ribbelhoogte η_{\max} circa 40% hoger terwijl in ons geval $U_{\max} \approx 0,45$ m/s beter lijkt dan de waarde 0,37 volgens Nielsen (Fig. 30c).

Dat de langere perioden niet meer voldoen aan het opgelegde verband van Fig. 30b heeft twee oorzaken. Ten eerste is het niet aannemelijk dat de ribbelhoogte altijd recht evenredig zal toenemen met de periode. Een periode van 10 s zou ongelooflijke ribbels te zien geven en de relatie naar stationaire stroming ($T \rightarrow \infty$) zou op problemen stuiten.

Een tweede oorzaak is waarschijnlijk de te korte ingolftijd bij de langste periode ($T = 7$ s).

Omdat de ribbelhoogte als verticale maat een relatie zou kunnen vertonen met de bodemlaagdikte A en de afnamelengte r_c zijn de verhoudingen A/η en r_c/η eveneens onderzocht.

De resultaten hiervan zijn te vinden in respectievelijk Par. 5.5.2 en 5.8.6.

5.6.3 Ribbellengte

Het verloop voor de ribbellengte λ lijkt netter, d.w.z. toename van periode levert altijd grotere λ -waarden. De toename met de periode wordt bij langere perioden minder (zoals ook het geval was voor de ribbelhoogte η).

De verhouding λ/T als functie van U_0 blijkt, over het bekeken snelheidsinterval, zo goed als evenredig te zijn (Fig. 31a).

Buiten beschouwing laten van de afwijkingen van het recht evenredige verband geeft als eenvoudige benadering:

$$\lambda/T \approx 0,16U_0 \text{ voor } (T < 5 \text{ s}; U_0 < 0,5 \text{ m/s}). \quad (5.10)$$

Gerelateerd aan de amplitude van de waterbeweging (x_0) betekent dit:

$$\lambda = 0,16 \cdot 2\pi \left(\frac{U_0 T}{2\pi} \right) = x_0. \quad (5.11)$$

Toevallig (?) is de ribbellengte exact gelijk aan de amplitude van de waterbeweging!

Aan het ver zadigingsgebied, waar de ribbels verdwijnen, komt deze benadering niet toe.

Conclusie: Voor het gebied $T < 5$ s en $U_0 < 0,5$ m/s geldt als goede benadering voor de gemeten ribbellengte dat deze gelijk is aan de waterbewegingsamplitude.

Op basis van de resultaten van Par. 2.3.3.3 lijkt een machtsverband op zijn plaats. Meer exact geldt:

$$\lambda/T \sim U_0^m \rightarrow \lambda/T = 0,157 \cdot U_0^{0,85}. \quad (5.12)$$

Deze relatie is gevonden op basis van een fit van λ/T -waarden als functie van U_0 .

Fig. 31b laat zien dat er in het begin een redelijk overeenkomst is met resultaten volgens Nielsen, maar dat vanaf $U_0 = 0,4$ m/s duidelijke verschillen gaan optreden. In Par. 5.6.5 wordt hierop teruggekomen.

5.6.4 Ribbelsteilheid

Zou men een verband voor de benaderde ribbelsteilheid direct uit de meetuitkomsten willen afleiden dan zou dit zo goed als onmogelijk zijn vanwege de grote spreiding. Het is beter gebruik te maken van de afzonderlijke resultaten voor η en λ .

De ribbelsteilheid is onafhankelijk van de periode, wat ook overeenstemt met de resultaten van Par. 2.3.3.4.

Uitwerking levert:

$$\eta/\lambda = \frac{\eta/T}{\lambda/T} = 0,31 U_0^{0,15} - 0,34 U_0^{1,15}. \quad (5.13)$$

Tekenen van dit verband levert de getrokken lijn van Fig. 31c op.

De ribbelsteilheid neemt langzaam af met toenemende snelheidsamplitude. Dit berekende verband beantwoordt goed aan de directe meetresultaten zoals deze per meting gevonden werden. (In figuur gegeven zonder spreiding). De reden voor de afname van de ribbelsteilheid is de optredende afvlakking van de ribbels.

Het getekende verband voldoet in principe alleen voor $T < 5$ s. De langere perioden voldoen echter ook redelijk.

$T = 6$ s levert een goede overeenstemming. $T = 7$ s daarentegen niet, de ribbelsteilheid is te laag met als mogelijke reden de te korte ingolftijd. (λ wel op evenwicht, η nog niet).

5.6.5 Conclusies

De resultaten lijken goed voor $U_0 \lesssim 0,5$ m/s en $T < 7$ s.

Heel anders wordt dit voor $U_0 > 0,5$ m/s waar optredende duinen het beeld kunnen verstoren. Hier moet de nodige voorzichtigheid in acht worden genomen m.b.t. de concentratiemetingen.

Bij periode $T = 7$ s zou men op basis van een te lage ribbelhoogte misschien op voorhand al kunnen zeggen dat de gevonden concentraties te laag zullen zijn als er inderdaad een directe relatie tussen bodemgeometrie en concentraties aanwezig is.

Opgemerkt moet worden dat in de ribbellengte λ een duidelijk verschil aanwezig is tussen de verbanden voor een oscillerende stroming en golven (verbanden volgens Nielsen), zoals al bleek uit Fig. 31b. Het ontbreken van een duidelijk afvlakking zorgt ook voor de verschillende η -verbanden als gegeven in Fig. 30c. De nodige voorzichtigheid is dus geboden bij het gelijkstellen van het gebeuren in de bodemlaag voor oscillerende stroom en golfbewegingen.

5.7 Random error

De random error $\Delta C/C$ lijkt niet afhankelijk van de snelheidsamplitude (zie Par. 4.5.2.3).

Afgezien van het resultaat bij $T = 1$ s lijkt $\Delta C/C$ evenmin afhankelijk van de periode T , zie Fig. 32a.

Gemiddelde random error:

$$\Delta C/C = (3,3 \pm 0,7)\% \quad (5.14)$$

Blijkbaar is de tijd van middeling ($6\frac{1}{2}$ min) ook bij de langere perioden nog ruimschoots voldoende. Maatgevend is het aantal golven in de middelingsduur. Bij $T = 6$ s bedraagt het aantal golven nog 65 stuks. Het is echter niet ondenkbaar dat hogere snelheden wel degelijk een vergroting van de random error tot gevolg zouden hebben (voor $T = 6$ s).

Een direct gevolg van de kleine random error is dat de mate van verklaarde variatie (R^2) van $C(z)$ over de hoogte zeer hoog is. Deze lijkt ook onafhankelijk van de snelheidsamplitude. Fig. 32b geeft de onverklaarde variatie ($1-R^2$) als functie van de periode.

In goede benadering geldt:

$$1-R^2 = (0,29 \pm 0,11)\% \quad (5.15)$$

Het exponentiële model voldoet in de bodemlaag dus uitermate goed. De variatie van de concentraties als functie van de hoogte wordt voor 99,7% verklaard door het opgelegde exponentiële model!

5.8 Afnamelengte

5.8.1 Algemeen

Fig. 33a geeft een beeld van de karakteristieke waarde van de afnamelengte r_c per omstandigheid.

Voor de hogere snelheden ($U_0 > 0,5$ m/s) moet de r_c -waarde met argwaan worden bekeken.

Hiervoor zijn de consequenties van in Par. 5.6.5 besproken ribbelgeometrie verantwoordelijk ("tunneleffect"). Het optreden van duinvormen betekent voor de concentratieverticaal dat deze sterk afhankelijk is van de plaats van middeling t.o.v. de aanwezige ribbelgeometrie en de lengte van de bedmiddeling.

Is de aanwezigheid van de duinen reëel dan zal pas een representatieve r_c -waarde gevonden kunnen worden met een veel langere bedmiddellingslengte.

De optredende duinen zijn vaak niet random qua plaats maar verschijnen veelal op identieke plaatsen in de tunnel. Herhaling van een meting kan derhalve best reproducerende resultaten kunnen leveren, maar die zijn dan niet karakteristiek voor de omstandigheid (T, U_0).

5.8.2 Karakteristieke spreiding

Beperking tot de lagere snelheden laat naar verwachting zien dat het meer of minder karakteristiek zijn voor een omstandigheid (van een gemeten r_c -waarde), afhankelijk is van het aantal ribbelvormen waarover gemiddeld wordt.

Is de in Par. 4.5.2 geïntroduceerde betrouwbaarheidsverhouding b groot, dan zal de spreiding in de gevonden r_c -waarde bij onafhankelijke herhalingen van een meting klein zijn. Voor deze verhouding geldt:

$$b = \frac{d_m}{\lambda} \quad (5.16)$$

Blijkens het gevonden verband voor de ribbellengte (Fig. 29b) zal de invloed van de snelheidsamplitude in het interval 0,20 tot 0,50 m/s klein zijn, terwijl de periode zorg draagt voor een evenredige verkleining van de betrouwbaarheid. De invloed van de periode is relatief sterker. Uitgaande van een b-waarde van 4 zal voor een middelingslengte van 0,6 m het bereiken van ribbellengtes van 0,15 m betekenen dat duidelijk $\Delta r_c / r_c$ gaat toenemen t.o.v. kleinere λ -waarden.

Bekijken van de resultaten voor de karakteristieke spreiding laat inderdaad zien dat er van een snelheidsafhankelijkheid nauwelijks sprake is.

Berekening van een gemiddelde karakteristieke spreiding per periode geeft het verband van Fig. 33b.

Er is een duidelijke toename met de periode aanwezig.

De spreiding neemt voor de kortere perioden bij benadering evenredig toe (λ ook!):

$$(\Delta r_c / r_c) \approx 2,5 T (\%) \text{ voor } T < 5 \text{ s.} \quad (5.17)$$

De spreiding als functie van de b-waarde beantwoordt aan de verwachting. Een kleinere waarde van de betrouwbaarheidsparameter geeft inderdaad een grotere karakteristieke spreiding (Fig. 33c) volgens het verband van Par. 4.5.2.5. De noodzaak van bedmiddeling ter verkrijging van reproducerende waarden is hiermee nog eens onderschreven.

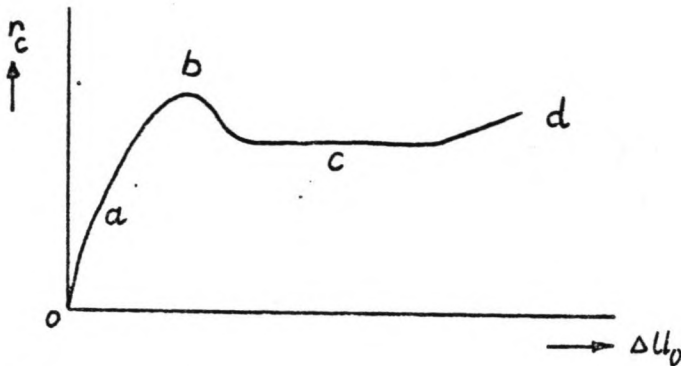
5.8.3 Snelheidsafhankelijkheid

De r_c -waarde hangt blijkens Fig. 33a van de snelheidsamplitude U_0 af. Omdat r_c gedefinieerd is voor $U_0 > U_c$ ligt het voor de hand om r_c als functie van $(U_0 - U_c)$ te bekijken, omdat dan de periodeafhankelijke verbanden elkaar niet meer doorsnijden.

Voor de grens van beweging U_c kan worden verwezen naar Par. 5.11.

Fig. 34a geeft de geschematiseerde verbanden voor de afnamelengte per periode als functie van $\Delta U = U_0 - U_c$.

Bekijken van de afhankelijkheid van ΔU_0 laat zien dat er sprake is van een viertal fasen, zoals in onderstaande schets is aangegeven:



De eerste tak (a) omvat dat deel van de snelheid (tot $\Delta U_0 = 0,10$ m/s) waarbij r_c sterk toeneemt met de snelheid ΔU_0 . In dit gebied zijn relatief weinig metingen, omdat nog nauwelijks sprake is van enige suspensievorming.

Deze tak zal in principe door het nulpunt van de grafiek moeten gaan.

De tweede tak (b) betreft de opzet in het r_c -verloop. Ofschoon deze niet aanwezig lijkt voor $T = 1,0$ s lijkt de aanwezigheid bij van de andere perioden reëel.

De opzet bevindt zich globaal tussen $\Delta U_0 = 0,10$ en $0,20$ m/s en bedraagt, onafhankelijk van de periode, ongeveer 20% ten opzichte van de voor een periode karakteristieke waarde (tak c).

Een verklaring voor deze opzet zou gevonden kunnen worden in de spitsheid van de ribbeltoppen bij lage snelheden ten opzichte van rondere toppen bij hogere U_0 -waarden.

Misschien is in de beginfase ook de bijdrage van de fijnere zandfractie groter, waardoor het (lichtere) zand relatief hoger komt (zie Par. 5.12).

Overigens bleek al eerder dat ook de verhouding bodemlaagdikte-ribbelhoogte voor lage snelheden relatief hoger is ten opzichte van bijv. $0,3$ m/s. Het sediment komt dus relatief hoger!

De verzadigingstak (c) levert een constante r_c -waarde die karakteristiek kan worden geacht voor de periode.

Het laatste deel (d) van het r_c -verloop ($U_0 > 0,5$ m/s) laat verhoudingsgewijs minder aannemelijke waarden zien. De r_c -waarden zijn veel hoger dan de karakteristieke waarde (duininvloed?).

5.8.4 Periode-afhankelijkheid

Fig. 34b geeft r_c als functie van T voor constante ΔU_0 -waarden.

De afnamelengte neemt recht evenredig toe met de periode voor $T < 5$ s.

(Deze betrekking geldt ook voor de ribbellengte en de ribbelhoogte!).

De periode-afhankelijkheid lijkt voor het hele r_c -verloop van toepassing, ook voor tak b van het verloop.

Fig. 35a geeft het verband tussen r_c/T en ΔU_0 .

Alle meetpunten vallen globaal op een enkel verband (met uitzondering van de hogere snelheden). Voor $T < 5$ s geldt:

$$r_c(\Delta U_0 | T) = T r_c(\Delta U_0 | T = 1,0 \text{ s}). \quad (5.18)$$

Voor deze perioden is het karakteristieke r_c -verloop getekend in Fig. 35b.

Voor de karakteristieke verzadigingswaarde geldt:

$$r_c/T = (8,2 \pm 0,5) \text{ mm/s} \quad (\text{voor } T < 5 \text{ s}). \quad (5.19)$$

Voor perioden groter dan $T = 5$ s lijkt het waarschijnlijk dat de r_c -waarde zal verzadigen en niet volgens bovenstaand verband meer zal toenemen, de steilheid van het concentratieverloop is immers begrensd.

5.8.5 Totaalafhankelijkheid afnamelengte

Fig. 35b geeft de totaalafhankelijkheid van de afnamelengte.

Onafhankelijk van de snelheid is er sprake van een karakteristiek niveau per periode als gegeven in de vorige paragraaf.

De opzet lijkt op basis van de resultaten van de zeefanalyse afkomstig van de snelheidsafhankelijke korrelverdeling van het gesuspendeerde materiaal (zie Par. 5.12).

De afhankelijkheid als beschreven sluit goed aan bij de resultaten van Par. 3.3.4 en onderschrijft het mechanisme van zandmeevoerende wervels (Vgl. 3.19).

5.8.6 Afnamelengte/ribbelhoogte

Vooraf kan worden opgemerkt dat de verhouding r_c/η onbetrouwbaar is voor $T = 7$ s (η te laag) en $U_0 > 0,5$ m/s (r_c en η onbetrouwbaar).

Op basis van afgeleide r_c - en η -verbanden toont Fig. 36a dat deze verhouding globaal gelijk is aan 1. Het r_c -verloop is in deze figuur getekend voor $U_c \approx 0,12$ m/s, zodat deze bij toename van de periode iets naar rechts verschuift, waardoor de verhouding r_c/η in het algemeen zal toenemen.

Het aldus berekende globale verband is getekend in Fig. 36b.

De directe meetresultaten zijn hierin tevens gegeven met weglating van de spreiding. Door de relatief vrij grote onnauwkeurigheid is de invloed van de periode niet meer duidelijk.

De evenredigheid van zowel r_c als η met de periode T verdwijnt voor de langere perioden, zodat de verhouding r_c/η niet door de periode wordt beïnvloed (wel invloed door $U_c(T)$).

Hiermee wordt trouwens ook de verwantschap van r_c en η weer geïllustreerd. Het in Par. 3.3.4 gegeven verband (Vgl. 3.21) klopt redelijk tot goed:

$$r_c/\eta \sim 1/WU_0. \quad (5.20)$$

De rechtertak beantwoordt goed aan de omgekeerde evenredigheid zijn met U_0 . De invloed van de valsnelheid ontbreekt omdat deze hier constant is.

Bij de lage snelheden daarentegen is de verhouding relatief kleiner, en op grond van bovenstaand verband niet te verklaren. Dit was trouwens ook niet te verwachten omdat deze afkomstig is van de sterke afname van r_c voor lagere snelheden die ook al niet volgde uit de relatie voor de afnamelengte zelf. De grootte van de verhouding klopt met de in de transportafschatting (Par. 1.3) geïntroduceerde parameter: $r_c/\eta = \alpha \approx 1$.

5.9 Bodemconcentraties

5.9.1 Algemeen

Fig. 37 geeft de resultaten voor de onderzochte omstandigheden. In de figuur is gebruik gemaakt van een logarithmische schaal voor de C_0 -waarden. Enerzijds

vanwege het grote traject (factor 10^4), maar anderzijds vanwege het feit dat eenzelfde relatieve spreiding nu altijd door een "errorbar" van gelijke lengte wordt weergegeven.

Evenals voor bodemgeometrie en afnamelengte dient met enige scepsis gekeken te worden naar de resultaten voor $U_0 \gtrsim 0,5$ m/s. De resultaten voor $T = 7$ s zouden wel eens te lage C_0 -waarden kunnen opleveren (η en A ook te laag).

5.9.2 Karakteristieke spreiding

De spreiding in de bodemconcentratie is afkomstig van een tweetal oorzaken, te weten:

- beddynamiek (analoog aan $\Delta r_c / r_c$),
- referentieniveau.

Deze laatste bijdrage levert een spreidingsvergroting evenredig met $\Delta z / r_c$ (zie Par. 4.5.2.6).

De spreiding in het referentieniveau (Δz) zal toenemen met zowel periode als snelheidsamplitude, terwijl de afnamelengte overheersend periode-afhankelijk toeneemt.

De spreiding als gevolg van beddynamiek neemt overheersend toe met de periode. Concluderend is er dus zowel een toename met snelheid als met periode aanwezig, al zal de laatste minder sterk zijn.

Voor $U_0 > 0,5$ m/s blijken de spreidingen zeer hoog te zijn. Het buiten beschouwing laten van de waarden voor deze snelheden laat per periode een toename met de snelheid zien.

Fig. 38a geeft een beeld van de spreiding voor $0,15 \text{ m/s} < U_0 < 0,35 \text{ m/s}$ en $0,35 \text{ m/s} < U_0 < 0,55 \text{ m/s}$ als functie van de periode.

Hogere snelheden lijken systematisch een iets grotere spreiding te geven. De spreiding neemt als functie van T alleen in het begin toe. In goede benadering geldt:

$$\Delta C_0 / C_0 = \begin{cases} (10 \pm 3)\% & \text{voor } 0,15 \text{ m/s} < U_0 < 0,35 \text{ m/s,} \\ (16 \pm 4)\% & \text{voor } 0,35 \text{ m/s} < U_0 < 0,55 \text{ m/s,} \\ > 20\% & \text{voor } U_0 > 0,55 \text{ m/s.} \end{cases} \quad (5.21)$$

Fig. 38b geeft een schets van het verloop van de spreiding op basis van deze resultaten.

In vergelijking met de afnamelengte zijn de spreidingen in de bodemconcentratie groter (extra foutbijdragen a.g.v. referentieniveau!).

5.9.3 Snelheidsafhankelijkheid

Op basis van de gevonden resultaten (en Par. 2.4.4) blijkt dat de bodemconcentratie sterk toeneemt met de snelheid. Uitzetten van het schematische verloop in een dubbellogaritmische plot levert bij benadering een aantal rechte lijnen zodat sprake lijkt te zijn van een machtsverband:

$$C_0 \sim (U_0)^m. \quad (5.22)$$

Duidelijke afwijkingen van dit verband lijken op te treden voor de hoge snelheden ($U_0 \gtrsim 0,5$ m/s), zoals overigens te verwachten was.

Voorts geldt dat er beneden de grens van beweging (U_c) geen suspensie aanwezig is en dus C_0 per definitie gelijk aan nul is.

We kunnen dus per periode een drietal fasen in het C_0 -verloop onderscheiden, te weten:

- a) de aanlooptak,
- b) de toenametak,
- c) de eindtak.

De eerste tak (a) omvat het deel van het snelheidsverloop vlak boven de grens van beweging, waarvoor theoretisch moet gelden $C_0 \rightarrow 0$ voor $U_0 \rightarrow U_c$. Dit deel van het C_0 -verloop is, analoog aan r_c , moeilijk te onderzoeken, aangezien nog nauwelijks sprake is van enige suspensie.

Deze tak zal (geleidelijk) overgaan in de toenametak.

In de tweede tak (b) neemt de concentratie snel toe.

Aangezien alle betrouwbare metingen tot deze fase behoren is de snelheidsafhankelijkheid in deze fase het beste te achterhalen.

De laatste tak (c) bevat in principe dat deel van de snelheden waarbij de ribbeltoppen als gevolg van de inzettende sheeflow weer worden afgevlakt en de concentratie dus anders van de snelheid zal afhangen dan in de tweede fase.

Beperking tot de resultaten uit tak b laat zien dat er een machtsverband aanwezig is.

Nadere analyse van de C_0 -waarden per omstandigheid (U_0, T) dient te gebeuren door een verband te fitten, zodanig dat dit:

- Klopt met de meetpunten, d.w.z. niet alle punten hoeven op het verband te liggen, maar de optedende verschillen mogen niet systematisch zijn.
- De verklaarde variatie (R^2) van C_0 met U_0 moet groot zijn.
- De afhankelijkheid van de snelheid is onafhankelijk van de bekeken periode (expliciete snelheidsafhankelijkheid!).
- De periode-afhankelijkheid moet duidelijk aanwezig zijn.

Houdt men in het te fitten verband rekening met het feit dat de concentratie voor de grens van beweging U_c nul is, dan is het volgende verband mogelijk:

$$C_0 = M \cdot (U_0 - U_c)^m. \quad (5.23)$$

Omgewerkt:

$$\ln C_0 = \ln M + m \cdot \ln(U_0 - U_c). \quad (5.24)$$

Op basis van plotjes bleek dat de macht van de term $(U_0 - U_c)$ ongeveer twee bedroeg, zodat de volgende varianten gefit werden:

I : $U_c = 0$ d.w.z. $C_0 = M(U_0)^m$; een relatief simpel model,

II : $U_c =$ waarde op basis van de gemeten grens van beweging (Par. 5.11, Vgl. 5.37),

III: $m = 2$ als vaststaand gegeven waarbij U_c wordt berekend (U_c^*).

De werkwijze bij het fitten, waarbij alle gemeten omstandigheden in principe zijn meegenomen, is zodanig dat telkens een punt extra (d.w.z. met hogere U_0) is toegevoegd.

Een random variërende m - en M -waarde als functie van het aantal meegenomen punten pleit voor de juistheid van het verband. Een plots optredende daling van R^2 betekent dat de geldigheid van het verband eindigt ($U_0 \sim 0,5$ m/s).

Tabel 4a geeft de resultaten van de fit.

Wat betreft de verbanden II en III wordt opgemerkt dat:

- soms omstandigheden met lagere snelheden niet meer aan het verband beantwoorden,
- de verklaarde variatie gemiddeld genomen lager is t.o.v. verband I,
- verband II (gemeten U_c) een duidelijk dalende macht (m) als functie van de periode te zien geeft, zoals blijkt uit Fig. 39b,
- verband III (vast $m=2$) een berekende U_c^* -waarde levert die niet gerelateerd is aan de echte grens van beweging en globaal constant lijkt. Fig. 39c laat de verschillende U_c - en U_c^* -waarden zien.

Bij verband I zien we dat R^2 over het algemeen hoger is terwijl alle omstandigheden voldoen ($U_0 < 0,5$ m/s). Bovendien lijkt de macht vrijwel onafhankelijk van de periode (Fig. 39a), er is dus een expliciete afhankelijkheid.

Concluderend geeft verband I de gemeten concentraties als functie van de snelheid het beste weer.

De aanlooptak voldoet ook aan dit verband, waarbij blijkbaar niet geldt dat onder de grens van beweging de concentraties nul zijn. Dit is analoog aan de bodemgeometrieparameters die extrapolierend voor $0 < U_0 < U_c$ ook waarden ongelijk aan nul opleveren.

Versand I voldoet voor $U_c < U_0 < U_m$ waarbij U_m de bovenbegrenzing aangeeft. Samenvattend:

$$C_0 = M(U_0)^m \text{ voor } U_c(T) < U_0 < U_m \text{ met } U_m \approx 0,5 \text{ m/s.} \quad (5.25)$$

Nadere analyse van dit modelverband geeft de resultaten zoals vermeld in Tabel 4b.

Fig. 40a geeft de macht m als functie van de periode met als resultaat:

$$m = 3,5 \pm 0,1. \quad (5.26)$$

De hoge macht van 3,5 geeft aan dat C_0 erg gevoelig is voor U_0 .

De afhankelijkheid van de periode zit in de M -waarde, waarover meer in de volgende paragraaf.

5.9.4 Periode-afhankelijkheid

In Tabel 4b staan de M-waarden als functie van de periode.
Als fitverband is gekozen (Fig. 40b):

$$M = M_0 \cdot T^q \quad (5.27)$$

Lineaire regressie levert $q = -2,0 \pm 0,1$, terwijl verder $M_0 \approx 3000 = 8,0$ gevonden wordt.

Met een verklaarde variatie van ongeveer 97% geldt dus:

$$M = M_0 \cdot T^{-2} \quad \text{met} \quad M_0 = 3000. \quad (5.28)$$

Een verdubbeling van de periode van de waterbeweging resulteert in een kwart van de oorspronkelijke concentratie bij gelijkblijvende snelheidsamplitude.

Toetsing van dit verband aan de gemeten concentraties bij verschillende snelheden levert Fig. 41.

Dat de macht van de periode een geheel getal oplevert is bemoedigend aangezien alle op het bodemgebeuren betrekking hebbende parameters een nette afhankelijkheid met de periode vertonen.

5.9.5 Totaalafhankelijkheid voor bodemconcentratie

De bodemconcentraties worden in goede benadering in hun afhankelijkheid beschreven door:

$$C_0 = M_0 \cdot U_0^{3,5} T^{-2}. \quad (5.29)$$

Het verband voldoet voor het snelheidsinterval:

$$U_c(T) < U_0 < U_m \quad \text{met:} \quad \begin{aligned} U_c &\approx 0,096 \cdot T^{0,33}, \\ U_m &\approx 0,5 \text{ m/s}. \end{aligned} \quad (5.30)$$

De grafiek van Fig. 42 toont lijnen van gelijke bodemconcentratie als functie van T en U_0 .

Voor $U_0 < U_m$ kloppen de meetwaarden goed, daarboven beduidend minder.

Fig. 43 geeft een vergelijking van gemeten en volgens het verband berekende concentraties.

Over 4 decaden (!) blijken de concentraties goed te voldoen.

De stippellijn geeft hierbij een spreidingsband van 20% aan.

Opvallend is eigenlijk dat $T = 6$ s ook voldoet, terwijl dit eerder (η, λ, r_c) niet het geval was.

De resultaten met dit simpele verband staan in schril contrast met die van de relaties volgens Nielsen (Par. 2.4.4).

5.9.6 Relatie Shieldsparemeter

Koppeling van de gemeten bodemconcentraties aan een Shieldsparemeter (Par. 2.4.4) levert de grafiek van Fig. 44 op. We zien hierin dat langere perioden systematisch lagere concentraties geven. De relatie bodemconcentratie-Shieldsparemeter dekt de afhankelijkheid van de periode onvoldoende.

Ook blijken punten in de eindtak ($U_0 > 0,5$ m/s) voor de verschillende perioden bij een hoge θ' -waarde te liggen, zodat blijkbaar niet in het algemeen geldt dat sprake is van sheetflow voor $\theta' \gtrsim 1$.

Het verband zoals gegeven door Nielsen voor de concentraties op ribbeltop-niveau (zie Vgl. 2.44):

$$C_N \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)} = 0,036 \cdot (\theta')^{1,7}. \quad (5.31)$$

Omgewerkt naar C_0 (kg/m³):

$$C_0 = C_N \cdot \rho_b \cdot \exp(\eta'/r_c), \quad (5.32)$$

waarin:

$$\rho_b \approx 2650 \text{ kg/m}^3,$$

$$\eta' \approx 2/3 \eta \quad (\text{niveau ribbeltoppen}),$$

$$r_c/\eta \approx 0,9 \quad (\text{Fig. 36b}),$$

zodat:

$$C_0 \approx 5560 \cdot C_N \quad (5.33)$$

Volgens Nielsen zou in goede benadering gelden:

$$C_{0,N} \approx 200 \cdot (\theta')^{1,7} \quad (5.34)$$

Dit verband (de stippellijn in Fig. 44) laat zien dat het, bij weglaten van de periode-aanduiding, aardig voldoet.

Afgezien van de kleine nauwkeurigheid van deze afleiding, kan het iets te hoog liggen van het verband verklaard worden uit het feit dat concentraties op ribbeltopniveau altijd hoger zijn dan op gemiddeld ribbeltopniveau.

De globale tendens is wel goed maar de invloed van de periode komt er niet op voldoende wijze uit.

Deze conclusie werd overigens door Nielsen zelf al getrokken.

De spreiding in de meetpunten is groot (orde 2 à 3), dit in schril contrast met Fig. 43 met spreidingen binnen orde 20%.

Concluderend lijkt de relatie van de bodemconcentratie met de Shieldsparameter geen succes.

5.10 Total load

5.10.1 Algemeen

De total load L_s , die iets zegt over de totale hoeveelheid gesuspendeerd sediment, is op een analoge wijze bekeken als de C_0 zodat weer dezelfde onderwerpen aan de orde zullen komen. De meetresultaten zijn gegeven in Fig. 45, met weglating van de karakteristieke spreidingen.

Naar verwachting ligt per omstandigheid de L_s -waarde vrij goed vast (zie duurmeting), zodat de karakteristieke spreiding klein is in vergelijking met C_0 .

De afhankelijkheid van periode en snelheid stelt ons voor de vraag of we vooraf, op basis van C_0 en r_c , iets meer kunnen zeggen over L_s .

Als het gevonden machtsverband voor C_0 goed is, dan impliceert dit dat het verband voor L_s minder net zou moeten aansluiten bij een machtsverband.

Weliswaar is r_c niet sterk afhankelijk van de snelheid (alleen toename- en opzetting), toch zal L_s (als product van r_c en C_0) merkbaar worden beïnvloed.

5.10.2 Karakteristieke spreiding

De spreiding in de load is in principe afkomstig van twee oorzaken, te weten:

- beddynamiek,
- referentieniveau.

De eerste invloed zal minimaal zijn op basis van de eerdere conclusies, zodat de fout t.g.v. het onbekende referentieniveau overheersend zal zijn. Er is, analoog aan C_0 , een afhankelijkheid van snelheid en periode aanwezig.

Fig. 46a geeft de resultaten voor twee snelheidsintervallen.

Vergelijking met de concentraties laat zien dat L_s iets beter bepaald is.

Voor de relatieve spreiding vinden we:

$$\Delta L_s / L_s = \begin{cases} (9 \pm 2)\% & \text{voor } 0,15 \text{ m/s} < U_0 < 0,35 \text{ m/s,} \\ (14 \pm 4)\% & \text{voor } 0,35 \text{ m/s} < U_0 < 0,55 \text{ m/s,} \\ > 20\% & \text{voor } U_0 > 0,55 \text{ m/s.} \end{cases} \quad (5.35)$$

Fig. 46b geeft een beeld van $\Delta L_s / L_s$ als functie van de snelheidsamplitude.

5.10.3 Snelheidsafhankelijkheid

De total load L_s gedrag als functie van de snelheid is gefit op analoge wijze als bij C_0 :

$$L_s = N \cdot (U_0 - U_c)^n, \quad (5.36)$$

met:

I : $U_c = 0$ d.w.z. $L_s = N \cdot U_0^n$,

II : U_c = waarde voor de grens van beweging (Par. 5.11, Vgl. 5.37)

III: $n = 2$ en $U_c = U_c^*$.

Het eerste verband komt overeen met dat van de bodemconcentratie. Door de invloed van de afnamelengte r_c zal bij snelheden in de toenametak, respectievelijk opzettak, dit verband worden onder-, resp. overschreden. De resultaten van de fit in Tabel 5, laten zien dat de verklaarde variatie klein is in vergelijking met die van C_0 . Bovendien blijkt de macht van n toe te nemen met de periode als gevolg van een relatief groter aandeel van de afname/opzettak. Dit verband voldoet dus niet.

De verklaarde variatie van het tweede verband is in vergelijking tot het eerste iets groter (Tabel 5). De reden hiervan is de U_c -afhankelijkheid van de afnamelengte. De macht n neemt sterk met de periode af. Fig. 47a toont de macht n als functie van de periode voor de beiden verbanden.

Het derde verband levert een U_c^* -verband dat geen relatie lijkt te vertonen met U_c . Een duidelijke trend ontbreekt eveneens (Tabel 5). De verklaarde variatie R^2 is (zeker in vergelijking met het verband voor C_0) veel minder.

Bekijken van verband II aan de hand van Fig. 47b toont dat deze snelheidsafhankelijkheid onjuist is, maar ook dat door inbreng van U_c de periodeafhankelijkheid minder duidelijk is geworden.

Op basis hiervan kan geconcludeerd worden dat de total load geen duidelijk verband met de snelheid vertoont.

Tenslotte wordt eraan herinnerd dat de hier gehanteerde total load is gedefinieerd door het product $r_c C_0$, wat slechts een (grobe) maat voor de echte total load is, (Par. 3.5.4.). De hier gehanteerde L_s heeft daarom een minder goed gedefiniëerde fysische betekenis.

5.10.4 Periode-afhankelijkheid

Evenals voor de snelheidsafhankelijkheid wordt de afhankelijkheid van de periode bij toepassing van een verband met U_c duidelijk verstoord. Een duidelijke relatie ($L_s \sim T^{-1}$) gaat over in een zeer onduidelijke relatie, wat betekent dat het optreden van de kritieke snelheid in een verband minder aannemelijk is.

Bekijkt men L_s als functie van T en U_0 in Fig. 48, dan lijkt de total load omgekeerd evenredig met de periode ($T < 5$ s), een afhankelijkheid die overigens al direct is af te leiden uit de relaties voor C_0 en r_c .

5.10.5 Totaalafhankelijkheid voor total load

Het berekenen van de total load L_s , als maat voor de hoeveelheid gesuspendeerd sediment, heeft voornamelijk zin bij vergelijking van metingen uitgevoerd bij dezelfde omstandigheid.

De total load heeft zelf geen eenvoudige afhankelijkheid met de snelheid en periode.

Globaal geldt wel dat de hoeveelheid opgewoeld sediment omgekeerd evenredig is met de periode ($T < 5$ s).

Opgemerkt moet worden dat de totaalafhankelijkheid van L_s natuurlijk direct volgt uit de C_0 - en r_c -relaties.

Een conclusie zou kunnen zijn dat C_0 en r_c hun grondslag vinden in twee aparte oorzaken. C_0 zou gerelateerd kunnen zijn aan de in een wervel aanwezige hoeveelheid sediment, r_c daarentegen aan de mate waarin het sediment in de wervel aanwezig blijft (zie Par. 6.3).

Dus C_0 en r_c bepalen L_s en niet andersom.

5.11 Kritieke snelheden

De resultaten voor de gedefinieerde grens van beweging U_c en het begin van beweging U_i zijn gegeven in Tabel 6.

Op basis van eerder onderzoek (Par. 2.5) is de afhankelijkheid van de periode getoetst aan een machtsverband (Fig. 49a).

Als resultaten werd achtereenvolgens gevonden:

$$U_c = 0,096 \cdot T^{0,33} \quad (\text{grens van beweging}), \quad (5.37)$$

$$U_i = 0,170 \cdot T^{0,23} \quad (\text{begin van beweging}). \quad (5.38)$$

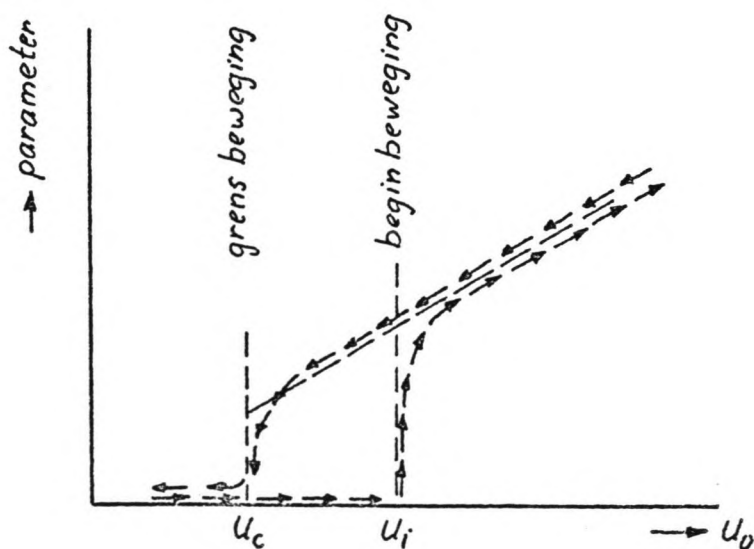
De resultaten van het verband voor U_c zijn gebruikt voor de analyse van C_o en L_s .

Vergelijking met eerder berekende verbanden voor kritieke snelheden (Fig. 13a) laat zien dat de tendens en orde van grootte redelijk worden weergegeven. Laten we het verband volgens Brebner achterwege dan volgt U_c de ondergrens van het bereik van de kritieke snelheden, terwijl U_i een bovenbegrenzing levert (Fig. 49b).

Nielsen (1979), Komar (1972) en Madsen & Grant (1976) vertonen dezelfde trend als U_c en U_i , zodat onderlinge verschillen slechts een factorkwestie zijn. Verder conclusies zijn onmogelijk aangezien het gebruikte criterium per relatie niet bekend is.

Opgemerkt moet worden dat er een sterke invloed is van de tijd die het sediment heeft om in beweging te komen: op den duur zal voor $U_c < U_0 < U_i$ uitgaande van vlak-bed best wel sprake zijn van beweging aangezien een kleine verstoring zich over het hele bed zal uitbreiden. Dit zal voor een deel ook de band van relaties tussen U_c en U_i verklaren.

Let op het luseffect (tussen U_c en U_i) dat optreedt bij de bepaling van een parameter als functie van de snelheid.



Laat men eerst de snelheid toenemen tot U_i en daarna tot $U_0 > U_i$, om te vervolgen met afnemende snelheid via U_i en U_c naar $U_0 < U_c$ dan doorloopt de bekeken parameter een soort lus.

Opvallend is dat sommige parameters niet extrapolerende naar nul gaan voor $U_0 = U_c$, maar wel voor $U_0 = 0$. De geldigheid van een verband gaat dan pas in voor $U_0 > U_c$.

Lijkt dit voor de afnamelengte niet het geval (zie Fig. 35b), voor de bedgeometrie parameters η , λ is dit wel zo (zie Fig. 30 en 31).

Dat de bodemconcentratie een relatie vertoont met de bodemgeometrie lijkt mede onderschreven door het feit dat het verband voor C_0 evenmin gerelateerd lijkt te zijn aan U_c !

5.12 Uitzeving

Voor drie duurmetingen zijn voor elk afzuigpunt respectievelijk de D_{10} , D_{50} en D_{90} bepaald.

De resultaten van de zeefanalyses zijn gegeven in Tabel 7a en Fig. 50.

Duidelijk blijkt de afname van D_x met de hoogte, die bovendien voor D_{90} verhoudingsgewijs het grootste is.

Het eerste dat opvalt is dat de dikte van de bodemlaag ook uit deze resultaten volgt (dichte symbolen). De afname van D met de hoogte z laat zien dat gradiënt in de bodemlaag duidelijk verschilt van het deel erboven, het meest duidelijk voor de D_{90} . Het niveau waarover de gradiënt over een relatief klein hoogteverschil verandert, is voor alle zeefparameters gelijk en lijkt identiek aan de al bekende bodemlaagdikte (Par. 5.5).

Een ander aspect is de korrelverdeling op de diverse niveau's, die wordt bepaald door de onderlinge ligging van D_{10} , D_{50} en D_{90} . Karakteristieke verhoudingen die deze verdeling beschrijven zijn voor het ongezeefde duinzand:

$$D_{10}/D_{50} = 0,7 \text{ en } D_{90}/D_{50} = 1,4. \quad (5.39)$$

Uit Fig. 51a blijkt dat deze verhoudingen in de bodemlaag vrijwel constant blijven, terwijl hogerop de D_{90} -zijde van de verhouding afneemt. Dit betekent dat de relatieve breedte van de korrelverdeling in de bodemlaag ongewijzigd blijft en er dus geen uitzeving optreedt in de zin van een afname van alleen het grofste materiaal.

In de hogere regionen neemt het aandeel van het grovere materiaal duidelijk af en wordt de korrelverdeling aan de rechterzijde vervormd.

Ter illustratie kunnen de verhoudingen uitgerekend worden voor het geval dat alleen het grofste materiaal uitgezeefd is. Als 20% van de korrelverdeling aan de grove zijde wordt afgekapt dan worden de verhoudingen:

$$D'_{10}(=D_8)/D'_{50}(=D_{40}) = 0,7 \text{ en } D_{90}(=D_{72})/D'_{50} = 1,3. \quad (5,40)$$

De verhouding aan de D_{90} -zijde neemt af. Deze tendens zien we ook in Fig. 51a. Blijkbaar wordt in de bovenlaag een steeds groter aandeel van het grovere materiaal uitgezeefd.

Een goede indruk over de mate van uitzeving is gegeven in Fig. 51b.

Hierin is D_{50} op niveau z gedeeld door de D_{50} van het bodemmateriaal ($218 \mu\text{m}$). Uitgedrukt in procenten blijkt de mate van uitzeving $(1 - D_{50}(z)/D_{50})$ voor beide omstandigheden ter plaatse van de bodemlaagbegrenzing (A) 20 à 25% te bedragen.

Deze waarde wordt ook gevonden voor duurmeting D1040 ($D_{50}(z=A)/D_{50} = 0,75$).

De uitzeving is blijkbaar zeer systematisch.

Naarmate het niveau stijgt is het effect sterker en blijkens de constante verhoudingen lijkt het dat deze invloed verband houdt met de korreldiameter.

Er zal dus een invloed van de korrelafmeting op de afnamelengte zijn zodanig dat het fijnere materiaal relatief hoger komt (grotere r_c).

Om dit nader te onderzoeken is de concentratieverdeling van de verschillende korrelfracties bekeken.

De verhouding tussen de concentratie op het niveau z en een referentieniveau ($z = z_r$) is:

$$R(z) = C(z)/C(z_r). \quad (5.41)$$

Definiëren we $p_i(z)$ als percentage van de massa dat op niveau z behoort tot diameter-interval i , dan krijgen we:

$$R_i(z) = C_i(z)/C_i(z_r) = \frac{p_i(z) \cdot C(z)}{p_i(z_r) \cdot C(z_r)} = \frac{p_i(z)}{p_i(z_r)} \cdot R(z) \quad (5.42)$$

De verhouding $R_i(z)$ als functie van de hoogte levert de afnamelengte r_{ci} .

Fig. 52 geeft de resultaten voor twee duurmetingen. Het referentieniveau is hierbij aangenomen als het onderste afzuigpunt voor zover geen sprake was van een verstoring ($z = 30$ mm ging bij D6029 wel eens door een ribbel).

Uit de figuur lijkt de afnamelengte afhankelijk van de korrelfractie: de concentratieverdeling vertoont een verloop dat steiler wordt naarmate de korrelfractie fijner is (zie ook Tabel 7b).

De gestippelde lijn geeft de concentratieverdeling voor het totale mengsel. De verdeling is hierbij exponentieel.

Blijkens Fig. 52 is de concentratieverdeling per korrelfractie in goede benadering ook exponentieel, zodat elke korrelfractie (i) een eigen afnamelengte r_{ci} heeft.

Fig. 53a geeft r_{ci} als functie van de per korrelfractie gemiddelde korreldiameter. Een grovere korrel resulteert in een kleinere afnamelengte. In Fig. 53b is r_c gegeven als functie van de valsnelheid (zie Fig. 14b) per korrelfractie.

In benadering is de afnamelengte omgekeerd evenredig met de valsnelheid:

$$r_c \sim 1/W. \quad (5.43)$$

De uitzeving in de bodemlaag lijkt dus het gevolg van het afhankelijk zijn van de afnamelengte van de in het zandmengsel aanwezige korreldiameters.

Deze conclusie lijkt aanvechtbaar. Dat elke korrelfractie een exponentieel concentratieverloop kent (met een eigen afnamelengte r_{ci}) klopt niet met het exponentiële concentratieverloop van het totale mengsel. Er zou dan immers gelden:

$$C(z_r) \cdot \exp\left(\frac{-(z-z_r)}{r_c}\right) = \sum_i C_i(z_r) \cdot \exp\left(\frac{-(z-z_r)}{r_{ci}}\right). \quad (5.44)$$

De sommatie van een aantal verschillende exponentiële verlopen levert in principe niet opnieuw een exponentieel verloop op.

De meetresultaten geven dat wel (verklaarde variatie: 99,7%).

M.b.v. Fig. 54 is verband(5.4.4) aannemelijk gemaakt.

Hierbij is uitgegaan van de rechterterm met daarin het percentage $p_i(z_r)$ van de massa dat op het referentieniveau ($z=z_r$) behoort tot korrelfractie i en de afnamelengte van een specifieke korrelfractie r_{ci} als gegeven in Tabel 7b.

Per korrelfractie wordt nu een exponentieel verband aangenomen.

Sommatie over alle fracties levert een verband dat overeen zou moeten komen met dat van het mengsel:

$$\sum_i p_i(z_r) \cdot \exp\left(\frac{-(z-z_r)}{r_{ci}}\right) \Rightarrow \text{conc.verloop mengsel.} \quad (5.45)$$

In Fig. 54 is deze bewerking uitgevoerd voor de beide duurmetingen.

De sommatie levert punten op die in zeer goede benadering weer op een rechte lijn liggen. Het concentratieverloop van het mengsel is dus ook exponentieel als het is samengesteld uit de sommatie van meerdere exponentiële concentratieverlopen per fractie (in goede benadering).

De gevonden afnamelengte van het mengsel klopt ook.

Uit de figuur blijkt dat het concentratieverloop van het mengsel voornamelijk wordt bepaald door de fracties 3, 4 en 5. De bijdrage van de andere fracties, met de duidelijk afwijkende r_c -waarden, is minimaal.

Als totaalbeeld vinden we voor de afnamelengte r_c de afhankelijkheid volgens (zie ook Par. 5.8):

$$r_c \sim T/W. \quad (5.46)$$

De relatie komt overeen met de in Par. 3.3.4 gegeven relatie, waar de afnamelengte werd gerelateerd aan de korrelbeweging in een omhoogbewegende wervel! Het nog niet geheel in suspensie zijn van het gehele zandmengsel, zoals dat bij ongezeefd zand bij de kritieke snelheden voorkomt, zal resulteren in een relatief kleinere gemiddelde korreldiameter met een relatief grotere afnamelengte.

Als het volledige mengsel in suspensie is (bij verder toenemende snelheid) zal de gemiddelde korreldiameter weer iets toenemen en dus een kleinere afnamelengte tot gevolg hebben.

De opzettak (Par. 5.8.3) in het r_c -verloop lijkt dus het gevolg van de snelheidsafhankelijke korrelverdeling van het gesuspendeerde sediment.

Bij een gezeefde zandsoort zou deze opzet moeten ontbreken!

Samenvattend levert dit voor de afnamelengte een verband volgens:

$$r_c = R_0 \cdot T/W, \quad (5.47)$$

met: $R_0 = 0,00022 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

Bij de bepaling van de constante R_0 is gebruik gemaakt van de gemiddelde valsnelheid van het bodemmateriaal ($W = 0,027 \text{ m/s}$).

Voor $T > 5 \text{ s}$ treedt er voor de invloed van de periode een verzadiging op.

6. Conclusies

6.1 Algemeen

In het vorige hoofdstuk zijn voor alle bekeken parameters afzonderlijk de resultaten geïnterpreteerd. Getracht zal worden enige conclusies te trekken voor het totaalgebeuren in de bodemlaag.

Par. 6.2 geeft het totaalbeeld van de concentraties in de bodemlaag. In Par. 6.3 zal een poging gedaan worden om de resultaten te verklaren aan de hand van een model dat het suspensiemechanisme in de bodemlaag beschrijft.

Uit het onderzoek blijkt dat in de bodemlaag sprake is van een proces als beschreven in Par. 2.1.

Uit de ingolftijd bij de duurmetingen volgt dat de groei naar het eindstadium voor suspensie en bodemgeometrie onderling gekoppeld is. De laagdikte waarin de wervels overheersen is gekoppeld aan de bodemlaagbegrenzing, d.w.z. een constante factor maal de ribbelhoogte.

De uitzeving in deze laag is zeer systematisch en de mate van uitzeving ter plaatse van de bodemlaagbegrenzing lijkt constant ($\sim 25\%$). De hoogte van deze begrenzing volgt zowel uit de tijds- en bedgemiddelde concentratieverticaal als uit de zeefresultaten, zodat het bestaan van een dergelijke bodemlaag reëel lijkt.

Het onderzoek naar de concentratieverdeling in de door wervels beheerste bodemlaag is derhalve zinvol.

Blijkens de bodemgeometrierelaties mag men de onderzoeksresultaten niet zonder meer vertalen naar het gebeuren onder een lopende golf.

6.2 Concentraties in de bodemlaag

Het inzicht in het gedrag van de concentratieverticaal vlak boven het bed als functie van hydraulische omstandigheden (T, U_0) is door uitvoering van dit onderzoek duidelijk vergroot.

Als eerste is daar het representatief zijn van een gemeten concentratieverticaal voor een omstandigheid.

Een voorwaarde hiervoor is dat boven een voldoende ingegolfd bed een tijds- en bedmiddeling plaatsvindt. Belangrijke aspecten hierbij zijn o.a. (zie Par. 4.5.2):

- de slaglengte van de middeling in verhouding tot de bedgeometrie,
- de tijdsduur van de middeling in verhouding tot het aantal golven,
- het gebruikte afzuigstelsel,
- goede reproductie van de waterbeweging, vooral de snelheidsamplitude U_0 ,
- de ligging van het referentieniveau.

Een karacteristieke concentratieverticaal blijkt als gevolg van de grote invloed van het dynamische bed veelal pas gevonden te worden na middeling van meerdere, bij dezelfde omstandigheid (T, U_0), onafhankelijk uitgevoerde metingen.

Hierbij is de total load een parameter die per meting beter vastligt, in vergelijking tot andere concentratieverticaal-beschrijvende parameters (zie Par. 5.4).

Een concentratieverticaal verloopt in de bodemlaag (ongeveer 3 ribbelhoogten dik) exponentieel en is volledig bepaald door een afnamelengte r_c en een bodemconcentratie C_0 volgens:

$$C(z) = C_0 \cdot \exp(-z/r_c). \quad (6.1)$$

De bodemconcentratie is afhankelijk van periode en snelheid van de waterbeweging volgens de in Par. 5.9 gegeven relatie:

$$C_0 = M_0 \cdot U_0^{3,5} \cdot T^{-2} \text{ voor } T < 7 \text{ s en } U_c < U_0 \lesssim 0,5 \text{ m/s.} \quad (6.2)$$

De constante M_0 is afhankelijk van het bedmateriaal.

De karakteristieke afnamelengte wordt sterk bepaald door de periode van de waterbeweging en de snelheidsafhankelijke korrelverdeling van het gesuspendeerde materiaal (Par. 5.8/12):

$$r_c = R_0 \cdot T/W \text{ voor } T < 5 \text{ s.} \quad (6.3)$$

Voor langere perioden lijkt r_c niet meer toe te nemen met de periode. De invloed van de valsnelheid is zichtbaar aanwezig bij de lage snelheden waarbij nog niet alle korrelfracties van het bodemmateriaal in suspensie zijn. De gemiddelde korrel is dan fijner, de valsnelheid lager en de afnamelengte hoger.

6.3 Suspensiemechanisme in de bodemlaag

6.3.1 Algemeen

Het hier gepresenteerde model voor het suspensiemechanisme in de bodemlaag is slechts een aanzet in de richting waarin volgens de auteur gedacht kan worden. De bewijzen zijn geenszins waterdicht, verder onderzoek zal moeten uitwijzen of de gelegde relaties al dan niet juist zijn.

Hoewel er veel verschil van mening bestaat over het al dan niet diffusief of convectief zijn van het suspensie-mechanisme, lijkt het duidelijk dat convectie (d.w.z. meevoering van korrels door de waterbeweging) in de bodemlaag van overheersend belang is.

Het gebruiken van "diffusiecoëfficiënten" voor de beschrijving van de concentratieverdeling is dan fysisch onjuist, maar kan gehanteerd worden als "verspreidingscoëfficiënt".

De bodemlaag is het gebied waarin de wervels dominant zijn.

Deze (water)wervels ontstaan achter de ribbeltoppen en verplaatsen zich (d.w.z. rollen over nieuwe wervels) naar hogere niveau's tot dat hun energie uitgeput is. Aangezien ontstaan en beweging gekoppeld zijn aan de ribbelvormen moet de bovenbegrenzing van de bodemlaag gerelateerd zijn aan de ribbelgeometrie (zie Par. 3.2).

Uit de metingen volgt een constante verhouding $A \approx 3 \cdot \eta$ (Par. 5.5.2).

In Fig. 55a is dit nog eens aangegeven.

Men mag veronderstellen dat het mechanisme van de waterwervels altijd aanwezig is over de aangegeven dikte als er sprake is van een ribbelgeometrie.

Voor het sediment blijkt uit eerdere berekeningen dat dit gevangen kan worden in een wervel en wel aan de ribbeltopzijde, d.w.z. daar waar de opwaartse snelheden de overhand hebben (Par. 3.3.4).

Als de wervel omhoog beweegt blijft het opgenomen zand in de wervel aanwezig en wordt eveneens omhoog gebracht (Fig. 55b).

Bekijkt men het totaalgebeuren in de bodemlaag dan is sprake van twee fasen, te weten:

- I De opname van het sediment door de achter de ribbeltop draaiende wervel.
- II Het meevoeren van het sediment met de "omhoog rollende" wervel.

De opname van sediment in de wervel vindt plaats achter elke ribbeltop. De hoeveelheid sediment in een wervel op het moment dat deze op het punt staat omhoog te gaan is van groot belang voor de concentraties onder in de bodemlaag. In Fig. 55c is deze fase getekend.

Concluderend zou men kunnen stellen:

De bodemconcentratie is volledig bepaald door fase I van het suspensieproces.

Het uit fase I afkomstige aanbod wordt met de wervels meegevoerd. Gemiddeld over het bed bewegen de wervels omhoog.

De mate waarin het zand aanwezig blijft in de omhoog bewegende wervels zegt iets over de concentratieverdeling (Fig. 55d).

De afnamelengte is volledig bepaald door fase II van het suspensieproces.

Als totaalmodel voor het suspensiemechanisme in de bodemlaag zien we een kringloop voor de zandkorrels waarbij de parameters C_0 en r_c in afzonderlijke fasen bepaald zijn als gegeven in Fig. 56.

Tot besluit zullen beide fasen afzonderlijk bekeken worden.

6.3.2 Bodemconcentratie: fase I

De hoeveelheid sediment in een wervel is bepalend voor de bodemconcentratie (Fig. 56). Gebruikmakend van de in Par. 3.5.2 gegeven relaties vinden we:

$$C_0 \sim L_v/\lambda, \quad (6.4)$$

waarin:

L_v = vortex load (kg/m^2),

λ = ribbellengte.

De ribbellengte is blijkens de proefresultaten goed gerelateerd aan de uitwijkingamplitude x_0 (Par. 5.6.3) zodat:

$$\lambda \approx x_0 \sim U_0 T. \quad (6.5)$$

Uit het afgeleide verband voor de bodemconcentraties volgt:

$$C_0 \sim U_0^{3,5} \cdot T^{-2} \sim \frac{L_v}{U_0 T}, \quad (6.6)$$

$$\rightarrow L_v \sim U_0^{4,5} \cdot T^{-1} = \left(\frac{U_0}{T}\right) \cdot U_0^{3,5}. \quad (6.7)$$

Zouden de gedane aannamen juist zijn dan moet de in een enkele wervel opgenomen hoeveelheid sediment de gegeven relatie (6.7) vertonen met de waterbewegingsparameters U_0 en T .

In Par. 3.3.4 is aannemelijk gemaakt dat de ruimte voor het opnemen van sediment kwadratisch toeneemt met de snelheid wat een deel van de relatie zou kunnen verklaren. Mogelijkerwijs bestaat ook een verband met de versnellingen.

Verder onderzoek naar de relatie van L_v met de waterbeweging zou meer duidelijkheid kunnen verschaffen en is derhalve zeer zinvol.

6.3.3 Afnamelengte: fase II

De mate waarin het sediment in de omhoogbewegende wervel aanwezig blijft is bepalend voor de afnamelengte (Fig. 56).

In Par. 3.3.4 is een relatie gelegd tussen de afnamelengte r_c en de verhouding t_t/T (Vgl. 3.18):

$$r_c \sim t_t/T, \quad (6.8)$$

waarin:

t_t = de tijd waarin een korrelbaandiameter met een factor e toeneemt,
 T = de waterbewegingsperiode.

Ook is afgeleid dat (Vgl. 3.19):

$$t_t/T \sim T/W. \quad (6.9)$$

Deze betrekking voldoet zolang de ribbelhoogte η evenredig toeneemt met de periode ($T < 5$ s). Voor langere perioden neemt de invloed van de periode af.

Conclusie:

$$r_c \sim T/W \quad \text{voor } T < 5 \text{ s.} \quad (6.10)$$

Dit verband klopt met de resultaten van paragrafen 5.8 en 5.12.

Ook de verhouding tussen de afnamelengte en de ribbelhoogte lijkt juist (Fig. 36b):

$$r_c/\eta \sim \frac{1}{U_0 \cdot W} \quad \text{voor alle } T. \quad (6.11)$$

De aanname dat de suspensieverdeling in de verticaal vlak boven het zandbed berust op de meevoering van korrels met de omhoogbewegende wervels lijkt redelijk onderschreven en is in ieder geval geen geweld aangedaan.

Overzicht gebruikte symbolen

symbool	omschrijving	eenheid
A	dikte bodemlaag (laagdikte boven geribbeld bed waarbinnen de concentraties een enkelvoudig exponentieel verband volgen)	m
A_p	oppervlakte korrels (projectie)	m^2
A_v	constante t.b.v traagheidsinvloedafschatting	m/s
b	betrouwbaarheidsverhouding ($= d_m / \lambda$)	-
b_0	schatter voor β_0 in lineair regressiemodel	-
b_1	idem voor β_1	-
C	coëfficiënt van Chézy	$m^{1/2}/s$
$C(z)$	sedimentconcentratie	kg/m^3
C_0	geëxtrapoleerde concentratie op vlakbedniveau $z=0$	kg/m^3
C_A	concentratie op sprongniveau $z=A$	kg/m^3
C_D	dragcoëfficiënt	-
C'_D	idem; momentane waarde	-
C_M	added mass coëfficiënt	-
C_N	concentratie boven ribbeltop volgens Nielsen	m^3/m^3
C_S	afgezogen concentratie; van belang voor afzuigcalibratie	kg/m^3
d_m	slaglengte bedmiddelaar	m
D	korreldiameter	m
D_x	korreldiameter; door zeefdiameter D_x passeert nog x% van de massa van het materiaal	m
D_z	bedgemiddelde diffusiecoëfficiënt in z-richting	m
E	parameter t.b.v. transportverdelingsberekening	-
f_w	evenredigheidsconstante voor de schuifspanning onder golven	-
F	willekeurige functie	-
g	versnelling van de zwaartekracht	m/s^2
h	waterdiepte	m
$I_\alpha(y)$	geïntegreerde transportverdelingsparameter	-
k	ruwheidswaarde in f_w -verband	m
L_s	total load; hoeveelheid gesuspendeerd sediment	kg/m^2
L_v	vortex load; hoeveelheid sediment aanwezig in een twee-dimensionale wervel	kg/m^2
m	macht in verband dat C_0 als functie van snelheid beschrijft	-

M	parameter in verband dat C_0 als functie van snelheid beschrijft	F(m)
M_0	parameter in verband dat C_0 als functie van de waterbeweging beschrijft	$\text{kg} \cdot \text{s}^{5,5} / \text{m}^{6,5}$
n	aantal punten in de bodemlaag:	-
	ook; macht in het verband dat L_s als functie van snelheid beschrijft	-
N	aantal proeven dat is uitgevoerd bij eenzelfde omstandigheid	-
N_i	aantal golven tijdens de ingolftijd	-
P	parameter t.b.v. reproductie en relatieve spreidingen	-
P_i	percentage massa dat behoort tot specifieke korrelfractie	%
P_x	willekeurige parameter gebaseerd op relaties met X	-
q	macht in verband dat C_0 als functie van de periode beschrijft	-
r	bedruwheid	m
r_c	afnamelengte; hoogte waarover de concentratie met een factor e afneemt	m
r_{ci}	idem; voor een specifieke korrelfractie	m
r_w	straal van een wervel (gerelateerd aan de ribbelhoogte)	m
$r_{\frac{1}{2}}$	concentratie halveringslengte; hoogte waarover de concentratie halveert	m
R	straal van een wervel	m
\vec{R}	plaatsvector in een wervel	-
$R_i(z)$	verhouding tussen $C_i(z)$ en de concentratie op een referentieniveau voor een specifieke korrelfractie	-
R_0	parameter in het verband dat r_c beschrijft	m^2/s^2
R^2	verklaarde variatie van C als functie van z door het opgelegde model	-
Re	korrel Reynolds-getal $(\frac{W \cdot D}{\nu})$	-
Re'	idem; momentane waarde	-
s	relatieve dichtheid ρ_s / ρ (2,65)	-
s^2	schatting voor σ^2 voor lineair regressiemodel	-
SF	shape factor; zegt iets over korrelvorm (= 0,7)	-
S(z)	transportverdelingsparameter	-

$S_\alpha(y)$	transportverdelingsparameter als functie van dimensieloze hoogte	-
t	tijd	s
t_i	ingolftijd benodigd voor verkrijgen evenwichtssituatie	s
t_t	tijd waarin de korrelbaandiameter in een wervel met een factor e toeneemt	s
T	periode van de waterbeweging	s
$\vec{u}_u(r)$	snelheidsvector waterbeweging als functie van straal	-
$u(t)$	snelheid waterbeweging als functie van tijd	m/s
$u(z)$	snelheid waterbeweging als functie van hoogte	m/s
U_b	snelheid nabij de bodem	m/s
U_c	kritieke snelheidsamplitude; grens van beweging	m/s
U_c^*	kritieke snelheidsamplitude; z.d.d. $C_0 \sim (U_0 - U_c^*)^2$	m/s
U_i	kritieke snelheidsamplitude; begin van beweging	m/s
U_m	bovengrens snelheidsamplitude	m/s
\vec{U}_p	snelheid van de zandkorrels	m/s
U_s	snelheid in het afzuigsysteem	m/s
U_0	snelheidsamplitude ongestoorde waterbeweging	m/s
U^*	bodemschuifspanningssnelheid	m/s
\vec{v}	snelheidsvector als gevolg van traagheid van korrels	m/s
V	volume korrels	m^3
\vec{w}	valsnelheidsvector korrel	-
W	valsnelheid korrel in stilstaand water	m/s
$x(t)$	uitwijking als functie van de tijd	m
x_0	uitwijkingsamplitude waterbeweging; ook: plaats in wervel waar valsnelheid gelijk is aan de opwaartse wervelsnelheid ($= w/\Omega$)	m
y	dimensieloze hoogte; z -waarde/ruwheidswaarde, van belang bij transportverdeling	-
Y	willekeurige parameter	-
Y_0	dimensieloze hoogte waarop $z=z_0$	-
z	hoogte boven referentieniveau	m
z_r	referentieniveau t.b.v. uitzevingsberekeningen	m
z_0	hoogte waarop $u=0$ bij een logaritmisch snelheidsprofiel	m

α	coëfficiënt in de bewegingsvergelijking ($= (s-1)/(s+C_m)$); ook: verhouding tussen afname lengte en bedruwheid t.b.v transportverdeling ($= r_c/r$)	- -
β	parameter t.b.v. korrelbeweging ($= \alpha \cdot g/w \cdot \Omega$); ook: dimensieloze spronghoogte, $y=\beta$	- -
β_0	parameter in lineaire regressiemodel ($= \ln C_0$)	-
β_1	idem ($= 1/r_c$)	-
γ	parameter voor de afhankelijkheid C_D en Re ($\gamma=1$; Stokesgebied); ook: relatieve concentratiegradiënt	- m^{-1}
ε	random error in lineair regressiemodel	-
ε_s	diffusiecoëfficiënt van het sediment	m^2/s
κ	constant van von Kàrmàn	-
η	gemiddelde ribbelhoogte	m
η'	niveau ribbeltoppen; $z=\eta'$	m
θ	Shieldsparameter	-
θ'	Shieldsparameter betrokken op de korrelruwheid	-
θ_c	kritische Shieldswaarde	-
θ_i	idem, begin van beweging	-
λ	gemiddelde ribbellengte	m
ρ	dichtheid van water (1000)	kg/m^3
ρ_b	dichtheid van het sediment incl poriën (bulk density)	kg/m^3
ρ_s	dichtheid van het sediment (2650)	kg/m^3
σ	spreidingsparameter voor de concentratieverdeling	-
τ	bodemschuifspanning; ook: tijdsfractie waarbinnen een korrel zich op een bepaald niveau interval bevindt	kg/ms^2 s
ν	kinematische viscositeit van water	m^2/s
ϕ	hoek van inwendige wrijving van de korrels; ook: faseverschuiving als gevolg van korreltraagheid	rad
ω	hoekfrequentie waterbeweging ($= 2\pi/T$)	rad/s
Ω	hoeksnelheid in een wervel	rad/s
\bar{x}	gemiddelde waarde van x	
$E\{x\}$	verwachtingswaarde van x	
$Var\{x\}$	variantie van x	
Δx	interval; nauwkeurigheid	

Literatuur

Booy, R,

Turbulentie, Collegedictaat b 82, THD

Bosman, J.J., 1695-I (dec. 1981); Bedbehaviour and sand concentration under oscillatory water motion, DHL

M 1695-II (febr. 1982); Concentration measurements under oscillatory water motion, DHL

M 1875 (dec. 1982); Concentratieverdeling onder golven en stroom, WL GEOMOR.

R 716-IV (juli 1981); Optical measurements of sediment concentration. DHL

M 1695-II (nov. 1983); Vergelijking golftunnel en gidsgoot m.b.t. sedimentconcentratie en bedgeometrie, TOW-nota

Brebner, A. (1980),

Sandbedforms under oscillatory motion, CEC 1980, pp. 1340-1344

Carstens, M.R., Nielson, F.M. en Altinbilek, H.D. (1969),

Bedforms generated in the laboratory under an oscillatory flow, Analytical and experimental study, CERC Techn. Mem. No. 28

Dingler, J.R. en Inman D.L. (1976),

Wave formed ripples in nearshore sands, CEC 1976, pp. 2109-2127

Draper, N. en Smith H. (1966),

Applied regression analysis, Ed. John Wiley & Sons, New York

Graf, W.H. (1971),

Hydraulics of Sediment Transport, McGraw-Hill, New York

Hallermeier, R.J. (1980),

Sand motion intitiation by water waves, Proc. ASCE, 106 (WW7) pp. 299-318

- Hulsbergen, C.H. (1981),
Bepaling zandconcentraties door dwars afzuiging, konseptnota M 1627, WL
- Johnson, I.G. en Carlsen, N.A. (1976),
Experimental and theoretical investigations in an oscillatory (rough) turbulent boundary layer, J. Hydr. Res., Vol. 14, No. 1, pp. 45-60
- Komar, P.D. en Miller, M.C. (1974),
Sediment threshold under oscillatory waves, CEC 1974, pp. 756-776
- Longuet-Higgins, M.S. (1981),
Oscillating flow over steep sand ripples, Journal of Fluid Mech., Vol. 107, pp. 1-35
- Madsen, O.S. en Grant, W.D. (1976),
Quantitative description of sediment transport by waves, CEC 1976, pp. 1093-1113
- Massie, W.W. e.a. (1980),
Coastal Engineering, Volume II, Harbour and beach problems, Colledge-
taat f11B, THD
- Mogridge, G.R. en Kamphuis, J.W. (1972),
Experiments on bedform generation by wave action, CEC 1974, pp. 1123-1142
- Nielsen, P. (1979),
Some basic concepts of wave sediment transport, ISVA, Techn. Univ. of
Denmark.
- Nielsen, P., Green, M.O. en Goffey, F.C. (1982),
Suspended sediment under waves, Coastal Studies Unit (Univ. of Sydney),
Techn. Rep. No. 82/6
- Swart, D.H. (1976),
Predictive equations regarding costal transport, CEC 1976, pp. 1113-1132

Tunsdall, E.B. en Inman, D.L. (1975),

Vortex generation by oscillatory flow over rippled surfaces, J. Geophys.
Res., Vol. 80, No. 24, pp. 3475-3485

Vos, J.W.E. (1983),

Toegepaste statistiek B, Collegedictaat a94, THD

Gebruikte afkortingen:

CEC Coastal Engineering Conference

DHL Delft Hydraulics Laboratory

THD Technische Hogeschool Delft

TOW Toegepast Onderzoek Waterstaat

WL Waterloopkundig Laboratorium

DEEL B

INHOUD

Tabellen

Appendices

Figuren

Tabellen

- 1 Meetresultaten.
- 1 a Resultaten duurmelingen.
- 1 b Correlaties duurmelingen.
- 1 c Resultaten individuele metingen.
- 1 d Correlatieresultaten individuele metingen.
- 1 e Totaaloverzicht meetresultaten.
- 2 Overzicht spreidingsresultaten duurmelingen.
- 3 Overzicht correlatieresultaten.
- 4 Fitresultaten bodemconcentratie.
- 4 a Resultaten per verband.
- 4 b Resultaten verband I.
- 5 Fitresultaten total load.
- 6 Resultaten kritieke snelheden.
- 7 Resultaten zeefanalyse.
- 7 a Zeefresultaten.
- 7 b Afhankelijkheid afnamelengte.

Appendices

- I Transportverdelingsafschatting.
- II Korrelbewegingen.
- II -a Bewegingsvergelijking.
- II -b Lineaire afschatting.
- III Korrelbeweging in wervel.
- III-a Standaardwervel.
- III-b Rankine-wervel.
- III-c Invloed traagheid.
- IV Regressieanalyse.

Figuren

- 1 a Benadering waterbeweging onder een golf vlak boven de bodem.
- 1 b Transportprofiel als produkt van concentratie- en snelheidsprofiel.
- 2 Transportverdelingsparameter $S_\alpha(y)$ voor diverse waarden van α .
- 3 a Parameter $E(y_0/\alpha)$ voor diverse waarden van α ($y_0 = 1/33$).
- 3 b Parameter $E(y/\alpha)$ voor diverse waarden van y/α .
- 4 Geïntegreerde transportverdelingsparameter $I_\alpha(y)$ voor diverse waarden van α .
- 5 Percentage van het totaaltransport onder het niveau y .
- 5 a Eenlaagsmodel, diverse waarden van α .
- 5 b Tweelagenmodel, diverse waarden van β ($\alpha_1 = 1, \alpha_u = 10$).
- 6 a Evenredigheidsconstante f_w als functie van $U_0 \cdot T$.
- 6 b Shieldsparameter θ' als functie van U_0 voor diverse waarden van T .
- 7 a Bedvormen volgens Bosman (M1695-I).
- 7 b Bedvormen volgens Carstens en Nielsen.
- 8 a Ribbelhoogte volgens Mogridge en Kamphuis.
- 8 b Ribbelhoogte volgens Nielsen.
- 9 a Ribbellengte volgens Brebner.
- 9 b Ribbellengte volgens Mogridge en Kamphuis.
- 9 c Ribbellengte volgens Bosman (M1695-I).
- 9 d Ribbellengte volgens Nielsen.
- 10 a Ribbelsteilheid volgens diverse verbanden.
- 10 b Ribbelsteilheid volgens Nielsen.
- 11 Ribbelgeometrie voor ongezeefd duinzand ($D_{50} = 218 \mu\text{m}$) volgens Nielsen.
- 11 a Ribbelhoogte.
- 11 b Ribbellengte.
- 11 c Ribbelsteilheid.
- 12 Concentraties op ribbeltopniveau gerelateerd aan de Shieldsparameter; volgens Nielsen.
- 13 a Diverse verbanden voor het begin van beweging voor ongezeefd duinzand.
- 13 b Kritische Shieldswaarden volgens Madsen en Grant.
- 14 a Coëfficiënt C_D als functie van het Reynoldsgetal.
- 14 b Verband tussen de diameter (D) en de valsnelheid (w).

- 15 Korrelbewegingen in een wervel.
- 15 a Standaardwervel.
- 15 b Rankine-wervel.
- 16 Concentratie als kans voor een drietal korrelbewegingen.
- 17 Concentratie op 10 mm boven een ribbeltop gemiddeld over 99 perioden.
- 18 Concentraties in een vast punt als functie van de tijd ($T=3$ s, $U_0=0,40$ m/s).
- 19 a Concentratieverloop in de bodemlaag.
- 19 b Schema doelstelling en relaties bodembegeuren.
- 19 c Voorbeeld van enkele concentratieverticalen.
- 20 Zeefkrommē ongezeefd duinzand.
- 21 a Schema van de golftunnel.
- 21 b Schema van de meetsectie.
- 22 Overzicht elementen golftunnel.
- 23 a Tunnelbereik bij normale en gereduceerde breedte van de meetsectie.
- 23 b Afzuigcalibratie voor dwarse afzuiging.
- 24 Schema verwerking concentraties.
- 25 Overzicht uitgevoerde proeven.
- 26 a Resultaten duurmeting; $T=1$ s, $U_0=0,40$ m/s.
- 26 b Resultaten duurmeting; $T=2$ s, $U_0=0,30$ m/s.
- 26 c Resultaten duurmeting; $T=4$ s, $U_0=0,35$ m/s.
- 26 d Resultaten duurmeting; $T=6$ s, $U_0=0,2875$ m/s.
- 27 Ingolftijd bij de duurmetingen.
- 27 a Definitie ingolftijd.
- 27 b Afhankelijkheid van de periode.
- 27 c Afhankelijkheid van het aantal golven (N_i).
- 28 a Bodemlaagdikte als functie van periode en snelheidsamplitude.
- 28 b Relatie bodemlaagdikte/ribbelhoogte.
- 29 a Geschematiseerde verbanden ribbelhoogte.
- 29 b Geschematiseerde verbanden ribbellengte.
- 30 a Ribbelhoogte als functie van de periode.
- 30 b Snelheidsafhankelijkheid ribbelhoogte.
- 30 c Verband ribbelhoogte; metingen en literatuur.
- 31 a Snelheidsafhankelijkheid ribbellengte.
- 31 b Verband ribbellengte; metingen en literatuur.
- 31 c Afhankelijkheid ribbelsteilheid.
- 32 a Random error als functie van de periode.

- 32 b Onverklaarde variatie als functie van de periode.
- 33 a Afnamelengte als functie van periode en snelheid.
- 33 b Karakteristieke relatieve spreiding als functie van de periode.
- 33 c Karakteristieke relatieve spreiding als functie van de b-waarde.
- 34 a Geschematiseerd verband voor de afnamelengte per periode als functie van de snelheid $\Delta U_0 (=U_0 - U_c)$.
- 34 b Periodeafhankelijkheid afnamelengte.
- 35 a Snelheidsafhankelijkheid afnamelengte.
- 35 b Verband afnamelengte.
- 36 a Verbanden afnamelengte en ribbelhoogte.
- 36 b Verband afnamelengte/ribbelhoogte-verhouding.
- 37 Bodemconcentraties als functie van periode en snelheid.
- 38 a Karakteristieke relatieve spreiding als functie van periode en snelheidsinterval.
- 38 b Verband karakteristieke relatieve spreiding.
- 39 a Macht van verband I als functie van de periode.
- 39 b Macht van verband II als functie van de periode.
- 39 c Snelheid U_c^* van verband III als functie van de periode.
- 40 a Macht van de snelheid (verband I).
- 40 b M-waarde als functie van de periode.
- 41 Concentratie C_0 als functie van periode en snelheid.
- 42 Lijnen met constante bodemconcentratie.
- 43 Vergelijking gemeten en volgens verband I berekende concentraties.
- 44 Verband bodemconcentraties volgens Nielsen.
- 45 Total load als functie van periode en snelheid.
- 46 a Karakteristieke relatieve spreiding als functie van snelheid en periode.
- 46 b Verband karakteristieke relatieve spreiding.
- 47 a Macht van snelheid voor verschillende L_s -beschrijvende verbanden.
- 47 b Relatie L_s met $(U_0 - U_c)^2$ als functie van snelheid en periode.
- 48 Snelheids- en periodeafhankelijkheid van de total load.
- 49 a Kritieke snelheden als functie van de periode.
- 49 b Vergelijking gevonden verbanden met die van Fig. 13a.
- 50 Zeefdiameters als functie van de hoogte.

- 51 a Parameter D_x/D_{50} als functie van de hoogte.
- 51 b Parameter $D_{50}(z)/D_{50}$ als functie van de hoogte.
- 52 Invloed korreldiameter op concentratieverdeling.
- 53 a Verband tussen de korreldiameter (gemiddeld per fractie) en de afnamelengte.
- 53 b Verband tussen de valsnelheid (gemiddeld per fractie) en de afnamelengte.
- 54 Mengsel samengesteld uit exponentieel concentratie-verloop per korrelfractie.
- 55 a De bodemlaag.
- 55 b De waterwervel met daarin de zandwervel.
- 55 c Fase I van het suspensieproces.
- 55 d Fase II van het suspensieproces.
- 56 Suspensievorming/verdeling-beschrijvend model.

TABELLEN

TIME-SERIES RESULTS FOR T=1 S AND U=0.40 M/S

TIME (MIN)	TEST	R-LENGTH		R-HEIGHT		STEEPNES		RATIO RC/RH		LENGTH RC		CG		TOTAL LOAD		MEASUREMENT RAND. ERROR (PCT)	EXPLANED VARIATION (PCT)
		VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M3)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M2)	ERROR (PCT)		
5	T242	73.0	7.1	9.0	10.5	.11	14.4	1.04	16.9	8.3	11.3	111	42.4	0.929	31.6	19.3	98.71
22	T243	70.0	7.1	10.0	10.0	.14	12.3	.87	16.8	8.7	13.0	88.0	51.4	0.761	36.7	22.0	98.22
37	T244	65.0	7.7	9.0	11.1	.14	13.5	1.03	17.2	9.3	13.1	72.0	48.0	0.666	35.5	20.0	98.32
52	T245	65.0	7.7	10.0	10.0	.15	12.6	.87	14.2	8.7	10.1	103	37.3	0.949	27.0	16.5	98.99
63	T246	65.0	7.7	10.0	10.0	.15	12.6	.86	14.6	8.6	10.7	100	39.9	0.866	29.1	17.6	98.88
76	T247	65.0	7.7	10.0	10.0	.15	12.6	.91	16.3	9.1	12.9	67.6	45.4	0.616	33.0	20.0	98.36
94	T248	65.0	7.7	10.0	10.0	.15	12.6	.88	17.3	8.8	14.1	97.2	55.9	0.556	42.3	22.6	98.68
111	T249	65.0	7.7	10.0	10.0	.15	12.6	.92	19.3	9.2	16.5	72.9	62.7	0.669	46.8	25.4	97.36
124	T250	65.0	7.7	10.0	10.0	.15	12.6	.85	14.1	8.5	10.0	78.1	35.3	0.666	25.8	16.5	99.61
143	T251	65.0	7.7	10.0	10.0	.15	12.6	.89	15.8	8.9	12.2	65.7	42.7	0.582	31.1	19.4	98.54
159	T252	65.0	7.7	10.0	10.0	.15	12.6	.88	14.3	8.8	10.2	69.1	36.0	0.611	26.2	16.4	98.97
175	T253	65.0	7.7	10.0	10.0	.15	12.6	.95	18.6	9.5	15.7	49.2	53.1	0.467	38.1	23.4	97.59
192	T254	65.0	7.7	10.0	10.0	.15	12.6	.86	16.8	8.6	13.4	65.5	45.5	0.564	32.8	22.1	98.23
209	T255	65.0	7.7	10.0	10.0	.15	12.6	.86	13.0	8.6	8.3	89.2	28.3	0.766	20.5	13.7	98.31
226	T256	65.0	7.7	10.0	10.0	.15	12.6	.85	14.8	8.5	10.9	102	40.0	0.860	29.6	18.2	98.83
AVER. VALUES		65.4	7.6	9.9	10.1	.15	12.7	.88	15.4	8.7	11.6	80	42.1	0.73	31.1	18.7	98.64
ST DEVIATION		1.4	.2	.3	.3	.01	.3	.05	1.4	.2	1.8	20	7.6	0.13	5.9	2.7	.40
* NOT INCLUDED IN AVERAGING: T242 BECAUSE TOO SHORT TIME T249 BECAUSE R2 TOO SMALL T253 BECAUSE CG,R2 TOO SMALL																	
MEANS+ERRORS		65.4	7.6	9.9	10.1	.15	12.7	.88	15.4	8.7	.8	80	5.5	0.73	5.1	18.7	98.64
ABSOL ERRORS		5.0		1.0		.02		.14		.1		5		0.04		.8	.12

TIME-SERIES RESULTS FOR T=2 S AND U=0.30 M/S

TIME (MIN)	TEST	R-LENGTH		R-HEIGHT		STEEPNES		RATIO RC/RH		LENGTH RC		CG		TOTAL LOAD		MEASUREMENT RAND. ERROR (PCT)	EXPLANED VARIATION (PCT)
		VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M3)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M2)	ERROR (PCT)		
33	T76-G	92.5	13.5	17.5	42.9	.19	44.9	1.10	42.5	19.3	2.6	9.11	5.8	0.175	3.4	4.3	99.79
48	T77-G	105.0	4.8	22.5	11.1	.21	12.1	.88	12.1	19.8	4.7	16.0	11.1	0.316	6.8	7.4	99.35
63	T75-G	105.0	4.8	22.5	11.1	.21	12.1	.93	11.4	21.0	2.4	11.3	4.9	0.237	2.7	3.6	99.82
73	T79-G	105.0	4.8	20.0	17.0	.19	11.1	1.00	10.2	19.9	1.8	11.7	3.9	0.233	2.3	2.9	99.90
83	T80-G	112.5	11.1	22.5	11.1	.20	15.7	.78	11.8	17.5	3.9	12.1	9.7	0.210	6.1	7.1	99.54
98	T81-G	105.0	4.8	22.5	11.1	.21	12.1	.74	12.0	16.7	4.4	13.1	11.7	0.217	7.7	8.4	99.42
113	T82-G	103.0	10.0	22.5	11.1	.25	15.9	.83	11.4	18.6	2.7	10.5	6.5	0.293	4.1	4.6	99.75
6	T83-G	75.0	20.0	18.5	18.9	.25	27.5	.91	19.0	16.8	1.6	8.92	4.0	0.150	2.5	3.0	99.93
17	T84-G	90.0	11.1	22.5	11.1	.25	15.7	.86	11.2	15.3	1.3	9.65	2.9	0.166	1.7	2.2	99.55
32	T85-G	105.0	4.8	22.5	11.1	.21	12.1	.87	12.2	19.7	5.1	11.1	11.3	0.218	6.6	8.2	99.23
45	T 98	120.0	16.7	20.0	25.0	.17	30.1	.55	35.2	18.5	3.4	8.85	7.7	0.168	4.6	5.7	99.65
50	T86-G	110.0	9.1	22.5	11.1	.23	14.4	.94	11.7	21.1	3.7	11.5	7.7	0.242	4.3	5.6	99.56
73	T87-G	90.0	22.2	20.0	25.0	.22	33.5	1.18	25.2	23.5	3.3	10.4	6.3	0.245	3.3	4.5	99.67
90	T 99	120.0	8.3	20.0	17.0	.17	13.0	.92	10.7	18.5	3.9	12.2	8.9	0.225	5.4	6.6	99.55
118	T89-G	115.0	4.4	23.5	6.4	.20	7.7	.95	7.7	23.1	4.2	10.5	8.1	0.242	4.3	6.8	99.47
139	T90-G	110.0	9.1	23.5	6.4	.21	11.1	.80	7.7	18.8	4.3	11.8	10.4	0.221	6.5	7.3	99.44
167	T91-G	115.0	9.7	22.0	9.1	.19	14.4	.85	11.5	19.2	2.8	9.16	6.5	0.176	6.0	4.5	99.77
186	T92-G	115.0	13.0	25.5	7.6	.03	15.1	.76	10.5	16.8	5.3	15.6	19.6	0.262	9.7	10.0	99.17
186	T92-G	115.0	13.0	25.5	7.6	.03	15.1	.65	8.2	17.4	3.2	11.9	8.8	0.207	5.6	5.5	99.69
AVER. VALUES		106.7	10.1	21.9	14.1	.21	17.7	.90	14.6	19.5	3.2	10.5	7.3	0.21	4.4	5.3	99.67
ST DEVIATION		9.9	4.9	2.1	9.7	.02	10.2	.14	9.5	2.0	.9	1.3	2.4	0.03	1.6	1.7	.17
* NOT INCLUDED IN AVERAGING: T77-G BECAUSE CG VERY LARGE T83-G BECAUSE TCG SHORT TIME T85-G BECAUSE EXTREME DC/C T91-G BECAUSE C2 (+DC/C) LARGE																	
MEANS+ERRORS		106.7	10.1	21.9	14.1	.21	17.7	.90	14.6	19.5	2.6	10.9	3.0	0.21	3.2	5.3	99.67
ABSOL ERRORS		10.8		3.1		.04		.13		.5		0.3		0.007		.4	.04

TIME-SERIES RESULTS FOR T=4 S AND U=0.35 M/S

TIME (MIN)	TEST	R-LENGTH		R-HEIGHT		STEEPNES		RATIO RC/RH		LENGTH RC		CG		TOTAL LOAD		MEASUREMENT RAND. ERROR (PCT)	EXPLANED VARIATION (PCT)
		VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M3)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M2)	ERROR (PCT)		
8	T175	110.0	9.1	12.5	20.0	.11	22.0	1.51	20.5	18.8	4.5	3.36	12.5	0.0632	3.2	7.6	99.39
22	T176	180.0	16.7	27.5	27.3	.15	32.0	1.34	27.5	36.8	3.1	3.11	4.4	0.114	1.6	2.7	99.71
39	T177	250.0	25.0	35.0	42.9	.14	47.3	.76	43.0	26.5	3.0	5.79	5.8	0.154	3.1	3.6	99.73
53	T178	210.0	23.8	37.5	46.7	.18	52.4	1.04	46.8	39.0	3.6	3.79	4.8	0.148	1.6	2.9	99.62
63	T179	255.0	9.9	37.5	33.3	.15	33.9	.75	33.6	28.2	4.3	6.01	8.6	0.169	4.5	3.4	99.63
96	T180	210.0	23.8	35.0	42.9	.17	49.0	.90	42.9	31.5	1.7	4.62	2.8	0.145	1.3	1.7	99.91
93	T181	295.0	25.8	37.5	33.3	.18	40.8	.70	33.6	27.0	4.0	6.65	8.4	0.160	4.5	3.3	99.67
107	T182	175.0	14.2	40.0	20.4	.24	32.7	.67	29.5	28.6	2.2	5.74	4.0	0.154	2.0	2.4	99.66
116	T183	220.0	9.1	40.0	17.7	.19	19.0	.96	18.0	40.0	3.4	3.83	4.3	0.157	1.4	2.6	99.66
132	T184	220.0	9.1	43.0	25.0	.18	26.6	.66	25.2	26.2	3.0	5.80	5.9	0.152	3.0	3.6	99.73
147	T185	225.0	11.1	42.5	17.7	.19	20.9	.63	17.8	27.0	2.0	3.89	3.8	0.165	2.0	2.3	99.69
161	T186	190.0	21.1	30.5	53.0	.17	57.8	.95	53.9	30.0	2.7	5.02	4.5	0.155	2.1	2.8	99.78
176	T187	195.0	18.0	29.0	60.0	.13	62.6	1.20	60.3	32.4	5.5	4.96	8.9	0.132	1.9	5.9	99.10
191	T188	185.0	19.9	15.0	28.6	.19	34.3	.84	28.8	25.2	3.5	5.66	6.2	0.165	3.0	3.8	99.54
205	T189	205.0	22.0	35.0	42.9	.17	48.2	.76	43.0	26.6	3.4	6.18	6.7	0.165	3.5	4.1	99.65
AVER. VALUES		210.0	17.7	36.3	39.0	.17	40.3	.86	38.2	30.6	3.4	5.3	5.9	0.157	2.8	3.3	99.66
ST DEVIATION		24.0	6.7	4.7	10.3	.03	12.9	.12	12.3	4.8	1.0	1.0	2.0	0.012	1.1	.9	.20
* NOT INCLUDED IN AVERAGING: T175 BECAUSE TOO SHORT TIME T176 BECAUSE TOO SHORT TIME T185 BECAUSE WRONG HEIGHT?																	
MEANS+ERRORS		210.0	17.7	36.3	39.0	.17	40.3	.86	38.2	30.6	4.6	5.3	5.3	0.157	2.3	3.3	99.66
ABSOL ERRORS		37.2		13.0		.07		.33		1.4		0.3		0.004		.3	.20

Tabel 1a: Resultaten duurmelingen.

TIME-SERIES RESULTS FOR T=6 S AND UO=0.2875 M/S

TIME (MIN)	TEST	R-LENGTH		R-HEIGHT		STFLPNESS		RATIO RC/PH		LENGTH RC		CO		TOTAL LOAD		MEASUREMENT RAND. ERROR (PCT)	EXPLAINED VARIATION (PCT)
		VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M ³)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M ²)	ERROR (PCT)		
18	* T145	70.0	28.6	7.5	33.3	.11	43.9	1.62	36.0	12.1	13.5	0.972	45.5	0.0118	32.4	15.8	58.21
26	* T146	115.0	21.7	11.5	30.4	.10	37.4	1.62	30.5	18.6	1.2	1.40	3.1	0.0260	2.0	1.6	49.97
40	T147	115.0	30.4	17.5	42.9	.15	52.6	1.53	45.7	26.8	5.4	1.07	9.9	0.0287	5.1	5.9	58.43
53	T148	185.0	18.9	22.5	33.3	.12	39.3	1.30	33.4	25.3	2.4	1.86	4.1	0.0549	1.9	2.4	58.89
66	T149	200.0	16.0	30.0	16.7	.15	19.4	.91	15.1	27.4	9.3	1.32	17.0	0.0361	8.5	10.1	58.29
83	T150	200.0	13.0	35.0	28.6	.18	20.2	.80	28.9	28.0	4.0	1.35	7.0	0.0377	3.5	4.2	59.69
103	T151	185.0	18.5	25.0	40.0	.14	44.3	1.84	40.0	45.9	1.3	0.524	1.7	0.0241	.6	.9	59.57
122	T152	175.0	14.3	35.0	28.6	.20	31.9	1.19	28.6	41.7	1.7	0.643	2.9	0.0351	1.4	2.0	59.90
135	T153	180.0	16.7	37.5	33.3	.21	37.3	1.38	33.5	51.9	3.4	0.762	4.8	0.0395	1.8	3.2	59.65
157	T154	190.0	31.6	47.5	47.4	.25	56.9	1.17	47.5	55.5	2.7	0.665	4.8	0.0380	1.7	3.3	59.60
203	T155	225.0	33.3	42.5	41.2	.19	53.0	1.10	41.5	46.5	5.2	0.945	8.0	0.0443	3.4	5.4	59.20
243	T156	280.0	28.6	37.5	33.3	.13	43.9	1.45	33.4	54.3	1.3	0.806	1.8	0.0470	.7	1.2	59.55
293	T157	235.0	27.7	32.5	38.5	.14	47.4	1.18	38.6	38.4	2.7	0.729	5.0	0.0280	2.6	3.4	59.79
328	T158	250.0	20.0	35.0	42.9	.14	47.3	1.11	43.2	38.5	5.1	1.38	9.4	0.0534	4.5	6.4	59.24
357	T159	220.0	27.3	40.0	37.5	.18	46.4	1.30	37.5	52.0	1.5	0.866	2.1	0.0450	.8	1.4	59.53
18	* T160	70.0	28.6	15.0	33.3	.21	43.9	1.28	33.4	15.3	2.5	0.808	7.5	0.0155	5.2	5.7	59.76
34	* T161	185.0	18.5	17.5	42.9	.09	46.9	2.23	43.0	39.1	3.8	0.663	6.4	0.0258	3.1	5.9	59.28
49	T162	185.0	18.9	22.5	33.3	.12	38.3	1.87	33.4	42.1	1.8	0.875	2.8	0.0366	1.3	2.5	59.85
67	T163	225.0	11.1	32.5	38.5	.14	40.0	1.40	38.6	45.5	2.6	0.643	3.8	0.0292	1.6	3.4	59.67
81	T164	200.0	20.0	37.5	33.3	.19	28.9	1.06	33.6	39.8	4.1	1.27	6.5	0.0504	3.3	6.3	59.15
97	T165	205.0	22.0	37.5	33.3	.18	29.9	1.08	33.9	40.5	5.9	1.19	9.6	0.0482	4.6	8.8	59.30
118	T166	200.0	25.0	37.5	33.3	.19	41.7	.93	33.4	35.1	1.9	0.966	3.6	0.0338	2.0	3.3	59.82
135	T167	235.0	14.9	37.5	33.3	.16	26.5	1.17	37.8	43.9	4.1	0.650	6.1	0.0298	2.7	5.6	59.18
150	T168	230.0	13.0	45.0	33.3	.20	35.8	.98	33.8	43.5	5.7	0.813	9.1	0.0357	4.0	6.5	58.72
165	T169	250.0	12.0	42.5	41.2	.17	42.9	1.48	41.4	62.5	3.9	0.455	4.4	0.0268	1.3	3.1	59.35
176	T170	225.0	11.1	37.5	33.3	.17	35.1	1.63	34.0	61.2	6.4	0.477	7.4	0.0292	2.2	5.2	58.37
195	T171	230.0	13.0	45.0	33.3	.20	35.8	1.22	34.3	55.1	7.9	0.722	10.2	0.0398	3.4	7.2	57.55
215	T172	230.0	13.0	35.0	42.9	.15	44.8	1.67	43.3	58.4	5.9	0.621	7.2	0.0363	2.3	5.1	58.62
230	T173	190.0	21.1	37.5	46.7	.20	51.2	1.53	46.7	57.2	2.7	0.614	3.3	0.0351	1.1	2.4	59.71
245	T174	250.0	20.0	42.5	28.4	.17	35.5	1.11	29.5	47.3	1.7	0.714	2.5	0.0338	1.0	1.8	59.69
AVER. VALUES		211.3	19.3	35.7	35.7	.17	41.0	1.28	36.1	45.0	3.9	0.9	6.0	0.038	2.6	4.3	59.34
ST DEVIATION		32.9	7.1	7.3	6.5	.03	P.C	.28	6.3	10.5	2.1	0.3	3.5	0.006	1.8	2.4	.65
* NOT INCLUDED IN AVERAGING: T145 BECAUSE TOO SHORT TIME T146 BECAUSE TOO SHORT TIME T160 BECAUSE TOO SHORT TIME T161 BECAUSE TOO SHORT TIME																	
MEANS+ERRORS		211.7	19.3	35.7	35.7	.17	41.0	1.28	36.1	45.0	4.6	0.9	7.3	0.038	4.3	4.3	59.34
ABSOL ERRORS		40.9		12.7		.07		.46		2.1		0.06		0.002		.5	.13

Tabel 1a: Resultaten duurmetingen (vervolg).

POINTS 1 TO 3 TIME SERIES
N = 12 CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
NT = 0 T = 1.0 S; UO = 0.40 M/S

	RC/PH	RC	CO	LOAD	DC/C	R2
RC/PH	100.0	89.1	-39.7	-29.8	23.7	-38.3
RC	89.1	100.0	-52.2	-41.5	30.7	-46.5
CO	-39.7	-52.2	100.0	99.3	-23.0	29.9
LOAD	-29.8	-41.5	99.3	100.0	-19.7	24.7
DC/C	23.7	30.7	-23.0	-19.7	100.0	-98.3
R2	-38.3	-46.5	29.9	24.7	-98.3	100.0

POINTS 1 TO 5 TIME SERIES
N = 15 CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
NT = 0 T = 2.0 S; UO = 0.30 M/S

	RC/PH	RC	CO	LOAD	DC/C	R2
RC/PH	100.0	76.6	-47.9	19.5	-44.2	24.0
RC	76.6	100.0	-33.8	51.7	-41.5	10.2
CO	-47.9	-33.8	100.0	63.0	54.7	-48.4
LOAD	19.5	51.7	63.0	100.0	13.5	-33.5
DC/C	-44.2	-41.5	54.7	13.5	100.0	-93.6
R2	24.0	10.2	-48.4	-33.5	-93.6	100.0

N = NUMBER OF MEASUREMENTS INCLUDED
NT = NUMBER WITH ONLY TWO MEASUREMENT HEIGHTS

POINTS 1 TO 5 TIME SERIES
N = 12 CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
NT = 0 T = 4.0 S; UO = 0.35 M/S

	RC/PH	RC	CO	LOAD	DC/C	R2
RC/PH	100.0	64.3	-81.6	-73.5	33.3	-70.4
RC	64.3	100.0	-89.8	-40.3	-26.4	-18.3
CO	-81.6	-89.8	100.0	75.8	12.2	31.3
LOAD	-73.5	-40.3	75.8	100.0	-19.0	41.5
DC/C	33.3	-26.4	12.2	-19.0	100.0	-86.1
R2	-70.4	-18.3	31.3	41.5	-86.1	100.0

POINTS 2 TO 7 TIME SERIES
N = 26 CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
NT = 0 T = 6.0 S; UO = 0.2875 M/S

	RC/PH	RC	CO	LOAD	DC/C	R2
RC/PH	100.0	46.4	-47.9	-32.5	-43.6	17.3
RC	46.4	100.0	-76.8	-15.8	-29.7	-13.7
CO	-47.9	-76.8	100.0	70.9	31.6	1.3
LOAD	-32.5	-15.8	70.9	100.0	17.7	-7.5
DC/C	-43.6	-29.7	31.6	17.7	100.0	-84.3
R2	17.3	-13.7	1.3	-7.5	-84.3	100.0

Tabel 1b: Correlaties duurmetingen.

TEST-RESULTS FOR T= 1.5

TEST	U0 (M/S)	R-LENGTH		R-HEIGHT		STEEPNESS		RATIO RC/PH		LENGTH RC		C0		TOTAL LOAD		MEASUREMENT RAAD. ERROR (PCT)	EXPLAINED VARIATION (PCT)
		VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M3)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M2)	ERROR (PCT)		
T226	0.20	47.0	21.3	5.0	40.0	.11	45.3	1.45	40.8	7.2	8.1	9.64	29.6	0.0696	22.0	15.9	99.34
T227	0.20	47.0	21.3	5.0	40.0	.11	45.3	1.41	42.2	7.0	13.4	8.74	50.1	0.0616	37.6	26.9	98.23
T228	0.26	47.0	21.3	5.0	40.0	.11	45.3	1.43	42.4	7.2	13.9	8.58	51.2	0.0614	38.2	27.5	98.10
T229	0.23	47.0	21.3	5.0	40.0	.11	45.3	1.43	42.4	7.2	14.1	7.99	51.8	0.0573	38.6	27.8	58.05
AVER. VALUES		47.0	21.3	5.0	40.0	.11	45.3	1.43	41.5	7.1	12.4	8.7	45.7	0.062	34.1	24.6	98.43
ST DEVIATION								.01	.8	.1	2.9	0.7	10.7	0.005	8.1	5.8	.61
MEANS+ERRORS		47.0	21.3	5.0	40.0	.11	45.3	1.43	41.5	7.1	.5	8.7	3.9	0.062	4.1	24.6	98.43
ABSOL ERRORS		10.0		2.0		.05		.60		.0		0.3		0.003		2.9	.31

1-2
1-3
1-3
1-3

N= 4

T230	0.25	50.0	20.0	8.0	25.0	.16	32.0	.98	25.4	7.5	4.6	18.8	15.4	0.148	11.1	8.3	99.79
T231	0.25	50.0	20.0	8.0	25.0	.16	32.0	1.00	25.4	8.0	4.7	19.7	15.4	0.157	11.1	8.3	99.78
T232	0.25	50.0	20.0	8.0	25.0	.16	32.0	.96	26.1	7.7	7.6	17.2	26.2	0.131	19.1	14.1	99.42
T233	0.25	50.0	20.0	8.0	25.0	.16	32.0	1.01	25.3	8.1	3.9	20.4	12.6	0.165	9.0	6.7	99.85
AVER. VALUES		50.0	20.0	8.0	25.0	.16	32.0	.99	25.6	7.5	5.2	19.0	17.4	0.150	12.6	9.3	99.71
ST DEVIATION								.02	.4	.2	1.7	1.4	6.0	0.014	4.5	3.2	.20
MEANS+ERRORS		50.0	20.0	8.0	25.0	.16	32.0	.99	25.6	7.5	1.2	19.0	3.7	0.150	4.6	9.3	99.71
ABSOL ERRORS		10.0		2.0		.05		.25		.1		0.7		0.007		1.6	.10

1-2
1-3
1-3
1-2

N= 4

T234	0.30	52.5	14.3	8.0	25.0	.15	28.8	1.01	25.3	8.1	3.9	45.3	12.5	0.368	8.9	6.7	99.65
T235	0.30	52.5	14.3	8.0	25.0	.15	28.8	.99	25.7	7.9	6.0	46.6	19.9	0.369	14.3	10.7	99.64
T236	0.30	52.5	14.3	8.0	25.0	.15	28.8	.99	25.4	7.5	4.2	46.5	14.0	0.368	10.1	7.5	99.82
T237	0.30	60.0	16.7	9.0	22.2	.15	27.8	.88	23.0	7.9	5.8	44.8	19.3	0.353	13.9	10.4	99.67
AVER. VALUES		54.4	14.9	8.3	24.3	.15	28.5	.97	24.8	8.0	5.0	45.8	16.4	0.365	11.8	8.8	99.75
ST DEVIATION		3.8	1.2	.5	1.4	.00	.5	.06	1.3	.1	1.1	0.9	3.7	0.008	2.7	2.0	.11
MEANS+ERRORS		54.4	14.9	8.3	24.3	.15	28.5	.97	24.8	8.0	.6	45.8	1.0	0.365	1.0	8.8	99.75
ABSOL ERRORS		8.1		2.0		.04		.24		.1		0.5		0.004		1.0	.05

1-3
1-3
1-3
1-3

N= 4

T238	0.35	60.0	16.7	10.0	20.0	.17	26.0	.81	21.4	8.1	7.5	61.8	24.4	0.502	17.4	13.1	99.44
T239	0.35	60.0	16.7	10.0	20.0	.17	26.0	.82	22.5	8.2	10.3	60.9	34.1	0.500	24.5	17.7	98.96
T240	0.35	60.0	16.7	10.0	20.0	.17	26.0	.81	21.4	8.1	7.5	72.6	26.0	0.590	19.0	13.1	99.44
T241	0.35	60.0	16.7	10.0	20.0	.17	26.0	.82	22.2	8.2	9.6	72.7	34.1	0.595	25.0	16.5	99.09
AVER. VALUES		60.0	16.7	10.0	20.0	.17	26.0	.82	21.8	8.2	8.7	67	29.6	0.55	21.5	15.1	99.23
ST DEVIATION								.06	.6	.0	1.4	7	5.2	0.05	3.9	2.4	.25
MEANS+ERRORS		60.0	16.7	10.0	20.0	.17	26.0	.82	21.8	8.2	.3	67	4.9	0.55	4.8	15.1	99.23
ABSOL ERRORS		10.0		2.0		.04		.18		.0		3		0.03		1.2	.12

1-3
1-3
1-3
1-3

N= 4

T257	0.45	75.0	6.7	10.0	20.0	.13	21.1	.87	21.8	8.7	4.7	101	29.1	0.878	20.9	14.1	99.25
T258	0.45	75.0	6.7	10.0	20.0	.13	21.1	.91	23.6	9.1	12.5	84.1	42.6	0.764	30.6	19.4	98.47
AVER. VALUES		75.0	6.7	10.0	20.0	.13	21.1	.89	22.7	8.5	10.6	93	35.9	0.82	25.9	16.8	98.86
ST DEVIATION								.03	1.2	.3	2.7	12	9.6	0.08	7.0	3.7	.55
MEANS+ERRORS		75.0	6.7	10.0	20.0	.13	21.1	.89	22.7	8.5	10.0	93	14.0	0.82	12.0	16.8	98.86
ABSOL ERRORS		5.0		2.0		.03		.20		.9		13		0.10		3.7	.55

1-3
1-3

N= 2

T259	0.50	87.5	8.6	11.0	9.1	.13	12.5	.67	9.1	7.3		213		1.56			
T260	0.50	87.5	8.6	11.0	9.1	.13	12.5	.70	9.1	7.7		254		1.95			
T324	0.50	80.0	12.5	8.0	25.0	.10	28.0	.97	25.0	7.7		233		1.80			
T325	0.50	80.0	12.5	8.0	25.0	.10	28.0	.95	25.0	7.6		263		2.00			
T325	0.50	80.0	12.5	8.0	25.0	.10	28.0	.91	25.0	7.3		253		1.84			
AVER. VALUES		83.0	10.9	9.2	18.6	.11	21.8	.84	18.6	7.5		240		1.8			
ST DEVIATION		4.1	2.2	1.6	8.7	.01	8.5	.14	8.7	.2		20		0.2			
MEANS+ERRORS		83.0	10.9	9.2	18.6	.11	21.8	.84	18.6	7.5	1.2	240		1.8		4.2	
ABSOL ERRORS		9.1		1.7		.02		.16		-		-		-		-	

1-2
1-2
1-2
1-2
1-2

N= 5

* T261	0.55	85.0	5.9	12.5	20.0	.15	20.9	.61	20.0	7.7		601		4.62				
* T262	0.55	85.0	5.9	12.5	20.0	.15	20.9	.58	20.0	7.2		622		4.51				
T318	0.55	100.0	10.0	15.0	33.3	.15	34.8	.50	33.3	7.5		283		2.12				
T319	0.55	100.0	10.0	15.0	33.3	.15	34.8	.50	33.3	7.5		260		1.95				
T320	0.55	100.0	10.0	15.0	33.3	.15	34.8	.52	33.3	7.9		267		2.10				
AVER. VALUES		100.0	10.0	15.0	33.3	.15	34.8	.51	33.3	7.6		270		2.06				
ST DEVIATION						.01			.2			12		0.09				
* NOT INCLUDED IN AVERAGING: T261 BECAUSE WRONG HEIGHT? T262 BECAUSE WRONG HEIGHT?																		
MEANS+ERRORS		100.0	10.0	15.0	33.3	.15	34.8	.51	33.3	7.6	1.5	270		2.06		2.5		
ABSOL ERRORS		10.0		5.0		.05		.17		-		-		-		-		

1-2
1-2
1-2
1-2
1-2

N= 3

T263	0.65	100.0	10.0	18.0	22.2	.18	24.4	.38	22.2	6.8		796		5.44			
T321	0.65	200.0	50.0	20.0	25.0	.10	55.9	.39	25.0	7.9		328		2.59			
T322	0.65	200.0	50.0	20.0	25.0	.10	55.9	.48	25.0	9.6		94.4		0.906			
T323	0.65	200.0	50.0	20.0	25.0	.10	55.9	.36	25.0	7.1		581		4.13			
AVER. VALUES		175.0	40.0	19.5	24.3	.12	48.0	.40	24.3	7.9		400		3			
ST DEVIATION		50.0	20.0	1.0	1.4	.04	15.8	.05	1.4	1.2		300		2			
MEANS+ERRORS		175.0	40.0	19.5	24.3	.12	48.0	.40	24.3	7.5	7.9	400		3		30.0	
ABSOL ERRORS		70.0		4.7		.06		.10		-		-		-		-	

1-2
1-2
1-2
1-2

N= 4

Tabel 1c: Resultaten individuele metingen.

T264	0.75	300.0	66.7	20.0	50.0	.07	23.3	.50	50.0	10.0			193		1.93			
AVER. VALUES		300.0	66.7	20.0	50.0	.07	23.3	.50	50.0	10.0			193		1.93			
MEANS+ERRORS		300.0	66.7	20.0	50.0	.07	23.3	.50	50.0	10.0	10.0		193	14.0	1.93	12.0		
ABSOL. ERRORS		200.0		10.0		.06		.25										

1-2
N= 1

T296	0.90	550.0	45.5	70.0	28.6	.13	23.7	.16	28.6	11.3			137		1.54			
AVER. VALUES		550.0	45.5	70.0	28.6	.13	23.7	.16	28.6	11.3			137		1.54			
MEANS+ERRORS		550.0	45.5	70.0	28.6	.13	23.7	.16	28.6	11.3	10.0		137	14.0	1.54	12.0		
ABSOL. ERRORS		250.0		20.0		.07		.05										

1-2
N= 1

TEST-RESULTS FOR T=1.5 S

TEST	UJ (M/S)	R-LENGTH		R-HEIGHT		STEEPNESS		RATIO RC/RH		LENGTH RC		CD		TOTAL LOAD		MEASUREMENT RANC. ERROR (PCT)	EXPLAINED VARIATION (PCT)
		VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M3)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M3)	ERROR (PCT)		
T190	0.15	65.0	23.1	12.0	16.7	.18	28.5	.64	16.9	7.7	2.6	2.31	10.5	0.0178	8.0	4.8	99.93
T191	0.15	65.0	23.1	12.0	16.7	.18	28.5	.63	17.0	7.6	3.3	2.46	13.5	0.0187	10.3	6.1	99.69
T192	0.15	65.0	23.1	12.0	16.7	.18	28.5	.67	16.7	8.0	1.6	2.35	6.1	0.0188	4.6	2.8	99.98
T193	0.15	65.0	23.1	12.0	16.7	.18	28.5	.74	17.4	8.8	5.0	1.88	17.8	0.0166	13.0	8.1	99.75
AVER. VALUES		65.0	23.1	12.0	16.7	.18	28.5	.67	17.0	8.0	3.1	2.2	11.9	0.0180	9.0	5.4	99.69
ST DEVIATION								.05	.3	.6	1.5	0.3	4.9	0.0010	3.6	2.2	.16
MEANS+ERRORS		65.0	23.1	12.0	16.7	.18	28.5	.67	17.0	8.0	3.5	2.2	5.6	0.0180	2.6	5.4	99.69
ABSOL. ERRORS		15.0		2.0		.05		.11		.3		0.13		0.0005		1.1	.05

1-3
1-3
1-3
1-3
N= 4

T195	0.20	70.0	14.3	13.0	15.4	.19	21.0	.74	15.4	9.6	.1	6.00	.2	0.0578	.2	.1	100.00
T196	0.20	70.0	14.3	13.0	15.4	.19	21.0	.82	15.8	10.6	3.5	5.04	10.4	0.0535	7.0	4.7	99.67
T197	0.20	70.0	14.3	13.0	15.4	.19	21.0	.76	15.4	9.9	.4	3.68	1.3	0.0382	.9	.6	100.00
AVER. VALUES		70.0	14.3	13.0	15.4	.19	21.0	.77	15.5	10.0	1.7	5.1	5.1	0.051	3.5	2.3	99.98
ST DEVIATION								.03	.2	.4	1.7	0.9	5.1	0.0069	3.5	2.3	.06
MEANS+ERRORS		70.0	14.3	13.0	15.4	.19	21.0	.77	15.5	10.0	2.1	5.1	8.9	0.051	6.5	2.3	99.98
ABSOL. ERRORS		10.3		2.0		.04		.12		.2		0.5		0.004		1.2	.03

1-3
1-3
1-3
N= 4

T198	0.25	80.0	12.5	15.0	13.3	.18	18.3	1.04	14.3	15.6	5.3	9.28	12.2	0.144	7.2	4.8	99.72		
T199	0.25	80.0	12.5	15.0	13.3	.19	18.3	.96	12.5	14.4	2.4	10.6	6.0	0.152	3.8	2.3	99.95		
T200	0.25	80.0	12.5	15.0	13.3	.18	18.3	1.01	13.8	15.1	3.4	10.0	8.4	0.151	5.2	3.2	99.69		
T201	0.25	80.0	12.5	15.0	13.3	.19	18.3	.84	13.7	12.7	3.1	15.4	10.1	0.195	7.1	3.5	99.90		
T333	0.25	67.5	11.1	10.0	20.0	.15	22.9	1.46	20.4	14.6	3.9	7.96	8.3	0.116	4.7	3.8	99.65		
T334	0.25	67.5	11.1	10.0	20.0	.15	22.9	1.61	20.0	16.1	.7	7.08	1.4	0.114	.7	.6	100.00		
T335	0.25	67.5	11.1	10.0	20.0	.15	22.9	1.30	20.0	13.0	.7	9.37	1.9	0.122	1.2	.8	99.95		
AVER. VALUES		73.8	11.8	12.5	16.7	.17	20.6	1.23	17.0	14.8	2.7	9.0	6.4	0.13	3.8	2.6	99.90		
ST DEVIATION		6.8	.8	2.7	3.7	.02	2.5	.27	3.4	1.1	1.8	1.3	4.2	0.02	2.5	1.7	.11		
* NOT INCLUDED IN AVERAGING: T201 BECAUSE TOO LARGE CD																			
MEANS+ERRORS		73.8	11.8	12.5	16.7	.17	20.6	1.23	17.0	14.8	3.0	9.0	5.9	0.13	5.5	2.6	99.90		
ABSOL. ERRORS		8.7		2.1		.02		.21		.4		0.5		0.007		.7	.04		

1-3
1-3
1-3
1-3
1-3
1-3
N= 6

T102	0.30	90.0	11.1	15.0	20.0	.17	22.9	.99	21.2	14.9	6.9	21.6	12.2	0.322	6.0	6.6	99.53
T103	0.30	90.0	11.1	15.0	20.0	.17	22.9	.95	20.8	14.2	5.8	24.3	12.7	0.345	7.3	5.8	99.66
T104	0.30	90.0	11.1	15.0	20.0	.17	22.9	1.01	20.0	15.1		23.1		0.349			99.60
T336	0.30	68.0	9.1	13.0	23.1	.15	24.8	.98	23.5	12.7	4.5	29.5	12.1	0.375	7.8	5.0	99.60
T337	0.30	85.0	9.1	13.0	23.1	.15	24.8	1.00	23.3	13.0	3.1	28.0	8.2	0.365	5.2	3.4	99.90
T338	0.30	88.0	9.1	13.0	23.1	.15	24.8	1.02	23.3	13.2	3.1	27.4	8.0	0.361	5.0	3.3	99.90
AVER. VALUES		89.0	10.1	14.0	21.5	.16	23.8	.99	22.0	13.9	3.9	26	8.9	0.35	5.2	4.8	99.76
ST DEVIATION		1.1	1.1	1.1	1.7	.01	1.1	.63	1.5	1.0	2.4	3	4.8	0.02	2.8	1.4	.16
MEANS+ERRORS		89.0	10.1	14.0	21.5	.16	23.8	.99	22.0	13.9	3.0	26	5.0	0.35	2.2	4.8	99.76
ABSOL. ERRORS		9.0		3.0		.04		.22		.4		1.3		0.008		.6	.07

1-3
1-3
1-2
1-3
1-3
1-3
N= 6

T202	0.35	95.0	5.3	17.0	11.8	.18	12.9	.80	13.4	13.6	6.4	95.6	18.3	0.621	12.1	6.6	99.59
T203	0.35	95.0	5.3	17.0	11.8	.18	12.9	.74	11.8	12.6	.2	51.7	.6	0.653	.4	.2	100.00
T204	0.35	95.0	5.3	17.0	11.8	.18	12.9	.78	11.8	13.3	.6	45.4	2.0	0.603	1.3	.7	100.00
T205	0.35	95.0	5.3	17.0	11.8	.18	12.9	.77	12.3	13.0	3.6	48.2	11.6	0.628	8.1	3.9	99.87
AVER. VALUES		95.0	5.3	17.0	11.8	.18	12.9	.77	12.3	13.1	2.7	48	8.1	0.63	5.5	2.9	99.87
ST DEVIATION								.02	.8	.4	2.9	3	8.3	0.02	5.6	3.0	.19
MEANS+ERRORS		95.0	5.3	17.0	11.8	.18	12.9	.77	12.3	13.1	1.6	48	3.1	0.63	1.7	2.9	99.87
ABSOL. ERRORS		5.0		2.0		.02		.10		.2		1.5		0.010		1.5	.10

1-3
1-3
1-3
1-3
N= 4

T206	0.40	100.0	20.0	18.0	11.1	.18	22.9	.68	11.5	12.2	2.8	49.7	8.6	0.604	5.9	3.2	99.92
T207	0.40	100.0	20.0	18.0	11.1	.18	22.9	.74	11.1	13.2	.4	30.4	1.3	0.402	.9	.5	100.00
T208	0.40	100.0	20.0	18.0	11.1	.18	22.9	.67	11.6	12.1	3.3	82.8	11.0	1.00	7.8	3.8	99.65
T339	0.40	110.0	18.2	18.0	11.1	.16	21.3	.79	12.1	14.3	4.8	67.7	12.1	0.964	7.5	4.7	99.77
T340	0.40	110.0	18.2	18.0	11.1	.16	21.3	.74	12.6	13.4	6.0	66.1	16.2	0.884	10.4	6.4	99.64
T341	0.40	110.0	18.2	18.0	11.1	.16	21.3	.70	12.2	12.5	1.5	51.4	4.4	0.844	3.0	1.7	99.98
T209	0.40	100.0	20.0	18.0	11.1	.18	22.9	.66	11.1	11.9	.8	74.2	2.9	0.881	2.1	1.0	99.99

1-3
1-3
1-3
1-3
1-3
1-3
1-3

Tabel 1c: Resultaten individuele metingen (vervolg).

AVER. VALUES	105.0	19.1	18.0	11.1	.17	22.1	.71	11.7	12.7	3.2	65	9.2	0.8	6.1	3.5	99.66
ST DEVIATION	5.5	1.6	2.0	1.0	.01	2.0	.05	1.9	1.9	2.0	13	5.0	0.2	3.1	2.0	14
* NOT INCLUDED IN AVERAGING: T207 BECAUSE TOO SMALL CO																
MEANS+ERRORS	105.0	19.1	18.0	11.1	.17	22.1	.71	11.7	12.7	2.9	65	8.0	0.8	6.2	3.5	99.66
ABSOL ERRORS	20.0		2.0		.04		.08		.4		5		0.07		.8	.06

T210	0.45	100.0	10.0	20.0	10.0	.20	14.1	.66	10.2	13.3	1.9	83.1	5.6	1.10	3.6	3.3	99.93
T211	0.45	105.0	9.5	20.2	10.0	.19	13.8	.55	10.8	11.0	4.0	140	14.0	1.53	10.3	8.1	99.69
T212	0.45	105.0	9.5	20.0	10.0	.18	13.8	.67	10.4	12.5	.7	78.3	2.1	1.06	1.5	1.2	99.99
T213	0.45	105.0	9.5	20.0	10.0	.19	13.8	.63	10.1	12.5	1.4	95.9	4.5	1.20	3.2	2.4	99.96
AVER. VALUES	103.8	9.6	20.0	10.0	.19	13.9	.63	10.3	12.6	2.0	100	6.6	1.2	4.7	3.7	99.89	
ST DEVIATION	2.5	.2	2.0	1.0	.00	2.2	.06	1.3	1.1	1.4	30	5.2	0.2	3.8	3.0	14	
MEANS+ERRORS	103.8	9.6	20.0	10.0	.19	13.9	.63	10.3	12.6	4.6	100	14.1	1.2	8.7	3.7	99.89	
ABSOL ERRORS	10.0		2.0		.03		.06		.6		14		0.11		1.5	.07	

T214	0.50	115.0	4.4	20.0	10.0	.17	16.9	.63	10.6	12.6	3.6	124	11.6	1.56	8.2	4.0	99.87
T215	0.50	115.0	4.4	20.0	10.0	.17	16.9	.61	10.6	12.1	.4	110	1.3	1.33	.9	.4	130.00
T216	0.50	115.0	4.4	20.0	10.0	.17	16.9	.46	10.4	9.7	2.8	318	12.0	3.07	9.3	4.1	99.92
T217	0.50	115.0	4.4	20.0	10.0	.17	16.9	.63	10.0	12.5		82.7		1.03			1-2
T303	0.50	105.0	4.8	12.5	20.0	.12	20.6	.91	20.2	11.4	2.5	146	9.1	1.67	6.6	3.1	99.94
T304	0.50	105.0	4.8	12.5	20.0	.12	20.6	.98	20.1	12.3	1.9	117	6.4	1.43	4.6	2.2	99.96
T327	0.50	110.0	9.1	12.5	20.0	.11	22.0	.98	20.2	12.3	2.9	148	8.4	1.82	5.6	3.3	99.92
T328	0.50	110.0	9.1	12.5	20.0	.11	22.0	1.07	20.8	11.4	5.7	132	15.3	1.76	9.9	6.0	99.66
T329	0.50	110.0	9.1	12.5	20.0	.11	22.0	.99	20.5	12.3	4.5	134	13.2	1.65	8.8	5.2	99.80
AVER. VALUES	110.6	6.2	15.3	16.2	.14	17.5	.85	16.5	12.3	2.7	120	8.2	1.5	5.6	3.5	99.88	
ST DEVIATION	4.2	2.4	3.9	5.2	.03	5.5	.19	5.3	4.5	1.9	20	5.4	0.3	3.6	1.9	11	
* NOT INCLUDED IN AVERAGING: T216 BECAUSE TOO LARGE CO																	
MEANS+ERRORS	110.6	6.2	15.3	16.2	.14	17.5	.85	16.5	12.3	1.6	120	6.1	1.5	6.0	3.5	99.88	
ABSOL ERRORS	6.9		2.5		.02		.14		.2		8		0.09		.7	.04	

T218	0.55	115.0	4.4	17.5	14.3	.15	14.9	.64	14.3	11.2	.7	152	2.7	1.70	2.0	.9	100.00
T219	0.55	115.0	4.4	17.5	14.3	.15	14.9	.65	15.2	11.3	5.3	140	21.3	1.58	16.1	6.6	99.72
T220	0.55	115.0	4.4	17.5	14.3	.15	14.9	.73	15.4	12.7	5.8	69.4	18.5	0.883	12.9	6.4	99.67
T221	0.55	115.0	4.4	17.5	14.3	.15	14.9	.68	15.3	11.9	5.6	128	21.6	1.51	16.1	6.7	99.69
T305	0.55	105.0	14.3	12.5	20.0	.12	24.6	.95	20.4	11.9	4.1	170	13.9	2.03	10.4	4.8	99.84
T306	0.55	105.0	14.3	12.5	20.0	.12	24.6	.89	21.5	11.1	7.8	209	30.2	2.32	22.6	10.0	99.39
AVER. VALUES	111.0	8.3	15.5	16.6	.14	18.8	.76	17.4	11.5	4.7	160	17.9	1.8	13.4	5.8	99.73	
ST DEVIATION	5.5	5.4	2.7	3.1	.02	5.3	.15	3.3	4	2.6	30	10.3	0.3	7.8	3.3	22	
* NOT INCLUDED IN AVERAGING: T220 BECAUSE WRONG HEIGHT?																	
MEANS+ERRORS	111.0	8.3	15.5	16.6	.14	18.8	.76	17.4	11.5	1.5	160	8.9	1.8	6.3	5.8	99.73	
ABSOL ERRORS	9.2		2.6		.03		.13		.2		14		0.2		1.5	.10	

T222	0.60	115.0	13.0	25.0	20.0	.22	23.9	.40	20.0	10.1		620		6.24			1-2
T223	0.60	115.0	13.0	25.0	20.0	.22	23.9	.47	20.0	11.7		172		2.61			1-2
T330	0.60	130.0	7.7	17.5	14.3	.13	16.2	.81	14.7	14.1	3.4	242	9.9	3.41	6.6	3.4	99.88
T331	0.60	100.0	10.0	15.0	20.0	.15	22.4	.71	20.3	10.7	3.5	372	14.2	3.97	10.8	4.6	99.88
T332	0.60	100.0	10.0	15.0	20.0	.15	22.4	.84	20.0	12.6	.0	268	.1	3.39	.0	.6	100.00
AVER. VALUES	111.3	10.2	18.1	18.6	.16	21.2	.71	18.7	12.3	1.7	260	6.0	3.2	4.4	2.7	99.92	
ST DEVIATION	14.4	2.2	4.7	2.9	.04	3.4	.17	2.7	1.5	2.0	80	7.2	0.8	5.3	2.4	1.7	
* NOT INCLUDED IN AVERAGING: T222 BECAUSE TOO LARGE CO																	
MEANS+ERRORS	111.3	10.2	18.1	18.6	.16	21.2	.71	18.7	12.3	5.9	260	15.7	3.2	13.1	2.7	99.92	
ABSOL ERRORS	11.3		3.4		.03		.13		.7		40		0.4		1.2	.63	

T224	0.70	300.0	66.7	35.0	42.5	.12	79.3	.34	43.0	11.4	3.2	496	13.5	5.88	10.4	3.8	99.90
AVER. VALUES	300.0	66.7	35.0	42.9	.12	79.3	.34	43.0	11.9	3.2	496	13.5	5.88	10.4	3.8	99.90	
MEANS+ERRORS	300.0	66.7	35.0	42.9	.12	79.3	.34	43.0	11.9	10.0	496	14.0	5.88	12.0	3.8	99.90	
ABSOL ERRORS	200.0		15.0		.09		.15		-		-	-	-	-	-	-	

T225	0.80	510.0	76.5	42.5	52.5	.08	93.0	.29	53.0	12.2	.6	649	2.7	7.91	2.0	.7	100.00
AVER. VALUES	510.0	76.5	42.5	52.5	.08	93.0	.29	53.0	12.2	.6	649	2.7	7.91	2.0	.7	100.00	
MEANS+ERRORS	510.0	76.5	42.5	52.5	.08	93.0	.29	53.0	12.2	10.0	649	14.0	7.91	12.0	.7	100.00	
ABSOL ERRORS	390.0		22.5		.08		.15		-		-	-	-	-	-	-	

T297	0.90	700.0	28.6	70.0	28.6	.10	40.4	.16	29.0	11.4	5.1	1000	22.5	11.5	17.5	6.3	99.74
AVER. VALUES	700.0	28.6	70.0	28.6	.10	40.4	.16	29.0	11.4	5.1	1000	22.5	11.5	17.5	6.3	99.74	
MEANS+ERRORS	700.0	28.6	70.0	28.6	.10	40.4	.16	29.0	11.4	10.0	1000	14.0	11.5	12.0	6.3	99.74	
ABSOL ERRORS	200.0		20.3		.04		.05		-		-	-	-	-	-	-	

Tabel 1c: Resultaten individuele metingen (vervolg).

TEST-RESULTS FOR T = 2 S

TEST	UO (M/S)	R-LENGTH		R-HEIGHT		STEEPNESS		FATIO RC/PH		LEAGHT MC		CO		TOTAL LOAD		MEASUREMENT RAND. ERROR (PCT)	EXPLAINED VARIATION (PCT)	
		VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M3)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M2)	ERROR (PCT)			
T 93	0.15	85.0	17.7	17.5	14.3	.21	22.7	.59	14.9	10.3	4.1	0.370	14.3	0.00381	10.4	5.6	99.83	
T 94	0.15	85.0	17.7	17.5	14.3	.21	22.7	.53	15.6	9.3	6.2	0.457	23.8	0.00423	17.9	9.4	99.52	
T 95	0.15	85.0	17.7	14.0	28.6	.16	33.6	.71	28.8	9.9	3.7	0.808	13.7	0.00802	10.2	8.3	99.73	
T3171	0.15	65.0	15.4	10.0	30.0	.15	33.7	.83	30.1	8.2	2.9	1.25	11.1	0.0104	8.4	7.7	99.83	
T3172	0.15	65.0	15.4	10.0	30.0	.15	33.7	.83	30.1	8.2	2.4	1.30	9.1	0.0107	7.0	6.4	99.89	
T3173	0.15	65.0	15.4	10.0	30.0	.15	33.7	.83	30.2	8.3	3.3	1.29	12.8	0.0108	9.6	9.0	99.76	
AVER. VALUES		70.0	15.9	11.0	29.6	.17	33.7	.80	29.8	8.7	3.1	1.2	11.7	0.0100	8.9	7.9	99.81	
ST DEVIATION		10.0	1.1	2.0	2.7	.01	.1	.06	.7	.8	.6	0.2	2.0	0.0013	1.5	1.1	.07	
* NOT INCLUDED IN AVERAGING: T 93 BECAUSE TOO SHORT TIME T 94 BECAUSE TOO SHORT TIME																		
MEANS+ERRORS		70.0	15.9	11.0	29.6	.16	33.7	.80	29.8	8.7	4.6	1.2	10.2	0.0100	6.6	7.9	99.81	
ABSOL ERRORS		11.2		3.3		.05		.24		.4		0.12		0.0007		.6	.03	
T 96	0.20	90.0	11.1	15.0	20.0	.17	22.9	.80	20.0	12.0	1.1	3.70	2.9	0.0446	1.8	1.3	99.99	
T 97	0.20	90.0	11.1	15.0	20.0	.17	22.9	.79	20.1	11.8	2.3	3.94	6.0	0.0467	3.9	2.7	99.95	
AVER. VALUES		90.0	11.1	15.0	20.0	.17	22.9	.80	20.1	11.9	1.7	3.8	4.4	0.0456	2.8	2.0	99.97	
ST DEVIATION						.01	.1	.1	.1	.8		0.2	2.2	0.0015	1.4	1.0	.03	
MEANS+ERRORS		90.0	11.1	15.0	20.0	.17	22.9	.80	20.1	11.9	10.0	3.8	14.0	0.0456	12.0	2.0	99.97	
ABSOL ERRORS		10.0		3.0		.04		.16		1.2		0.5		0.005		1.0	.03	
T100	0.40	150.0	20.0	22.5	11.1	.15	22.9	.85	11.4	19.2	2.3	21.2	5.1	0.408	3.0	3.8	99.84	
T101	0.40	150.0	20.0	22.5	11.1	.15	22.9	.79	11.1	17.7	.5	22.7	1.1	0.401	.7	.8	99.99	
AVER. VALUES		150.0	20.0	22.5	11.1	.15	22.9	.82	11.2	18.5	1.4	21.9	3.1	0.405	1.9	2.3	99.92	
ST DEVIATION						.05	.2	.1	1.1	1.3		1.0	2.9	0.004	1.7	2.1	.11	
MEANS+ERRORS		150.0	20.0	22.5	11.1	.15	22.9	.82	11.2	18.5	10.0	21.9	14.0	0.405	12.0	2.3	99.92	
ABSOL ERRORS		30.0		2.5		.03		.09		1.8		3		0.05		2.1	.11	
T105	0.50	180.0	27.8	22.5	55.6	.13	62.1	.77	55.6	17.2	1.9	61.8	4.8	1.06	3.1	3.4	99.96	
T106	0.50	180.0	27.8	22.5	55.6	.13	62.1	.79	55.6	17.9	2.0	47.0	4.8	0.841	3.0	3.4	99.89	
AVER. VALUES		180.0	27.8	22.5	55.6	.13	62.1	.78	55.6	17.6	1.9	54	4.8	1.0	3.1	3.4	99.90	
ST DEVIATION						.02	.1	.02	.5	.1		10	.0	0.2	.0	.0	.01	
MEANS+ERRORS		180.0	27.8	22.5	55.6	.13	62.1	.78	55.6	17.6	10.0	54	14.0	1.0	12.0	3.4	99.90	
ABSOL ERRORS		50.0		12.5		.08		.43		1.8		8		0.11		.0	.01	
T351	0.59	170.0	17.7	23.0	34.8	.14	39.0	.90	35.2	20.8	5.6	26.5	13.9	0.552	8.5	6.1	99.37	
T352	0.59	170.0	17.7	23.0	34.8	.14	39.0	.81	35.3	18.7	6.0	38.9	18.1	0.727	12.2	7.2	99.28	
T353	0.59	170.0	17.7	23.0	33.2	.18	37.7	.62	33.6	18.6	3.9	45.9	11.2	0.853	7.5	4.6	99.71	
AVER. VALUES		170.0	17.7	25.3	34.3	.15	38.6	.78	34.7	19.3	5.2	37	14.4	0.7	9.4	6.0	99.45	
ST DEVIATION				.4	.8	.02	.7	.15	1	1.3	1.2	10	3.5	0.2	2.5	1.3	.23	
MEANS+ERRORS		170.0	17.7	25.3	34.3	.15	38.6	.78	34.7	19.3	3.7	37	15.3	0.7	12.3	6.0	99.45	
ABSOL ERRORS		30.0		8.7		.06		.27		.7		6		0.09		.7	.13	
T107	0.60	200.0	25.0	30.0	33.3	.15	41.7	.57	33.5	17.0	2.9	71.6	8.0	1.22	5.2	3.9	99.23	
T108	0.60	200.0	25.0	30.0	33.3	.15	41.7	.57	33.5	17.0	3.6	60.2	8.7	1.02	5.2	3.0	99.87	
T309	0.60	200.0	25.0	50.0	40.0	.25	47.2	.42	40.8	21.1	8.2	27.9	19.8	0.590	12.0	8.7	98.68	
T310	0.60	200.0	25.0	50.0	40.0	.25	47.2	.44	40.8	21.8	8.2	27.4	20.3	0.557	12.5	8.4	98.68	
AVER. VALUES		200.0	25.0	40.0	36.7	.20	44.4	.50	37.2	19.2	5.7	50	14.2	0.9	8.7	6.0	99.26	
ST DEVIATION				11.5	3.9	.06	3.2	.08	4.2	2.6	2.8	20	6.8	0.3	4.1	3.0	.68	
MEANS+ERRORS		200.0	25.0	40.0	36.7	.20	44.4	.50	37.2	19.2	6.8	50	24.1	0.9	18.3	6.0	99.26	
ABSOL ERRORS		50.0		14.7		.05		.18		1.3		11		0.2		1.5	.34	
T307	0.65	200.0	25.0	50.0	40.0	.25	47.2	.48	40.7	24.0	7.2	41.0	17.5	0.984	10.5	6.7	98.96	
T308	0.65	200.0	25.0	50.0	40.0	.25	47.2	.46	40.3	23.2	5.2	37.0	13.0	0.858	8.0	5.0	99.46	
AVER. VALUES		200.0	25.0	50.0	40.0	.25	47.2	.47	40.5	23.6	6.2	39	15.3	0.92	9.2	5.9	99.21	
ST DEVIATION						.01	.2	.2	.2	.5	1.4	3	3.2	0.09	1.8	1.2	.35	
MEANS+ERRORS		200.0	25.0	50.0	40.0	.25	47.2	.47	40.5	23.6	10.0	39	14.0	0.92	12.0	5.9	99.21	
ABSOL ERRORS		50.0		20.0		.12		.19		2.4		5		0.11		1.2	.35	
T354	0.69	150.0	12.5	25.0	20.0	.16	33.6	.85	21.6	21.0	8.0	38.9	21.9	0.627	14.1	8.4	98.73	
T355	0.69	150.0	12.5	25.0	20.0	.15	33.3	.82	19.2	19.2	7.4	37.3	19.7	0.717	12.6	8.6	98.91	
T356	0.69	200.0	10.0	30.0	33.3	.15	34.8	.32	34.4	24.5	8.6	23.6	19.7	0.579	11.4	7.8	98.55	
AVER. VALUES		253.3	15.8	38.3	28.9	.15	33.4	.66	30.0	21.7	8.0	33	20.4	0.71	12.7	8.3	98.73	
ST DEVIATION		128.6	8.0	15.9	7.7	.00	9.1	.30	7.4	2.7	.6	8	1.3	0.12	1.4	.4	.18	
MEANS+ERRORS		253.3	15.8	38.3	28.9	.15	33.4	.66	30.0	21.7	7.1	33	14.6	0.71	10.1	8.3	98.73	
ABSOL ERRORS		40.1		11.1		.05		.20		1.5		5		0.07		.2	.10	
T298	0.70	425.0	18.8	100.0	20.0	.24	27.5	.23	20.9	22.6	6.1	37.2	16.2	0.641	10.3	3.8	99.63	
AVER. VALUES		425.0	18.8	100.0	20.0	.24	27.5	.23	20.9	22.6	6.1	37.2	16.2	0.641	10.3	3.8	99.63	
MEANS+ERRORS		425.0	18.8	100.0	20.0	.24	27.5	.23	20.9	22.6	10.0	37.2	14.0	0.641	12.0	3.8	99.63	
ABSOL ERRORS		80.0		20.0		.06		.05		-		-		-				

Tabel 1c: Resultaten individuele metingen (vervolg).

TEST-RESULTS FOR T = 3 S

TEST	UO (M/S)	R-LENGTH		R-HEIGHT		STEEPNESS		RATIO PC/RH		LENGTH RC		CD		TOTAL LOAD		MEASUREMENT RANG. ERROR (PCT)	EXPLAINED VARIATION (PCT)
		VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M3)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M2)	ERROR (PCT)		
T265	0.20	130.0	7.7	32.0	9.4	.25	12.1	.81	11.3	26.0	6.4	1.19	8.8	0.0308	3.0	3.5	59.60
T266	0.20	140.0	13.7	30.0	16.0	.21	14.7	.82	12.7	24.6	7.8	1.25	11.4	0.0307	4.2	4.5	59.40
T267	0.20	140.0	10.7	30.0	10.0	.21	14.7	.78	11.5	23.4	5.7	1.38	8.8	0.0322	3.5	3.4	59.68
AVER. VALUES		136.7	9.7	30.7	9.8	.22	13.8	.80	11.8	24.7	6.6	1.27	9.6	0.0313	3.5	3.8	59.56
ST DEVIATION		5.8	1.7	1.2	.4	.02	1.5	.07	.7	1.3	1.1	0.10	1.5	0.0009	.6	.6	.14
MEANS+ERRORS		136.7	9.7	30.7	9.8	.22	13.8	.80	11.8	24.7	6.6	1.27	9.6	0.0313	3.5	3.8	59.56
ABSOL ERRORS		13.3		3.0		.03		.10		.8		0.06		0.0005	1.6	.3	.08
* T268																	
T268	0.25	135.0	33.3	20.0	50.0	.15	60.1	1.17	50.0	23.5	1.4	1.79	2.9	0.0420	1.6	1.9	99.94
T269	0.25	135.0	33.3	20.0	50.0	.15	60.1	1.19	50.2	23.7	4.2	3.22	9.0	0.0763	5.0	3.9	99.65
T270	0.25	135.0	33.3	20.0	50.0	.15	60.1	1.31	50.0	26.2	2.1	3.03	3.8	0.0794	1.9	2.5	99.87
AVER. VALUES		135.0	33.3	20.0	50.0	.15	60.1	1.25	50.1	25.0	3.1	3.12	6.4	0.078	3.5	3.2	99.76
ST DEVIATION								.09	.1	1.8	1.5	0.14	3.7	0.002	2.2	1.0	.16
* NOT INCLUDED IN AVERAGING: T268 BECAUSE TOO SHORT TIME																	
MEANS+ERRORS		135.0	33.3	20.0	50.0	.15	60.1	1.25	50.1	25.0	10.0	3.12	14.0	0.078	12.0	3.2	99.76
ABSOL ERRORS		45.0		10.0		.79		.63		2.5		0.4		0.009		1.0	.16
* T271																	
T271	0.30	160.0	12.5	25.0	20.0	.16	23.6	1.19	20.2	29.7	2.7	4.44	4.7	0.132	2.2	2.9	99.78
T272	0.30	140.0	21.4	25.0	20.0	.18	29.3	1.18	20.1	25.4	2.1	4.76	3.7	0.140	1.8	2.2	99.87
T273	0.30	140.0	21.4	25.0	20.0	.18	29.3	1.06	20.1	26.6	2.1	4.23	4.2	0.113	2.2	2.5	99.86
T274	0.30	165.0	33.3	25.0	20.0	.15	28.9	1.08	20.1	26.9	1.9	5.94	3.7	0.160	1.9	2.3	99.89
AVER. VALUES		151.2	22.2	25.0	20.0	.17	30.3	1.13	20.1	28.2	2.2	4.8	4.1	0.14	2.0	2.5	99.85
ST DEVIATION		13.1	8.5			.01	6.3	.06	.0	1.6	.3	0.8	.5	0.02	.2	.3	.65
MEANS+ERRORS		151.3	22.2	25.0	20.0	.17	30.3	1.13	20.1	28.2	2.9	4.8	7.8	0.14	7.2	2.5	99.85
ABSOL ERRORS		33.5		5.0		.05		.23		.8		0.4		0.010		.1	.02
* T342																	
T342	0.34	160.0	12.5	30.0	33.3	.19	35.6	.89	33.3	26.6	.7	6.12	1.2	0.163	.6	.8	99.99
T343	0.34	160.0	12.5	30.0	33.3	.19	35.6	.79	33.5	23.7	3.7	6.63	7.3	0.157	4.0	4.9	99.60
T344	0.34	160.0	12.5	30.0	33.3	.19	35.6	.96	33.5	28.8	3.5	4.96	5.7	0.143	2.6	3.6	99.64
AVER. VALUES		160.0	12.5	30.0	33.3	.19	35.6	.88	33.5	26.4	2.6	5.9	4.7	0.154	2.4	3.2	99.74
ST DEVIATION								.09	.1	2.6	1.7	0.9	3.2	0.010	1.7	2.1	.21
MEANS+ERRORS		160.0	12.5	30.0	33.3	.19	35.6	.88	33.5	26.4	5.6	5.9	8.4	0.154	3.9	3.2	99.74
ABSOL ERRORS		20.0		10.0		.07		.29		1.5		0.5		0.006		1.2	.12
* T279																	
T279	0.40	250.0	40.0	25.0	40.0	.10	56.6	1.05	40.1	26.2	3.3	17.9	7.1	0.468	3.9	2.8	99.78
T280	0.40	250.0	40.0	25.0	40.0	.10	56.6	1.05	40.0	26.3	1.8	17.5	3.5	0.460	1.9	2.1	99.91
T281	0.40	250.0	40.0	30.0	50.0	.12	64.0	.87	50.0	26.1	.8	13.8	1.5	0.361	.8	.9	99.96
T282	0.40	250.0	40.0	30.0	50.0	.12	64.0	1.11	50.1	33.2	3.0	12.9	5.1	0.429	2.2	2.0	99.82
AVER. VALUES		250.0	40.0	27.5	45.0	.11	60.3	1.02	45.1	28.0	2.2	16	4.3	0.43	2.2	2.0	99.87
ST DEVIATION				2.9	5.8	.01	4.3	.10	5.8	3.6	1.2	3	2.4	0.05	1.3	.6	.09
MEANS+ERRORS		250.0	40.0	27.5	45.0	.11	60.3	1.02	45.1	28.0	6.4	16	8.2	0.43	5.7	2.0	99.87
ABSOL ERRORS		100.0		12.4		.07		.46		1.8		1.3		0.02		.4	.04
* T345																	
T345	0.44	205.0	17.1	35.0	42.9	.17	46.1	.61	42.9	21.5	2.1	16.7	5.1	0.358	3.1	3.1	99.67
T346	0.44	205.0	17.1	35.0	42.9	.17	46.1	.67	43.0	23.5	2.8	14.1	6.2	0.332	3.6	3.7	99.77
T347	0.44	205.0	17.1	35.0	42.9	.17	46.1	.68	42.9	23.9	2.0	9.80	4.3	0.234	2.4	2.6	99.89
AVER. VALUES		205.0	17.1	35.0	42.9	.17	46.1	.66	42.9	23.0	2.3	14	5.2	0.31	3.0	3.1	99.84
ST DEVIATION								.04	.0	1.3	.4	3	1.0	0.07	.6	.6	.06
MEANS+ERRORS		205.0	17.1	35.0	42.9	.17	46.1	.66	42.9	23.0	3.3	14	14.9	0.31	12.2	3.1	99.84
ABSOL ERRORS		35.0		15.0		.08		.28		.8		2		0.04		.3	.04
* T283																	
T283	0.45	250.0	20.0	35.0	42.9	.14	47.3	.67	42.9	23.5	2.5	23.4	6.4	0.551	4.0	3.4	99.81
T284	0.45	250.0	20.0	35.0	42.9	.14	47.3	.87	43.1	30.3	4.2	12.4	8.5	0.377	4.6	4.4	99.47
T285	0.45	250.0	20.0	30.0	33.3	.12	38.9	.90	33.7	27.1	5.0	16.2	11.3	0.439	6.6	5.8	99.27
T286	0.45	250.0	20.0	35.0	42.9	.14	47.3	.75	43.1	26.2	4.9	14.0	11.9	0.367	7.2	5.9	99.28
AVER. VALUES		250.0	20.0	33.3	39.7	.13	44.5	.84	43.0	27.9	4.7	14	10.6	0.39	6.1	5.4	99.34
ST DEVIATION				2.4	5.5	.01	4.9	.08	5.4	2.2	.4	2	1.8	0.04	1.4	.9	.11
MEANS+ERRORS		250.0	20.0	33.3	39.7	.13	44.5	.84	43.0	27.9	4.5	14	7.7	0.39	5.7	5.4	99.34
ABSOL ERRORS		50.0		12.2		.06		.34		1.2		1.1		0.02		.5	.07
* NOT INCLUDED IN AVERAGING: T283 BECAUSE TOO LARGE CD																	
* T287																	
T287	0.50	280.0	35.7	35.0	42.9	.13	55.8	.64	43.0	22.3	4.0	28.0	10.1	0.622	6.4	5.6	99.53
T288	0.50	280.0	35.7	35.0	42.9	.13	55.8	.73	43.1	25.5	4.4	12.1	9.9	0.308	5.8	5.5	99.61
T289	0.50	280.0	35.7	35.0	42.9	.13	55.8	.77	42.9	27.0	1.8	12.9	3.8	0.347	2.1	2.1	99.95
T290	0.50	280.0	35.7	35.0	42.9	.13	55.8	.79	42.9	27.6	1.8	11.4	3.7	0.313	2.0	2.0	99.90
T291	0.50	280.0	35.7	35.0	42.9	.13	55.8	.76	43.4	26.5	6.9	14.3	18.3	0.379	11.5	3.7	99.53
AVER. VALUES		280.0	35.7	35.0	42.9	.13	55.8	.76	43.1	26.6	3.7	12.7	8.9	0.34	5.3	3.3	99.73
ST DEVIATION							.03	.2	.2	2.4	1.3	1.3	6.9	0.03	4.4	1.6	.19
MEANS+ERRORS		280.0	35.7	35.0	42.9	.13	55.8	.76	43.1	26.6	1.7	12.7	5.0	0.34	4.9	3.3	99.73
ABSOL ERRORS		100.0		15.0		.07		.33		.4		0.6		0.02		.8	.10
* NOT INCLUDED IN AVERAGING: T287 BECAUSE TOO SHORT TIME?																	

Tabel 1c: Resultaten individuele metingen (vervolg).

T292	0.55										34.6	4.1	13.2	8.8	0.456	4.8	3.7	99.50
T293	0.55										31.4	9.4	11.8	23.2	0.375	14.0	6.6	98.27
AVER. VALUES											33.2	6.7	12.5	16.0	0.42	9.4	5.2	98.89
ST DEVIATION											2.0	3.7	1.0	10.2	0.06	6.5	2.0	.87
MEANS+ERRORS											33.2	10.0	12.5	14.0	0.42	12.0	5.2	98.89
ABSOL ERRORS											3.3		2		0.05		2.0	.87

T294	0.575										31.5	3.7	13.9	9.5	0.442	5.8	2.6	99.72
AVER. VALUES											31.9	3.7	13.9	9.5	0.442	5.8	2.6	99.72
MEANS+ERRORS											31.9	10.0	13.9	14.0	0.442	12.0	2.6	99.72
ABSOL ERRORS											-		-		-			

TEST-RESULTS FOR T = 4 S

TEST	UO (M/S)	R-LENGTH		R-HEIGHT		STEEPNESS		RATIO RC/RH		LENGTH PC		CO		TOTAL LOAD		MEASUREMENT RAND. ERROR (PCT)	EXPLAINED VARIATION (PCT)
		VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M3)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M2)	ERROR (PCT)		
T100	0.20	130.0	7.7	25.0	20.0	.19	21.4	1.07	20.2	26.8	2.8	0.425	4.8	0.0114	2.2	2.3	99.64
T110	0.20	145.0	3.5	30.0	16.7	.21	17.0	.86	18.9	25.8	9.0	0.486	16.2	0.0125	7.8	7.8	98.41
T117	0.20	155.0	22.6	25.0	20.0	.16	30.2	.89	20.1	22.2	1.8	0.571	3.8	0.0126	2.2	2.6	99.90
T118	0.20	155.0	22.6	25.0	20.0	.16	30.2	1.18	20.0	29.4	1.1	0.586	2.0	0.0172	.9	.5	99.97
T119	0.20	165.0	9.1	27.5	9.1	.17	12.9	.97	9.2	26.6	1.7	0.522	3.2	0.0139	1.6	1.4	99.95
AVER. VALUES		150.0	13.1	26.5	17.2	.18	22.3	.99	17.7	26.1	3.3	0.52	6.0	0.014	2.9	3.0	99.61
ST DEVIATION		13.2	8.0	2.2	4.7	.02	7.8	.13	4.8	2.6	3.3	0.07	5.8	0.002	2.7	2.6	.67
MEANS+ERRORS		150.0	13.1	26.5	17.2	.18	22.3	.99	17.7	26.1	4.5	0.52	5.7	0.014	7.4	3.0	99.61
ABSOL ERRORS		19.6		4.5		.04		.18		1.2		0.03		0.0010		1.2	.30

T120	0.25	150.0	33.3	32.5	23.1	.22	40.5	1.11	23.5	35.9	4.5	1.28	7.1	0.0459	3.0	3.9	99.40
T121	0.25	150.0	33.3	32.5	23.1	.22	40.5	.92	23.4	29.9	3.9	1.21	7.5	0.0361	3.8	4.2	99.54
AVER. VALUES		150.0	33.3	32.5	23.1	.22	40.5	1.01	23.5	32.9	4.2	1.24	7.3	0.041	3.4	4.1	99.47
ST DEVIATION								.13	.1	4.2	.4	0.05	.3	0.007	.6	.2	.10
MEANS+ERRORS		150.0	33.3	32.5	23.1	.22	40.5	1.01	23.5	32.9	10.0	1.24	14.0	0.041	12.0	4.1	99.47
ABSOL ERRORS		50.0		7.5		.09		.24		3.3		0.2		0.005		.2	.10

T111	0.30	190.0	15.8	30.0	33.3	.16	36.9	1.19	33.5	35.8	3.6	2.29	5.9	0.0819	2.7	4.5	99.50
T112	0.30	225.0	33.3	35.0	28.6	.16	43.9	1.09	28.7	38.2	2.4	2.54	3.8	0.0893	1.6	2.9	99.76
T122	0.30	225.0	33.3	35.0	28.6	.16	43.9	.97	28.7	34.1	2.2	2.25	3.6	0.0767	1.6	2.0	99.86
T123	0.30	225.0	33.3	35.0	42.9	.16	54.3	.97	42.9	33.9	2.3	2.64	3.8	0.0895	1.7	2.1	99.85
T314	0.30	165.0	9.1	40.0	25.0	.24	26.6	.70	25.0	28.8	1.5	3.48	2.7	0.0976	1.4	1.7	99.94
T315	0.30	165.0	9.1	40.0	25.0	.24	26.6	.88	25.1	35.2	2.6	1.81	3.9	0.0638	1.5	2.4	99.79
T316	0.30	165.0	9.1	40.0	25.0	.24	26.6	.88	25.2	35.0	2.7	2.82	4.0	0.0986	1.6	2.4	99.78
AVER. VALUES		194.3	20.4	36.4	29.8	.19	37.0	.95	29.9	34.3	2.5	2.5	4.0	0.085	1.7	2.6	99.78
ST DEVIATION		30.1	12.3	3.2	6.5	.05	10.9	.16	6.5	3.1	.6	0.5	.9	0.012	.4	.9	.14
MEANS+ERRORS		194.3	20.4	36.4	29.8	.19	37.0	.95	29.9	34.3	3.4	2.5	8.0	0.085	5.4	2.6	99.78
ABSOL ERRORS		39.7		10.8		.07		.29		1.2		0.2		0.005		.3	.05

* T113	0.40	220.0	27.3	35.0	42.9	.16	50.8	.77	42.9	27.0	1.6	6.20	3.1	0.168	1.6	1.9	99.92	
T114	0.40	240.0	33.3	37.5	33.3	.16	47.1	.70	33.5	26.4	2.9	8.90	6.2	0.235	3.4	2.5	99.83	
T124	0.40	240.0	33.3	37.5	33.3	.16	47.1	.87	33.4	32.7	2.3	7.17	4.0	0.235	1.9	2.3	99.84	
T125	0.40	315.0	42.9	32.5	53.9	.10	68.8	.83	53.9	26.9	2.0	8.77	4.2	0.236	2.3	2.3	99.88	
AVER. VALUES		265.0	36.5	35.8	40.2	.14	54.4	.80	40.3	28.7	2.4	8.3	4.8	0.2353	2.5	2.3	99.85	
ST DEVIATION		43.3	5.5	2.9	11.8	.03	12.5	.09	11.8	3.5	.5	1.0	1.2	0.0008	.8	.1	.03	
* NOT INCLUDED IN AVERAGE: T113 BECAUSE TOO SHORT TIME																		
MEANS+ERRORS		265.0	36.5	35.8	40.2	.14	54.4	.80	40.3	28.7	7.0	8.3	6.7	0.2353	.2	2.3	99.85	
ABSOL ERRORS		96.7		14.4		.08		.32		2.8		0.6		0.0005		.1	.02	

T348	0.45	250.0	20.0	45.0	33.3	.18	38.9	.63	33.6	28.2	3.9	11.0	7.2	0.310	3.6	4.4	99.54
T349	0.45	250.0	20.0	45.0	33.3	.18	38.9	.58	33.4	25.9	2.7	12.8	5.4	0.331	2.9	3.3	99.79
T350	0.45	300.0	33.3	45.0	33.3	.15	47.1	.64	33.4	28.9	2.2	10.7	4.6	0.310	2.6	3.4	99.85
AVER. VALUES		266.7	24.4	45.0	33.3	.17	41.6	.62	33.5	27.7	2.9	11.5	5.7	0.317	3.0	3.7	99.73
ST DEVIATION		28.9	7.7			.02	4.2	.04	.1	1.6	.9	1.1	1.3	0.012	.5	.6	.16
MEANS+ERRORS		266.7	24.4	45.0	33.3	.17	41.6	.62	33.5	27.7	3.3	11.5	5.6	0.317	2.2	3.7	99.73
ABSOL ERRORS		65.2		15.0		.07		.21		.9		0.6		0.007		.4	.09

T115	0.48	315.0	42.9	32.5	53.9	.10	68.8	.86	53.9	27.9	3.0	16.3	5.5	0.455	2.8	3.3	99.74
T116	0.48	315.0	42.9	32.5	53.9	.10	68.8	.89	54.3	28.9	7.3	15.9	12.9	0.457	5.8	3.6	99.46
AVER. VALUES		315.0	42.9	32.5	53.9	.10	68.8	.87	54.1	28.4	5.1	16.1	9.2	0.456	4.3	3.5	99.60
ST DEVIATION								.02	.3	.7	3.1	0.3	5.2	0.001	2.1	.2	.20
MEANS+ERRORS		315.0	42.9	32.5	53.9	.10	68.8	.87	54.1	28.4	10.0	16.1	14.0	0.456	12.0	3.5	99.60
ABSOL ERRORS		135.0		17.5		.07		.47		2.8		2		0.05		.2	.20

Tabel 1c: Resultaten individuele metingen (vervolg).

TEST-RESULTS FOR T = 6 S

TEST	U0 (M/S)	R-LENGTH		R-HEIGHT		STEEPNESS		RATIO RC/PH		LENGTH RC		CD		TOTAL LOAD		MEASUREMENT		EXPLAINED
		VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M3)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M2)	ERROR (PCT)	RAND. ERROR (PCT)	VARIATION (PCT)	
T133	0.2125	140.0	7.1	30.0	33.3	.21	34.1	.92	33.4	27.5	2.2	0.340	4.9	0.00935	2.8	1.8	99.90	
T134	0.2125	140.0	7.1	30.0	33.3	.21	34.1	.82	33.5	24.7	3.0	0.412	7.3	0.0102	4.5	2.7	99.82	
AVER. VALUES		140.0	7.1	30.0	33.3	.21	34.1	.87	33.4	26.1	2.6	0.38	6.1	0.0098	3.6	2.2	99.86	
ST DEVIATION								.06	.0	1.9	.6	0.05	1.7	0.0006	1.2	.6	.05	
MEANS+ERRORS		140.0	7.1	30.0	33.3	.21	34.1	.87	33.4	26.1	10.0	0.38	14.0	0.0098	12.0	2.2	99.86	
ABSOL ERRORS		10.0		10.0		.07		.29		2.6		0.05		0.0012		.6	.06	

1-4
1-4

N = 2

T131	0.225	130.0	15.4	25.0	20.0	.19	25.2	.90	20.4	22.5	4.1	0.420	6.4	0.00944	4.6	4.1	99.67
T132	0.225	130.0	15.4	25.0	20.0	.15	25.2	.89	20.1	22.2	1.8	0.467	3.8	0.0103	2.1	1.2	99.94
AVER. VALUES		130.0	15.4	25.0	20.0	.19	25.2	.89	20.2	22.3	2.9	0.44	6.1	0.0099	3.3	2.9	99.80
ST DEVIATION								.01	.2	.2	1.6	0.03	3.3	0.0006	1.8	1.6	.19
MEANS+ERRORS		130.0	15.4	25.0	20.0	.19	25.2	.89	20.2	22.3	10.0	0.44	14.0	0.0099	12.0	2.9	99.80
ABSOL ERRORS		20.0		5.0		.05		.18		2.2		0.06		0.0012		1.6	.15

1-4
1-4

N = 2

T127	0.25	160.0	12.5	30.0	33.3	.19	35.6	1.00	33.4	29.9	.9	0.598	1.6	0.0178	.7	.7	99.90
T128	0.25	160.0	12.5	30.0	33.3	.19	35.6	.97	33.3	29.2	.0	0.537	.1	0.0157	.6	.0	100.00
AVER. VALUES		160.0	12.5	30.0	33.3	.19	35.6	.98	33.3	29.5	.5	0.57	.8	0.017	.4	.3	99.99
ST DEVIATION								.0	.0	.5	.6	0.04	1.1	0.002	.5	.5	.01
MEANS+ERRORS		160.0	12.5	30.0	33.3	.19	35.6	.98	33.3	29.5	10.0	0.57	14.0	0.017	12.0	.3	99.99
ABSOL ERRORS		20.0		10.0		.07		.33		3.0		0.08		0.002		.5	.01

2-5
2-4

N = 2

T135	0.275	170.0	5.9	37.5	33.3	.22	33.9	1.08	33.8	40.3	5.7	0.452	8.6	0.0182	3.2	3.2	99.36	
T136	0.275	170.0	5.9	37.5	33.3	.22	33.9	1.04	34.6	39.1	9.1	0.482	14.2	0.0188	5.5	5.2	98.37	
T311	0.275	175.0	8.6	30.0	33.3	.17	34.4	1.05	33.3	31.4	.6	0.897	.9	0.0281	.3	.4	99.59	
T312	0.275	195.0	12.8	35.0	42.9	.18	44.7	1.08	43.3	37.9	6.0	1.20	8.5	0.0454	3.0	3.5	99.29	
T313	0.275	195.0	12.8	35.0	42.9	.18	44.7	1.23	43.6	42.9	8.1	0.825	8.4	0.0354	2.1	4.2	98.72	
AVER. VALUES		188.3	11.4	33.3	39.7	.18	41.3	1.12	40.1	37.4	4.9	1.0	5.9	0.036	1.8	2.7	99.33	
ST DEVIATION		11.5	2.5	2.9	5.5	.00	6.0	.10	5.8	5.8	3.8	0.2	4.4	0.009	1.3	2.0	.64	
* NOT INCLUDED IN AVERAGING: T135 BECAUSE WRONG HEIGHT? T136 BECAUSE WRONG HEIGHT?																		
MEANS+ERRORS		188.3	11.4	33.3	39.7	.18	41.3	1.12	40.1	37.4	9.0	1.0	11.8	0.036	13.8	2.7	99.33	
ABSOL ERRORS		21.5		13.2		.07		.45		3.3		0.11		0.005		1.2	.37	

2-5
2-5
1-4
2-5
1-4

N = 3

T129	0.30	280.0	17.9	45.0	33.3	.16	37.8	.88	33.4	39.7	1.1	1.49	1.6	0.0593	.6	.6	99.97
T130	0.30	280.0	17.9	45.0	33.3	.16	37.8	1.04	33.7	46.9	4.7	1.22	5.6	0.0572	1.4	2.2	99.56
AVER. VALUES		280.0	17.9	45.0	33.3	.16	37.8	.96	33.5	43.2	2.9	1.4	3.6	0.0583	1.0	1.4	99.77
ST DEVIATION								.11	.2	5.1	2.5	0.2	2.8	0.0015	.6	1.1	.29
MEANS+ERRORS		280.0	17.9	45.0	33.3	.16	37.8	.96	33.5	43.2	10.0	1.4	14.0	0.0583	12.0	1.4	99.77
ABSOL ERRORS		50.0		15.0		.06		.32		4.3		0.2		0.007		1.1	.29

2-5
2-5

N = 2

T299	0.325	170.0	17.7	35.0	42.9	.21	46.4	1.31	43.2	46.0	5.0	1.41	5.5	0.0650	1.6	3.4	99.25
T300	0.325	190.0	21.1	35.0	42.9	.18	47.8	1.11	43.2	38.8	5.8	1.38	6.6	0.0533	1.8	3.3	99.34
T301	0.325	175.0	14.3	25.0	67.0	.14	61.7	1.68	60.1	41.9	3.2	1.43	3.4	0.0598	.9	1.7	99.80
T302	0.325	200.0	25.0	30.0	33.3	.15	41.7	1.42	34.7	42.7	9.6	1.74	12.2	0.0744	3.4	5.0	98.19
AVER. VALUES		183.8	19.5	31.3	44.8	.17	49.4	1.38	45.3	42.3	5.9	1.5	6.9	0.063	1.9	3.4	99.14
ST DEVIATION		13.8	4.6	4.8	11.1	.03	8.6	.24	10.6	3.0	2.7	0.2	3.8	0.009	1.1	1.4	.66
MEANS+ERRORS		183.8	19.5	31.3	44.8	.17	49.4	1.38	45.3	42.3	3.5	1.5	5.7	0.063	7.0	3.4	99.14
ABSOL ERRORS		35.8		14.0		.08		.62		1.5		0.08		0.004		.7	.34

1-5
1-4
1-4
2-5

N = 4

TEST-RESULTS FOR T = 7 S

TEST	U0 (M/S)	R-LENGTH		R-HEIGHT		STEEPNESS		RATIO RC/PH		LENGTH RC		CD		TOTAL LOAD		MEASUREMENT		EXPLAINED
		VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (-)	ERROR (PCT)	VALUE (MM)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M3)	ERROR (PCT)	VALUE (KG/M2)	ERROR (PCT)	RAND. ERROR (PCT)	VARIATION (PCT)	
T139	0.20	190.0	10.5	22.5	11.1	.12	15.3	.84	11.2	18.8	.9	0.235	1.9	0.00443	1.1	.7	99.59	
T140	0.20	190.0	10.5	27.5	9.1	.14	13.9	.81	9.5	22.1	2.8	0.256	6.6	0.00367	4.0	3.5	99.92	
AVER. VALUES		190.0	10.5	25.0	10.1	.13	14.6	.82	10.3	20.5	1.8	0.246	4.2	0.0051	2.5	2.1	99.66	
ST DEVIATION				3.5	1.4	.02	1.0	.02	1.2	2.3	1.3	0.015	3.3	0.0009	2.1	2.0	.25	
MEANS+ERRORS		190.0	10.5	25.0	10.1	.13	14.6	.82	10.3	20.5	10.0	0.246	14.0	0.0051	12.0	2.1	99.66	
ABSOL ERRORS		20.0		2.5		.02		.08		3.0		0.03		0.0006		2.0	.25	

1-3
1-3

N = 2

T143	0.225	140.0	21.4	20.0	25.0	.14	32.9	1.44	25.0	28.9	1.4	0.228	2.4	0.00658	1.2	1.4	99.96
T144	0.225	155.0	20.0	20.0	25.0	.13	38.3	1.74	25.6	34.8	5.5	0.208	8.7	0.00723	3.5	3.4	99.70
AVER. VALUES		147.5	25.2	20.0	25.0	.14	35.6	1.59	25.3	31.8	3.4	0.218	5.5	0.0069	2.3	2.4	99.83
ST DEVIATION		10.6	5.4			.01	3.8	.21	.4	4.2	2.9	0.014	4.4	0.0005	1.7	1.4	.19
MEANS+ERRORS		147.5	25.2	20.0	25.0	.14	35.6	1.59	25.3	31.8	10.0	0.218	14.0	0.0069	12.0	2.4	99.83
ABSOL ERRORS		37.2		5.0		.05		.40		3.2		0.03		0.0308		1.4	.18

1-4
2-4

N = 2

Tabel 1c: Resultaten individuele metingen (vervolg).

T141	6.25	235.0	10.6	32.5	23.1	.14	25.4	1.49	23.2	48.6	2.5	0.292	3.2	0.0142	1.1	1.6	99.82
T142	0.25	240.0	16.7	32.5	23.1	.14	26.5	1.31	23.3	42.6	3.5	0.304	5.3	0.0130	2.1	2.9	99.75
AVER. VALUES		237.5	13.7	32.5	23.1	.14	26.9	1.40	23.3	45.6	3.0	0.298	4.2	0.0136	1.6	2.3	99.82
ST DEVIATION		3.5	4.3			.00	2.2	.13	.1	4.2	.8	0.909	1.4	0.0069	.7	.8	.09
MEANS+ERRORS		237.5	13.7	32.5	23.1	.14	26.9	1.40	23.3	45.6	10.0	0.298	14.0	0.0136	12.0	2.3	99.82
ABSOL ERRORS		32.4		7.5		.04		.33		4.6		0.04		0.002		.8	.09

T137	0.289	220.0	18.2	35.0	28.6	.16	33.9	1.00	28.8	35.1	3.9	0.712	6.5	0.0250	3.1	5.0	99.54
T138	0.289	220.0	18.2	35.0	28.6	.16	33.9	1.16	28.9	40.4	4.2	0.582	6.6	0.0235	2.0	3.6	99.65
AVER. VALUES		220.0	18.2	35.0	28.6	.16	33.9	1.08	28.9	37.8	4.0	0.65	6.6	0.0243	3.0	4.3	99.59
ST DEVIATION								.11	.0	3.7	.2	0.09	.0	0.0011	.2	1.0	.08
MEANS+ERRORS		220.0	18.2	35.0	28.6	.16	33.9	1.08	28.9	37.8	10.0	0.65	14.0	0.0243	12.0	4.3	99.59
ABSOL ERRORS		40.0		10.0		.05		.31		3.8		0.09		0.003		1.0	.08

Tabel 1c: Resultaten individuele metingen (vervolg).

POINTS 1 TO 3
N = 4
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 1.0 S; U0 = 0.20 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	100.0	34.8	45.8	-63.6	58.9
RC	100.0	100.0	34.4	45.5	-63.5	58.8
C0	34.8	34.4	100.0	39.3	-90.8	92.5
LOAD	45.8	45.5	99.3	100.0	-94.3	95.3
DC/C	-63.6	-63.5	-90.8	-94.3	100.0	-95.8
R2	58.9	58.8	92.5	95.3	-95.8	100.0

POINTS 1 TO 2
N = 5
NT = 5
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 1.0 S; U0 = 0.50 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	22.0	45.0	44.8	-	-
RC	22.0	100.0	26.8	52.3	-	-
C0	45.0	26.8	100.0	96.1	-	-
LOAD	44.8	52.3	96.1	100.0	-	-
DC/C	-	-	-	-	100.0	-
R2	-	-	-	-	-	100.0

POINTS 1 TO 3
N = 4
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 1.0 S; U0 = 0.25 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	100.0	100.0	100.0	-94.7	92.8
RC	100.0	100.0	100.0	100.0	-94.7	92.8
C0	100.0	100.0	100.0	100.0	-94.7	92.8
LOAD	100.0	100.0	100.0	100.0	-94.4	92.4
DC/C	-94.7	-94.7	-94.7	-94.4	100.0	-99.8
R2	92.8	92.8	92.8	92.4	-99.8	100.0

POINTS 1 TO 2
N = 3
NT = 3
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 1.0 S; U0 = 0.55 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	100.0	-24.4	36.4	-	-
RC	100.0	100.0	-24.4	36.4	-	-
C0	-24.4	-24.4	100.0	81.4	-	-
LOAD	36.4	36.4	81.4	100.0	-	-
DC/C	-	-	-	-	100.0	-
R2	-	-	-	-	-	100.0

POINTS 1 TO 3
N = 4
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 1.0 S; U0 = 0.30 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	61.3	64.2	97.0	-60.3	55.6
RC	61.3	100.0	-21.1	40.6	-70.7	66.1
C0	64.2	-21.1	100.0	80.8	-3.2	1.7
LOAD	97.0	40.6	80.8	100.0	-45.3	41.0
DC/C	-60.3	-70.7	-3.2	-45.3	100.0	-99.7
R2	55.6	66.1	1.7	41.0	-99.7	100.0

POINTS 1 TO 2
N = 4
NT = 4
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 1.0 S; U0 = 0.65 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	95.6	-82.3	-84.4	-	-
RC	95.6	100.0	-94.8	-96.0	-	-
C0	-82.3	-94.8	100.0	99.9	-	-
LOAD	-84.4	-96.0	99.9	100.0	-	-
DC/C	-	-	-	-	100.0	-
R2	-	-	-	-	-	100.0

POINTS 1 TO 3
N = 4
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 1.0 S; U0 = 0.35 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	100.0	-19.5	-14.2	99.4	-99.6
RC	100.0	100.0	-19.5	-14.2	99.4	-99.6
C0	-19.5	-19.5	100.0	99.9	-18.7	19.3
LOAD	-14.2	-14.2	99.9	100.0	-13.4	14.0
DC/C	99.4	99.4	-18.7	-13.4	100.0	-100.0
R2	-99.6	-99.6	19.3	14.0	-100.0	100.0

POINTS 1 TO 3
N = 4
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 1.5 S; U0 = 0.15 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	100.0	-95.9	-79.4	56.3	-77.2
RC	100.0	100.0	-95.9	-79.4	56.3	-77.2
C0	-95.9	-95.9	100.0	93.3	-66.8	83.9
LOAD	-79.4	-79.4	93.3	100.0	-76.3	85.8
DC/C	56.3	56.3	-66.8	-76.3	100.0	-96.0
R2	-77.2	-77.2	83.9	85.8	-96.0	100.0

POINTS 1 TO 3
N = 12
NT = 0
TIME SERIES
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 1.0 S; U0 = 0.40 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	89.1	-39.7	-29.8	23.7	-38.3
RC	89.1	100.0	-52.2	-41.5	30.7	-46.5
C0	-39.7	-52.2	100.0	99.3	-23.0	29.9
LOAD	-29.8	-41.5	99.3	100.0	-19.7	24.7
DC/C	23.7	30.7	-23.0	-19.7	100.0	-98.3
R2	-38.3	-46.5	29.9	24.7	-98.3	100.0

N = NUMBER OF MEASUREMENTS INCLUDED
NT = NUMBER WITH ONLY TWO MEASUREMENT HEIGHTS

Tabel 1d: Correlatieresultaten individuele metingen.

POINTS 1 TO 3
N = 4
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 1.5 S; U0 = 0.20 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	100.0	-22.7	2.1	76.9	-88.6
RC	100.0	100.0	-22.7	2.1	76.9	-88.6
C0	-22.7	-22.7	100.0	96.9	10.4	-11.7
LOAD	2.1	2.1	96.9	100.0	30.6	-34.2
DC/C	76.9	76.9	10.4	30.6	100.0	-96.2
R2	-88.6	-88.6	-11.7	-34.2	-96.2	100.0

POINTS 1 TO 3
N = 6
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 1.5 S; U0 = 0.25 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	15.6	-94.0	-96.9	-48.5	39.9
RC	15.6	100.0	-44.3	4.6	25.7	-31.0
C0	-94.0	-44.3	100.0	87.4	24.3	-13.0
LOAD	-96.9	4.6	87.4	100.0	45.2	-35.2
DC/C	-48.5	25.7	24.3	45.2	100.0	-95.4
R2	39.9	-31.0	-13.0	-35.2	-95.4	100.0

POINTS 1 TO 3
N = 6
NT = 1
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 1.5 S; U0 = 0.30 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	-1	5.5	11.1	-62.2	48.9
RC	-1	100.0	-97.2	-84.7	77.2	-90.3
C0	5.5	-97.2	100.0	94.6	-73.5	87.8
LOAD	11.1	-84.7	94.6	100.0	-72.7	87.5
DC/C	-62.2	77.2	-73.5	-72.7	100.0	-96.8
R2	48.9	-90.3	87.8	87.5	-96.8	100.0

POINTS 1 TO 3
N = 4
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 1.5 S; U0 = 0.35 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	100.0	-93.0	-75.5	71.0	-74.7
RC	100.0	100.0	-92.9	-75.3	71.3	-75.0
C0	-93.0	-92.9	100.0	94.3	-48.3	47.3
LOAD	-75.5	-75.3	94.3	100.0	-20.8	16.3
DC/C	71.0	71.3	-48.3	-20.8	100.0	-96.6
R2	-74.7	-75.0	47.3	16.3	-96.6	100.0

POINTS 1 TO 3
N = 6
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 1.5 S; U0 = 0.40 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	100.0	-4.1	33.4	68.8	-75.1
RC	100.0	100.0	-4.2	33.4	68.8	-75.1
C0	-4.1	-4.2	100.0	92.8	14.6	-15.0
LOAD	33.4	33.4	92.8	100.0	39.8	-42.3
DC/C	68.8	68.8	14.6	39.8	100.0	-96.5
R2	-75.1	-75.1	-15.0	-42.3	-96.5	100.0

POINTS 1 TO 4
N = 4
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 1.5 S; U0 = 0.45 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	100.0	-99.6	-99.7	-93.1	93.5
RC	100.0	100.0	-99.6	-99.7	-93.1	93.5
C0	-99.6	-99.6	100.0	100.0	95.3	-96.1
LOAD	-99.7	-99.7	100.0	100.0	95.3	-95.9
DC/C	-93.1	-93.1	95.3	95.3	100.0	-99.4
R2	93.5	93.5	-96.1	-95.9	-99.4	100.0

POINTS 1 TO 3
N = 8
NT = 1
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 1.5 S; U0 = 0.50 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	15.0	66.2	72.1	58.3	-51.4
RC	15.0	100.0	-22.5	5.8	59.5	-78.0
C0	66.2	-22.5	100.0	95.9	47.3	-24.3
LOAD	72.1	5.8	95.9	100.0	73.8	-59.2
DC/C	58.3	59.5	47.3	73.8	100.0	-93.6
R2	-51.4	-78.0	-24.3	-59.2	-93.6	100.0

POINTS 1 TO 3
N = 5
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 1.5 S; U0 = 0.55 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	24.0	75.5	85.1	39.4	-37.8
RC	24.0	100.0	-43.6	-28.5	-8.6	25.3
C0	75.5	-43.6	100.0	98.6	45.7	-57.2
LOAD	85.1	-28.5	98.6	100.0	45.3	-54.4
DC/C	39.4	-8.6	45.7	45.3	100.0	-97.2
R2	-37.8	25.3	-57.2	-54.4	-97.2	100.0

POINTS 1 TO 3
N = 4
NT = 1
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 1.5 S; U0 = 0.60 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	49.0	50.1	79.4	-86.8	72.2
RC	49.0	100.0	-43.4	-2.3	-32.5	8.6
C0	50.1	-43.4	100.0	91.0	54.4	-32.4
LOAD	79.4	-2.3	91.0	100.0	71.3	-52.2
DC/C	-86.8	-32.5	54.4	71.3	100.0	-97.0
R2	72.2	8.6	-32.4	-52.2	-97.0	100.0

POINTS 1 TO 4
N = 4
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 2.0 S; U0 = 0.15 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	-99.5	99.0	98.8	-24.8	72.2
RC	-99.5	100.0	-99.7	-99.4	32.7	-77.8
C0	99.0	-99.7	100.0	99.9	-30.6	76.2
LOAD	98.8	-99.4	99.9	100.0	-28.2	74.5
DC/C	-24.8	32.7	-30.6	-28.2	100.0	-84.9
R2	72.2	-77.8	76.2	74.5	-84.9	100.0

POINTS 1 TO 5
N = 15
NT = 0
TIME SERIES
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 2.0 S; U0 = 0.30 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	76.6	-47.9	19.5	-44.2	24.0
RC	76.6	100.0	-33.8	51.7	-41.5	10.2
C0	-47.9	-33.8	100.0	63.0	54.7	-48.4
LOAD	19.5	51.7	63.0	100.0	13.5	-33.5
DC/C	-44.2	-41.5	54.7	13.5	100.0	-93.6
R2	24.0	10.2	-48.4	-33.5	-93.6	100.0

POINTS 1 TO 4
N = 3
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 2.0 S; U0 = 0.59 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	77.8	-93.6	-95.6	70.9	-86.6
RC	77.8	100.0	-95.0	-92.8	10.9	-36.3
C0	-93.6	-95.0	100.0	99.8	-41.5	63.7
LOAD	-95.6	-92.8	99.8	100.0	-47.2	68.4
DC/C	70.9	10.9	-41.5	-47.2	100.0	-96.6
R2	-86.6	-36.3	63.7	68.4	-96.6	100.0

POINTS 2 TO 5
N = 4
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 2.0 S; U0 = 0.60 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	-98.5	97.6	96.6	-99.2	99.7
RC	-98.5	100.0	-97.3	-96.0	-98.5	-99.4
C0	97.6	-97.3	100.0	99.9	-94.6	97.3
LOAD	96.6	-96.0	99.9	100.0	-93.3	96.1
DC/C	-99.2	98.4	-94.6	-93.0	100.0	-99.5
R2	99.7	-99.4	97.3	96.1	-99.5	100.0

POINTS 1 TO 4
N = 3
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 2.0 S; U0 = 0.69 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	75.7	-36.2	-9	-63.2	-83.7
RC	75.7	100.0	-80.3	-66.0	-98.5	-99.1
C0	-36.2	-80.3	100.0	93.5	95.1	81.4
LOAD	-9	-66.0	93.5	100.0	78.0	55.5
DC/C	-63.2	-98.5	95.1	78.0	100.0	95.3
R2	-83.7	-99.1	81.4	55.5	95.3	100.0

POINTS 1 TO 3
N = 3
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 3.0 S; U0 = 1.20 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	73.5	-87.5	-99.4	66.9	-83.8
RC	73.5	100.0	-97.1	-80.3	-1.2	-24.5
C0	-87.5	-97.1	100.0	92.2	-22.7	46.9
LOAD	-99.4	-80.3	92.2	100.0	-58.7	77.5
DC/C	66.9	-1.2	-22.7	-58.7	100.0	-96.6
R2	-83.8	-24.5	46.9	77.5	-96.6	100.0

N = NUMBER OF MEASUREMENTS INCLUDED
NT = NUMBER WITH ONLY TWO MEASUREMENT HEIGHTS

Tabel 1d: Correlatieresultaten individuele metingen (vervolg).

POINTS 1 TO 5
N = 4
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 3.0 S; U0 = 0.30 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	100.0	-29.3	6.9	32.6	-62.9
RC	100.0	100.0	-29.8	6.4	33.1	-62.9
C0	-29.3	-29.8	100.0	93.3	-59.5	58.0
LOAD	6.9	6.4	93.3	100.0	-51.1	38.2
DC/C	32.6	33.1	-59.5	-51.1	100.0	-94.2
R2	-62.9	-62.9	58.0	38.2	-94.2	100.0

POINTS 1 TO 5
N = 3
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 3.0 S; U0 = 0.34 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	100.0	-95.1	-61.5	-34.3	18.5
RC	100.0	100.0	-95.1	-61.6	-34.2	18.4
C0	-95.1	-95.1	100.0	82.9	3.6	12.8
LOAD	-61.5	-61.6	82.9	100.0	-52.9	66.1
DC/C	-34.3	-34.2	3.6	-52.9	100.0	-98.7
R2	18.5	18.4	12.8	66.1	-98.7	100.0

POINTS 1 TO 5
N = 4
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 3.0 S; U0 = 0.35 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	100.0	-96.1	-88.7	15.0	-59.4
RC	100.0	100.0	-96.1	-88.7	14.7	-59.2
C0	-96.1	-96.1	100.0	97.9	-24.3	63.1
LOAD	-88.7	-88.7	97.9	100.0	-34.6	66.7
DC/C	15.0	14.7	-24.3	-34.6	100.0	-68.1
R2	-59.4	-59.2	63.1	66.7	-68.1	100.0

POINTS 2 TO 5
N = 4
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 3.0 S; U0 = 0.40 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	59.9	17.2	80.3	77.8	-79.5
RC	59.9	100.0	-68.4	.8	5.9	-39.9
C0	17.2	-68.4	100.0	72.4	65.5	-26.7
LOAD	80.3	.8	72.4	100.0	95.3	-74.1
DC/C	77.8	5.9	65.5	95.3	100.0	-88.9
R2	-79.5	-39.9	-26.7	-74.1	-88.9	100.0

POINTS 1 TO 5
N = 3
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 3.0 S; U0 = 0.44 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	100.0	-86.9	-76.8	-8.5	-21.6
RC	100.0	100.0	-86.8	-76.7	-8.3	-21.8
C0	-86.9	-86.8	100.0	98.4	56.6	-29.4
LOAD	-76.8	-76.7	98.4	100.0	70.4	-45.9
DC/C	-8.5	-8.3	56.6	70.4	100.0	-95.4
R2	-21.6	-21.8	-29.4	-45.9	-95.4	100.0

POINTS 1 TO 5
N = 3
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 3.0 S; U0 = 0.45 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	48.2	31.4	76.8	-37.0	24.9
RC	48.2	100.0	-58.0	-19.2	-99.2	96.9
C0	31.4	-58.0	100.0	85.0	76.6	-84.1
LOAD	76.8	-19.2	85.0	100.0	31.1	-42.9
DC/C	-37.0	-99.2	76.6	31.1	100.0	-99.2
R2	24.9	96.9	-84.1	-42.9	-99.2	100.0

POINTS 1 TO 3
N = 4
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 3.0 S; U0 = 0.50 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	100.0	-20.6	10.9	-96.2	73.5
RC	100.0	100.0	-21.1	10.5	-96.2	73.9
C0	-20.6	-21.1	100.0	95.0	12.0	-60.8
LOAD	10.9	10.5	95.0	100.0	-18.6	-37.9
DC/C	-96.2	-96.2	12.0	-18.6	100.0	-79.9
R2	73.5	73.9	-60.8	-37.9	-79.9	100.0

POINTS 2 TO 5
N = 5
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 4.0 S; U0 = 0.20 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	80.4	10.5	61.1	-68.3	57.7
RC	80.4	100.0	-5.3	62.6	-28.2	10.8
C0	10.5	-5.3	100.0	74.6	-36.2	32.5
LOAD	61.1	62.6	74.6	100.0	-45.7	31.1
DC/C	-68.3	-28.2	-36.2	-45.7	100.0	-98.1
R2	57.7	10.8	32.5	31.1	-98.1	100.0

POINTS 1 TO 5
N = 7
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 4.0 S; U0 = 0.30 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	78.6	-58.9	-24.8	82.8	-81.4
RC	78.6	100.0	-75.5	-32.7	56.5	-59.0
C0	-58.9	-75.5	100.0	86.3	-40.2	45.0
LOAD	-24.8	-32.7	86.3	100.0	-16.4	21.7
DC/C	82.8	56.5	-40.2	-16.4	100.0	-59.2
R2	-81.4	-59.0	45.0	21.7	-59.2	100.0

POINTS 1 TO 5
N = 12
NT = 0
TIME SERIES
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 4.0 S; U0 = 0.35 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	64.3	-81.6	-73.5	33.0	-70.4
RC	64.3	100.0	-89.8	-40.3	-26.4	-18.3
C0	-81.6	-89.8	100.0	75.8	12.2	31.3
LOAD	-73.5	-40.3	75.8	100.0	-19.0	41.9
DC/C	33.0	-26.4	12.2	-19.0	100.0	-86.1
R2	-70.4	-18.3	31.3	41.9	-86.1	100.0

POINTS 1 TO 5
N = 3
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 4.0 S; U0 = 0.40 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	75.2	-74.7	8.1	-59.9	44.5
RC	75.2	100.0	-100.0	-59.7	-78.6	-25.6
C0	-74.7	-100.0	100.0	60.3	78.1	26.4
LOAD	8.1	-59.7	60.3	100.0	-2.7	92.9
DC/C	-59.9	-78.6	78.1	-2.7	100.0	-39.6
R2	44.5	-25.6	26.4	92.9	-39.6	100.0

POINTS 1 TO 4
N = 3
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 6.0 S; U0 = 0.275 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	92.0	-48.9	15.4	77.6	-52.6
RC	92.0	100.0	-19.9	48.5	96.1	-100.0
C0	-48.9	-19.9	100.0	81.6	16.9	12.3
LOAD	15.4	48.5	81.6	100.0	70.8	-47.3
DC/C	77.6	96.1	16.9	70.8	100.0	-95.7
R2	-52.6	-100.0	12.3	-47.3	-95.7	100.0

POINTS 2 TO 7
N = 26
NT = 0
TIME SERIES
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 6.0 S; U0 = 0.2875 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	46.4	-47.9	-32.5	-43.6	17.3
RC	46.4	100.0	-76.8	-15.8	-29.7	-13.7
C0	-47.9	-76.8	100.0	70.9	31.6	1.3
LOAD	-32.5	-15.8	70.9	100.0	17.7	-7.5
DC/C	-43.6	-29.7	31.6	17.7	100.0	-84.3
R2	17.3	-13.7	1.3	-7.5	-84.3	100.0

POINTS 2 TO 5
N = 4
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 6.0 S; U0 = 0.325 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	25.7	23.7	32.5	-43.2	19.2
RC	25.7	100.0	16.8	60.1	14.5	-15.5
C0	23.7	16.8	100.0	88.9	75.3	-90.1
LOAD	32.5	60.1	88.9	100.0	68.2	-80.5
DC/C	-43.2	14.5	75.3	68.2	100.0	-96.4
R2	19.2	-15.5	-90.1	-80.5	-96.4	100.0

POINTS 1 TO 5
N = 3
NT = 0
CORRELATION COEFFICIENTS IN PCT
T = 4.0 S; U0 = 0.45 M/S

	RC/RH	RC	C0	LOAD	DC/C	R2
RC/RH	100.0	100.0	-99.4	-97.1	40.9	-12.0
RC	100.0	100.0	-99.4	-97.1	40.9	-12.0
C0	-99.4	-99.4	100.0	99.2	-50.8	23.0
LOAD	-97.1	-97.1	99.2	100.0	-61.5	35.3
DC/C	40.9	40.9	-50.8	-61.5	100.0	-95.5
R2	-12.0	-12.0	23.0	35.3	-95.5	100.0

N = NUMBER OF MEASUREMENTS INCLUDED
NT = NUMBER WITH ONLY TVC MEASUREMENT HEIGHTS

Tabel 1d: Correlatieresultaten individuele metingen (vervolg).

T (S)	UC (M/S)	P-LENGTH (MM)	R-HEIGHT (MM)	STEEPNESS (-)	RC/RH (-)	RC (MM)	CO (KG/M ³)	TOTAL LOAD (KG/M ²)	DC/C (PCT)	EXPL. VA (FCT)
1.0	0.20	47#10	5#2	0.11#0.05	1.4#0.6	7.15#0.04	8.7#0.3	0.062#0.003	24.6# 2.5	95.43#
	0.25	50#10	8#2	0.16#0.05	1.0#0.3	7.90#0.09	19.0#0.7	0.150#0.007	9.3# 1.6	99.71#
	0.30	54#8	8#2	0.15#0.04	1.0#0.2	7.96#0.02	45.8#0.5	0.365#0.004	8.8# 1.0	99.75#
	0.35	60#10	10#2	0.17#0.04	0.8#0.2	8.17#0.02	67#3	0.55#0.03	15.1# 1.2	99.23#
	0.40	65#5	10#1	0.15#0.02	0.88#0.14	8.75#0.07	84#5	0.73#0.04	18.7# .8	98.64#
	0.45	75#5	10#2	0.13#0.03	0.9#0.2	8.9#0.9	93#13	0.82#0.10	16.8# 3.7	98.86#
	0.50	83#9	9#2	0.11#0.02	0.8#0.2	7.53#0.09	243#9	1.83#0.08		
	0.55	100#10	15#5	0.15#0.05	0.5#0.2	7.62#0.12	270#7	2.06#0.05		
	0.65	175#70	20#5	0.12#0.06	0.40#0.10	7.9#0.6	400#200	3.3#1.0		
	0.75	300#200	20#10	0.07#0.06	0.5#0.2	10.0#1.0	190#30	1.9#0.2		
0.90	550#250	70#20	0.13#0.07	0.16#0.05	11.3#1.1	140#20	1.5#0.2			
1.5	0.15	65#15	12#2	0.18#0.05	0.67#0.11	8.0#0.3	2.25#0.13	0.0160#0.0005	5.4# 1.1	99.89#
	0.20	70#10	13#2	0.19#0.04	0.77#0.12	10.0#0.2	5.1#0.5	0.051#0.004	2.3# 1.2	99.95#
	0.25	74#9	13#2	0.17#0.03	1.2#0.2	14.8#0.4	9.0#0.5	0.133#0.007	2.6# .7	99.90#
	0.30	89#9	14#3	0.16#0.04	1.0#0.2	13.9#0.4	25.6#1.3	0.353#0.008	4.8# .6	99.76#
	0.35	95#5	17#2	0.18#0.02	0.77#0.10	13.1#0.2	47.7#1.5	0.626#0.010	2.9# 1.5	99.87#
	0.40	105#20	18#2	0.17#0.04	0.71#0.08	12.7#0.4	65#5	0.83#0.07	3.5# .8	99.86#
	0.45	104#10	20#2	0.19#0.03	0.63#0.06	12.6#0.6	99#14	1.22#0.11	3.7# 1.5	99.69#
	0.50	111#7	15#2	0.14#0.02	0.85#0.14	12.3#0.2	124#8	1.53#0.09	3.5# .7	99.86#
	0.55	111#9	16#3	0.14#0.03	0.76#0.13	11.5#0.2	160#14	1.8#0.2	5.8# 1.5	99.73#
	0.60	111#11	18#3	0.16#0.03	0.71#0.13	12.3#0.7	260#40	3.2#0.4	2.7# 1.2	99.92#
	0.70	300#200	35#15	0.12#0.09	0.34#0.15	11.9#1.2	500#70	5.9#0.7	3.8# -	99.90#
	0.80	510#390	43#22	0.08#0.08	0.3#0.2	12.2#1.2	650#90	7.9#0.9	.7# -	100.0#
	0.90	700#200	70#20	0.10#0.04	0.16#0.05	11.4#1.1	1000#140	11.5#1.4	6.3# -	99.74#
2.0	0.15	70#11	11#3	0.16#0.05	0.8#0.2	8.7#0.4	1.16#0.12	0.0100#0.0007	7.9# .6	99.81#
	0.20	90#10	15#3	0.17#0.04	0.8#0.2	11.9#1.2	3.8#0.5	0.046#0.005	2.0# 1.0	99.97#
	0.30	107#11	22#3	0.21#0.04	0.90#0.13	19.5#0.5	10.9#0.3	0.213#0.007	5.3# .4	99.67#
	0.40	150#30	23#2	0.15#0.03	0.82#0.09	18#2	22#3	0.40#0.05	2.3# 2.1	99.92#
	0.50	180#50	23#13	0.13#0.02	0.8#0.4	18#2	54#8	0.95#0.11	3.4# .0	99.90#
	0.59	170#30	25#9	0.15#0.06	0.8#0.3	19.3#0.7	37#6	0.71#0.09	6.0# .7	99.45#
	0.60	200#50	40#15	0.20#0.09	0.5#0.2	19.2#1.3	47#11	0.9#0.2	6.0# 1.5	99.26#
	0.65	200#59	50#20	0.25#0.12	0.5#0.2	24#2	39#5	0.92#0.11	5.9# 1.2	99.21#
	0.69	253#40	38#11	0.15#0.05	0.7#0.2	22#2	33#5	0.71#0.07	8.3# .2	98.73#
	0.70	425#80	100#20	0.24#0.06	0.23#0.05	23#2	37#5	0.84#0.10	3.8# -	99.63#
3.0	0.20	137#13	31#3	0.22#0.03	0.80#0.10	24.6#0.8	1.27#0.06	0.0313#0.0005	3.8# .3	99.56#
	0.25	135#45	20#10	0.15#0.09	1.2#0.6	25#2	3.1#0.4	0.078#0.009	3.2# 1.0	99.76#
	0.30	151#34	25#5	0.17#0.05	1.1#0.2	28.2#0.8	4.8#0.4	0.136#0.010	2.5# .1	99.85#
	0.34	160#20	30#10	0.19#0.07	0.9#0.3	26.4#1.5	5.9#0.5	0.154#0.006	3.2# 1.2	99.74#
	0.35	205#35	28#7	0.13#0.04	1.2#0.3	31.8#1.3	7.3#0.8	0.23#0.02	2.4# .2	99.83#
	0.40	250#100	28#12	0.11#0.07	1.0#0.5	28#2	15.5#1.3	0.43#0.02	2.0# .4	99.87#
	0.44	205#35	35#15	0.17#0.08	0.7#0.3	23.0#0.8	14#2	0.31#0.04	3.1# .3	99.84#
	0.45	250#50	33#13	0.13#0.06	0.8#0.3	27.9#1.3	14.2#1.1	0.39#0.02	5.4# .5	99.34#
	0.50	280#100	35#15	0.13#0.07	0.8#0.3	26.6#0.4	12.7#0.6	0.34#0.02	3.3# .8	99.73#
	0.55	BUMPS				33#3	12#2	0.42#0.05	5.2# 2.0	98.89#
	0.575	BUMPS				32#3	14#2	0.44#0.05	2.6# -	99.72#
4.0	0.20	150#20	27#5	0.18#0.04	1.0#0.2	26.1#1.2	0.52#0.03	0.0135#0.0010	3.0# 1.2	99.61#
	0.25	150#50	33#8	0.22#0.09	1.0#0.2	33#3	1.2#0.2	0.041#0.005	4.1# .2	99.47#
	0.30	194#40	36#11	0.19#0.07	1.0#0.3	34.3#1.2	2.5#0.2	0.085#0.005	2.6# .3	99.78#
	0.35	210#37	36#14	0.17#0.07	0.9#0.3	30.6#1.4	5.3#0.3	0.157#0.004	3.3# .3	99.66#
	0.40	265#97	36#14	0.14#0.08	0.8#0.3	29#2	8.3#0.6	0.2353#0.0005	2.3# .1	99.85#
	0.45	267#65	45#15	0.17#0.07	0.6#0.2	27.7#0.5	11.5#0.6	0.317#0.007	3.7# .4	99.73#
	0.48	315#135	33#18	0.10#0.07	0.9#0.5	28#3	16#2	0.46#0.05	3.5# .2	99.60#
5.0	0.2125	140#10	30#10	0.21#0.07	0.9#0.3	26#3	0.38#0.05	0.0098#0.0012	2.2# .6	99.85#
	0.225	130#20	25#5	0.19#0.05	0.9#0.2	22#2	0.44#0.06	0.0099#0.0012	2.9# 1.6	99.60#
	0.25	160#20	30#10	0.19#0.07	1.0#0.3	30#3	0.57#0.08	0.017#0.002	.3# .5	99.99#
	0.275	188#21	33#13	0.18#0.07	1.1#0.4	37#3	0.97#0.11	0.036#0.005	2.7# 1.2	99.33#
	0.2875	211#41	36#13	0.17#0.07	1.3#0.5	45#2	0.89#0.06	0.038#0.002	4.3# .5	99.34#
	0.30	280#50	45#15	0.16#0.06	1.0#0.3	43#4	1.4#0.2	0.058#0.007	1.4# 1.1	99.77#
	0.325	184#36	31#14	0.17#0.08	1.4#0.6	42.3#1.5	1.49#0.08	0.063#0.004	3.4# .7	99.14#
	0.20	190#20	25#3	0.13#0.02	0.82#0.08	20#2	0.25#0.03	0.0051#0.0006	2.1# 2.0	99.96#
0.225	148#37	20#5	0.14#0.05	1.6#0.4	32#3	0.22#0.03	0.0069#0.0008	2.4# 1.4	99.83#	
0.25	238#32	33#8	0.14#0.04	1.4#0.3	46#5	0.30#0.04	0.014#0.002	2.3# .8	99.82#	
0.289	220#40	35#10	0.16#0.05	1.1#0.3	38#4	0.65#0.09	0.024#0.003	4.3# 1.0	99.59#	

*) FROM TIME SERIES

Tabel 1e: Totaaloverzicht meetresultaten.

2a:

code	T (s)	U_0 (m/s)	N
D1040	1,0	0,40	15 (12)
D2030	2,0	0,30	19 (15)
D4035	4,0	0,35	15 (12)
D6029	6,0	0,2875	30 (26)

2b:

code	$\Delta\eta/\eta$ (%)		$\Delta\lambda/\lambda$ (%)		$\Delta(\eta/\lambda)/(\eta/\lambda)$ (%)	
	ind.	kar.	ind.	kar.	ind.	kar.
D1040	10,1	3,0	7,6	2,1	12,7	6,7
D2030	14,1	9,6	10,1	9,3	17,7	9,5
D4035	38,0	12,8	17,1	11,4	42,3	17,6
D6029	35,7	20,4	19,3	15,6	41,0	17,6

2c:

code	$\Delta C/C$ (%)	n
D1040	18,5 \pm 1,0	3
D2030	5,3 \pm 0,4	5
D4035	3,3 \pm 0,3	4
D6029	4,3 \pm 0,5	6

2d:

code	$(\Delta r_c/r_c)_{fit}$ (%)	$(\Delta r_c/r_c)_{kar}$ (%)	$(\Delta r_c/r_c)_{bed}$ (%)
D1040	11,6	2,3	-
D2030	3,2	10,3	9,7
D4035	4,6	15,1	14,4
D6029	3,9	23,3	23,0

2e:

code	$(\Delta C_0/C_0)_{fit}$ (%)	$(\Delta C_0/C_0)_{kar}$ (%)	$(\Delta C_0/C_0)_{rest}$ (%)
D1040	42,1	19,0	-
D2030	7,3	11,7	9,2
D4035	7,6	17,3	15,6
D6029	6,0	36,9	36,5

2f:

code	$(\Delta L_s/L_s)_{fit}$ (%)	$(\Delta L_s/L_s)_{kar}$ (%)	$(\Delta L_s/L_s)_{rest}$ (%)
D1040	31,1	17,7	-
D2030	4,4	12,3	11,5
D4035	3,3	7,5	6,7
D6029	2,6	21,8	21,7

Verklaring: N aantal onafhankelijke metingen,
n aantal punten in de bodemlaag.

Tabel 2: Overzicht spreidingsresultaten duurmetingen.

	r_c/η	r_c	C_0	L_s	$\Delta C/C$	R^2	T (s)	U_0 (m/s)	N
r_c/η	X	89 77 60 46	-40 -48 -82 -48	-30 20 -74 -33	24 -44 33 -44	-38 24 -70 17	1,0 2,0 4,0 6,0	0,40 0,30 0,35 0,29	12 15 12 26
r_c	++	X	-52 -34 -90 -77	-42 52 -40 -16	31 -42 -26 -30	-47 10 -18 -14			
C_0	-	-	X	99 63 76 71	-23 55 12 32	30 -48 31 1			
L_s	o	o	++	X	-20 14 -19 18	25 -34 42 -8			
$\Delta C/C$	o	o	o	o	X	-98 -94 -86 -84			
R^2	o	o	o	o	++	X			

3a: Rechtsboven ; Correlaties duurmetingen in %.

3b: Linksonder ; Snelheids- en periodeonafhankelijke correlatieresultaten, waarin:

- ++ sterk positief,
- + positief,
- o onbepaald,
- negatief,
- sterk negatief.

Tabel 3: Overzicht correlatieresultaten.

T (s)	I : $M \cdot u_0^m$			II : $M \cdot (u_0 - u_c)^m$			III: $M \cdot (u_0 - u_c^*)^2$		
	m	lnM	R ²	m	lnM	R ²	u_c^*	lnM	R ²
1.0	3.4	7.6	99.3	2.3	7.3	98.8	0.122	7.2	98.7
1.5	3.5	7.3	99.5	2.15	7.0	98.9	0.105	6.6	98.4
2.0	3.1	6.15	98.7	1.4	5.1	97.8	0.083	5.5	99.2
3.0	3.25	5.5	98.4	1.5	4.3	98.2	0.108	5.0	97.4
4.0	3.9	5.7	99.7	1.55	4.1	96.4	0.160	5.0	98.7
6.0	3.45	4.35	95.5	1.2	2.85	93.5	0.130	3.7	90
7.0	3.5	3.8	92						

Verklaring: R² percentage verklaarde variatie,
 u_c grens van beweging volgens Vgl. 5.37,

Tabel 4a: Fitresultaten bodemconcentratie; resultaten per verband.

T (s)	m	lnM	R ² (%)	nr's
1.0	3.45 ± 0.12	7.77 ± 0.17	98.8	1 - 9
1.5	3.52 ± 0.04	7.37 ± 0.07	99.1	1 - 9
2.0	3.32 ± 0.27	6.54 ± 0.48	99.0	1 - 5
3.0	3.39 ± 0.18	5.74 ± 0.28	98.8	1 - 5
4.0	3.95 ± 0.16	5.67 ± 0.11	99.7	1 - 5
6.0	3.40 ± 0.09	4.26 ± 0.13	95.5	1 - 6
7.0	3.4 ± 0.5	3.6 ± 0.7	95	1 - 4
Tot.	3.5 ± 0.1	8.0 - 2 lnT	98.0	

Verklaring: m, M parameters in het verband $C_0 = M u_0^m$,
nr volgnummer van de in de fit meegenomen
punten (Tab. 1c).

Tabel 4b: Fitresultaten bodemconcentratie; resultaten verband I.

T (s)	I : $N \cdot u_o^n$			II : $N \cdot (u_o - u_c)^n$			III : $N \cdot (u_o - u_c^*)^2$		
	n	lnN	R ²	n	lnN	R ²	u_c^*	lnN	R ²
1.0	3.3	2.7	98.1	2.35	2.56	98.7	0.122	2.32	97.8
1.5	3.7	3.1	98.4	2.15	2.40	98.7	0.115	2.26	97.9
2.0	3.6	2.6	98.4	1.76	1.47	99.4	0.108	1.70	99.7
3.0	3.7	2.5	99.6	1.73	1.31	98.4	0.12	1.57	98.9
4.0	4.0	2.3	99.5	1.75	1.05	99.1	0.14	1.29	99.6
6.0	5.0	3.0	96.5	1.5	0.11	94.4	0.15	0.80	95.7
7.0	4.4	1.8	98.0	0.9	-1.8	92.3	0.13	-0.1	97.0

Verklaring: zie Tab. 4a.

Tabel 5: Fitresultaten total load.

T (s)	u_c (m/s)	u_i (m/s)
1.0	0.100	0.175
1.5	0.105	0.187
2.0	0.120	0.205
3.0	0.138	0.210
4.0	0.158	0.219
6.0	0.175	0.255
7.0	0.175	0.275

Verklaring: u_c gemeten waarde grens van beweging,
 u_i gemeten waarde begin van beweging.

Tabel 6: Resultaten kritieke snelheden.

nr	\bar{z} (mm)	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	D_{90} (mm)
1 *	20.8	0.142	0.180	0.255
2 *	30.8	0.137	0.163	0.231
3 *	40.8	0.130	0.164	0.207
4	50.8	0.127	0.161	0.202
5	60.8	0.120	0.161	0.186
6	75.8	0.116	0.153	0.183
7	90.8	0.106	0.148	0.180
8	110.8	0.088	0.141	0.173
9	130.8	0.083	0.133	0.168
10	150.8	0.081	0.126	0.161

Tabel 7a: Zeefresultaten (D1040; T= 1s, $U_0 = 0,40$ m/s).

nr	\bar{z} (mm)	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	D_{90} (mm)
1 *	30.0	0.149	0.201	0.300
2 *	40.0	0.143	0.193	0.286
3 *	50.0	0.144	0.193	0.288
4 *	60.0	0.138	0.182	0.267
5 *	70.0	0.137	0.179	0.258
6	85.0	0.130	0.172	0.241
7	100.0	0.126	0.168	0.230
8	120.0	0.121	0.162	0.219
9	140.0	0.118	0.159	0.203
10	160.0	0.116	0.156	0.200

nr	\bar{z} (mm)	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	D_{90} (mm)
1 *	30.0	0.139	0.187	0.280
2 *	40.0	0.138	0.186	0.270
3 *	50.0	0.138	0.181	0.260
4 *	60.0	0.136	0.179	0.258
5 *	70.0	0.130	0.175	0.246
6 *	85.0	0.130	0.171	0.240
7	100.0	0.128	0.169	0.231
8	120.0	0.123	0.165	0.222
9	140.0	0.121	0.162	0.217
10	160.0	0.120	0.161	0.211

Verklaring: nr volgnummer van het afzuigpunt,
 \bar{z} gemiddelde hoogte van het afzuigpunt,
 * afzuigpunt behoort tot de bodemlaag.

Tabel 7a: Zeefresultaten (vervolg).

(Resp. D4035; T= 4s, $U_0 = 0,35$ m/s en D6029; T= 6s,
 $U_0 = 0,2875$ m/s)

nr	\bar{D} (mm)	w (m/s)	D4035		D6029	
			r_c (mm)	p_{rn} (%)	r_c (mm)	p_{rn} (%)
1	0.385	0.057	14.5	2.8	18.0	1.3
2	0.325	0.048	17.0	6.9	24.5	3.6
3	0.256	0.036	24	33.6	33	27.3
4	0.196	0.024	30	22.9	44	22.8
5	0.165	0.0185	38	22.7	61	27.6
6	0.138	0.0135	50	8.0	70	12.5
7	0.116	0.0095	65	1.8	78	3.1

Verklaring: nr volgnummer van de korrelfractie,
 r_c afnamelengte volgens Fig. 52,
 p_{rn} % van de fractie op niveau $z = z_r$.

Tabel 7b: Afhankelijkheid afnamelengte.

APPENDICES

Appendix I: Transportverdelingsafschatting:

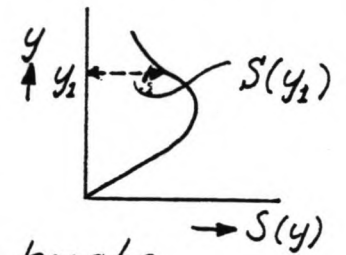
Ga uit van het verband: $S_1(z) = C(z) \cdot u(z) \cdot z$
 $= C_0 \cdot \exp(-z/r_c) \cdot u^*/K \cdot \ln(z/z_0)^{1/3}$

Stel: $r_c = \alpha \cdot r$,
 $z_0 = r/33$,

zodat: $S_1(z) = \underbrace{C_0 \cdot u^*/K}_{\text{constant}} \cdot \exp(-\frac{z}{r \cdot \alpha}) \cdot \ln(33 \cdot z/r)^{1/3}$

Voor de afschatting van de verdeling van het transport over de verticaal, is het gebruik van onderstaand verband voldoende:

$S_\alpha(y) = \exp(-y/\alpha) \cdot \ln(33 \cdot y)$,
 met: $y = z/r$ en $\alpha = r_c/r$.



De waarde y staat voor een dimensieloze hoogte (~ aantal ribbelhoogten) en α geeft de verhouding tussen de afnamelengte (r_c) en de bedruwheid (r). Een grotere waarde voor α staat dus voor een "steiler" concentratieverloop.

Nader bekijken van $S_\alpha(y)$ levert:

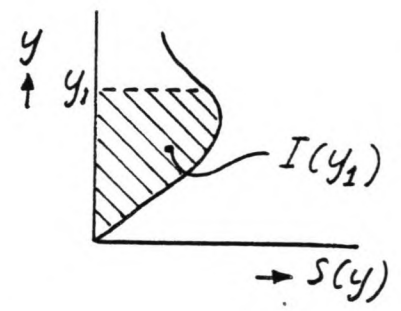
- nulpunten : $S_\alpha(y) = 0 \rightarrow \ln(33 \cdot y) = 0 \Rightarrow y = y_0 = 1/33$,
 $\exp(-y/\alpha) = 0 \Rightarrow y \rightarrow +\infty$,
- maximum : $dS_\alpha(y)/dy = 0 \rightarrow y \cdot \ln(33y) = \alpha \rightarrow y^*$,
 zodat: $S_\alpha(y)_{\max} = \frac{\alpha}{y^*} \cdot \exp(-y^*/\alpha)$.

Fig. 2 geeft $S_\alpha(y)$ als functie van y voor verschillende waarden van α . Bij lage waarden van α ($\alpha \approx O(1)$) lijkt het transport zich voornamelijk te concentreren in de onderste regionen ($y \lesssim 4$).

Een echt goed beeld van de verdeling van het transport over de hoogte wordt pas verkregen door integratie over de y -waarden volgens:

$$I_{\alpha}(y) = \int_{y_0}^y S_{\alpha}(y) \cdot dy,$$

met: $y_0 = 1/33.$



De berekening van $I_{\alpha}(y)$:

$$\begin{aligned}
 I_{\alpha}(y) &= \int_{y_0}^y S_{\alpha}(y) \cdot dy = \int_{y_0}^y \exp(-y/\alpha) \cdot \ln(33 \cdot y) \cdot dy = \\
 &= \frac{1}{\alpha} \cdot \int_{y_0}^y \ln(33y) \cdot d(\exp(-y/\alpha)) = \\
 &= -\alpha \cdot \exp(-y/\alpha) \cdot \ln(33y) \Big|_{y_0}^y + \int_{y_0}^y \alpha/y \cdot \exp(-y/\alpha) \cdot dy = \\
 &= -\alpha \cdot S_{\alpha}(y) + \int_{y_0}^y (\alpha/\alpha)^{-1} \cdot \exp(-y/\alpha) \cdot dy.
 \end{aligned}$$

De integraal is onbepaald en moet derhalve worden benaderd.
 Stel:

$$x = y/\alpha, \text{ zodat: } dy = \alpha \cdot dx.$$

Substitutie levert:

$$\begin{aligned}
 \int_{y_0/\alpha}^{y/\alpha} \frac{1}{x} \cdot \exp(-x) \cdot \alpha \cdot dx &= \alpha \int_{y_0/\alpha}^{y/\alpha} \frac{1}{x} \cdot \exp(-x) dx = \\
 &= \alpha \cdot \left\{ \int_{y_0/\alpha}^{\infty} \frac{1}{x} \cdot \exp(-x) dx - \int_{y/\alpha}^{\infty} \frac{1}{x} \cdot \exp(-x) dx \right\} = \\
 &= \alpha \cdot \{ E(y_0/\alpha) - E(y/\alpha) \},
 \end{aligned}$$

zodat:

$$\begin{aligned}
 \frac{I_{\alpha}(y)}{\alpha} &= E(y_0/\alpha) - E(y/\alpha) - S_{\alpha}(y), \\
 \text{met: } E(x) &= \int_x^{\infty} \frac{1}{x} \cdot \exp(-x) dx.
 \end{aligned}$$

De waarde van de integraal $I_{\alpha}(y)$ komt voort uit drie termen, waarvan de laatste te vinden is in de al genoemde Fig. 2. De eerste twee termen moeten benaderd worden.

De benadering van $E(x)$ kan opgesplitst worden in twee soorten, te weten:

- benadering 1 : $E_1(x)$ voor: $0 < x \leq 1,$
- benadering 2 : $E_2(x)$ voor: $x \geq 1.$

Volgens handboek Math. Functions :

Polynomial and Rational Approximations

5.1.53

$$0 \leq x \leq 1$$

$$E_1(x) + \ln x = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + \epsilon(x)$$

$$|\epsilon(x)| < 2 \times 10^{-7}$$

$a_0 = -.57721\ 566$

$a_3 = .05519\ 968$

$a_1 = .99999\ 193$

$a_4 = -.00976\ 004$

$a_2 = -.24991\ 055$

$a_5 = .00107\ 857$

5.1.54

$$1 \leq x < \infty$$

$$xe^x E_2(x) = \frac{x^2 + a_1x + a_2}{x^2 + b_1x + b_2} + \epsilon(x)$$

$$|\epsilon(x)| < 5 \times 10^{-8}$$

$a_1 = 2.334733$

$b_1 = 3.330657$

$a_2 = .250621$

$b_2 = 1.681534$

De bijdrage van $E(y_0/\alpha)$ wordt:

$$y_0 = 1/33, \text{ zodat } y_0/\alpha < 1, \text{ dus voor } \alpha > 1/33 : E_1(x).$$

Fig. 3a geeft $E(y_0/\alpha)$ als functie van α . Enkele waarden zijn in tabelvorm:

α	$E(y_0/\alpha)$
0,5	2,286
1	2,949
2	3,628
5	4,535
10	5,225

De bijdrage van $E(y/\alpha)$ wordt:

$$\begin{aligned} \text{m.b.v. benadering } E_1(x) \text{ voor: } & 0 < y/\alpha \leq 1 \rightarrow y \leq \alpha, \\ \text{en benadering } E_2(x) \text{ voor: } & y/\alpha \geq 1 \rightarrow y \geq \alpha. \end{aligned}$$

Fig. 3b geeft $E(y/\alpha)$ als functie van y/α , voor $y/\alpha \rightarrow \infty$ ($y \gg \alpha$) wordt deze bijdrage nul.

Gebruikmakend van het verband voor $I_\alpha(y)/\alpha$ (zie pag. I-2), volgt op eenvoudige wijze Fig. 4 waarin $I_\alpha(y)/\alpha$ als functie van y . Blijkbaar zegt de eerste bijdrage ($E(y_0/\alpha)$) iets over het totale oppervlak onder de S-curve.

Bij een kleine waarde van α wordt de limietwaarde van de integraal al snel bereikt, m.a.w. het transport speelt zich dan voor het overgrote deel af in de onderste regio's.

Een kwantitatief beeld van de transportverdeling wordt gekregen door de verhouding tussen het transport onder een specifiek niveau y en het totaaltransport te bekijken.

Het totaaltransport is:

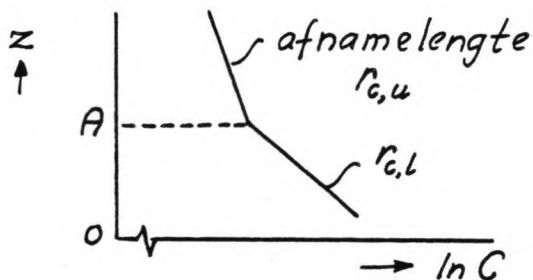
$$I_{\alpha}(y \rightarrow \infty) = I_{\alpha}(\infty) = \alpha \cdot E(y_0/\alpha),$$

zodat:

$$\% \text{ v.h. transport onder het niveau } y = \frac{I_{\alpha}(y)}{I_{\alpha}(\infty)} = \frac{I_{\alpha}(y)/\alpha}{E(y_0/\alpha)}.$$

Fig. 5a geeft dit verband voor diverse waarden van α . Voor $\alpha = \mathcal{O}(1)$ ziet men de beperking van het transport tot een laag van slechts enkele ribbelhoogten dik!

Tot nu toe werd er bij de afschatting uitgegaan van een enkelvoudig exponentieel model voor de concentratieverdeling. Een beter model wordt gegeven door een tweelagen systeem waarbij op een bepaalde hoogte ($z = A = \beta \cdot r$) het exponentieel model van de onderlaag overgaat in het exponentieel model van de bovenlaag.

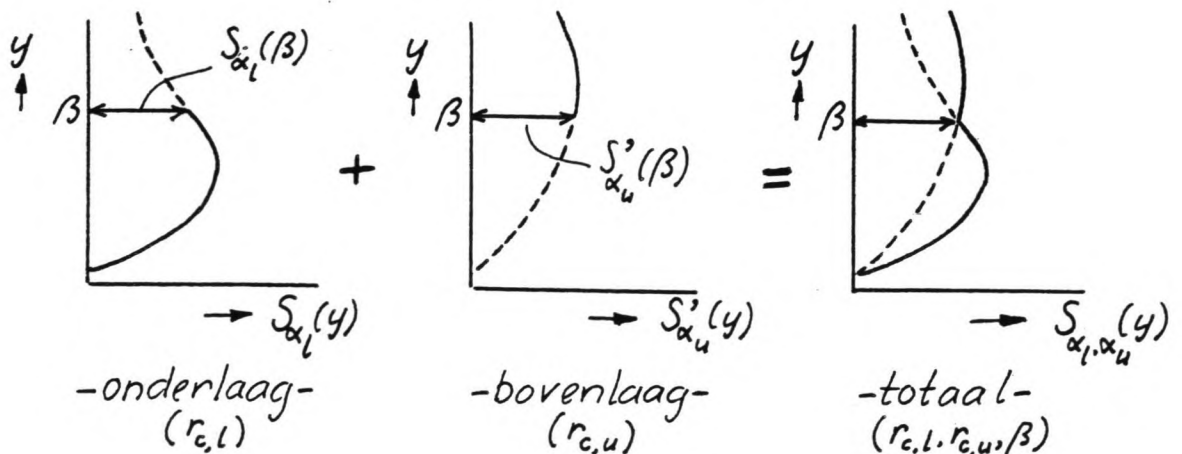


$$\text{spronghoogte: } y = \frac{z}{r} = \beta.$$

$$\text{bovenlaag (upper): } \alpha_u = \frac{r_{c,u}}{r}.$$

$$\text{onderlaag (lower): } \alpha_l = \frac{r_{c,l}}{r}.$$

Het tweelagenmodel is dus samengesteld uit twee eenlaagsmodellen, z.d.d. ter plaatse van de sprong ($y = \beta$) geldt dat de concentraties en dus ook de transporten gelijk zijn.



Ter plaatse van de overgang moet gelden :

$$S_l(\beta) = S_u(\beta).$$

Stel dus:

$$S_{\alpha_l}(\beta) = S_{\alpha_u}(\beta) = B \cdot S_{\alpha_u}(\beta),$$

waarin: B een factor, toegevoegd aan de bovenlaag
z.d.d. $S_l(\beta) = S_u(\beta)$,

$$\text{met: } B = \frac{S_{\alpha_l}(\beta)}{S_{\alpha_u}(\beta)} = \frac{\exp(-\beta/\alpha_l)}{\exp(-\beta/\alpha_u)} = \exp\left[\beta\left(\frac{1}{\alpha_u} - \frac{1}{\alpha_l}\right)\right].$$

De transporten in de bovenlaag (en dus ook het oppervlak) moeten met de factor B vermenigvuldigd worden om het transport in het tweelagen model te krijgen.

Ook voor het tweelagenmodel kan weer gebruik gemaakt worden van Fig. 4 en wel op de volgende wijze:

$$\begin{array}{l} \text{opp. tweelagenmodel} \\ \text{(totaal)} \end{array} = \begin{array}{l} \text{opp. onderlaag} \\ (r_{cl}) \text{ voor} \\ y \leq \beta \end{array} + \begin{array}{l} \text{opp. bovenlaag} \\ (r_{cu}) \text{ voor} \\ y \geq \beta, \end{array}$$

$$\text{dus: } I_{\alpha_l, \alpha_u, \beta}(\infty) = I_{\alpha_l}(\beta) + B \cdot [I_{\alpha_u}(\infty) - I_{\alpha_u}(\beta)],$$

waarin: B volgens relatie boven aan pagina,
 $I_{\alpha}(y)$ op basis van Fig. 4.

De verdeling van het transport over de hoogte volgt nu weer uit de verhoudingen:

$$\begin{array}{l} \% \text{ v.h. transport boven} \\ \text{het niveau } y \text{ (} y \geq \beta \text{)} \end{array} = \frac{B \cdot [I_{\alpha_u}(\infty) - I_{\alpha_u}(y)]}{I_{\alpha_l, \alpha_u, \beta}(\infty)},$$

$$\text{en: } \begin{array}{l} \% \text{ v.h. transport onder} \\ \text{het niveau } y \text{ (} y \leq \beta \text{)} \end{array} = \frac{I_{\alpha_l}(y)}{I_{\alpha_l, \alpha_u, \beta}(\infty)}.$$

Fig. 5b geeft het percentage van het transport onder het niveau y voor diverse waarden van β voor $\alpha_l = 1$ en $\alpha_u = 10$. De sprongniveaulijn geeft het percentage van het transport onder het sprongniveau als functie van de hoogte van dit niveau. Het aandeel van de bodemlaag in het transport t.o.v. het een laag model is kleiner, maar blijft overheersend!

Appendix II : Korrelbewegingen.

II-a: Bewegingsvergelijking.

De beweging van een gesuspendeerd sediment deeltje valt uiteen in een drietal deelbewegingen (Nielsen, 1982):

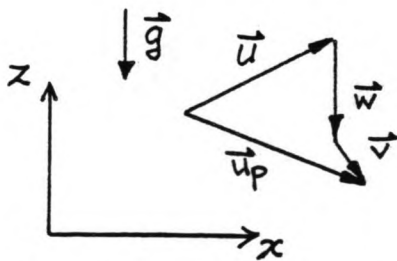
$$\vec{u}_p = \vec{u} + \vec{w} + \vec{v},$$

waarin: $\vec{u}_p(x, z, t)$ de snelheid van de korrel (particle),

$\vec{u}(x, z, t)$ de watersnelheid; snelheid van de waterdeeltjes t.p.v. de korrel,

\vec{w} de valsnelheid van de korrel, in stilstaand water (positief in negatieve z-richting),

$\vec{v}(x, z, t)$ de snelheid a.g.v. de versnellingen van het water.



(\vec{v} is ook te zien als het gevolg van het feit dat de korrel de waterbeweging slechts kan volgen met een zekere fase verschuiving S_t ; $\vec{v} \approx -S_t \cdot d\vec{u}/dt$ met $S_t \ll T$)

Zonder al te veel in te gaan op de achtergronden geldt voor de bewegingsvergelijking:

$$F(\text{op de korrel}) = F(\text{a.g.v. traagheid}) + \\ + F(\text{a.g.v. weerstand}) + \\ + F(\text{a.g.v. gravitatie en opdriving}).$$

Als: V = deeltjes volume,
 A_p = oppervlakte deeltje (projectie-),

dan geldt (in benadering):

$$\rho_s \cdot V \cdot \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \rho \cdot V \cdot \frac{d\vec{u}}{dt} + C_M \cdot \rho \cdot V \cdot \frac{d}{dt} (\vec{u} - \vec{u}_p) + \\ + C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_p \cdot (\vec{u} - \vec{u}_p) \cdot |\vec{u} - \vec{u}_p| + \\ + (\rho_s - \rho) \cdot V \cdot \vec{g},$$

met: C_M = added mass coëfficiënt,
 C_D = drag coëfficiënt.

Uitgaande van een bolvormig deeltje:

$$A_p = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2,$$

$$V = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot D^3,$$

en de relatieve dichtheid $s (= \rho_s/\rho)$ vindt men:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{1}{s} \cdot \frac{d\vec{u}}{dt} + C_M \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{d}{dt} (\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{3 \cdot C_D'}{4 \cdot s \cdot D} (\vec{u} - \vec{u}_p) |\vec{u} - \vec{u}_p| + \left(\frac{s-1}{s}\right) \cdot \vec{g},$$

alles uitgedrukt in kracht per massa (= versnelling).

De dragcoëfficiënt is hierbij de momentane waarde:

$$C_D' = F(Re'), \quad \text{met} \quad Re' = \frac{|\vec{u} - \vec{u}_p| \cdot D}{\nu} = \frac{|\vec{w} + \vec{v}| \cdot D}{\nu}.$$

Normaal geldt voor de dragcoëfficiënt (stationair):

$$C_D = F(Re), \quad \text{met} \quad Re = \frac{w \cdot D}{\nu}.$$

De verhouding C_D'/C_D is afhankelijk van het Reynoldsgetal.

In het Stokes gebied ($Re \leq 1$) geldt $C_D = 24/R$,

zodat:

$$C_D'/C_D = \frac{|\vec{w}|}{|\vec{w} + \vec{v}|} = \frac{w}{|\vec{w} + \vec{v}|} \quad (Re < 1),$$

en voor het Newtons gebied ($Re > 150$):

$$C_D'/C_D = 1 \quad (C_D \text{ onafh. van } Re).$$

In het overgangsgebied is de verhouding dus afhankelijk van de helling van het verband $C_D = F(Re)$ (zie Fig. 14a).

Als benadering hiervoor is in gebruik:

$$C_D'/C_D = \left(\frac{|\vec{w} + \vec{v}|}{w} \right)^{-\gamma},$$

met: $-\gamma = \frac{d \ln C_D}{d Re} \quad \text{voor} \quad Re = \frac{w \cdot D}{\nu},$

zodat: als Stokes van toepassing ($Re < 1$) $\rightarrow \gamma = +1$,
als C_D onafh. van Re ($Re > 150$) $\rightarrow \gamma = 0$.

Verder omschrijven van de vergelijking levert m.b.v.:

$$(\vec{u} - \vec{u}_p) = (-\vec{w} - \vec{v}) = -1 \cdot (\vec{w} + \vec{v}),$$

$$|\vec{u} - \vec{u}_p| = |\vec{w} + \vec{v}|,$$

$$\text{en } \frac{3 C_D \rho}{4 \cdot s \cdot D} = \frac{s-1}{s} \cdot \frac{g}{w^2} \cdot \left(\frac{|\vec{w} + \vec{v}|}{w} \right)^{-\gamma},$$

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{1}{s} \cdot \frac{d\vec{u}}{dt} + \frac{C_M}{s} \cdot \frac{d}{dt} (-\vec{w} - \vec{v}) - \left(\frac{s-1}{s} \right) \cdot \frac{g}{w^{2-\gamma}} \cdot |\vec{w} + \vec{v}|^{1-\gamma} \cdot (\vec{w} + \vec{v}) + \left(\frac{s-1}{s} \right) \cdot \vec{g}.$$

Met de tijdsafgeleiden:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{d\vec{u}}{dt} + \frac{d\vec{v}}{dt},$$

$$\frac{d}{dt} (-\vec{w} - \vec{v}) = -\frac{d\vec{v}}{dt},$$

wordt tenslotte gevonden:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -1 \cdot \left(\frac{s-1}{s+C_M} \right) \cdot \left\{ \frac{d\vec{u}}{dt} + \frac{g}{w^{2-\gamma}} \cdot |\vec{w} + \vec{v}|^{1-\gamma} \cdot (\vec{w} + \vec{v}) - \vec{g} \right\}.$$

In ons geval geldt als redelijke benadering dat het Reynoldsgetal zo laag is dat geldt: $\gamma \sim 1$.

De verder te onderzoeken vergelijking wordt nu:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\alpha \cdot \left\{ \frac{d\vec{u}}{dt} + \frac{g}{w} \cdot (\vec{w} + \vec{v}) - \vec{g} \right\},$$

met: $\alpha = (s-1)/(s+C_M)$.

De snelheid \vec{v} zit impliciet in deze vergelijking. In Appendix II-b zaler een lineaire afschatting gemaakt worden.

N.B.: Voor een uitgebreidere verhandeling over de bewegingsvergelijking van een korrél onder invloed van een niet-stationaire waterbeweging kan worden verwezen naar de deelstudie.

II-b: Lineaire afschatting.

De af te schatten vergelijking is gegeven op pag. II-a-3, waarin al gesubstitueerd: $\gamma=1$ (~ Stokes gebied)

Voor de diverse factoren in dit verband geldt:

$$\vec{w} = \begin{pmatrix} 0 \\ -w \end{pmatrix}, \quad \vec{g} = \begin{pmatrix} 0 \\ -g \end{pmatrix}, \quad \vec{u} = \begin{pmatrix} u_x \\ u_z \end{pmatrix} \text{ en}$$

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_z \end{pmatrix}.$$

De componenten in de snelheidsvector \vec{v} zijn in benadering (uitschrijven termen t/m 2^e orde:

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_x^{(1)} + v_x^{(2)} + \dots \\ v_z^{(1)} + v_z^{(2)} + \dots \end{pmatrix},$$

zodat geldt:

$$\begin{cases} \frac{dv_x^{(1)}}{dt} + \frac{dv_x^{(2)}}{dt} + \dots = -\alpha \cdot \left\{ \frac{du_x}{dt} + \frac{g}{w} (0 + v_x^{(1)} + v_x^{(2)} + \dots) - 0 \right\}, \\ \frac{dv_z^{(1)}}{dt} + \frac{dv_z^{(2)}}{dt} + \dots = -\alpha \cdot \left\{ \frac{du_z}{dt} + \frac{g}{w} (-w + v_z^{(1)} + v_z^{(2)} + \dots) + g \right\}. \end{cases}$$

In eerste orde benadering wordt dus gevonden:

$$\begin{aligned} \frac{dv_x^{(1)}}{dt} &= -\alpha \cdot \left\{ \frac{du_x}{dt} + \frac{g}{w} \cdot v_x^{(1)} \right\}, \\ \frac{dv_z^{(1)}}{dt} &= -\alpha \cdot \left\{ \frac{du_z}{dt} + \frac{g}{w} \cdot v_z^{(1)} \right\}, \\ \text{waarin: } \alpha &= \frac{s-1}{s+C_M}. \end{aligned}$$

Met behulp van deze vergelijking kan \vec{v} worden afgeschat, waarmee dus inzicht wordt verkregen over het effect van het niet kunnen volgen van de waterbeweging. (zie Appendix III-c).

De vergelijking toont wel dat dit effect sterk afhankelijk van de relatieve dichtheid. Voor lichte deeltjes (\approx waterdeeltjes met $s \approx 1$) bestaat \vec{v} niet, de coëfficiënt α is dan nul!

Appendix III: Korrelbeweging in wervel.

III-a: Standaardwervel.

Voor de waterbeweging in een standaardwervel geldt:

$$\vec{u}(\vec{r}, t) = \Omega \cdot \vec{r} \cdot \begin{pmatrix} -\sin \Omega t \\ \cos \Omega t \end{pmatrix},$$

waarin: Ω de fasesnelheid,
 \vec{r} een plaatsvector.

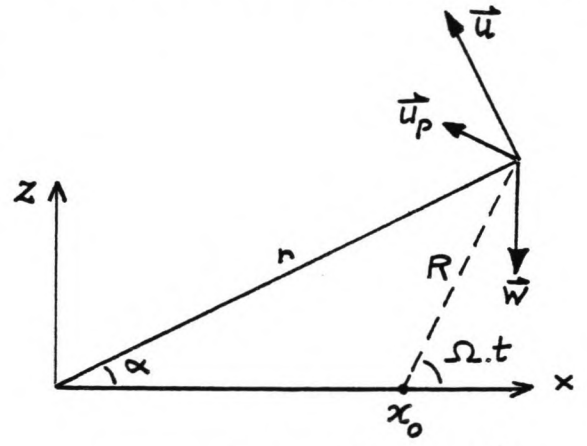
De plaats van een korreltje in zo'n wervel wordt gegeven door:

$$\begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix} + R \cdot \begin{pmatrix} \cos \Omega t \\ \sin \Omega t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix} + \vec{R},$$

waarin: $x_0 = w/\Omega$ = het middelpunt van de cirkelvormige korrelbeweging; x -waarde,
 \vec{R} = een (constante) waarde voor de plaatsvector

Fig. 15a geeft enkele korrelbanen (verschillende R -waarden) voor een enkele korrelafmeting (vaste D).

De geldigheid van dit verband is te verifiëren aan de hand van de hiernaast gegeven figuur.



Er geldt:

$$\vec{u}_p = \Omega \cdot R \cdot \begin{pmatrix} -\sin \Omega t \\ \cos \Omega t \end{pmatrix},$$

en $\vec{u} = \Omega \cdot r \cdot \begin{pmatrix} -\sin \alpha \\ \cos \alpha \end{pmatrix},$

met: $\sin \alpha = \frac{R \cdot \sin \Omega t}{r}, \quad \cos \alpha = \frac{x_0 + R \cdot \cos \Omega t}{r}$

en er moet gelden: $\vec{u}_p = \vec{u} + \vec{w}.$

Uitgeschreven levert dit:

$$u_{px} = u_x + 0 = \Omega \cdot r \cdot -\sin \alpha = \Omega R \cdot -\sin \Omega t,$$

$$u_{pz} = u_z - w = \Omega \cdot r \cdot \cos \alpha - w = \Omega \cdot \left(\frac{w}{\Omega} + R \cdot \cos \Omega t \right) - w = \Omega \cdot R \cdot \cos \Omega t.$$

Het gegeven verband is dus juist.

III-b: Rankine-wervel.

Voor de waterbeweging in een Rankine-wervel geldt:

$$\vec{u}(\vec{r}, t) = \frac{\Omega \cdot R}{1 + (x/R)^2 + (z/R)^2} \cdot \begin{pmatrix} -\sin \Omega t \\ \cos \Omega t \end{pmatrix}$$

Fig. 15b geeft de beweging van enkele korrels (vaste D) in deze wervel. Jets duidelijker wordt dit bij berekening van enkele specifieke punten in dit snelheidsveld.

Uitgaande van:

$$\vec{u}_p = 0 \rightarrow \vec{u} + \vec{w} = \vec{0},$$

is er geen horizontale deeltjesbeweging voor:

$$u_{px} = u_x = 0, \text{ dus:}$$

$$\frac{\Omega \cdot R}{1 + (x/R)^2 + (z/R)^2} \cdot (-z/R) = 0 \rightarrow z = 0.$$

Er is dus geen horizontale beweging van korrels mogelijk op de x-as.

Voor de verticale component u_{pz} geldt op analoge wijze:

$$u_{pz} = u_z - w = 0, \text{ dus:}$$

$$\frac{\Omega \cdot R}{1 + (x/R)^2 + (z/R)^2} \cdot (x/R) = w.$$

Omwerken van deze relatie levert:

$$(x/R)^2 - \frac{\Omega}{w} \cdot x + (z/R)^2 = -1, \text{ ofwel:}$$

$$\left(\frac{x}{R} - \frac{\Omega R}{2 \cdot w} \right)^2 + \left(\frac{z}{R} \right)^2 = \left(\frac{\Omega \cdot R}{2 \cdot w} \right)^2 - 1,$$

hetgeen de vergelijking van een cirkel is.

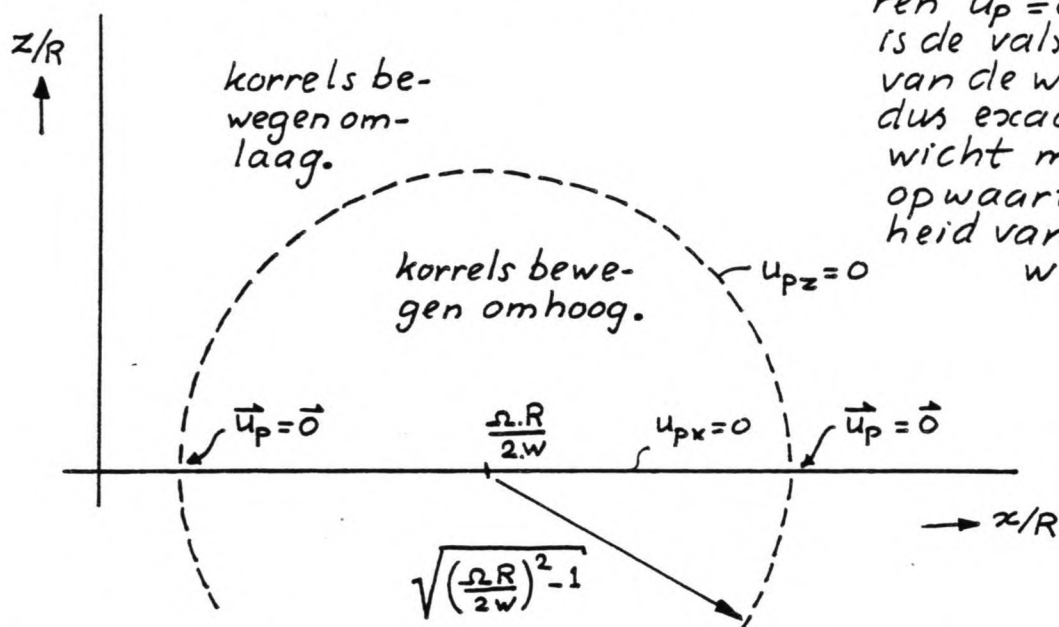
Het middelpunt van de cirkel is gelegen op:

$$\left(\frac{\Omega \cdot R}{2 \cdot w}, 0 \right)$$

en de straal ervan is:

$$\sqrt{\left(\frac{\Omega \cdot R}{2 \cdot w} \right)^2 - 1}.$$

Op de cirkel geldt dus dat de opwaartse/neerwaartse snelheden nul zijn. De snijpunten met de x-as leveren $\vec{u}_p = \vec{0}$ op; hier is de valsnelheid van de wervel dus exact in evenwicht met de opwaartse snelheid van de wervel.



Ook is af te leiden dat binnen de cirkel de korrels omhoog bewegen en daarbuiten omlaag.

Fig. 15b geeft enkele korrelbanen voor het geval dat:

$$\frac{\Omega \cdot R}{w} = 4,$$

zodat het middelpunt de coördinaten $(2, 0)$ heeft en de beide snijpunten $(2 \pm \sqrt{3}, 0)$.

Enkele korrelbanen (in het midden) zijn gesloten, dat wil zeggen dat korrels, eenmaal in een dergelijke baan, in de wervel opgenomen blijven.

Een voorwaarde hiervoor is natuurlijk wel dat de opwaartse snelheden in de wervel de valsnelheid overtreffen. Er moet gelden:

$$u_{z, \max} > w \rightarrow \frac{\Omega \cdot R}{2} > w, \text{ zodat } \frac{\Omega \cdot R}{w} > 2.$$

Uit de figuur volgt het zelfde resultaat; de straal moet een reële waarde hebben, ofwel:

$$\sqrt{\left(\frac{\Omega R}{2w}\right)^2 - 1} > 0 \rightarrow \frac{\Omega R}{2w} > 1, \text{ zodat } \frac{\Omega \cdot R}{w} > 2.$$

Een criterium voor de hoeveelheid gevangen zand zou het oppervlak van de cirkel kunnen zijn:

$$\text{opp.} \approx 2 \cdot \pi \cdot \left[\left(\frac{\Omega R}{2w}\right)^2 - 1 \right] \sim \left(\frac{\Omega R}{w}\right)^2.$$

III-c: Invloed traagheid.

Voor de waterbeweging in een standaardwervel geldt (Appendix III-a):

$$\vec{u}(\vec{r}, t) = \Omega \cdot R \cdot \begin{pmatrix} -\sin \Omega t \\ \cos \Omega t \end{pmatrix},$$

en voor de korrelbeweging moet gelden (App. II-a):

$$\vec{u}_p = \vec{u} + \vec{w} + \vec{v}.$$

De laatste term volgt uit de eerste orde benadering (App. II-b) en de gegeven waterbeweging volgens:

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = -\alpha \cdot \left\{ \frac{du_x}{dt} + \frac{g}{w} \cdot v_x \right\}, \\ \frac{dv_z}{dt} = -\alpha \cdot \left\{ \frac{du_z}{dt} + \frac{g}{w} \cdot v_z \right\}, \end{cases} \text{ met } \alpha = \frac{(\beta-1)}{(\beta+C_M)}.$$

Substitutie van de waterbeweging levert:

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = +\alpha \cdot \Omega^2 \cdot R \cdot \cos \Omega t - \frac{\alpha \cdot g}{w} \cdot v_x, \\ \frac{dv_z}{dt} = +\alpha \cdot \Omega^2 \cdot R \cdot \sin \Omega t - \frac{\alpha \cdot g}{w} \cdot v_z. \end{cases}$$

Hieruit kan \vec{v} berekend worden, stel daartoe:

$$\begin{aligned} v_x &= A_v \cdot \cos(\Omega t - \varphi) = \\ &= A_v \cdot \cos \Omega t \cdot \cos \varphi + A_v \cdot \sin \Omega t \cdot \sin \varphi, \end{aligned}$$

met: A_v en φ nader te bepalen constanten.

Substitutie levert:

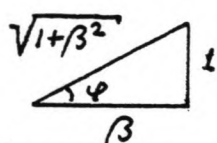
$$\begin{aligned} -A_v \cdot \cos \varphi \cdot \Omega \cdot \sin \Omega t + A_v \cdot \sin \varphi \cdot \Omega \cdot \cos \Omega t &= +\alpha \cdot \Omega^2 \cdot R \cdot \\ \cdot \cos \Omega t - \frac{\alpha \cdot g}{w} \cdot A_v \cdot \cos \varphi \cdot \cos \Omega t - \frac{\alpha \cdot g}{w} \cdot A_v \cdot \sin \varphi \cdot \sin \Omega t. \end{aligned}$$

Voorwaarden:

$$-A_v \cdot \Omega \cdot \cos \varphi = -\frac{\alpha \cdot g}{w} \cdot A_v \cdot \sin \varphi \rightarrow \tan \varphi = \frac{+\Omega \cdot w}{\alpha \cdot g},$$

$$\begin{aligned} A_v \cdot \Omega \cdot \sin \varphi &= \alpha \cdot \Omega^2 \cdot R - \frac{\alpha \cdot g}{w} \cdot A_v \cdot \cos \varphi \\ \rightarrow A_v &= \frac{\alpha \cdot \Omega^2 \cdot R}{\Omega \cdot \sin \varphi + \frac{\alpha \cdot g}{w} \cdot \cos \varphi}. \end{aligned}$$

Stel: $\beta = \frac{\alpha \cdot g}{w \cdot \Omega}$, zodat:



$$\tan \varphi = 1/\beta, \quad \sin \varphi = (1 + \beta^2)^{-1/2}$$

$$\text{en } \cos \varphi = \beta \cdot (1 + \beta^2)^{-1/2}.$$

Herschrijven levert:

$$A_v = \frac{\alpha \cdot \Omega^2 \cdot R \cdot \sqrt{1 + \beta^2}}{\Omega + \frac{\alpha \cdot g \cdot \beta}{w}} = \frac{\alpha \cdot \Omega \cdot R}{\sqrt{1 + \beta^2}},$$

zodat:

$$v_x = \frac{\alpha \cdot \Omega \cdot R}{\sqrt{1 + \beta^2}} \cdot \cos(\Omega t - \arctan 1/\beta).$$

Op analoge wijze is af te leiden:

$$v_z = \frac{\alpha \cdot \Omega \cdot R}{\sqrt{1 + \beta^2}} \cdot \sin(\Omega t - \arctan 1/\beta).$$

Aangezien altijd geldt $\beta \gg 1$, blijft als goede benadering:

$$\vec{v} = \frac{\alpha \cdot \Omega \cdot R}{\beta} \cdot \begin{pmatrix} \cos \Omega t \\ \sin \Omega t \end{pmatrix} = \frac{\Omega^2 \cdot w \cdot R}{g} \cdot \begin{pmatrix} \cos \Omega t \\ \sin \Omega t \end{pmatrix},$$

waarbij de snelheidsvector \vec{v} in het verlengde van de plaatsvector \vec{R} ligt. Het is derhalve ook te zien als een vergroting van de plaatsvector volgens:

$$\vec{v} = \frac{\Omega^2 \cdot w}{g} \cdot \vec{R} = \frac{d\vec{R}}{dt}.$$

Dit betekent dat er geldt:

$$R = R_0 \cdot \exp\left(\frac{\Omega^2 \cdot w}{g} (t - t_0)\right).$$

Het gevolg van de traagheid is blijkbaar dat de korrels i.p.v. zuiver cirkelvormige banen een spiraalvormige baan gaan beschrijven. De straal van de korrelbaan zal dus steeds groter worden.

De snelheid van dit proces is afhankelijk van de tijd t_f :

$$t_f = \frac{g}{\Omega^2 \cdot w}.$$

Na t_f (seconden) is de straal van de korrelbaan met een factor e toegenomen.

Appendix IV: Regressieanalyse.Modeldefinitie.

Uit metingen volgt voor het verloop van de concentraties in de bodemlaag:

$$C(z) = C_0 \cdot \exp(-z/r_c).$$

Voor linearisatie van dit verband moet men stellen:

$$y = \ln C(z) \quad , \quad \text{zodat:} \quad y = \ln C_0 - \frac{1}{r_c} \cdot z.$$

Er bestaat nu een lineaire relatie tussen y en z .

Veronderstel nu verder:

- y is een afhankelijke variabele behorende bij een onafhankelijke variabele z ,
- z is zonder meetfout bekend,
- de toevallige fout in y is onafhankelijk van de z -waarde (voorwaarde ongewogen model!), m.a.w.:

$$\Delta y = \Delta \ln C = \frac{1}{C} \cdot \Delta C = \Delta C/C \quad \text{onafh. van } z!$$

Onder deze voorwaarden kan een eerste orde, ongewogen, lineair regressiemodel gedefinieerd worden volgens:

$$y = \beta_0 - \beta_1 \cdot z + \varepsilon,$$

$$\text{met:} \quad \begin{aligned} y &= \ln C(z), \\ \beta_0 &= \ln C_0, \\ \beta_1 &= 1/r_c. \end{aligned}$$

Bij een gegeven z wordt een waarde y gemeten van $\beta_0 - \beta_1 \cdot z$, plus een afwijking ε die (als het model juist is), bepaald wordt door de toevallige meetfout in y .

β_0 en β_1 zijn de parameters van het model welke met behulp van een kleinste kwadraten methode kunnen worden afgeschat.

Voor wat betreft de afwijking ε_i in meetpunt i moet worden opgemerkt dat:

- ε_i een random variabele is met:
 - gemiddelde nul: $E\{\varepsilon_i\} = 0$,
 - variantie σ^2 : $\text{Var}\{\varepsilon_i\} = \sigma^2$,
- de randomafwijking is onafhankelijk van het meetpunt: $\text{Cov}\{\varepsilon_i, \varepsilon_j\} = 0 \quad (i \neq j)$,
- de variantie van ε_i is in elk meetpunt dezelfde en gelijk aan σ^2 : $\sigma_i^2 = \sigma^2$
(gevolg van voorwaarde ongewogen model).

Uit het tot nu toe behandelde volgt tevens:

$$E\{y_i\} = \beta_0 - \beta_1 \cdot z_i \quad , \quad \text{Var}\{y_i\} = \text{Var}\{\varepsilon_i\} = \sigma^2 \quad \text{en ook:}$$

$$E\{\bar{y}\} = \beta_0 - \beta_1 \cdot \bar{z} \quad \text{en} \quad \text{Var}\{\bar{y}\} = \sigma^2/N.$$

In de regressieanalyse zijn nu dus de getallenparen y_i, z_i ; $i = 1, 2, \dots, N$, de bekenden.

De (nog) onbekenden zijn β_0, β_1 , en σ^2 .

Kent men nu de eigenschappen van deze drie, dan kan men daaruit de eigenschappen van $C(z)$, r_c , C_0 (en $L_s (= r_c \cdot C_0)$) destileren.

Schatters voor β_0, β_1 en σ^2 .

Er bestaan verschillende methoden om β_0 en β_1 te schatten. Via de hier gekozen kleinste kwadratenmethode worden β_0 en β_1 zo aangenomen dat:

$$\sum_{i=1}^N [y_i - \beta_0 + \beta_1 \cdot z_i]^2 \quad \text{minimaal is.}$$

De daarbij behorende β_0 - en β_1 -waarden zijn respectievelijk b_0 en b_1 , volgens:

$$\beta_1 \rightarrow b_1 = - \frac{\sum (z_i - \bar{z})(y_i - \bar{y})}{\sum (z_i - \bar{z})^2} = - \frac{\sum (z_i - \bar{z}) \cdot y_i}{\sum (z_i - \bar{z})^2},$$

$$\beta_0 \rightarrow b_0 = \bar{y} + b_1 \cdot \bar{z}.$$

Een goede schatting voor σ^2 wordt gegeven door de totale kwadratische afwijking per vrijheidsgraad s^2 , volgens:

$$\sigma^2 \rightarrow s^2 = \frac{1}{N-2} \cdot \sum [y_i - b_0 + b_1 \cdot z_i]^2.$$

De eigenschappen van deze variabelen moeten nog bekeken worden. De schattingen b_0 en b_1 voor β_0 en β_1 zijn natuurlijk beter naarmaten het aantal meetpunten (N) groter is en de variantie (σ^2) kleiner is. De schattingen (b) zijn te zien als een random variabele met een waarschijnlijkheidsverdeling. De verwachtingswaarde ervan is dan β en de variantie $\text{Var}\{b\}$. Ook s^2 is op deze wijze te zien als zo'n random variabele.

Verdelingen voor b_1 , b_0 en s^2 .

* Verdeling b_1 ; er geldt:

$$b_1 = - \frac{\sum (z_i - \bar{z}) \cdot y_i}{\sum (z_i - \bar{z})^2}.$$

Voor het gemiddelde van b_1 geldt:

$$\begin{aligned} E\{b_1\} &= \frac{-\sum (z_i - \bar{z}) \cdot E\{y_i\}}{\sum (z_i - \bar{z})^2} = \frac{-\sum (z_i - \bar{z})(\beta_0 - \beta_1 \cdot z_i)}{\sum (z_i - \bar{z})^2} = \\ &= \frac{-\beta_0 \cdot \sum (z_i - \bar{z}) + \beta_1 \cdot \sum (z_i - \bar{z}) \cdot z_i}{\sum (z_i - \bar{z})^2} = \beta_1 \cdot \frac{\sum (z_i - \bar{z})^2}{\sum (z_i - \bar{z})^2} = \beta_1, \end{aligned}$$

dus b_1 is een goede schatter voor β_1 .

Voor de variantie van b_1 geldt:

$$\text{Var}\{b_1\} = \frac{(\sum (z_i - \bar{z}))^2 \cdot \text{Var}\{y_i\}}{(\sum (z_i - \bar{z})^2)^2} = \frac{\sigma^2}{\sum (z_i - \bar{z})^2},$$

wat dus een maat is voor de nauwkeurigheid van b_1 als schatter voor β_1 .

Verder is af te leiden:

$$\begin{aligned} \text{Cov}\{y_i, b_1\} &= E\{[y_i - E\{y_i\}][b_1 - E\{b_1\}]\} = \\ &= E\{\varepsilon_i [b_1 - \beta_1]\} = E\{\varepsilon_i \cdot b_1\} = \frac{-\sigma^2 \cdot (z_i - \bar{z})}{\sum (z_i - \bar{z})^2}, \end{aligned}$$

$$\text{Cov}\{\bar{y}, b_1\} = 0.$$

Schat men σ^2 met behulp van s^2 , dan is $(\Delta b_1)^2$ een goede schatting voor $\text{Var}\{b_1\}$ volgens:

$$\text{Var}\{b_1\} = \frac{\sigma^2}{\sum (z_i - \bar{z})^2}, \rightarrow \boxed{(\Delta b_1)^2 = \frac{s^2}{\sum (z_i - \bar{z})^2}}.$$

* Verdeling b_0 ; er geldt:

$$b_0 = \bar{y} + b_1 \cdot \bar{z}.$$

Voor het gemiddelde van b_0 geldt:

$$\begin{aligned} E\{b_0\} &= E\{\bar{y} + b_1 \cdot \bar{z}\} = E\{\bar{y}\} + \bar{z} \cdot E\{b_1\} = \beta_0 - \beta_1 \cdot \bar{z} + \bar{z} \cdot \beta_1 = \\ &= \beta_0, \end{aligned}$$

dus b_0 is een goede schatter voor β_0 .

Voor de variantie van b_0 geldt:

$$\begin{aligned}\text{Var}\{b_0\} &= \text{Var}\{\bar{y}\} + \bar{z}^2 \cdot \text{Var}\{b_1\} + 2 \cdot \bar{z} \cdot \text{Cov}\{\bar{y}, b_1\} = \\ &= \frac{\sigma^2}{N} + \bar{z}^2 \cdot \frac{\sigma^2}{\sum (z_i - \bar{z})^2} = \frac{\sigma^2 \cdot \sum z_i^2}{N \cdot \sum (z_i - \bar{z})^2},\end{aligned}$$

wat dus een maat is voor de nauwkeurigheid van b_0 als schatter van β_0 .

Verder is af te leiden:

$$\text{Cov}\{y_i, b_0\} = \sigma^2 \left\{ \frac{1}{N} + \frac{(z_i - \bar{z}) \cdot \bar{z}}{\sum (z_i - \bar{z})^2} \right\} = \frac{\sigma^2}{N} + \bar{z} \cdot \text{Cov}\{y_i, b_1\},$$

$$\text{Cov}\{\bar{y}, b_0\} = \frac{\sigma^2}{N},$$

$$\text{Cov}\{b_0, b_1\} = \bar{z} \cdot \text{Var}\{b_1\}.$$

Schat men σ^2 met behulp van s^2 , dan is $(\Delta b_0)^2$ een goede schatting voor $\text{Var}\{b_0\}$ volgens:

$$\begin{aligned}\text{Var}\{b_0\} &= \frac{\sigma^2}{N} + \bar{z}^2 \frac{\sigma^2}{\sum (z_i - \bar{z})^2} \rightarrow (\Delta b_0)^2 = \frac{s^2}{N} + \bar{z}^2 \frac{s^2}{\sum (z_i - \bar{z})^2} \\ &= \frac{s^2}{N} + \bar{z}^2 (\Delta b_1)^2.\end{aligned}$$

* Verdeling s^2 ; er geldt:

$$s^2 = \frac{1}{N-2} \cdot \sum \varepsilon_i^2 = \frac{1}{N-2} \cdot \sum [y_i - b_0 + b_1 \cdot z_i]^2$$

Voor het gemiddelde van s^2 geldt:

$$E\{s^2\} = E\left\{ \frac{1}{N-2} \cdot \sum [y_i - b_0 + b_1 \cdot z_i]^2 \right\} = \frac{1}{N-2} \cdot \sum \text{Var}\{y_i - b_0 + b_1 \cdot z_i\},$$

waarin:

$$\begin{aligned}\text{Var}\{y_i - b_0 + b_1 \cdot z_i\} &= \text{Var}\{y_i\} + \text{Var}\{-b_0 + b_1 \cdot z_i\} + 2 \cdot \text{Cov}\{y_i, -b_0 + b_1 \cdot z_i\} = \\ &= \sigma^2 + \text{Var}\{b_0\} + z_i^2 \cdot \text{Var}\{b_1\} - 2 \cdot z_i \cdot \text{Cov}\{b_0, b_1\} - 2 \cdot \text{Cov}\{y_i, b_0\} + \\ &\quad + 2 \cdot z_i \cdot \text{Cov}\{y_i, b_1\} = \\ &= \sigma^2 + \frac{\sigma^2}{N} + \bar{z}^2 \cdot \text{Var}\{b_1\} + z_i^2 \cdot \text{Var}\{b_1\} - 2 \cdot z_i \cdot \bar{z} \cdot \text{Var}\{b_1\} - \\ &\quad - 2 \frac{\sigma^2}{N} - 2 \cdot \bar{z} \cdot \text{Cov}\{y_i, b_1\} + 2 \cdot z_i \cdot \text{Cov}\{y_i, b_1\} = \\ &= \sigma^2 - \frac{\sigma^2}{N} + (\bar{z} - z_i)^2 \cdot \text{Var}\{b_1\} + 2 (z_i - \bar{z}) \cdot \text{Cov}\{y_i, b_1\} = \\ &= \sigma^2 - \frac{\sigma^2}{N} + (\bar{z} - z_i)^2 \frac{\sigma^2}{\sum (z_i - \bar{z})^2} + 2 \cdot (z_i - \bar{z}) \cdot \frac{-\sigma^2 (z_i - \bar{z})}{\sum (z_i - \bar{z})^2} =\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \sigma^2 - \frac{\sigma^2}{N} + \sigma^2 \frac{\sum (z_i - \bar{z})^2}{\sum (z_i - \bar{z})^2} - 2\sigma^2 \frac{\sum (z_i - \bar{z})^2}{\sum (z_i - \bar{z})^2} = \\
 &= \sigma^2 - \frac{\sigma^2}{N} - \sigma^2 \frac{\sum (z_i - \bar{z})^2}{\sum (z_i - \bar{z})^2},
 \end{aligned}$$

zodat:

$$\begin{aligned}
 E\{s^2\} &= \frac{1}{N-2} \cdot \sum \text{Var}\{y_i - b_0 + b_1 \cdot z_i\} = \\
 &= \frac{1}{N-2} \cdot \sum \left\{ \sigma^2 - \frac{\sigma^2}{N} - \sigma^2 \frac{\sum (z_i - \bar{z})^2}{\sum (z_i - \bar{z})^2} \right\} = \\
 &= \frac{1}{N-2} \{N \cdot \sigma^2 - \sigma^2 - \sigma^2\} = \frac{1}{N-2} \{(N-2) \cdot \sigma^2\} = \sigma^2,
 \end{aligned}$$

dus s^2 is een goede schatter voor σ^2 .

Eigenschappen van r_c , C_0 en L_s .

Voor het afschatten van met name de nauwkeurigheden wordt gebruik gemaakt van de veronderstellingen:

$$b_0 = \beta_0 + db_0 \quad \text{en} \quad b_1 = \beta_1 + db_1,$$

met:

$$E\{b\} = \beta, \quad E\{db\} = 0 \quad \text{en} \quad \text{Var}\{b\} = \text{Var}\{db\} = E\{db^2\}.$$

* Eigenschappen r_c .

Ergeldt:

$$r_c = 1/b_1 = \frac{1}{(\beta_1 + db_1)} = \frac{1}{\beta_1} \left(1 - \left(\frac{db_1}{\beta_1}\right) + \left(\frac{db_1}{\beta_1}\right)^2 - \dots \right).$$

In eerste orde benadering:

$$E\{r_c\} = E\left\{\frac{1}{b_1}\right\} = \frac{1}{\beta_1} \cdot E\left\{1 - \frac{db_1}{\beta_1}\right\} = 1/\beta_1,$$

dus een goede benadering is: $r_c = 1/b_1$.

Voor de variantie geldt:

$$\text{Var}\{r_c\} = \frac{1}{\beta_1^2} \cdot \text{Var}\left\{\frac{db_1}{\beta_1}\right\} = \frac{1}{\beta_1^2} \cdot \frac{1}{\beta_1^2} \cdot (\Delta b_1)^2,$$

dus: $(\Delta r_c)^2 = r_c^2 \cdot (\Delta b_1/b_1)^2$, zodat: $\left|\frac{\Delta r_c}{r_c}\right| = \left|\frac{\Delta b_1}{b_1}\right|$.

Uit een tweede orde benadering volgt:

$$\begin{aligned}
 E\{r_c\} &= E\left\{\frac{1}{\beta_1} \cdot \left[1 - \left(\frac{db_1}{\beta_1}\right) + \left(\frac{db_1}{\beta_1}\right)^2\right]\right\} = r_c \cdot E\left\{1 + \left(\frac{db_1}{\beta_1}\right)^2\right\} = \\
 &= r_c \cdot \left\{1 + \frac{E\{db_1^2\}}{\beta_1^2}\right\} = r_c \left\{1 + \left(\frac{\Delta b_1}{b_1}\right)^2\right\}.
 \end{aligned}$$

Verwaarlozing van de tweede orde correctieterm geeft een systematische fout van de orde $(\Delta b_1/b_1)^2$. Als r_c tot op 10% nauwkeurig te bepalen is dan geldt:

$$\left(\frac{\Delta b_1}{b_1}\right) \leq 0,1$$

De toevallige fout in de eerste orde benadering is orde 10% en de door verwaarlozing van hogere orde termen geïntroduceerde fout (systematisch) bedraagt orde 1%, wat dus het gebruik van de eerste orde benadering rechtvaardigd.

Samenvattend:

als goede benadering :

$$r_c = 1/b_1,$$

en :

$$\left|\frac{\Delta r_c}{r_c}\right| = \left|\frac{\Delta b_1}{b_1}\right| = \frac{s}{b_1 \sqrt{\sum (z_i - \bar{z})^2}}.$$

* Eigenschappen C_0 :

Ergeldt:

$$C_0 = e^{b_0} = e^{(\beta_0 + db_0)} = e^{\beta_0} (1 + db_0 + \frac{1}{2}(db_0)^2 + \dots).$$

In eerste orde benadering:

$$E\{C_0\} = E\{e^{\beta_0} (1 + db_0)\} = e^{\beta_0},$$

dus is dit een goede benadering.

$$\text{Var}\{C_0\} = e^{2\beta_0} \cdot \text{Var}\{db_0\} = C_0^2 \cdot \text{Var}\{b_0\} = C_0^2 \cdot (\Delta b_0)^2,$$

dus: $(\Delta C_0)^2 = C_0^2 \cdot (\Delta b_0)^2$, zodat: $|\frac{\Delta C_0}{C_0}| = |\Delta b_0|$.

Blijkbaar is $|\Delta b_0|$ een maat voor de relatieve fout in de bodemconcentratie C_0 (vanwege $\Delta y = \Delta C/C$).

Uit de tweede orde benadering volgt:

$$\begin{aligned} E\{C_0\} &= E\{e^{\beta_0} (1 + db_0 + \frac{1}{2} db_0^2)\} = C_0 \cdot [1 + \frac{1}{2} E(db_0^2)] = \\ &= C_0 \cdot [1 + \frac{1}{2} \text{Var}\{db_0\}] = C_0 \cdot [1 + \frac{1}{2} (\Delta b_0)^2]. \end{aligned}$$

Verwaarlozing van de tweede orde correctieterm geeft een systematische fout van de orde $\frac{1}{2} (\Delta b_0)^2$ in de eerste orde benadering.

Als geldt: $\Delta b_0 \leq 0,2$ ($\Delta C_0/C_0 \leq 20\%$),

dan rechtvaardigt de systematische fout $\frac{1}{2}(\Delta b_0)^2 \approx 0,02$ ten opzichte van de relatieve fout (0,2) het gebruik van de eerste orde benadering.

Samenvattend:

als goede benadering:

$$C_0 = e^{b_0},$$

en:

$$\left| \frac{\Delta C_0}{C_0} \right| = \Delta b_0 = \sqrt{\frac{S^2}{N} + \bar{z}^2 (\Delta b_1)^2}.$$

* Eigenschappen L_s :

Er geldt:

$$\begin{aligned} L_s &= r_c \cdot C_0 = \frac{1}{b_1} \cdot e^{b_0} = \frac{1}{\beta_1} \cdot \left(1 - \frac{db_1}{\beta_1} + \left(\frac{db_1}{\beta_1}\right)^2 - \dots\right) \cdot e^{\beta_0} (1 + db_0 + \frac{1}{2} db_0^2 + \dots) \\ &= \frac{e^{\beta_0}}{\beta_1} \cdot \left(1 - \frac{db_1}{\beta_1} + db_0 + \left(\frac{db_1}{\beta_1}\right)^2 - \frac{db_1 db_0}{\beta_1} + \frac{1}{2} (db_0)^2 + \dots\right). \end{aligned}$$

In eerste orde benadering:

$$E\{L_s\} = E\left\{ \frac{e^{\beta_0}}{\beta_1} \left(1 - \frac{db_1}{\beta_1} + db_0\right) \right\} = \frac{e^{\beta_0}}{\beta_1} = r_c \cdot C_0,$$

zodat dit dus een goede benadering is.

$$\begin{aligned} \text{Var}\{L_s\} &= C_0^2 \cdot r_c^2 \cdot \text{Var}\left\{ -\frac{db_1}{\beta_1} + db_0 \right\} = \\ &= C_0^2 \cdot r_c^2 \cdot \left[\frac{1}{\beta_1^2} \cdot \text{Var}\{db_1\} + \text{Var}\{db_0\} - \frac{2}{\beta_1} \cdot \text{Cov}(db_1, db_0) \right] = \\ &= C_0^2 \cdot r_c^2 \cdot \left[\left(\frac{1}{\beta_1^2} - \frac{2\bar{z}}{\beta_1} \right) \cdot \text{Var}\{b_1\} + \text{Var}\{b_0\} \right] = \\ &= C_0^2 \cdot r_c^2 \cdot \left[\left(\bar{z} - \frac{1}{b_1} \right)^2 \cdot (\Delta b_1)^2 + \frac{S^2}{N} \right], \end{aligned}$$

dus:

$$\left(\frac{\Delta(r_c \cdot C_0)}{r_c \cdot C_0} \right)^2 = \frac{S^2}{N} + \left(\bar{z} - \frac{1}{b_1} \right)^2 \cdot (\Delta b_1)^2,$$

zodat:

$$\left| \frac{\Delta L_s}{L_s} \right| = \sqrt{\frac{S^2}{N} + \left(\bar{z} - \frac{1}{b_1} \right)^2 \cdot (\Delta b_1)^2} = \sqrt{\frac{S^2}{N} + (b_1 \bar{z} - 1)^2 \cdot \left(\frac{\Delta b_1}{b_1} \right)^2}.$$

De tweede orde benadering:

$$\begin{aligned} E\{L_s\} &= E\left\{ \frac{e^{\beta_0}}{\beta_1} \left(1 - \frac{db_1}{\beta_1} + db_0 + \left(\frac{db_1}{\beta_1}\right)^2 - \frac{db_1 db_0}{\beta_1} + \frac{1}{2} (db_0)^2 \right) \right\} = \\ &= r_c \cdot C_0 \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta_1^2} \cdot E\{db_1^2\} - \frac{1}{\beta_1} \cdot E\{db_1 db_0\} + \frac{1}{2} \cdot E\{db_0^2\} \right) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= r_c \cdot C_0 \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta_1^2} \cdot \text{Var}\{b_1\} - \frac{1}{\beta_1} \cdot \text{Cov}\{b_0, b_1\} + \frac{1}{2} \cdot \text{Var}\{b_0\}\right) = \\
&= r_c \cdot C_0 \cdot \left(1 + \frac{\sigma^2}{2N} + \left(\frac{1}{\beta_1^2} - \frac{\bar{z}}{\beta_1} + \frac{\bar{z}^2}{2}\right) \cdot \text{Var}\{b_1\}\right) \\
&= r_c \cdot C_0 \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \left|\frac{\Delta L_s}{L_s}\right|^2 + \frac{1}{2} \cdot \left|\frac{\Delta b_1}{b_1}\right|^2\right).
\end{aligned}$$

Verwaarlozen van de tweede orde correctietermen geeft dus een systematische fout ter grootte van:

$$\left|\frac{\Delta L_s}{L_s}\right|_{\text{syst}} = \frac{1}{2} \cdot \left|\frac{\Delta L_s}{L_s}\right|_{\text{toev.}}^2 + \frac{1}{2} \cdot \left|\frac{\Delta b_1}{b_1}\right|^2$$

Afschatting levert met:

$$\frac{s^2}{N} \approx 0,01, \quad b_1 \cdot \bar{z} \approx 2 \quad \text{en} \quad |\Delta b_1/b_1| \approx 0,1$$

voor de toevallige fout:

$$\left|\frac{\Delta L_s}{L_s}\right| \approx \sqrt{0,01 + (2-1)^2 \cdot (0,1)^2} = \sqrt{0,02} \approx 0,14 \quad (14\%),$$

en de systematische fout:

$$\left|\frac{\Delta L_s}{L_s}\right|_{\text{syst}} \approx \frac{1}{2} \cdot (0,14)^2 + \frac{1}{2} \cdot (0,1)^2 = 0,015 \quad (1,5\%).$$

De systematische fout veroorzaakt door verwaarlozing van hogere orde termen is te verwaarlozen ten opzichte van de toevallige fout ($1,5 \ll 14\%$), dus het gebruik van de eerste orde benadering is gerechtvaardigd.

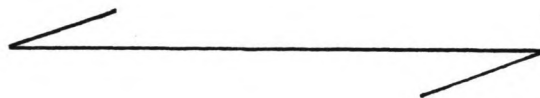
Samenvattend:

als goede benadering:

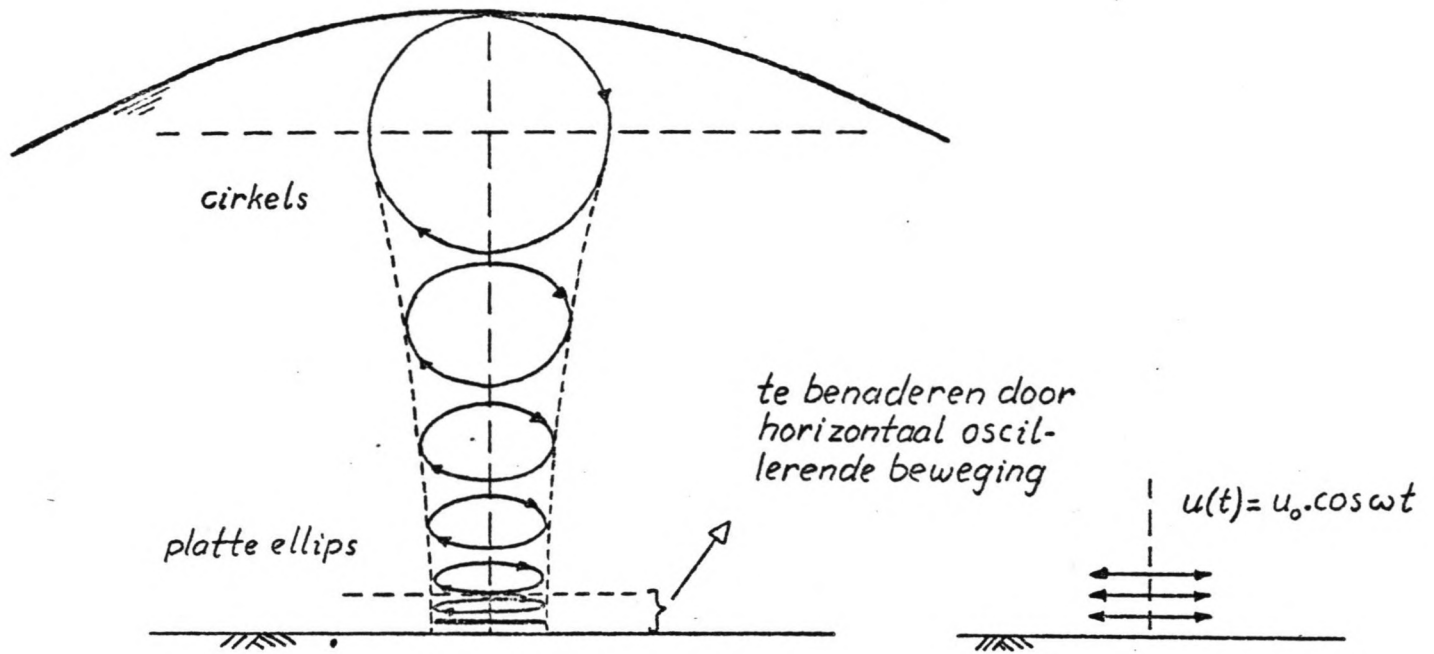
$$L_s = \frac{e^{\beta_0}}{\beta_1},$$

en:

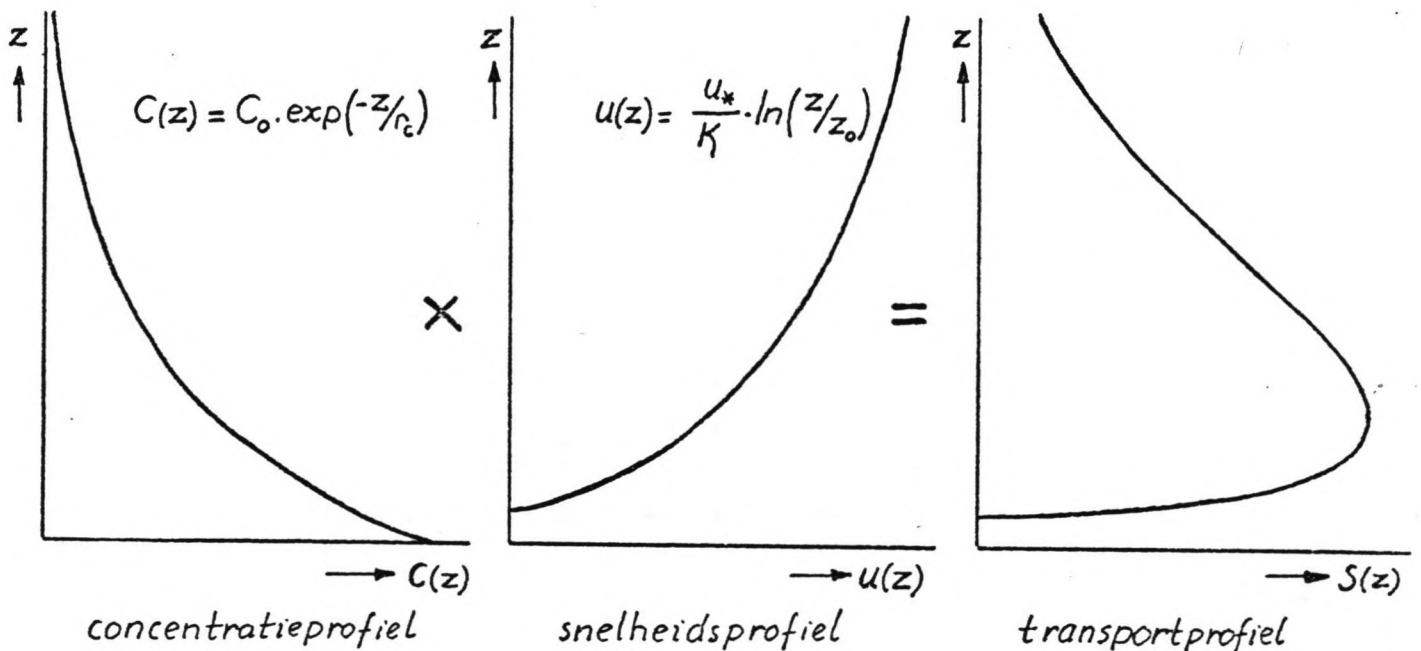
$$\left|\frac{\Delta L_s}{L_s}\right| = \sqrt{\frac{s^2}{N} + (b_1 \bar{z} - 1)^2 \cdot \left|\frac{\Delta b_1}{b_1}\right|^2}.$$



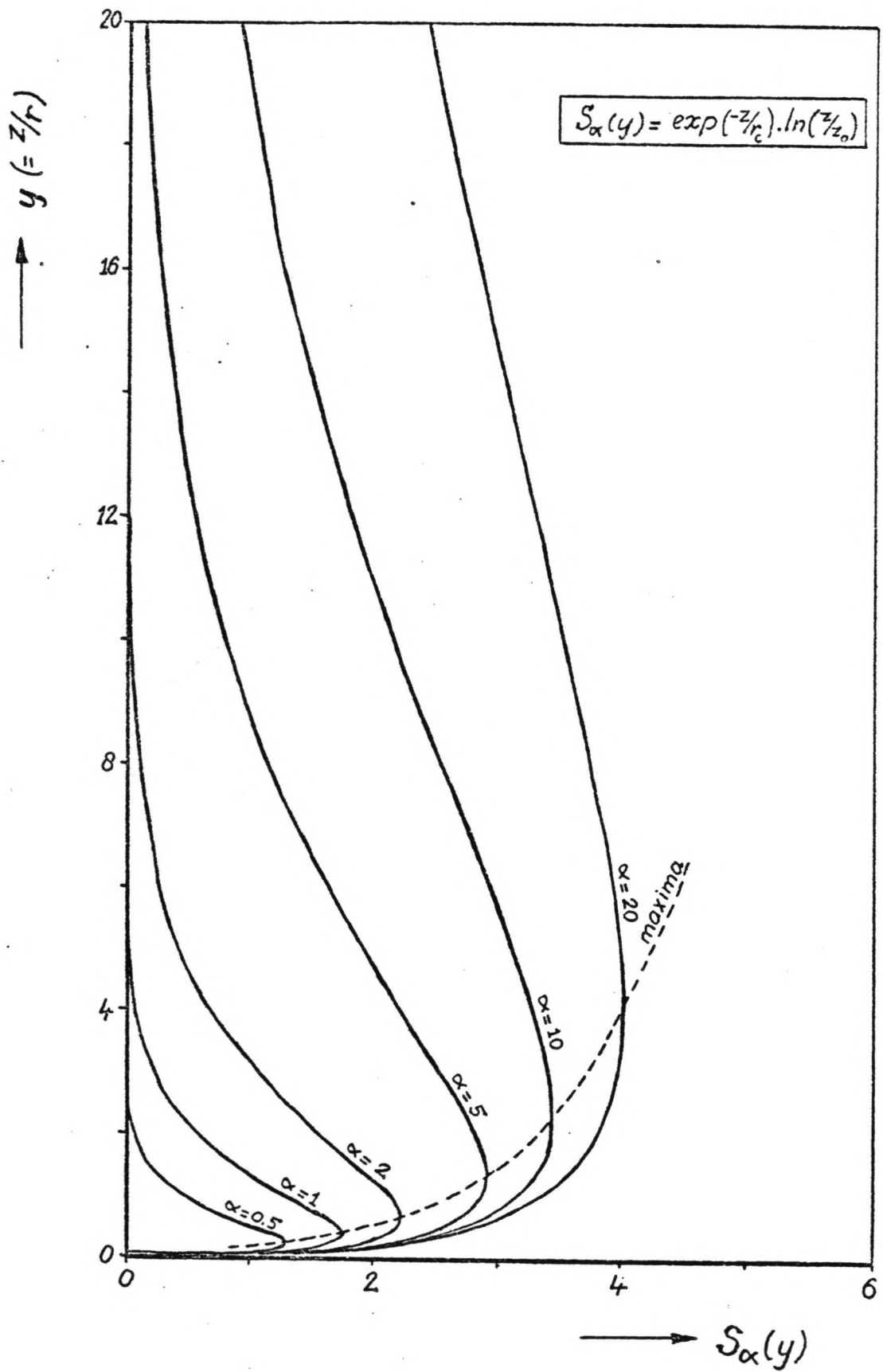
FIGUREN



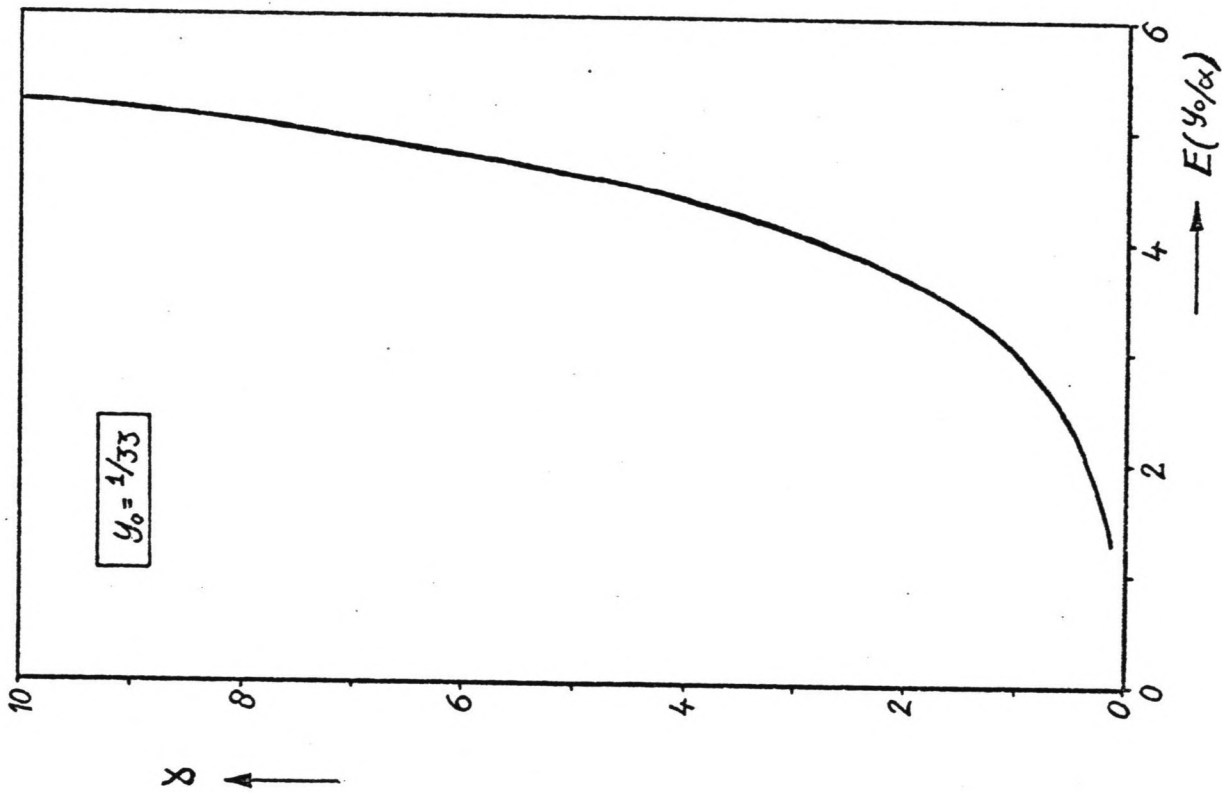
Figuur 1a : Benadering waterbeweging onder een golf vlak boven de bodem.



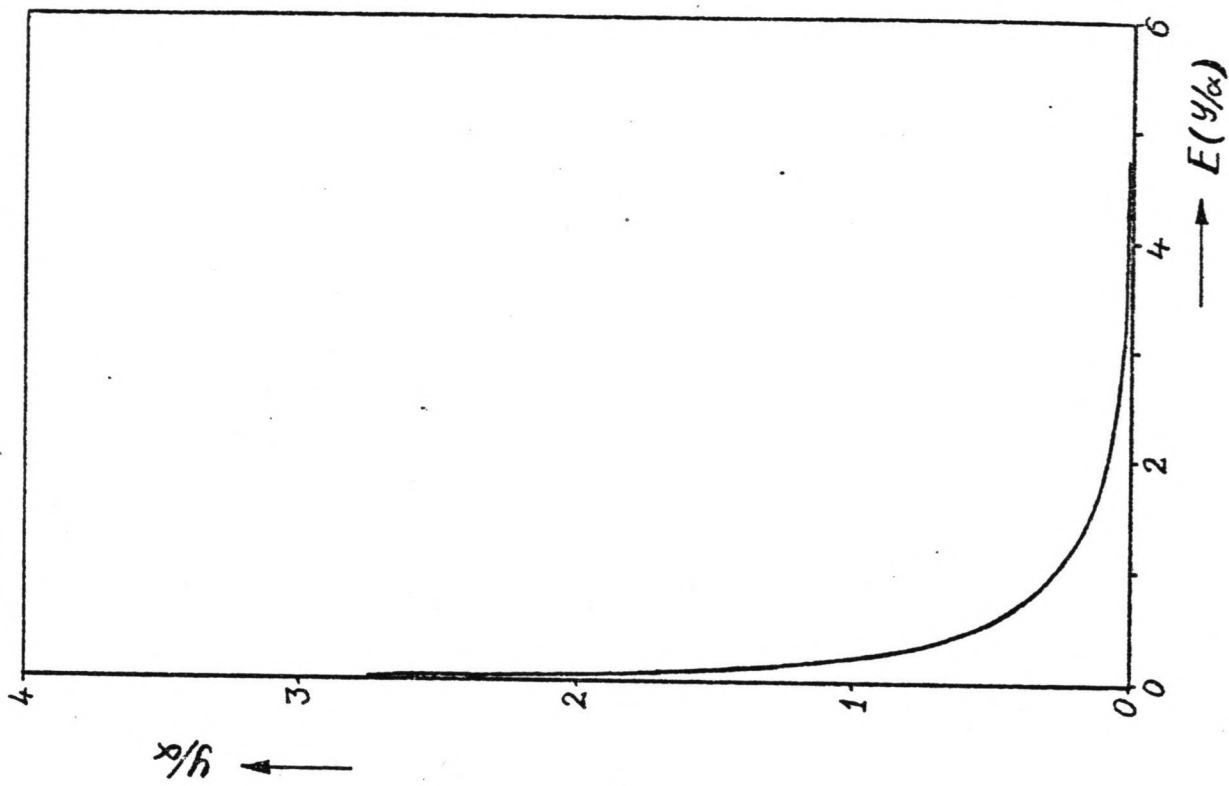
Figuur 1b : Transportprofiel als produkt van concentratie- en snelheidsprofiel.



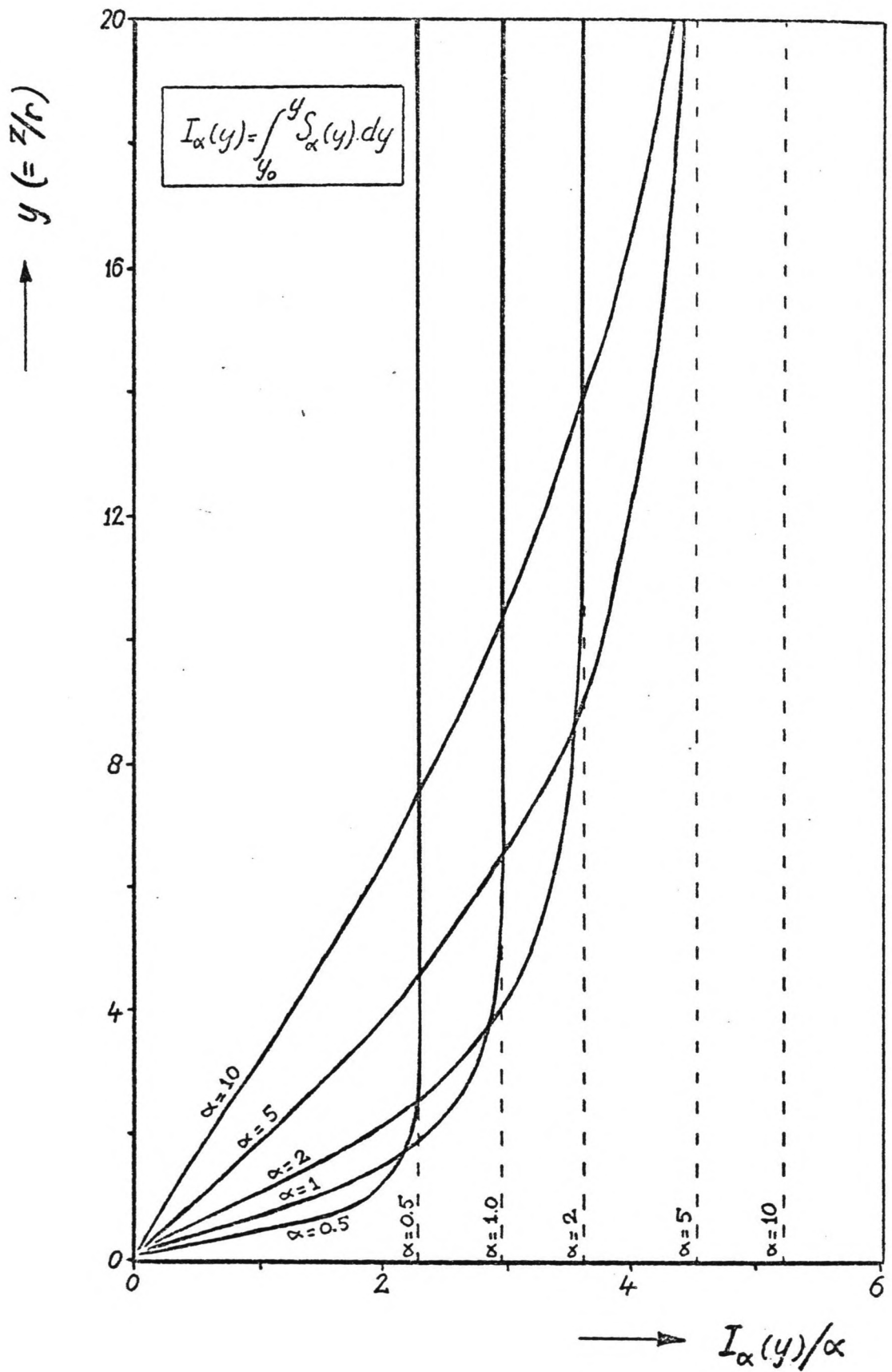
Figuur 2: Transportverdelingsparameter $S_{\alpha}(y)$ voor diverse waarden van α .



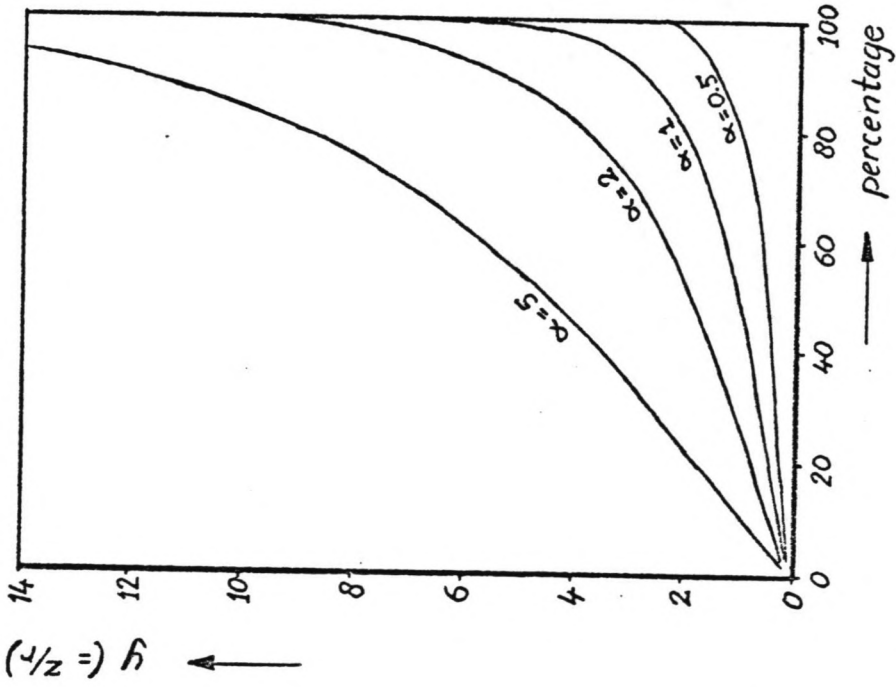
Figuur 3a: Parameter $E(y_0/\alpha)$ voor diverse waarden van α ($y_0 = 1/33$).



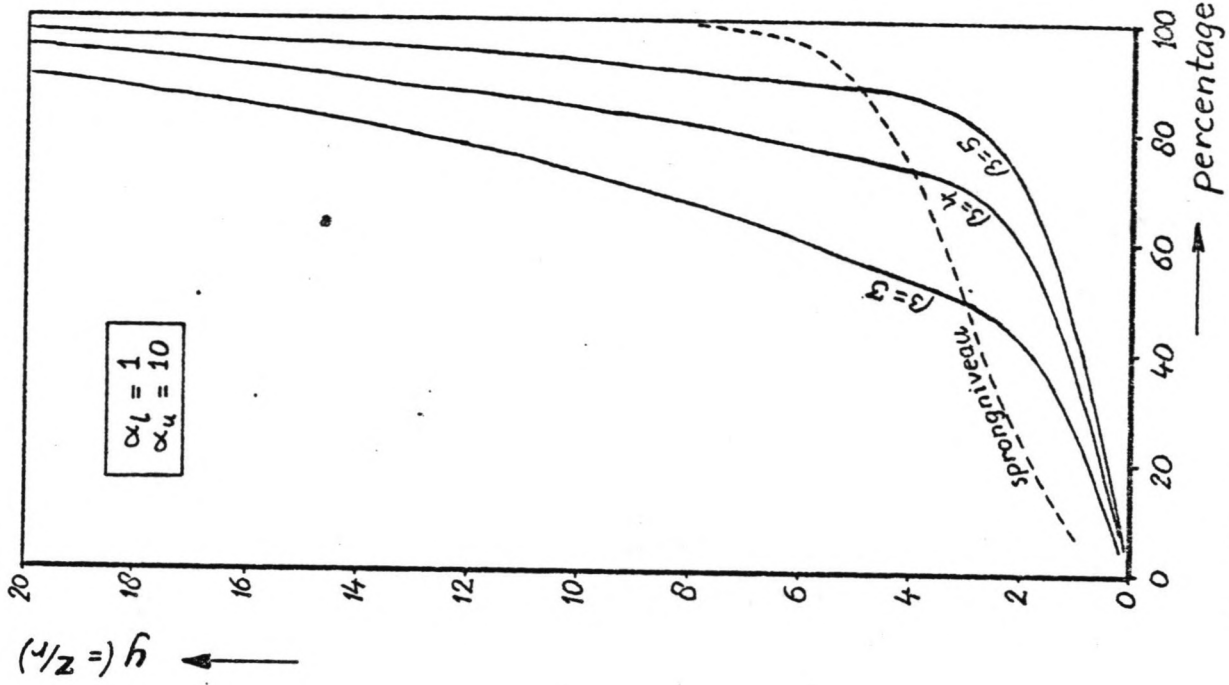
Figuur 3b: Parameter $E(y/\alpha)$ voor diverse waarden van y/α .



Figuur 4 : Geïntegreerde transportverdelings parameter $I_\alpha(y)$ voor diverse waarden van α .

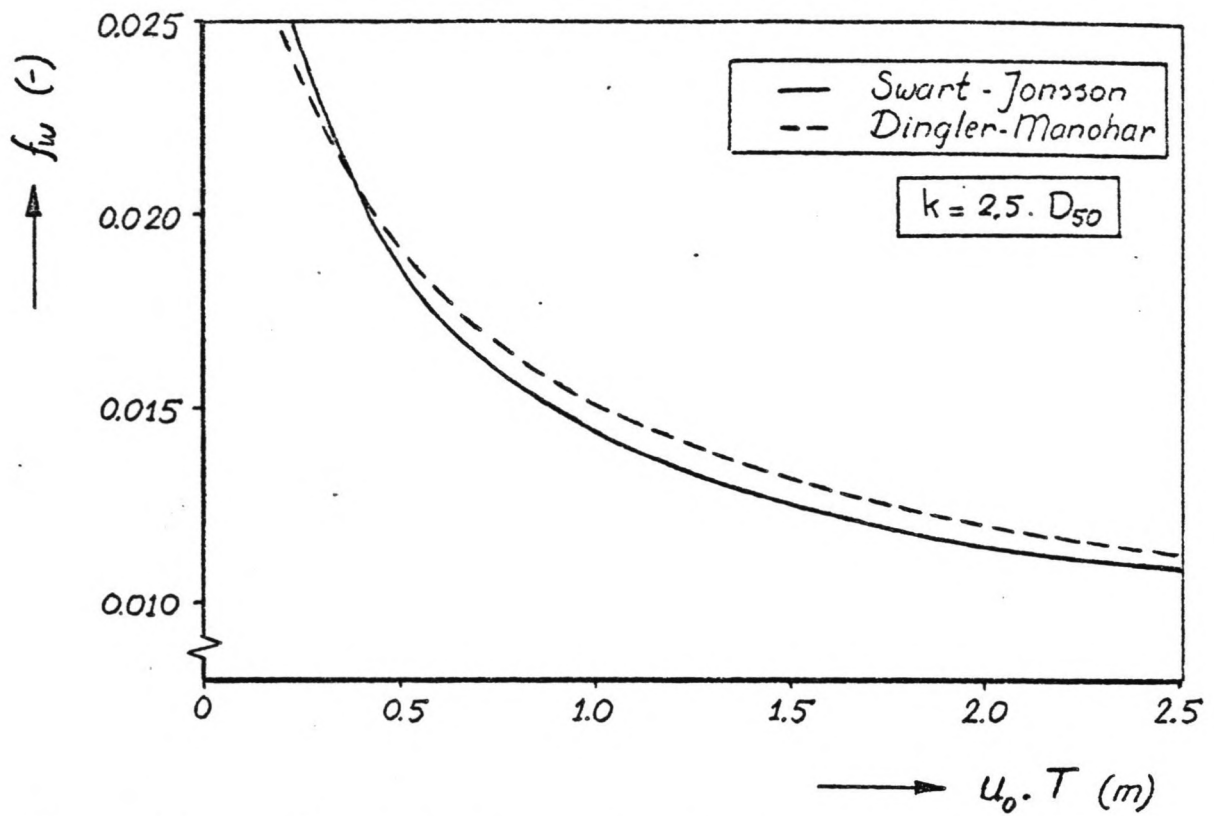


5a: Eenlaagsmodel, diverse waarden van α .

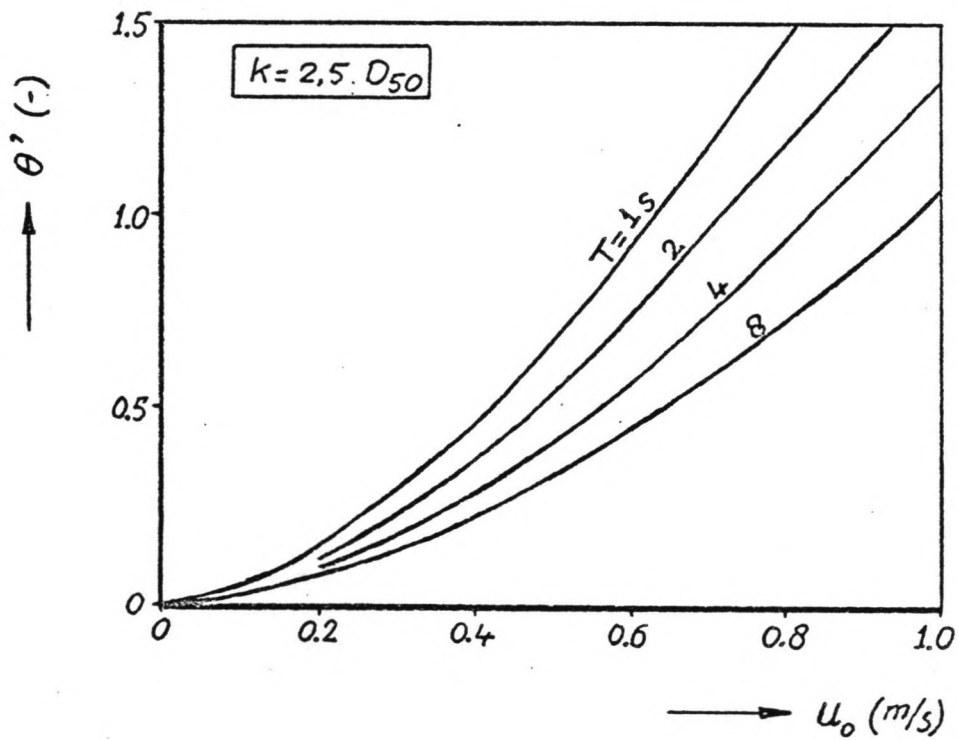


5b: Tweelagenmodel, diverse waarden van β ($\alpha_1=1, \alpha_u=10$).

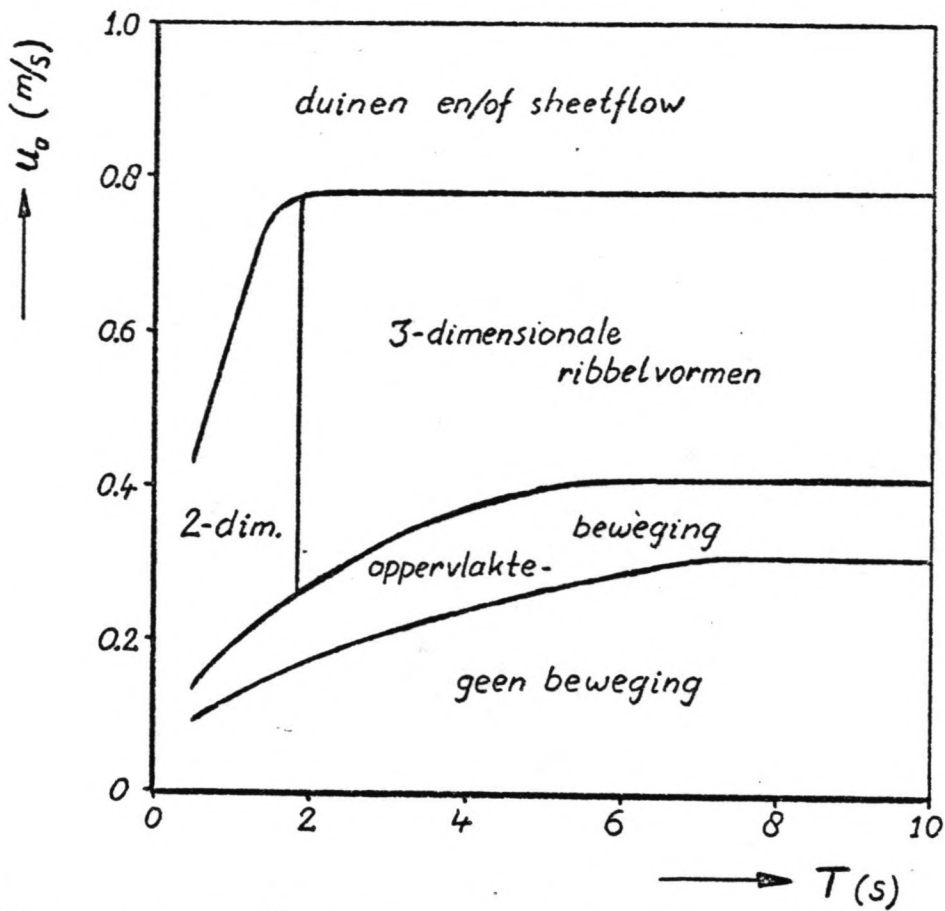
Figuur 5: Percentage van het totaaltransport onder het niveau y .



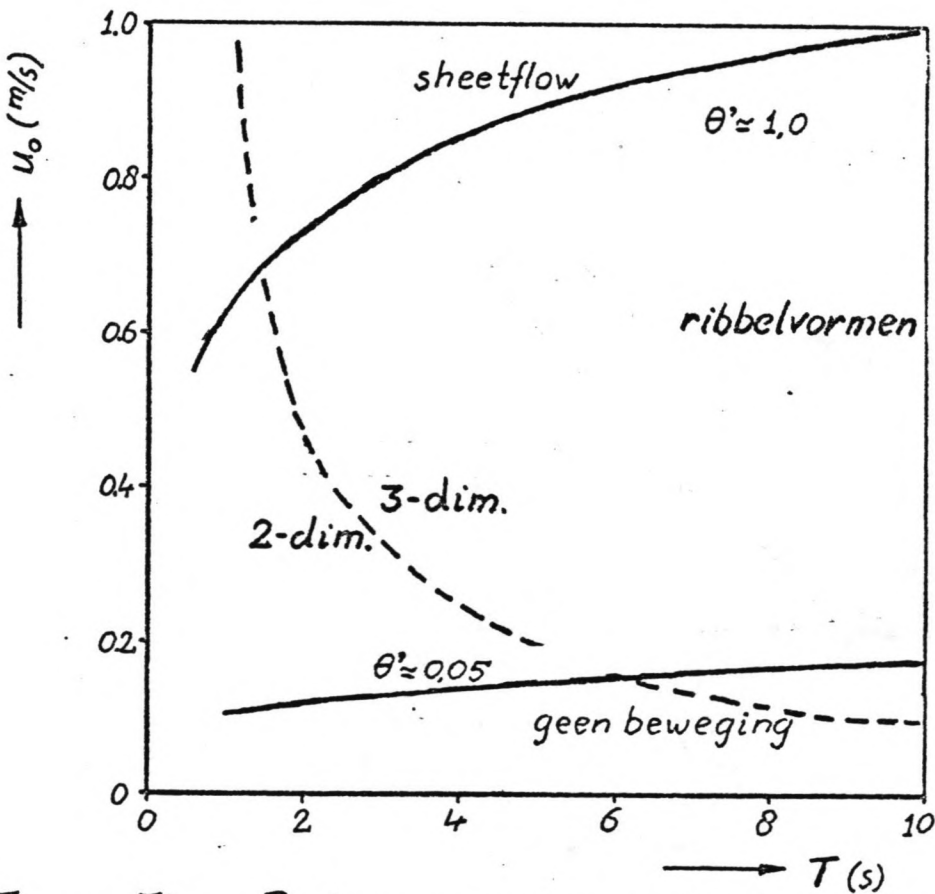
Figuur 6a: Evenredigheidsconstante f_w als functie van $u_0 \cdot T$.



Figuur 6b: Shieldsparameter θ' als functie van u_0 voor diverse waarden van T .

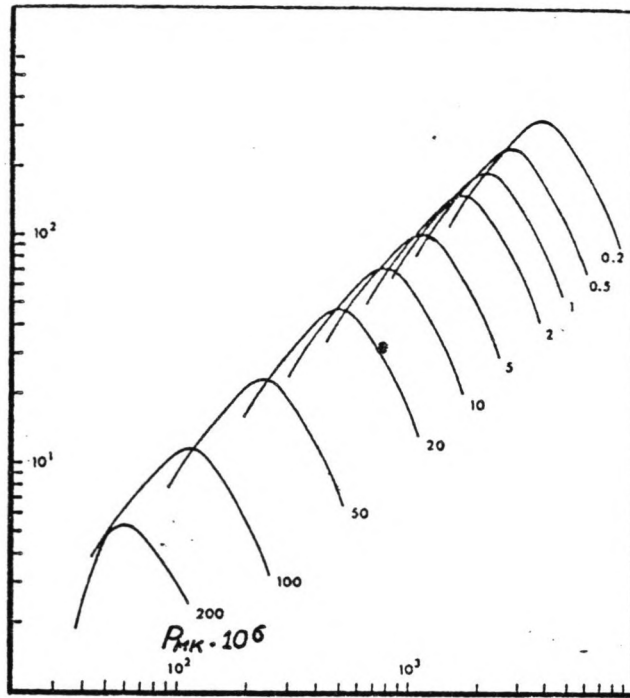


Figuur 7a: Bedvormen volgens Bosman (M1695-I).



Figuur 7b: Bedvormen volgens Carstens (---) en Nielsen (—).

η/D (-)
↑



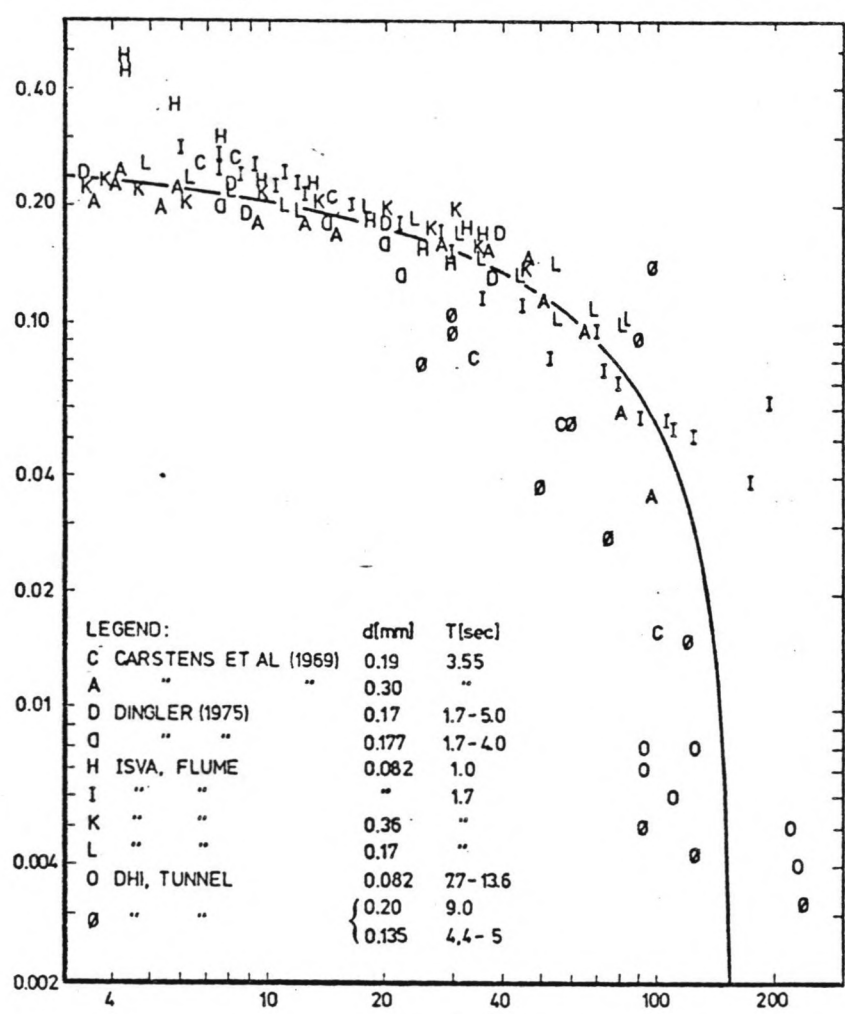
$$P_{MK} = \frac{D}{(s-1) \cdot g \cdot T^2}$$

$$= 13,5 \cdot 10^6 / T^2$$

→ $2 \cdot x_0/D$ (-)

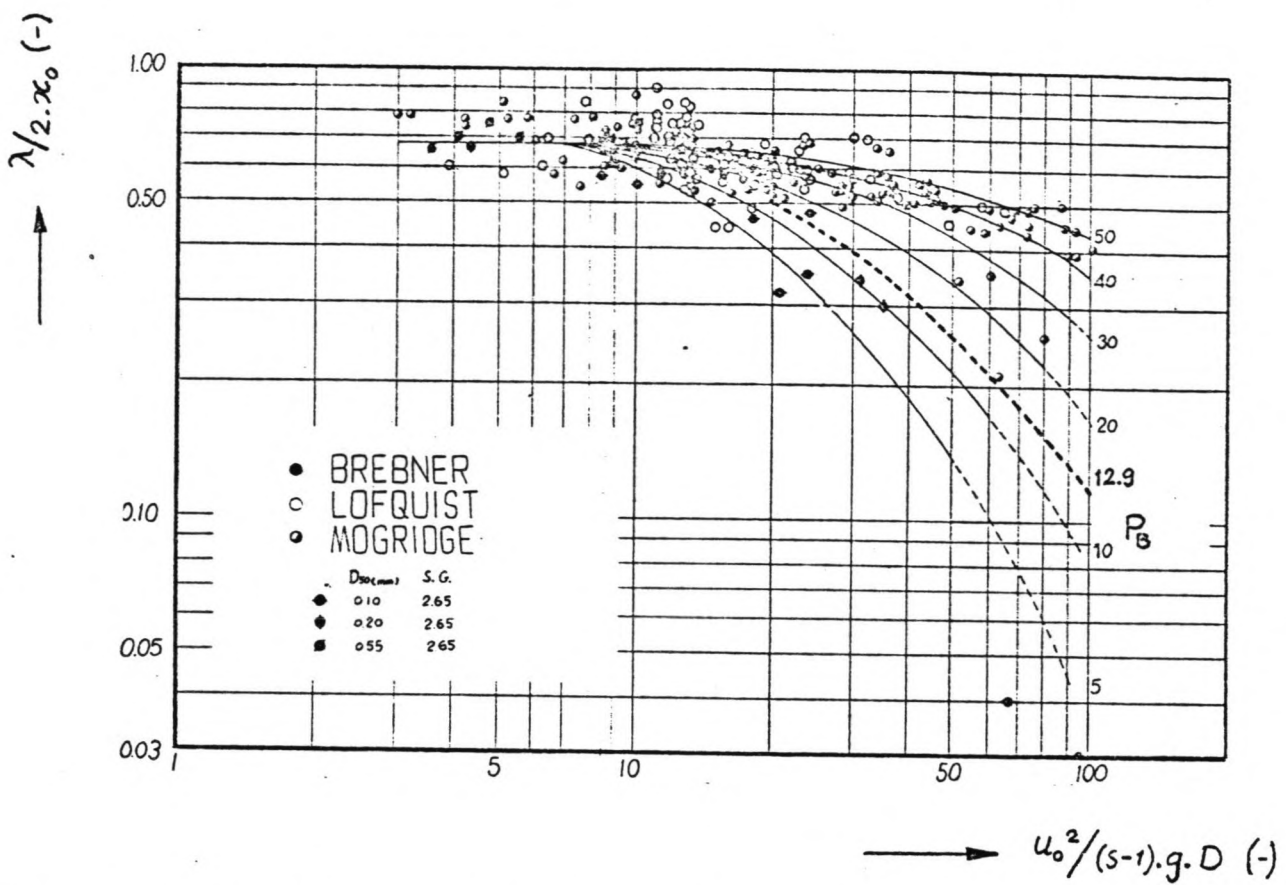
Figuur 8a: Ribbelhoogte volgens Mogridge en Kamphuis.

η/x_0 (-)
↑

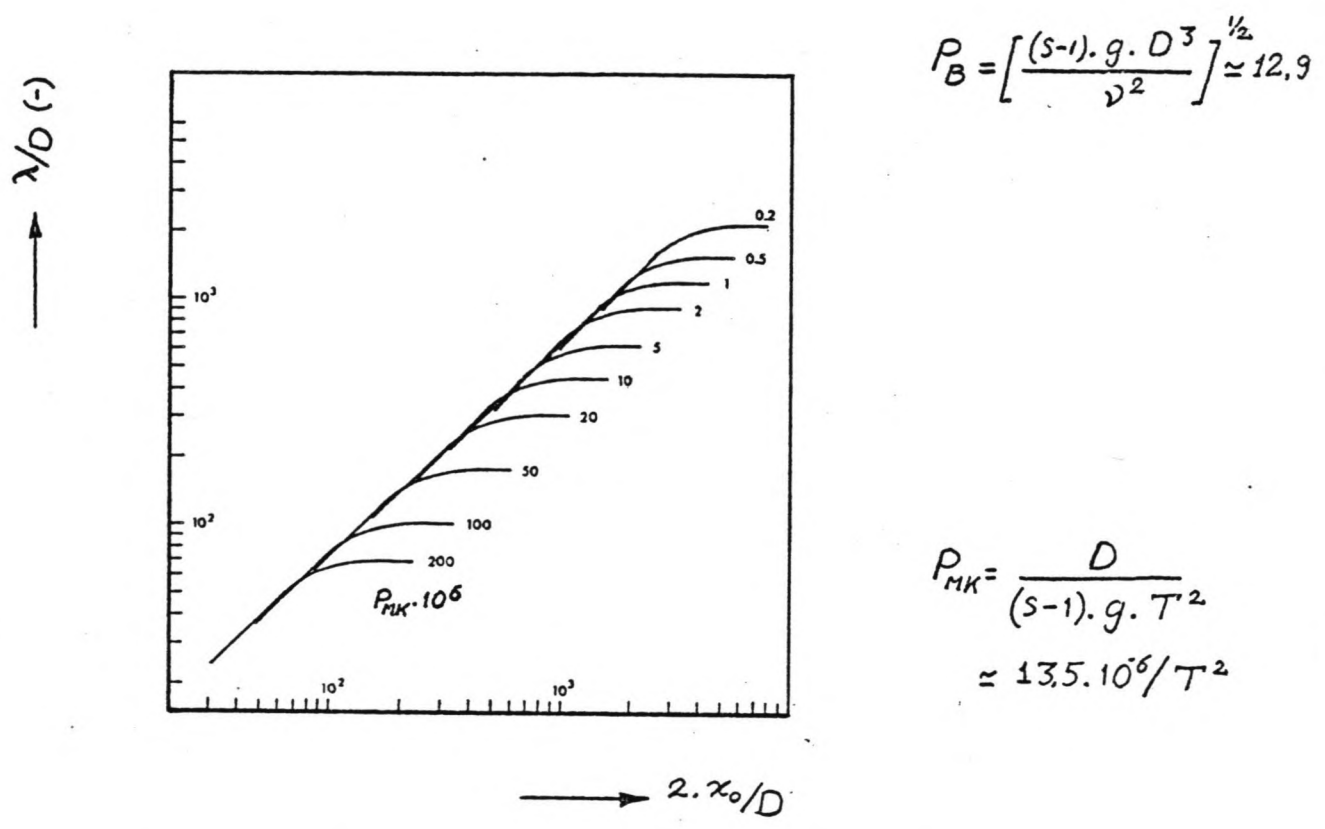


→ $u_0^2/(s-1) \cdot g \cdot D$ (-)

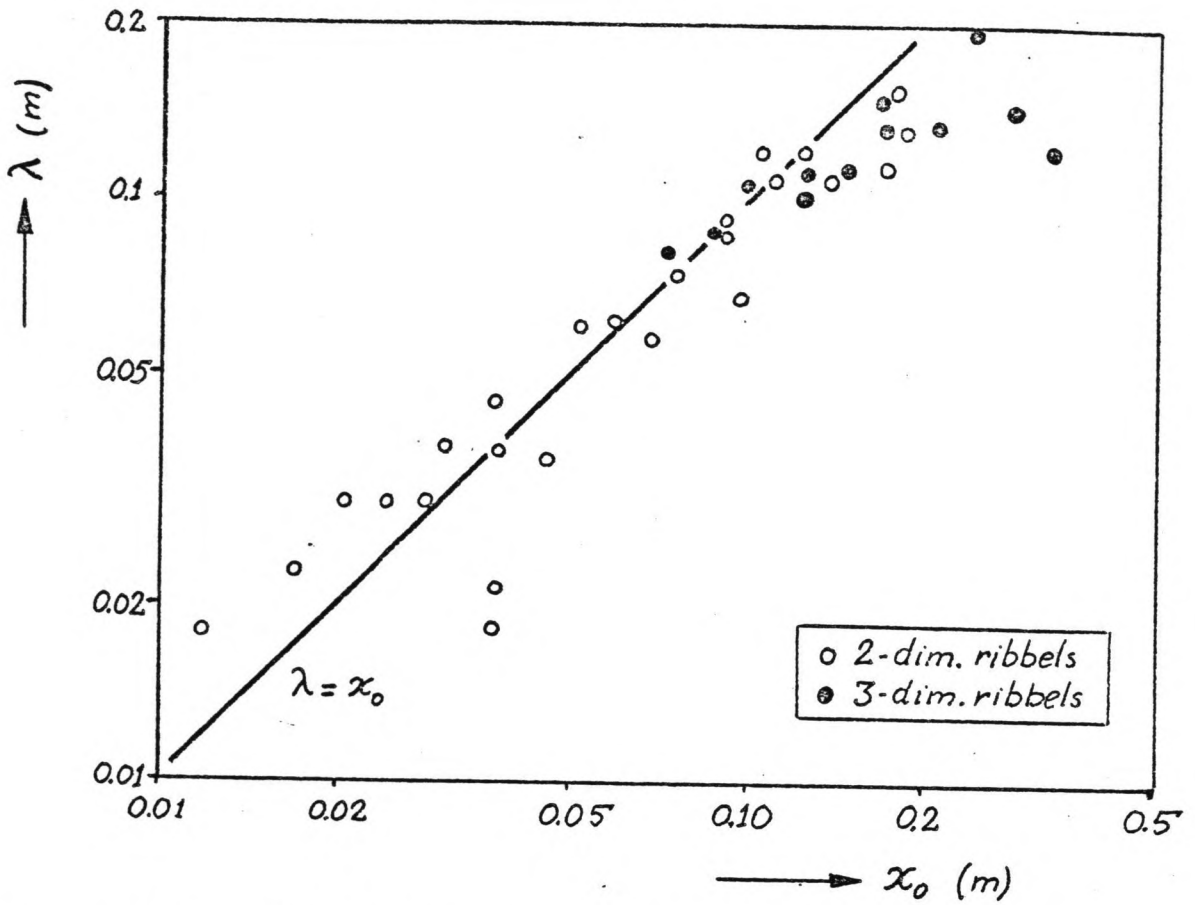
Figuur 8b: Ribbelhoogte volgens Nielsen.



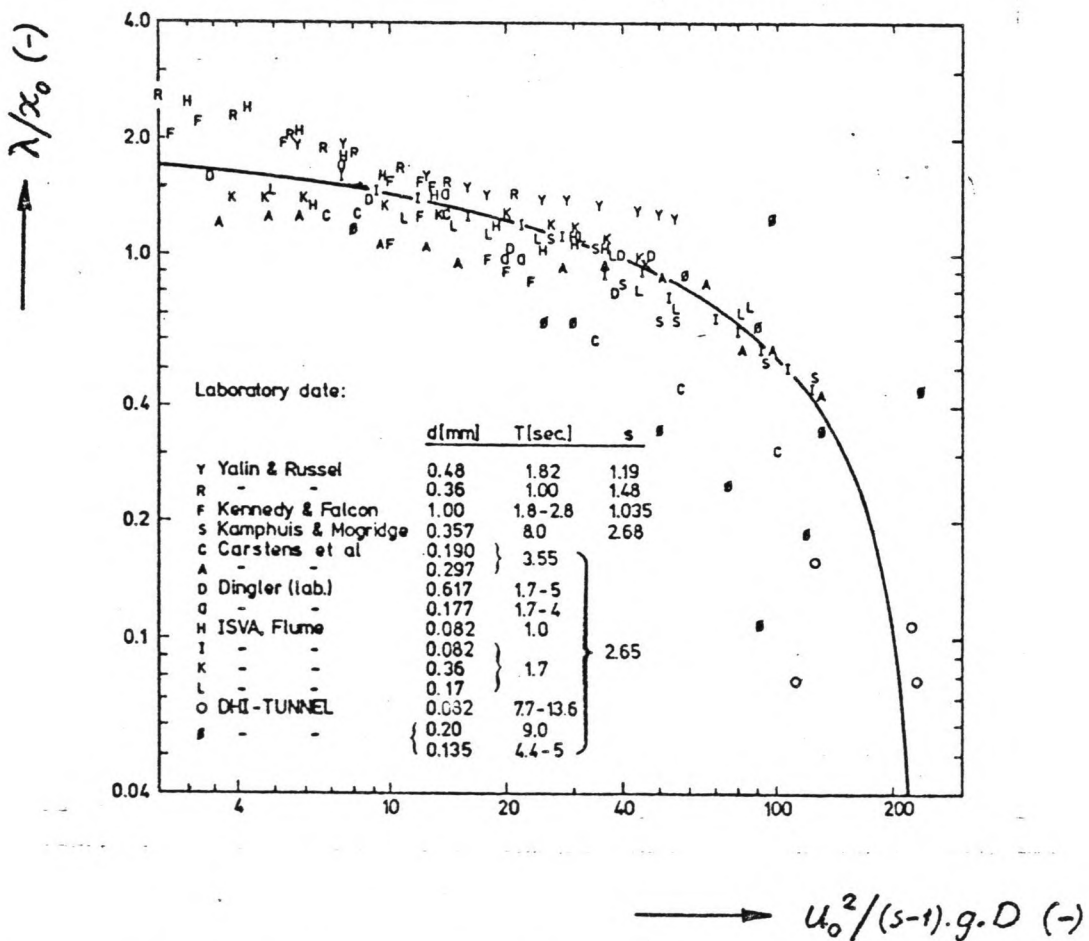
Figuur 9a : Ribbellengte volgens Brebner.



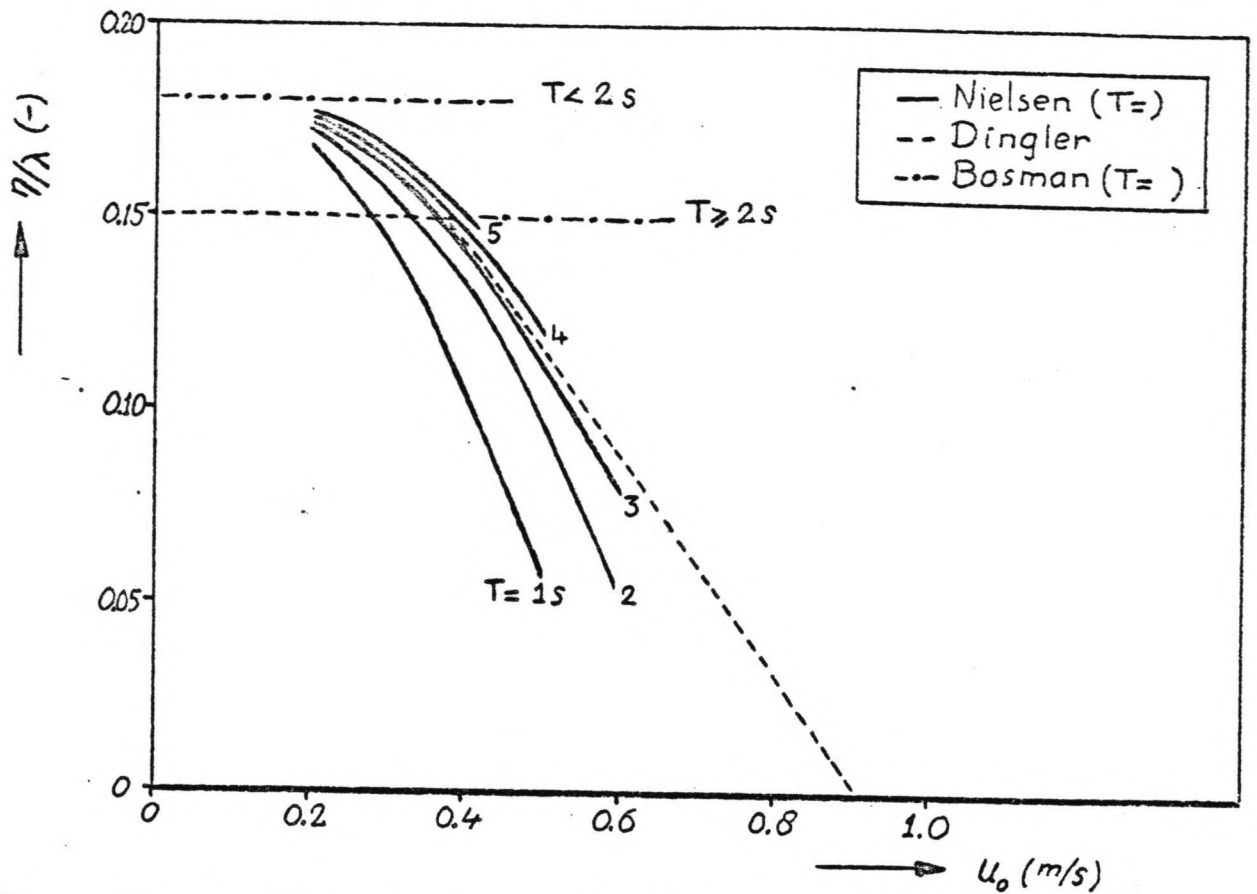
Figuur 9b : Ribbellengte volgens Mogridge en Kamphuis.



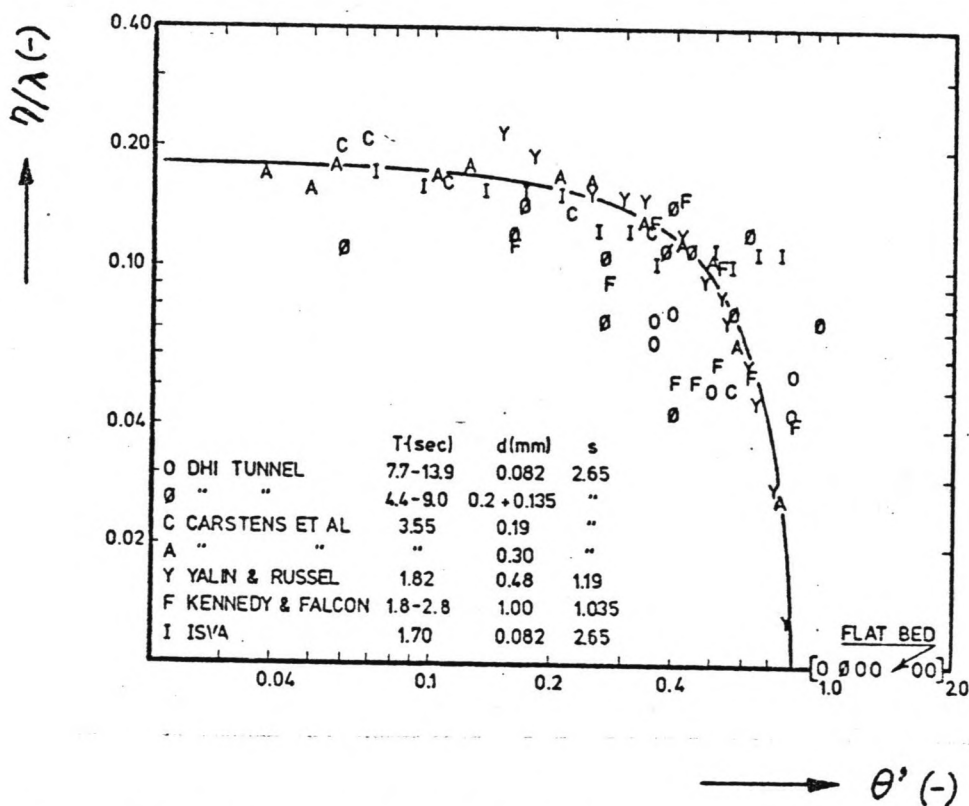
Figuur 9c: Ribbellengte volgens Bosman (M1695-I).



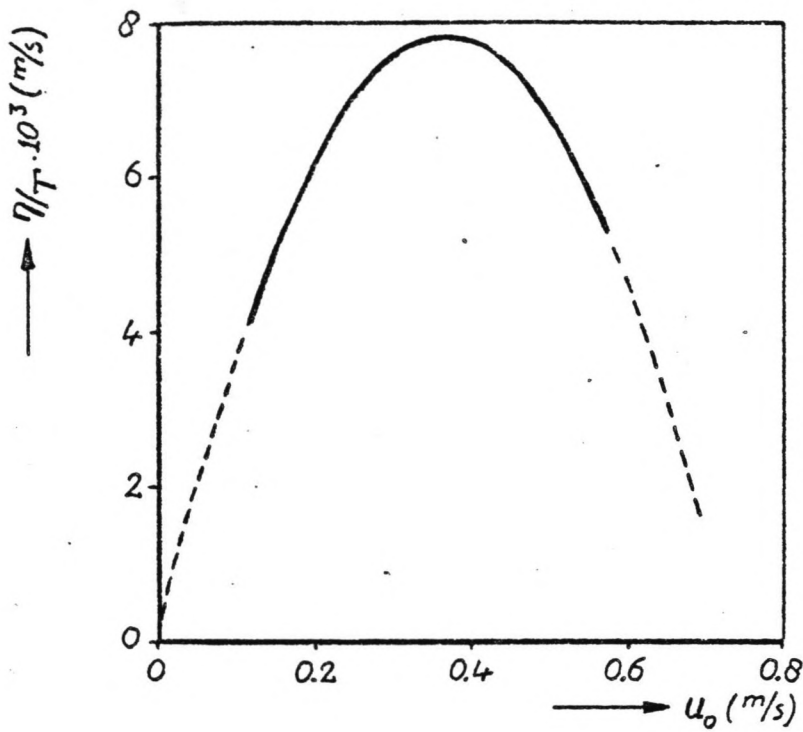
Figuur 9d: Ribbellengte volgens Nielsen.



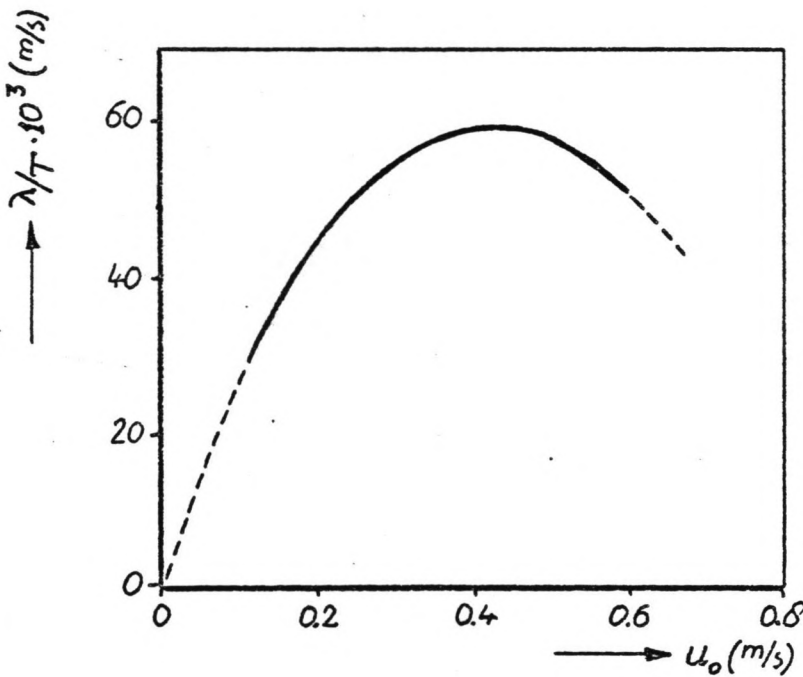
Figuur 10a : Ribbelsteilheid volgens diverse verbanden.



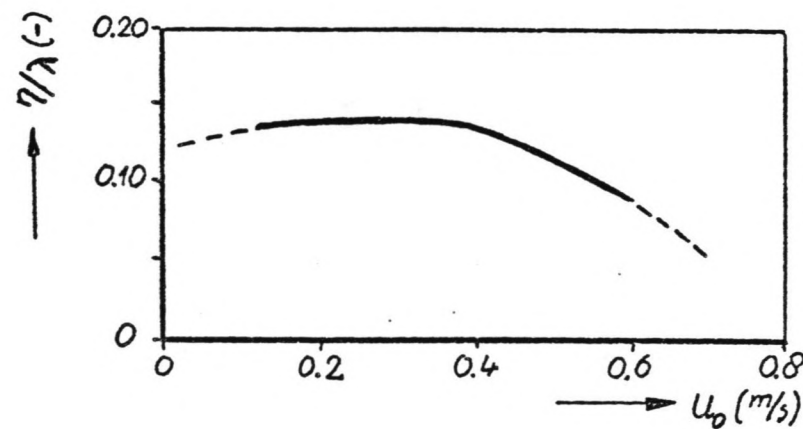
Figuur 10b : Ribbelsteilheid volgens Nielsen.



11a : Ribbelhoogte.

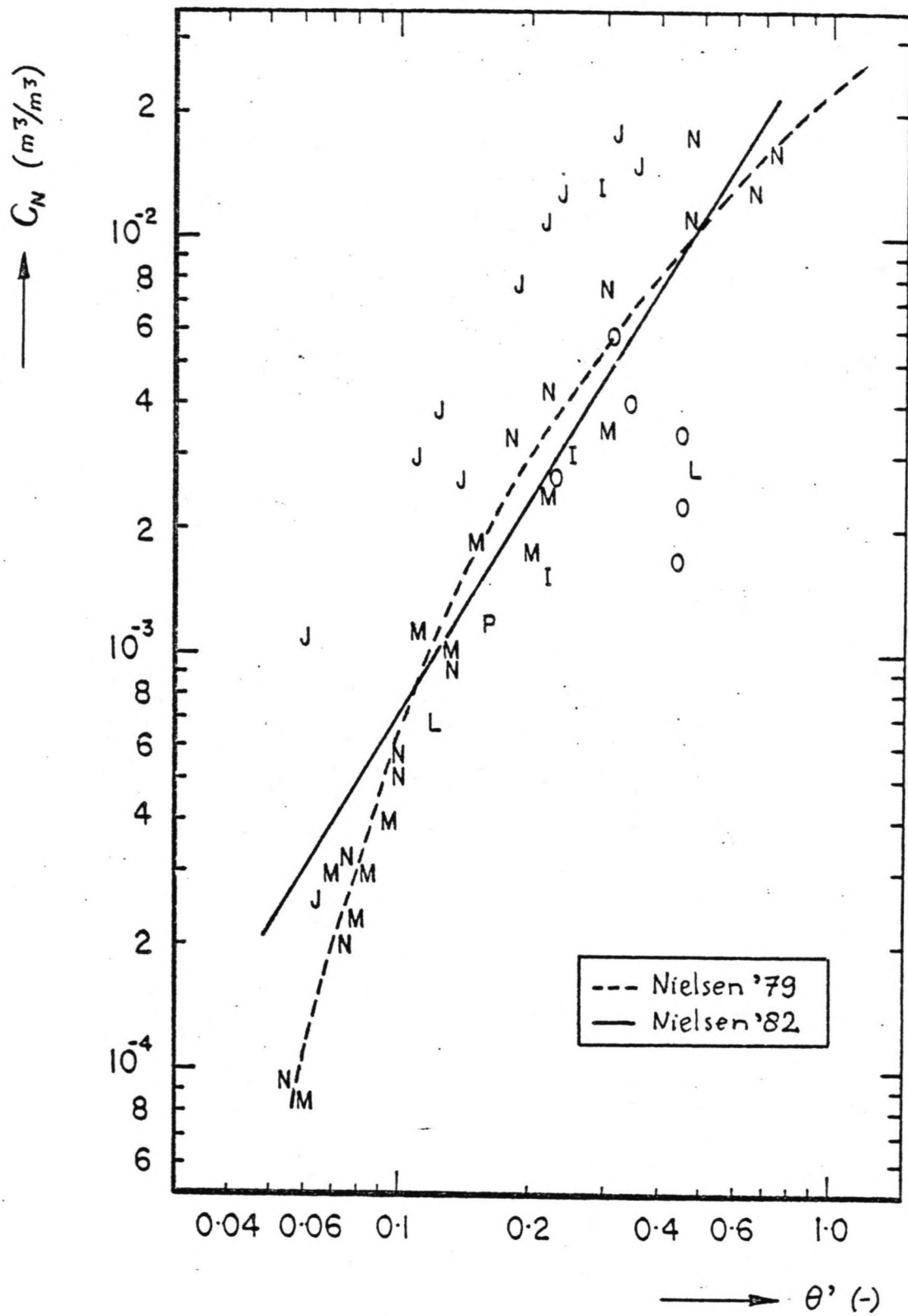


11b : Ribbellengte.

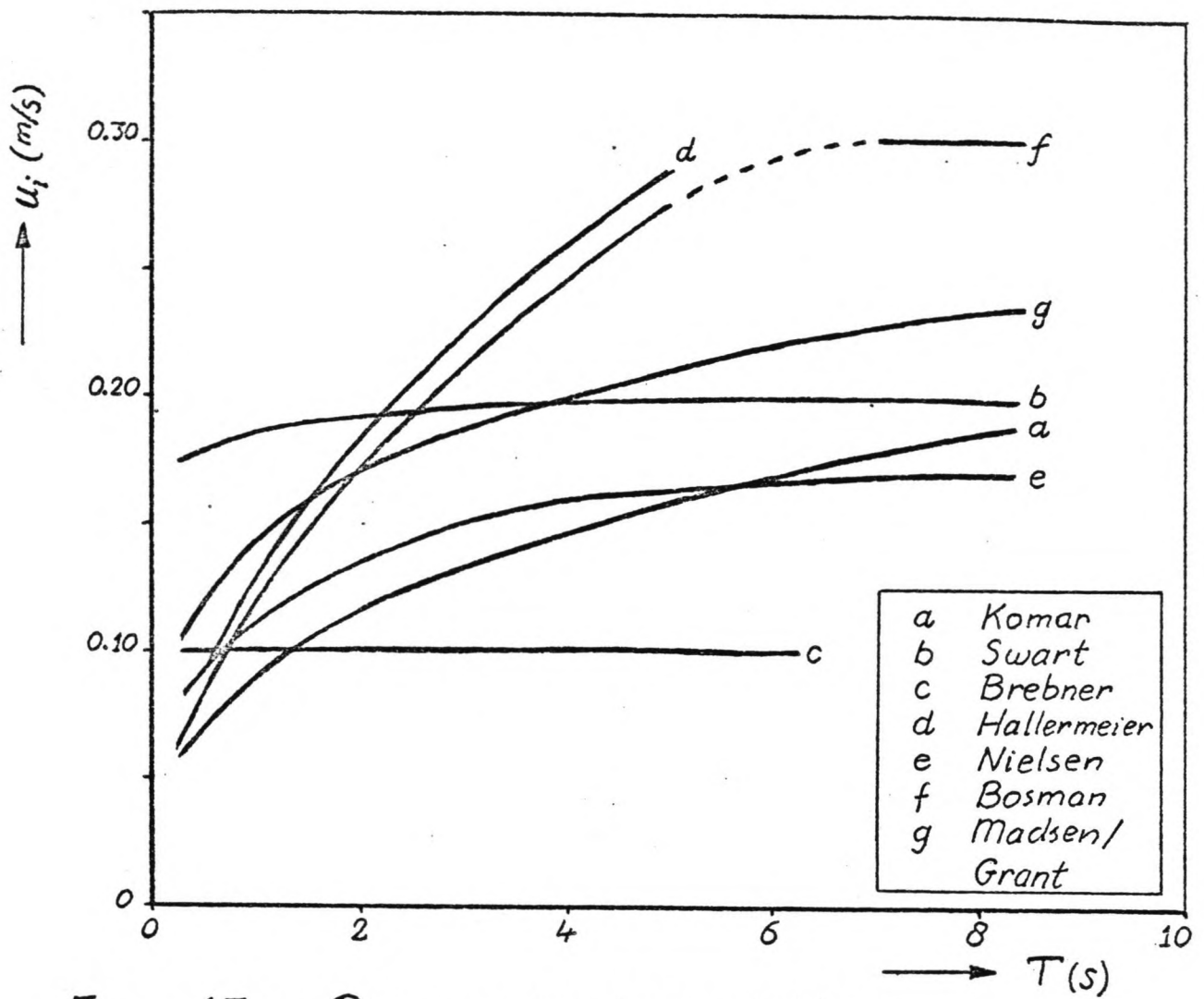


11c : Ribbelsteilheid.

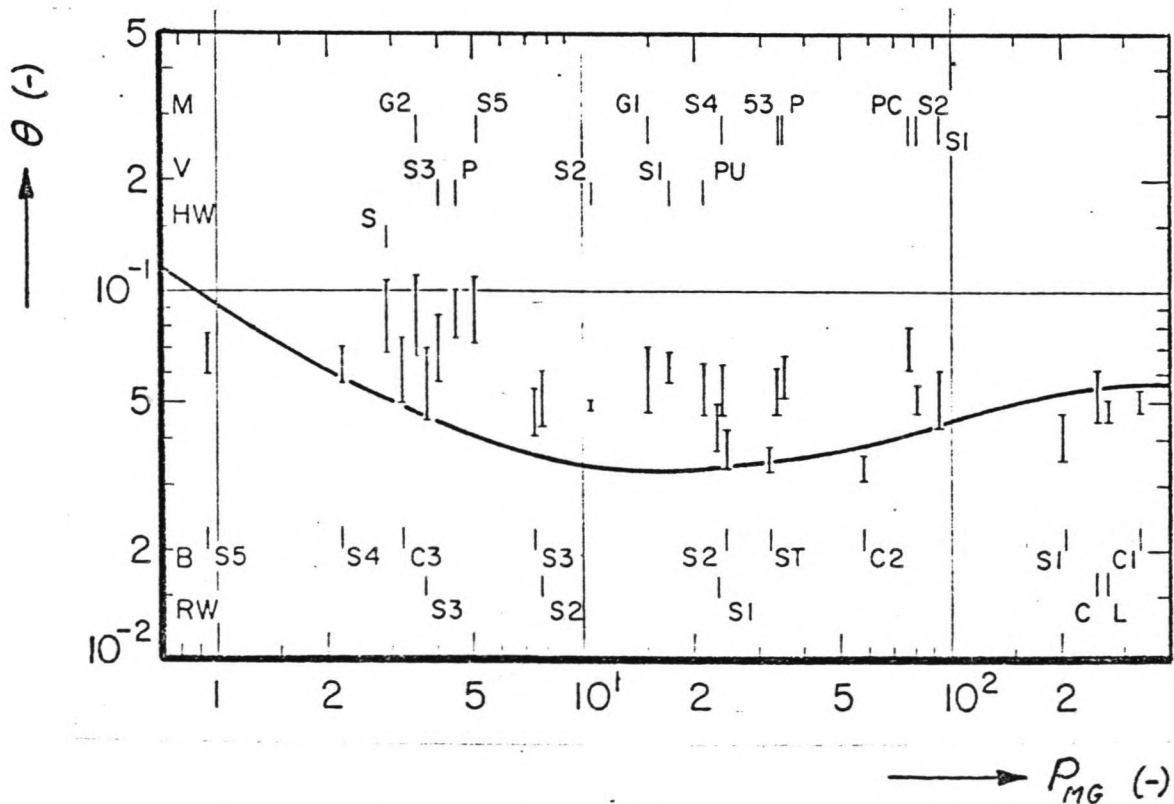
Figuur 11 : Ribbelgeometrie voor ongezeefd duinzand ($D_{50} = 218 \mu\text{m}$) volgens Nielsen.



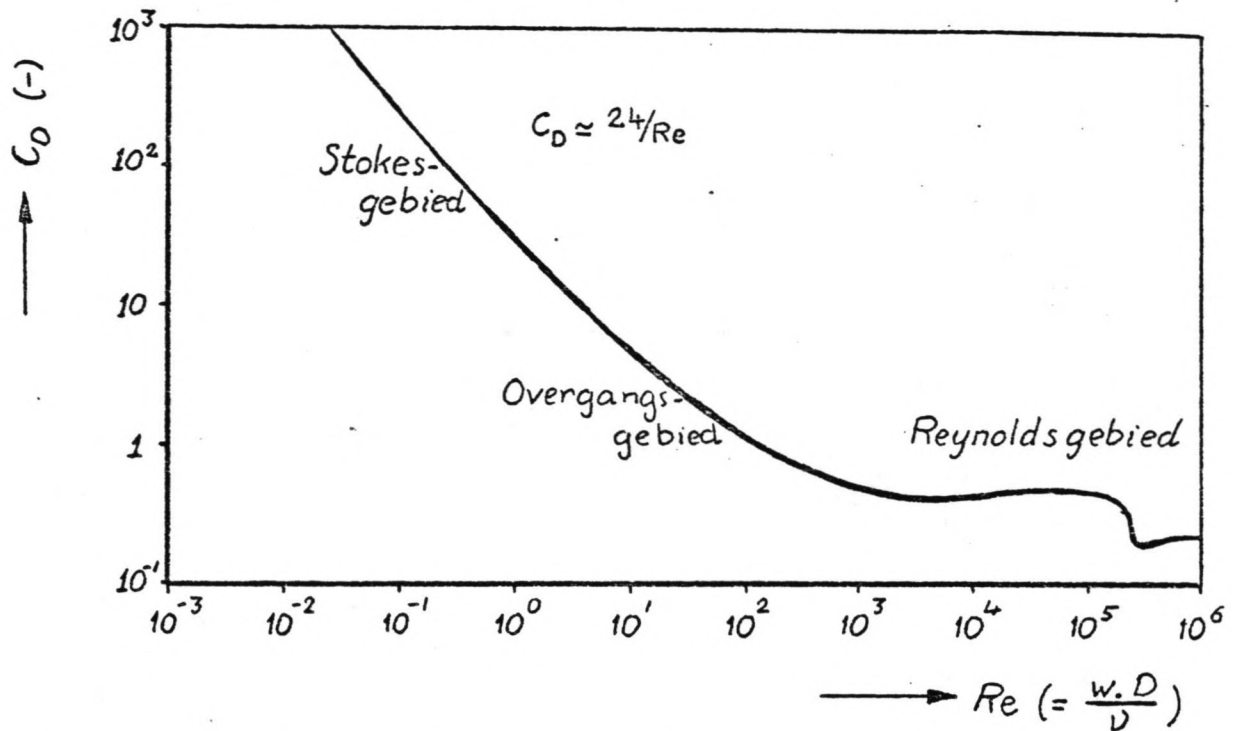
Figuur 12: Concentraties op ribbeltopniveau gerelateerd aan de Shieldsparameter; volgens Nielsen.



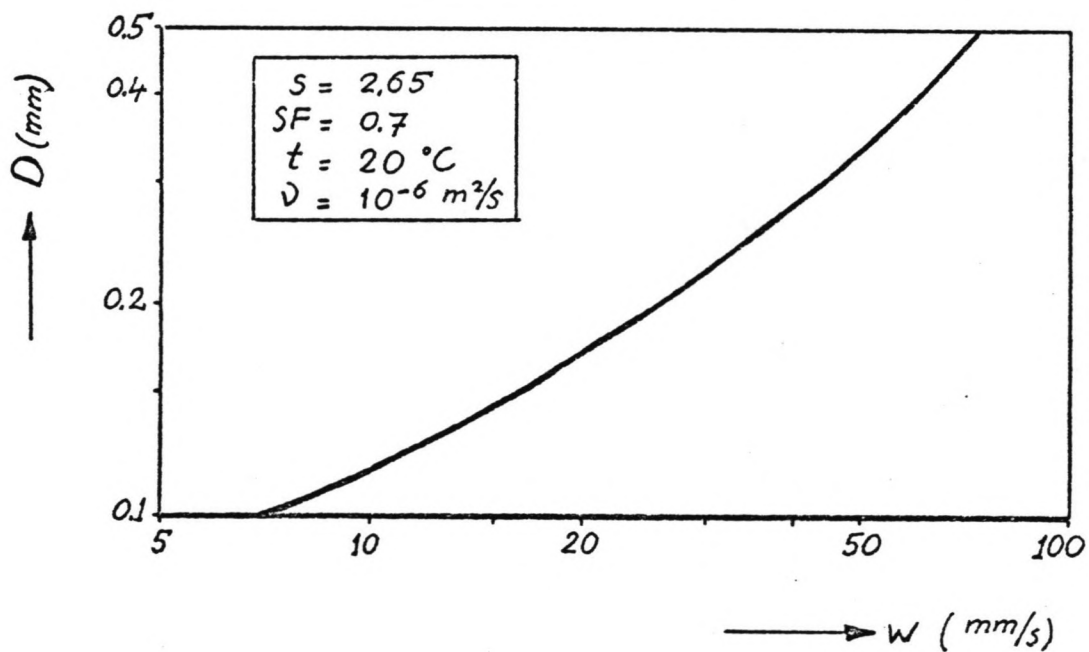
Figuur 13a : Diverse verbanden voor het begin van beweging voor ongezeefd duinzand.



Figuur 13b : Kritische Shieldswaarden volgens Madsen en Grant.

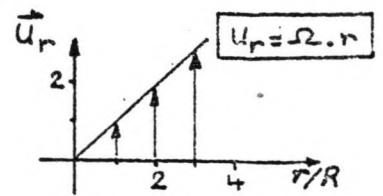
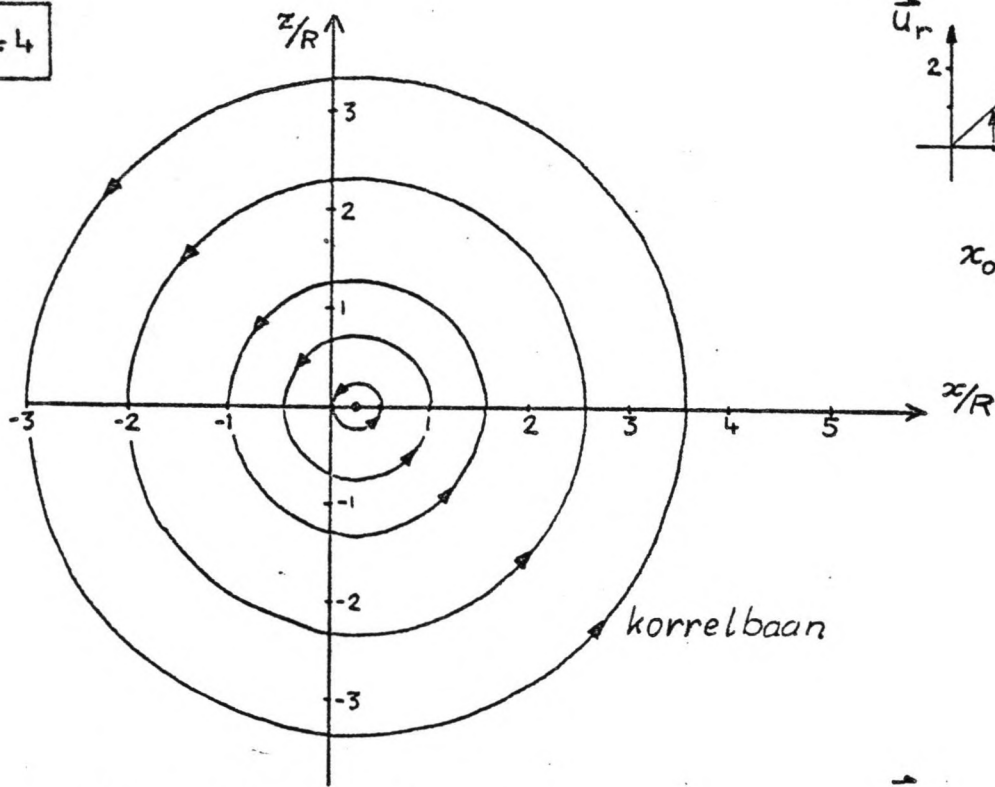


Figuur 14a : Coëfficiënt C_D als functie van het Reynoldsgetal.



Figuur 14b : Verband tussen de diameter (D) en de valsnelheid (w).

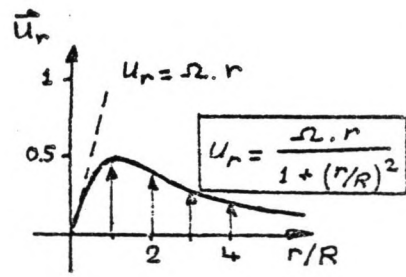
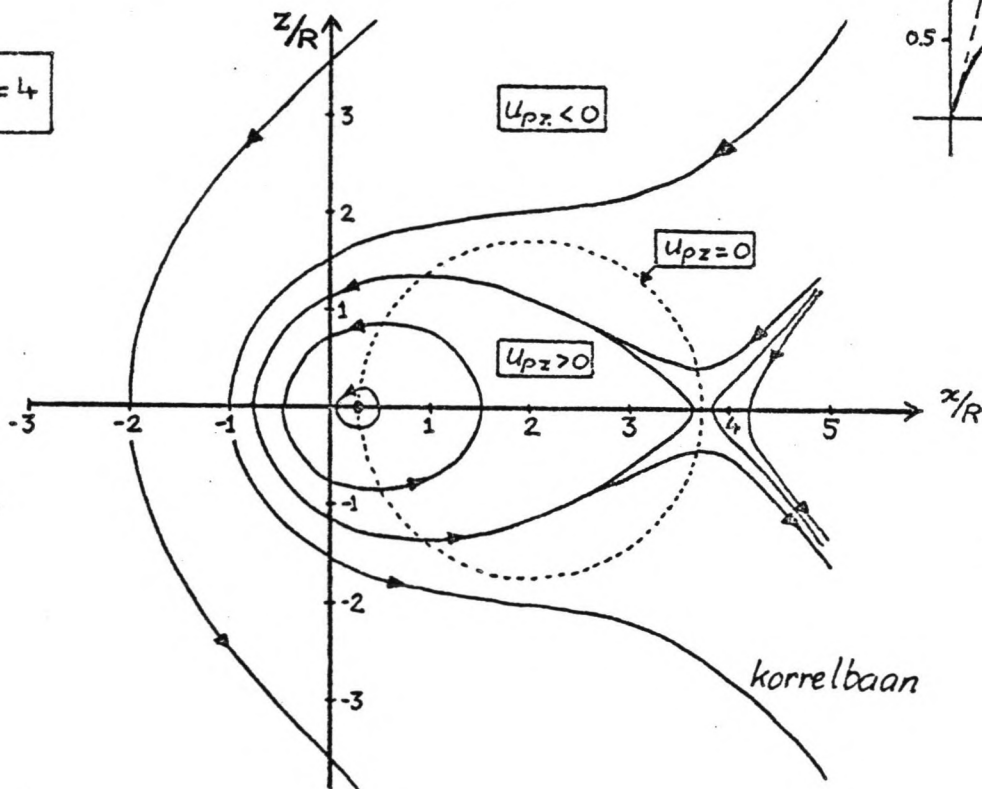
$$\frac{\Omega \cdot R}{\omega} = 4$$



$$x_0 = 1/4$$

15a: Standaardwervel

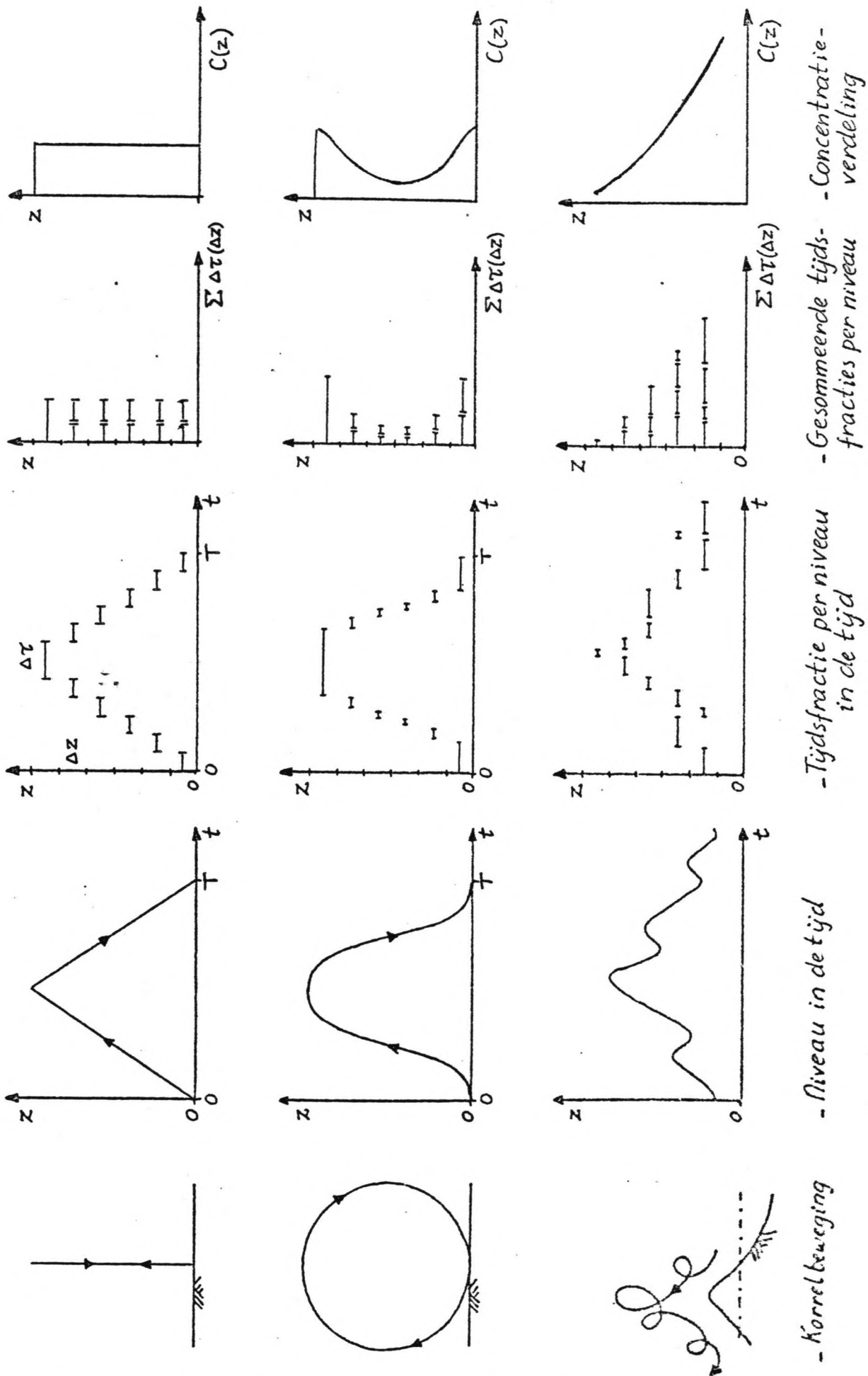
$$\frac{\Omega \cdot R}{\omega} = 4$$



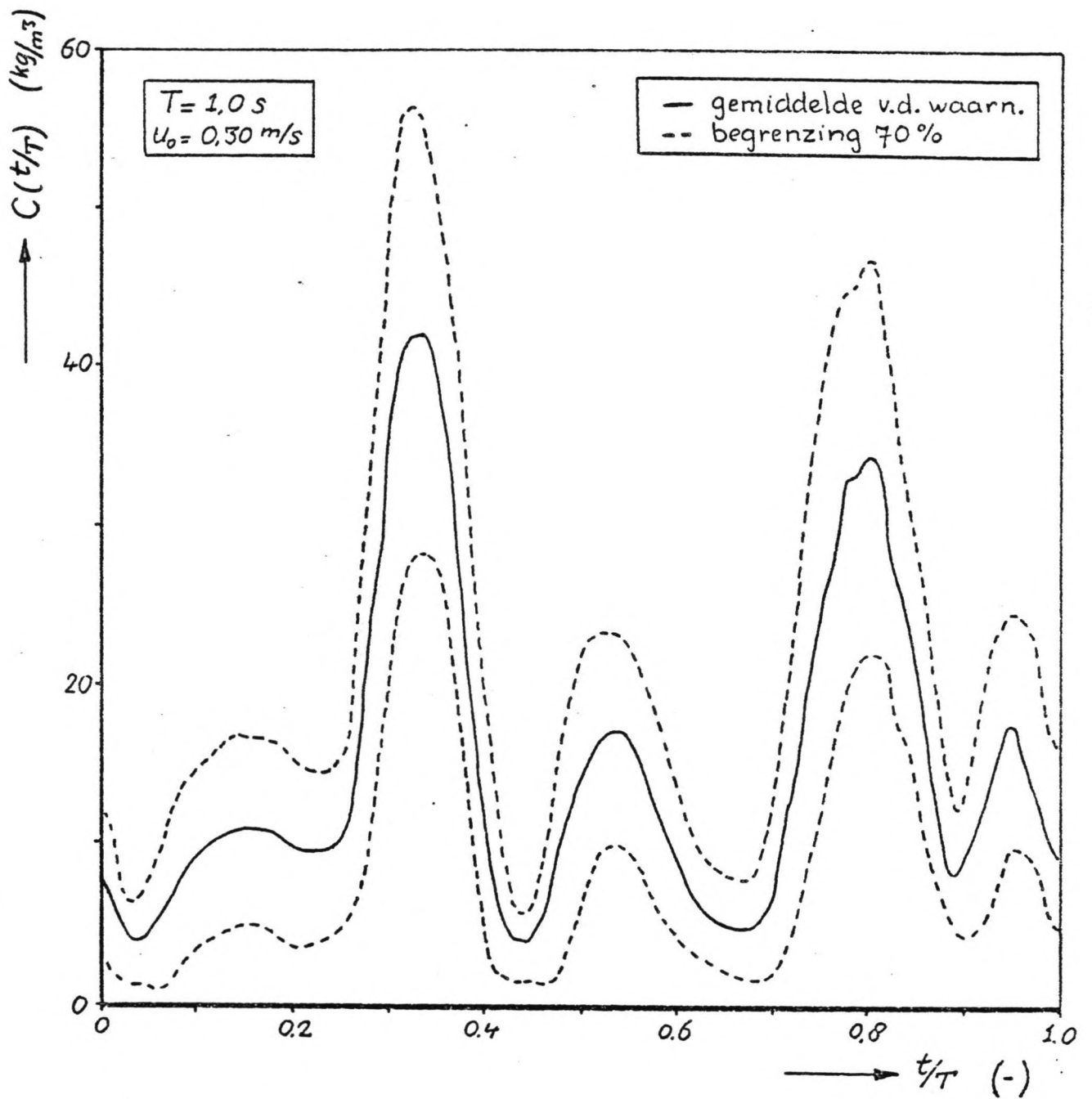
15b: Rankine wervel

(Nielsen, 1982)

Figuur 15: Korrelbewegingen in een wervel.



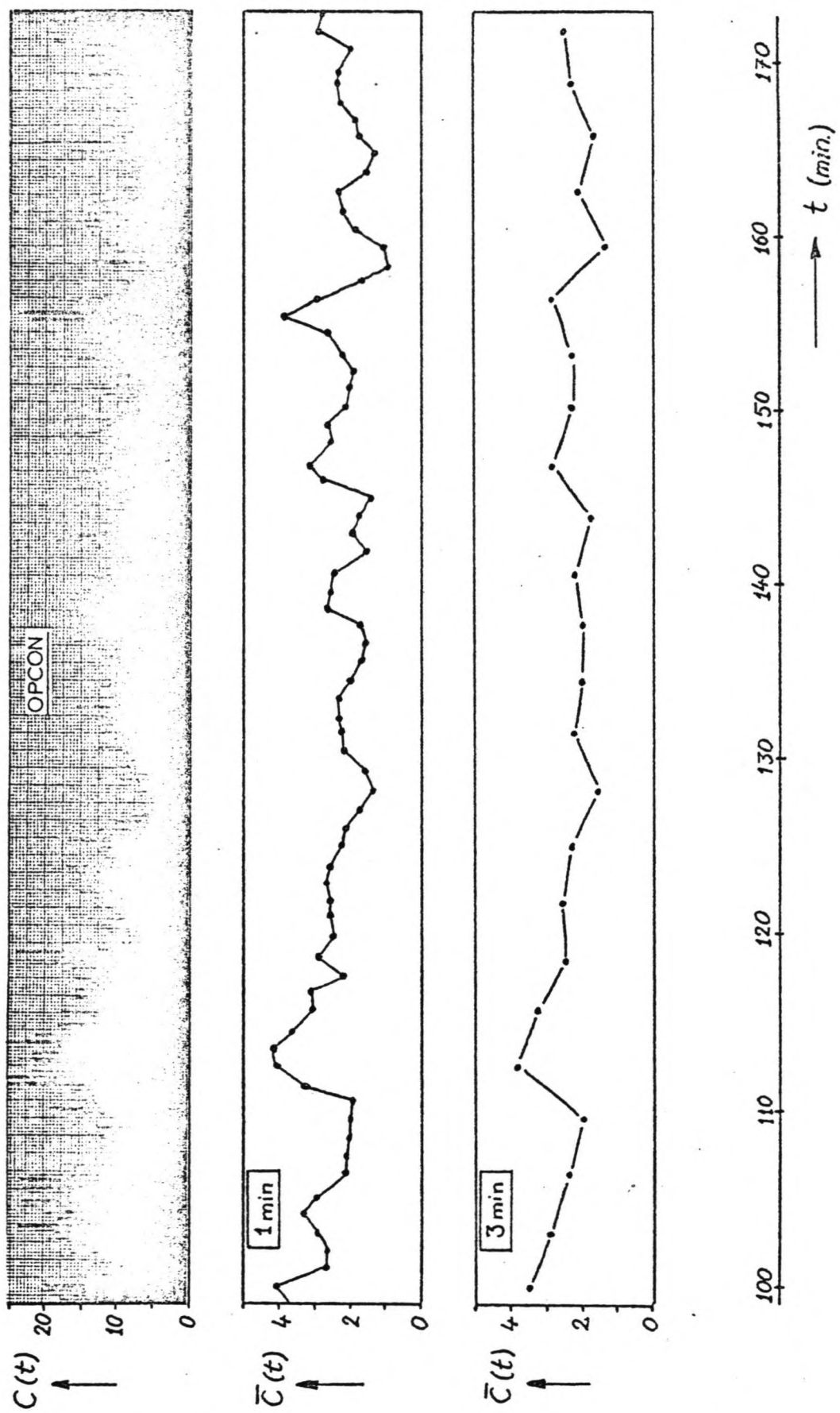
Figuur 16: Concentratie als kans voor een drietal korrelbewegingen.



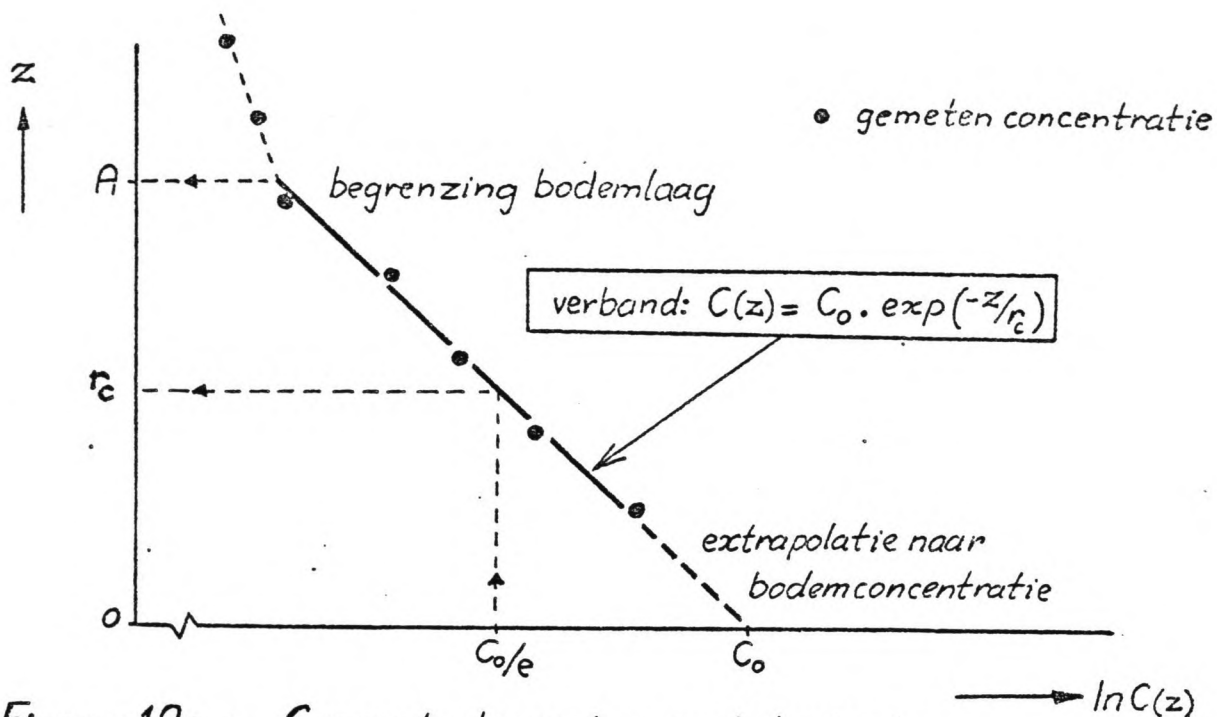
(bron: Bosman, M1695-II)

Figuur 17: Concentratie op 10 mm boven een ribbeltop gemiddeld over 99 perioden.

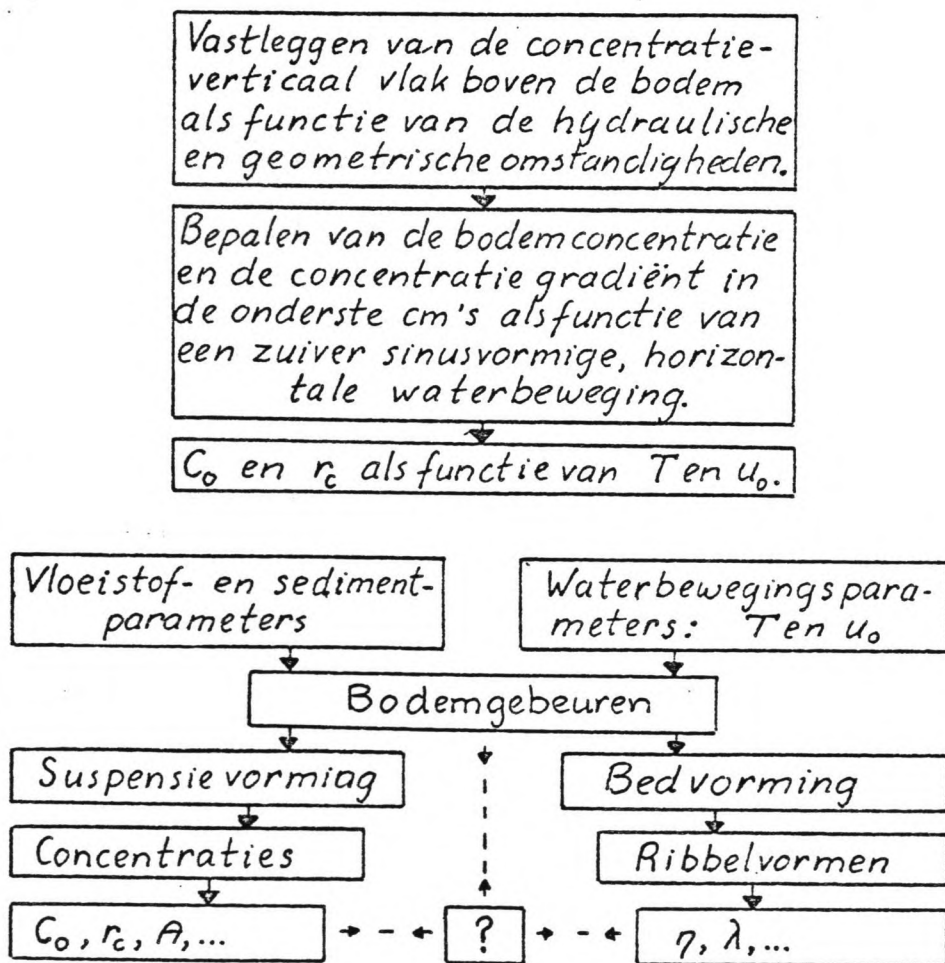
(Bron: Bosman M1695)



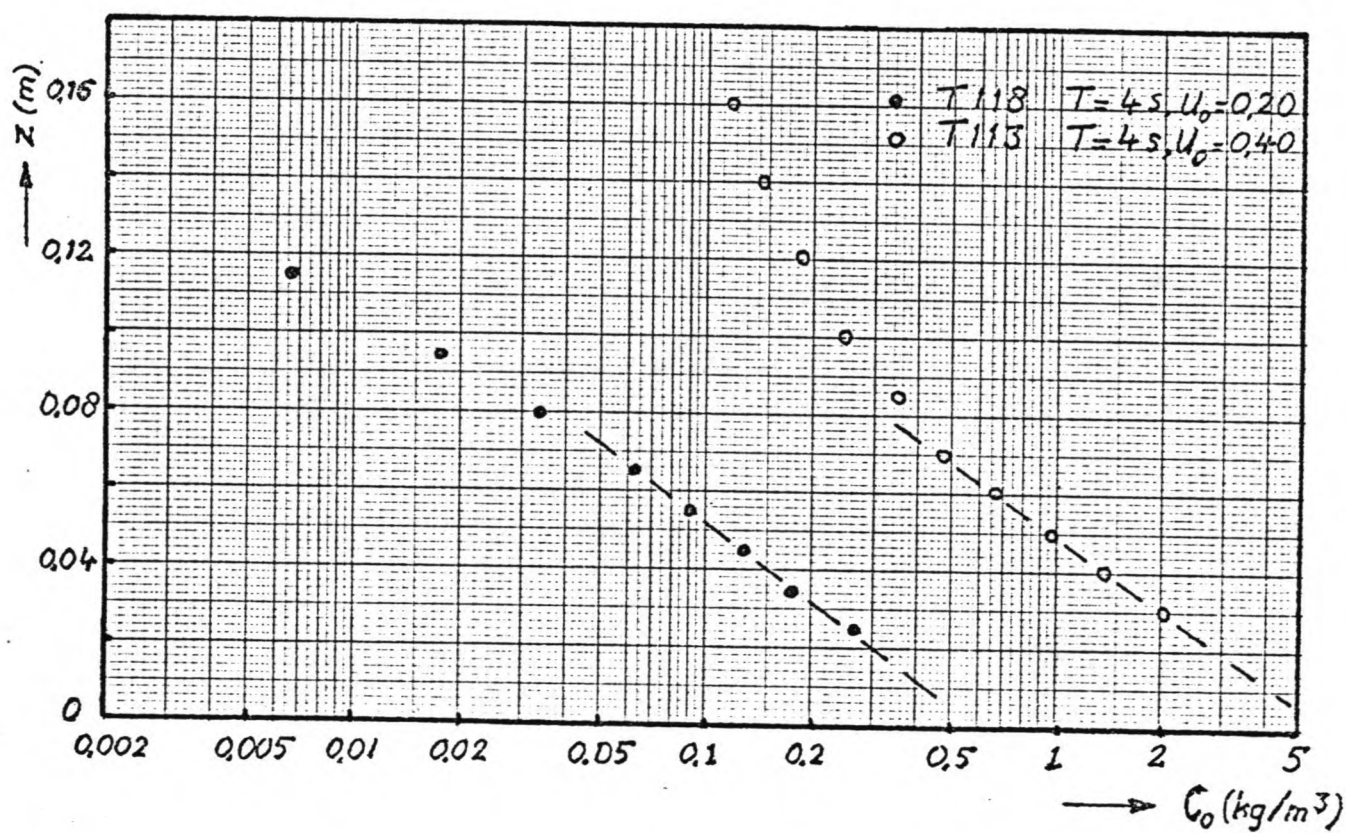
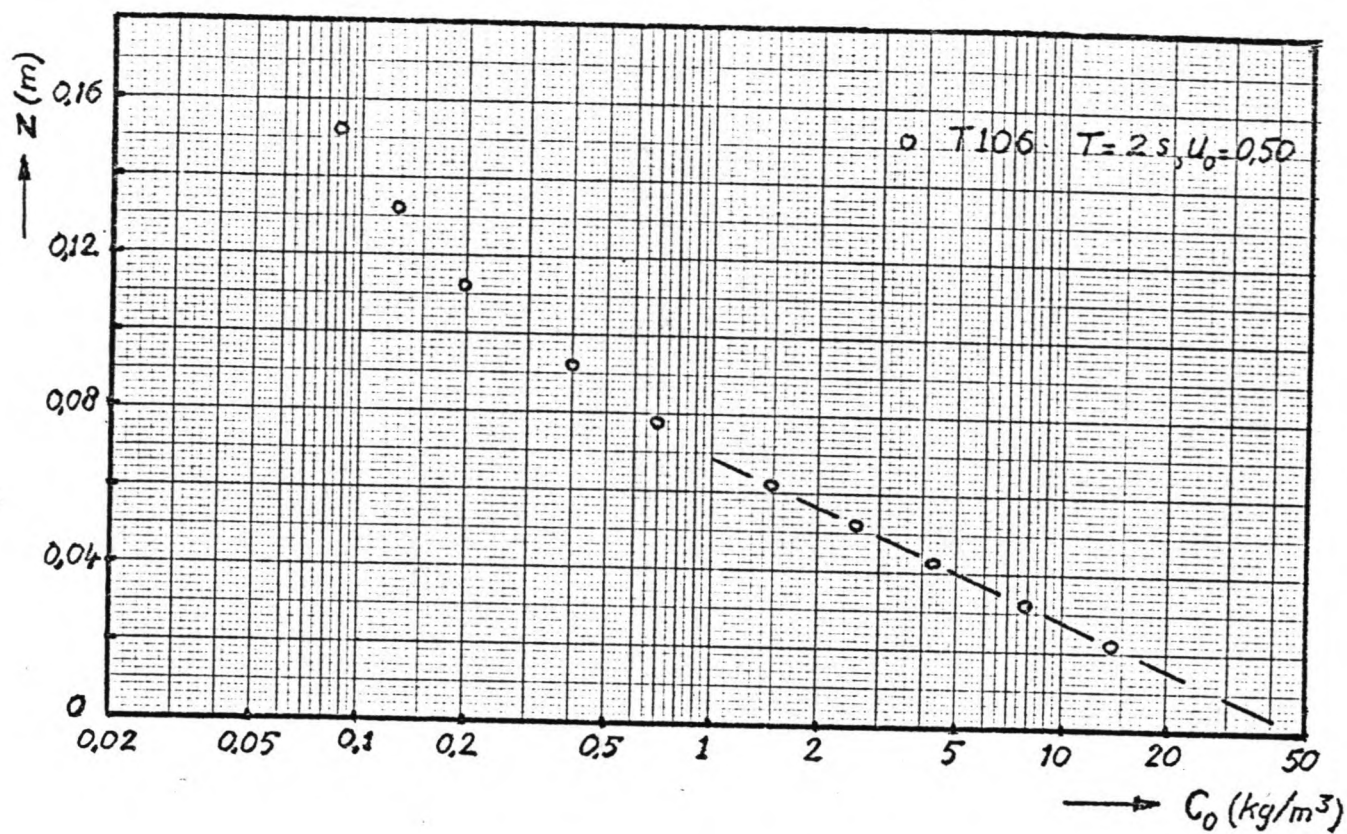
Figuur 18 : Concentraties in een vast punt als functie van de tijd ($T=3s$, $u_0 = 0,40$ m/s).



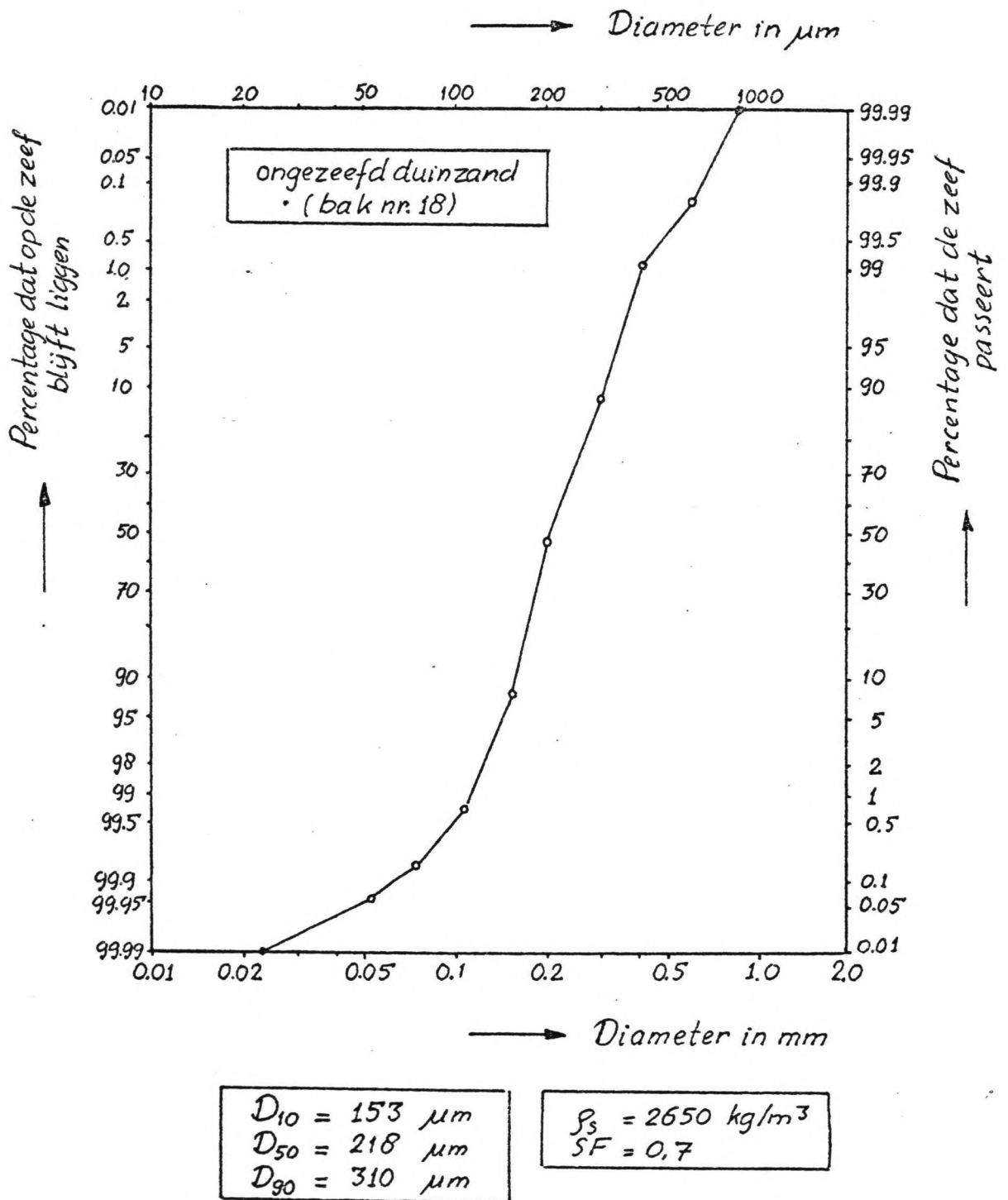
Figuur 19a: Concentratie verloop in de bodemlaag.



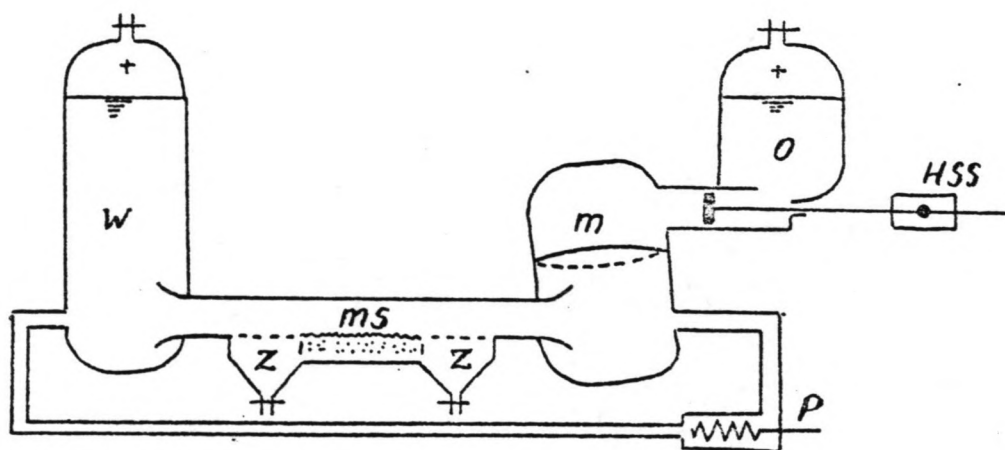
Figuur 19b: Schema doelstelling en relaties bodem-
gebeuren.



Figuur 19c: Voorbeeld van enkele concentratie verticalen.

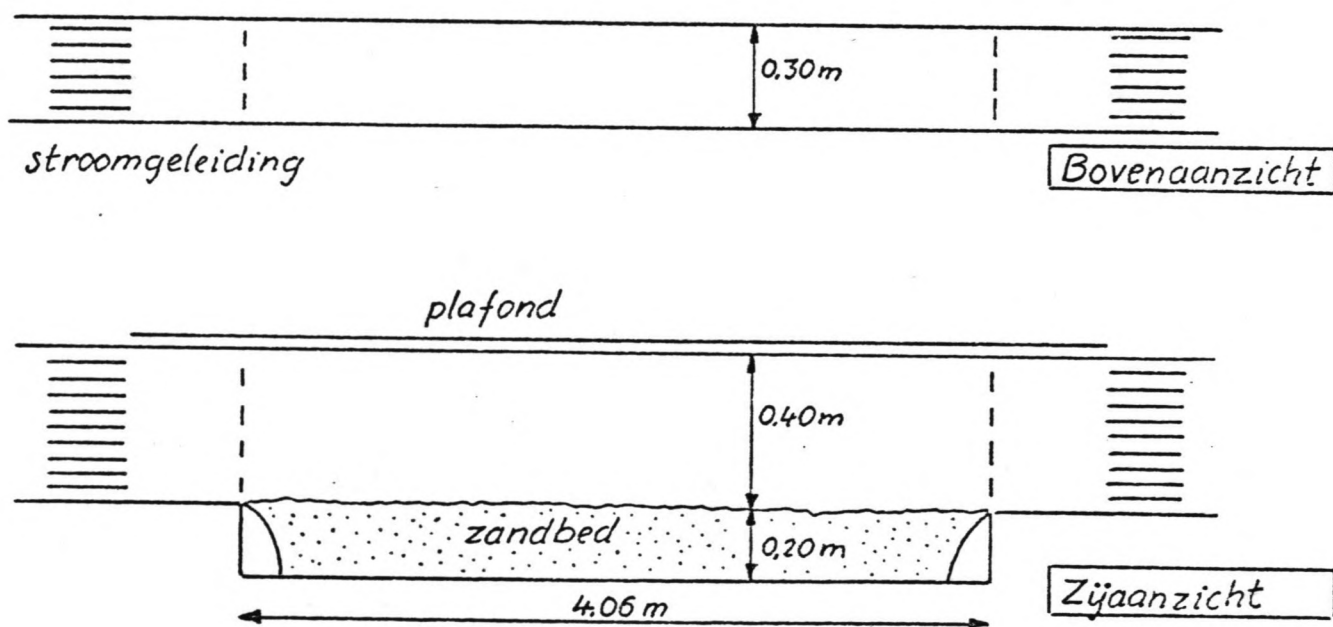


Figuur 20 : Zeefkromme ongezeefd duinzand.

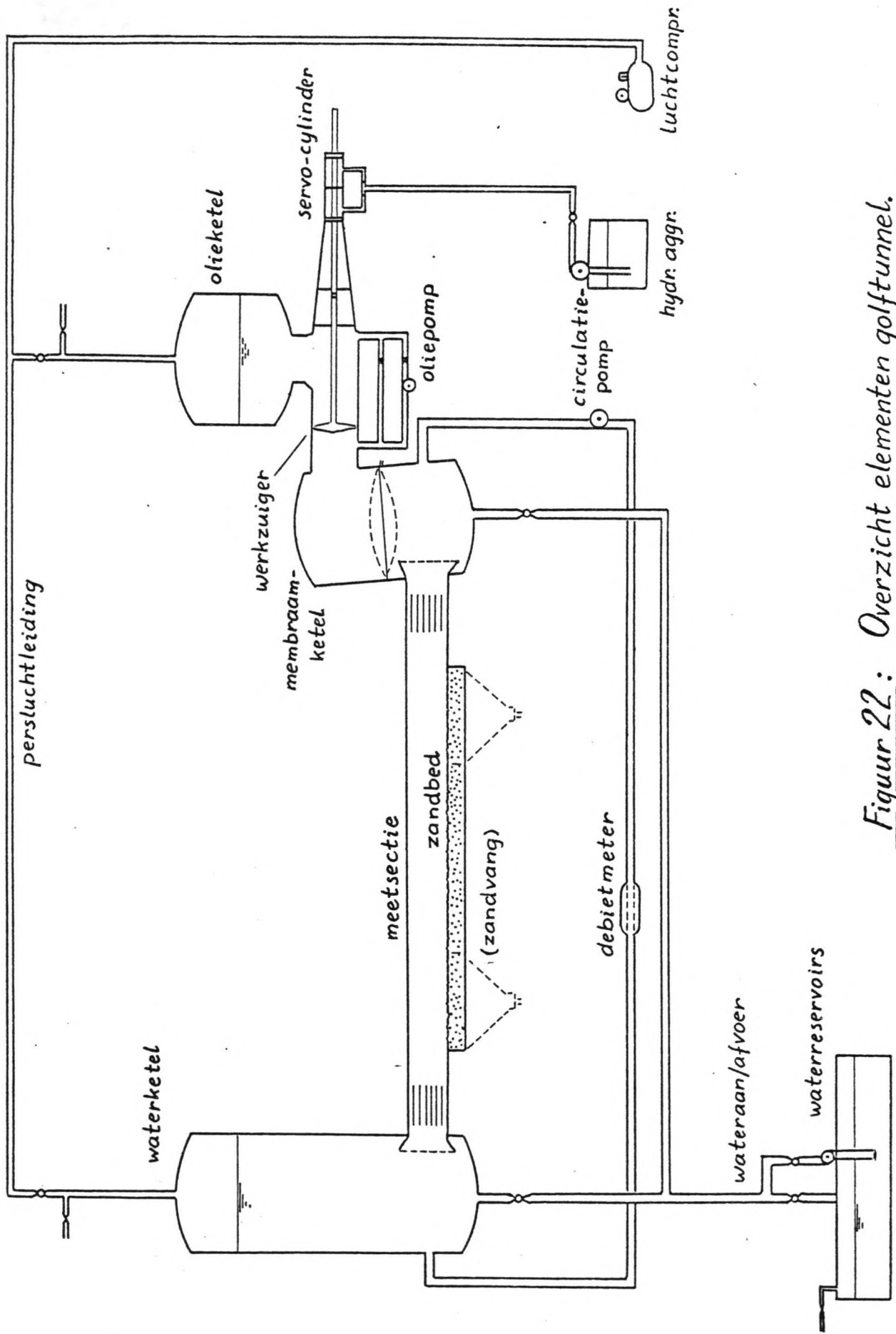


Verkl: W waterketel MS meetsectie
 M membraan P circulatiepomp
 O olieketel HSS hydraulisch
 Z zandvang servo systeem

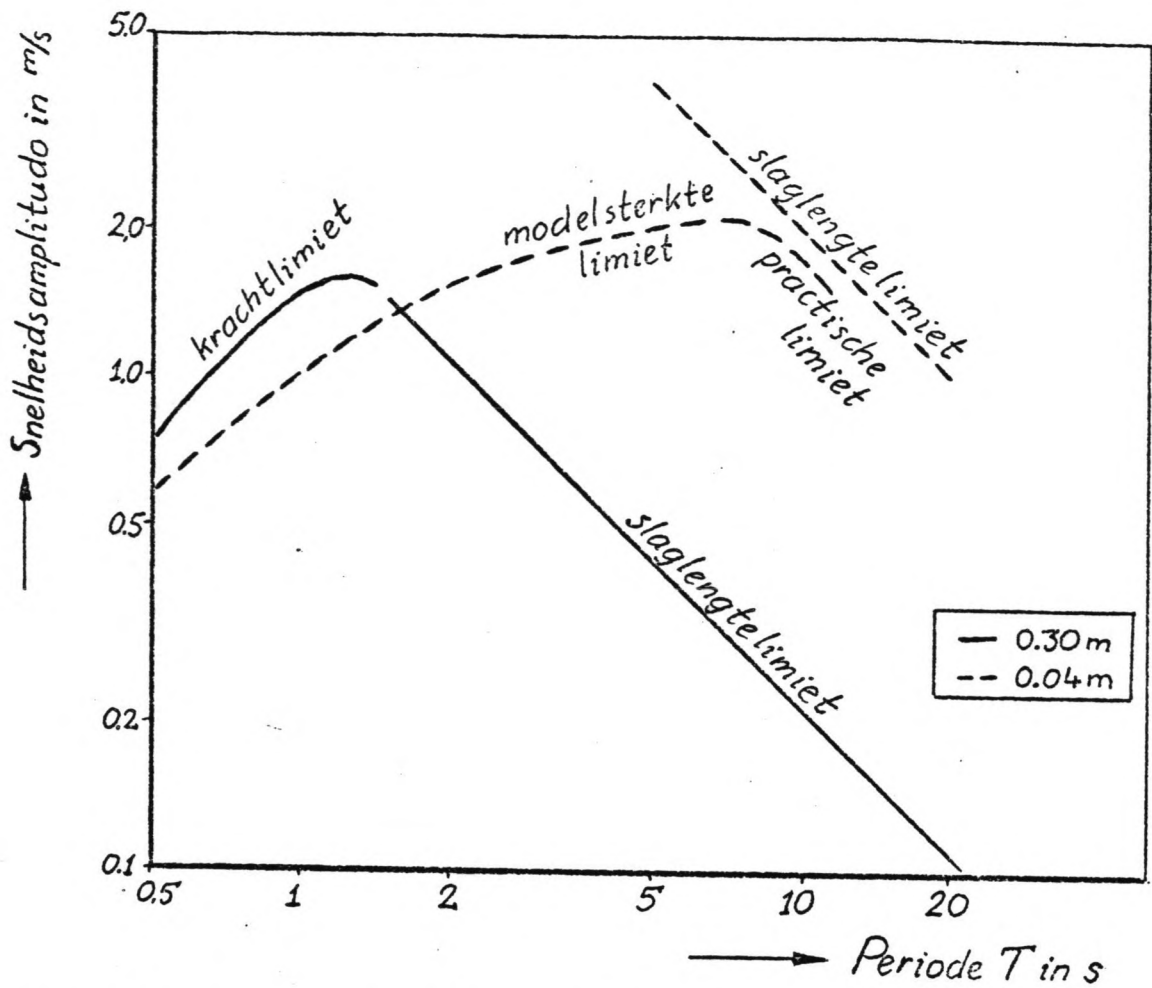
Figuur 21a : Schema van de golftunnel.



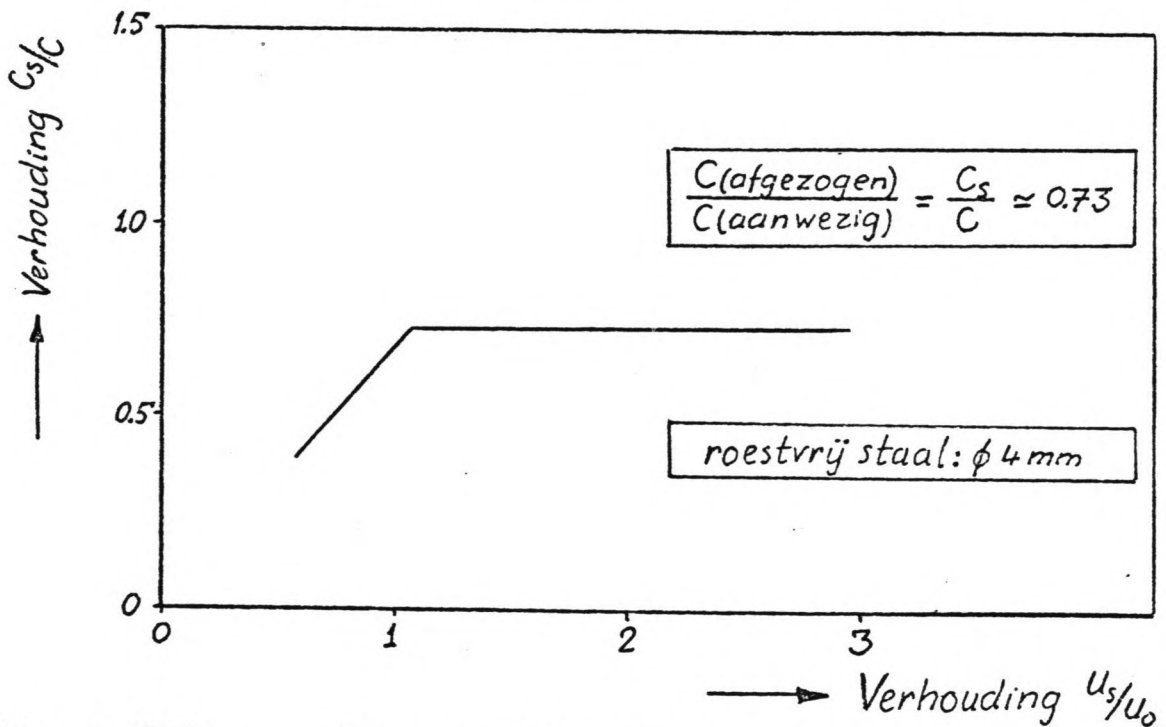
Figuur 21b : Schema van de meetsectie.



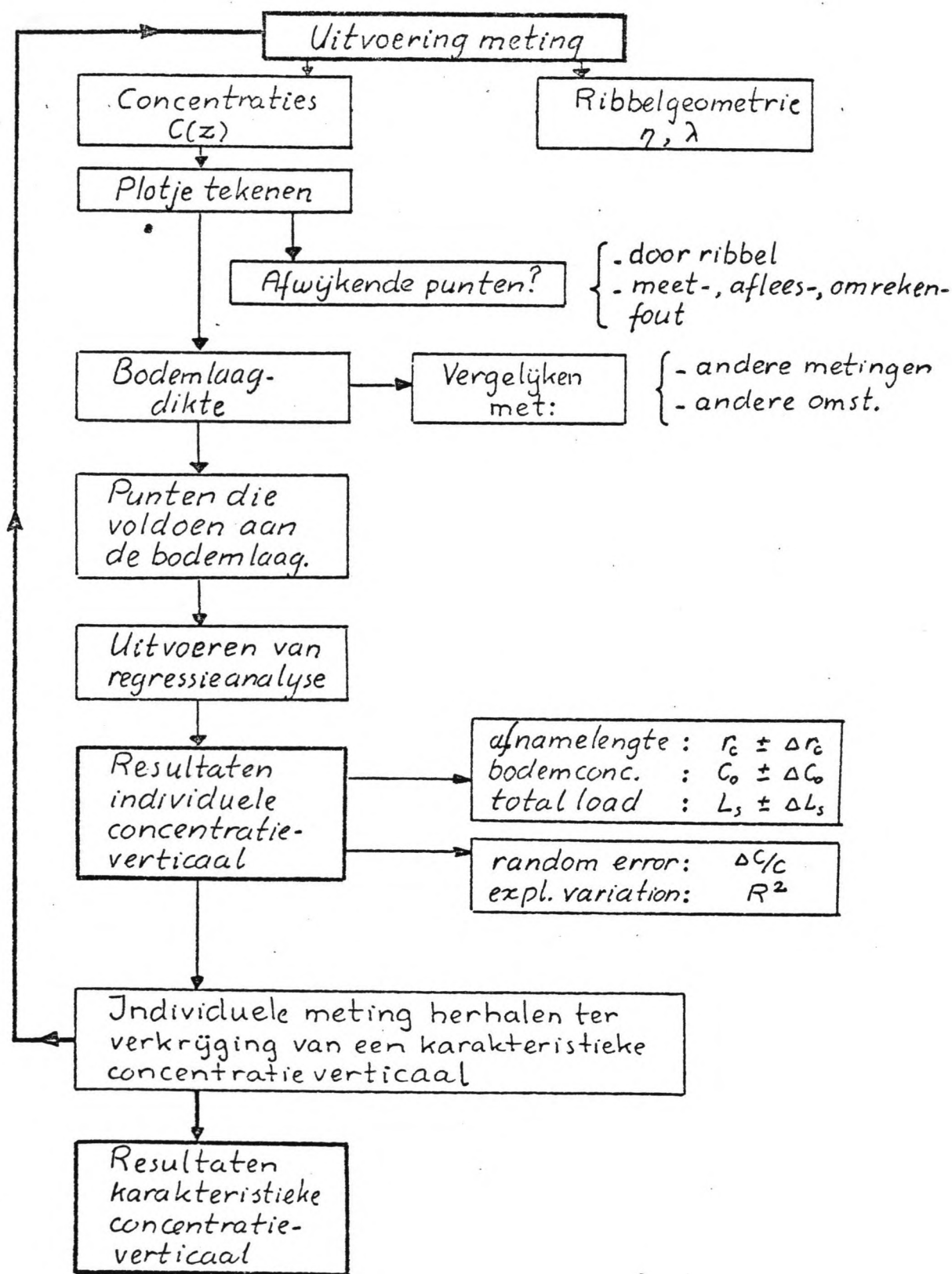
Figuur 22: Overzicht elementen golfunnel.



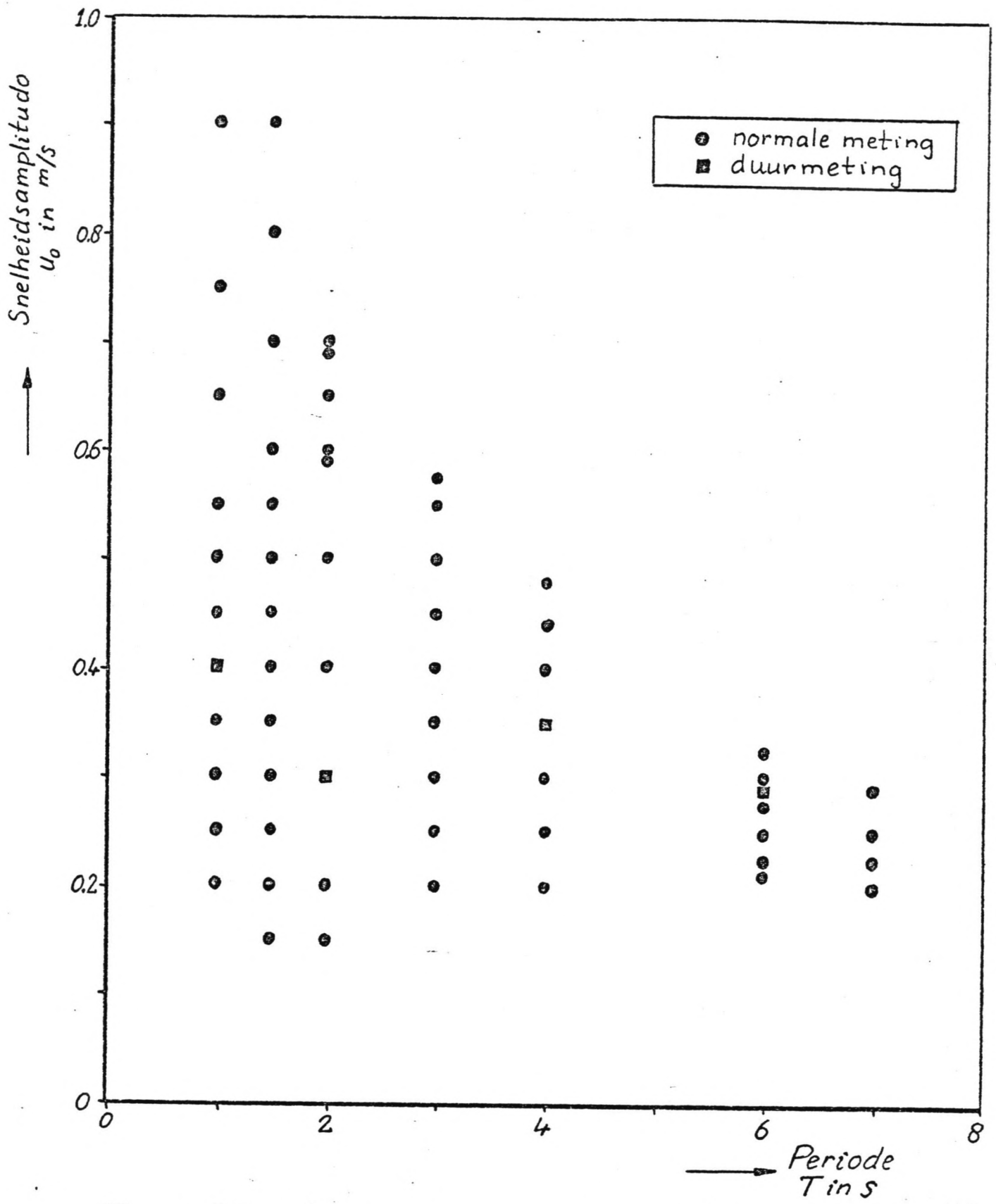
Figuur 23a : Tunnelbereik bij normale en gereduceerde breedte van de meetsectie.



Figuur 23b : Afzuigcalibratie voor dwarse afzuiging. (Bron: Hulsbergen)

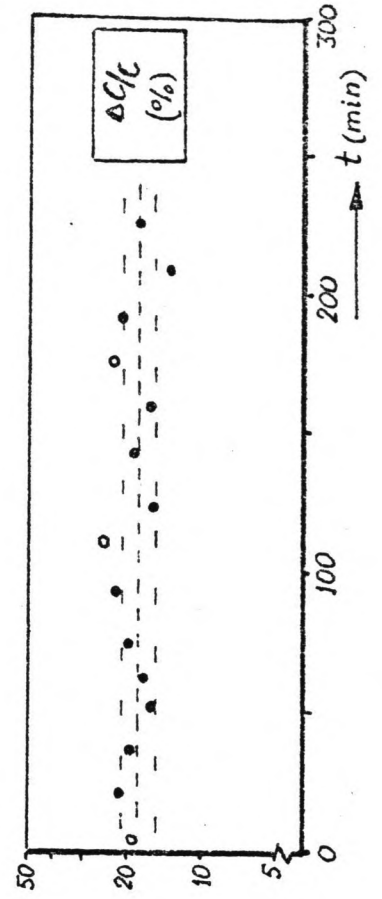
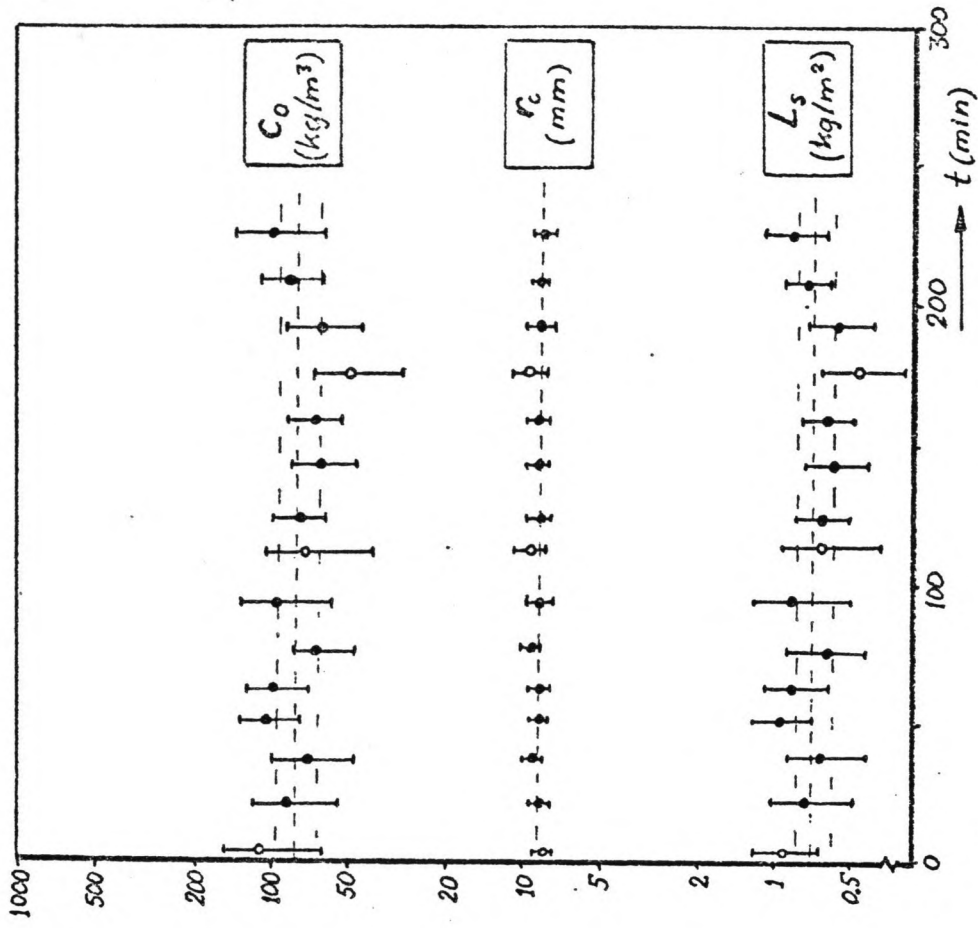
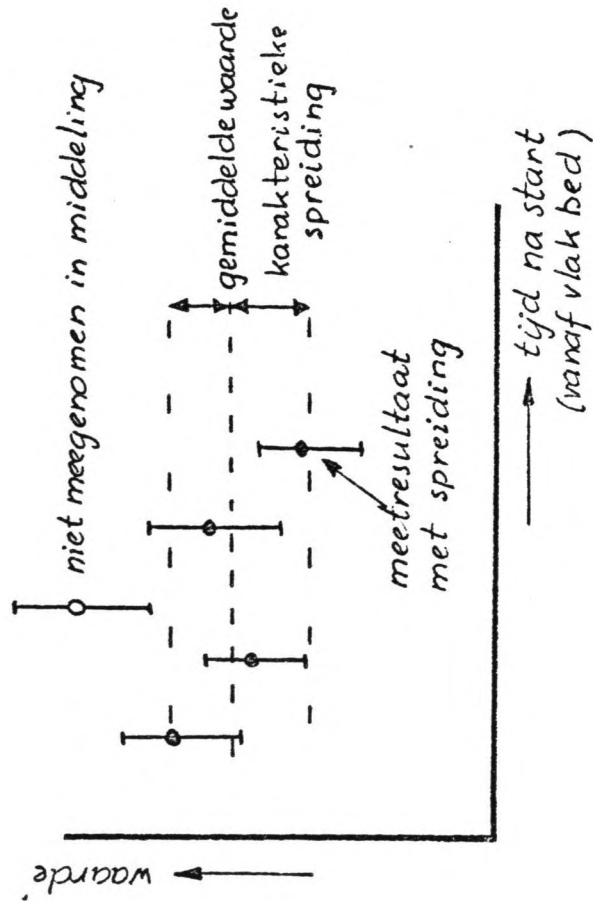


Figuur 24: Schema verwerking concentraties.

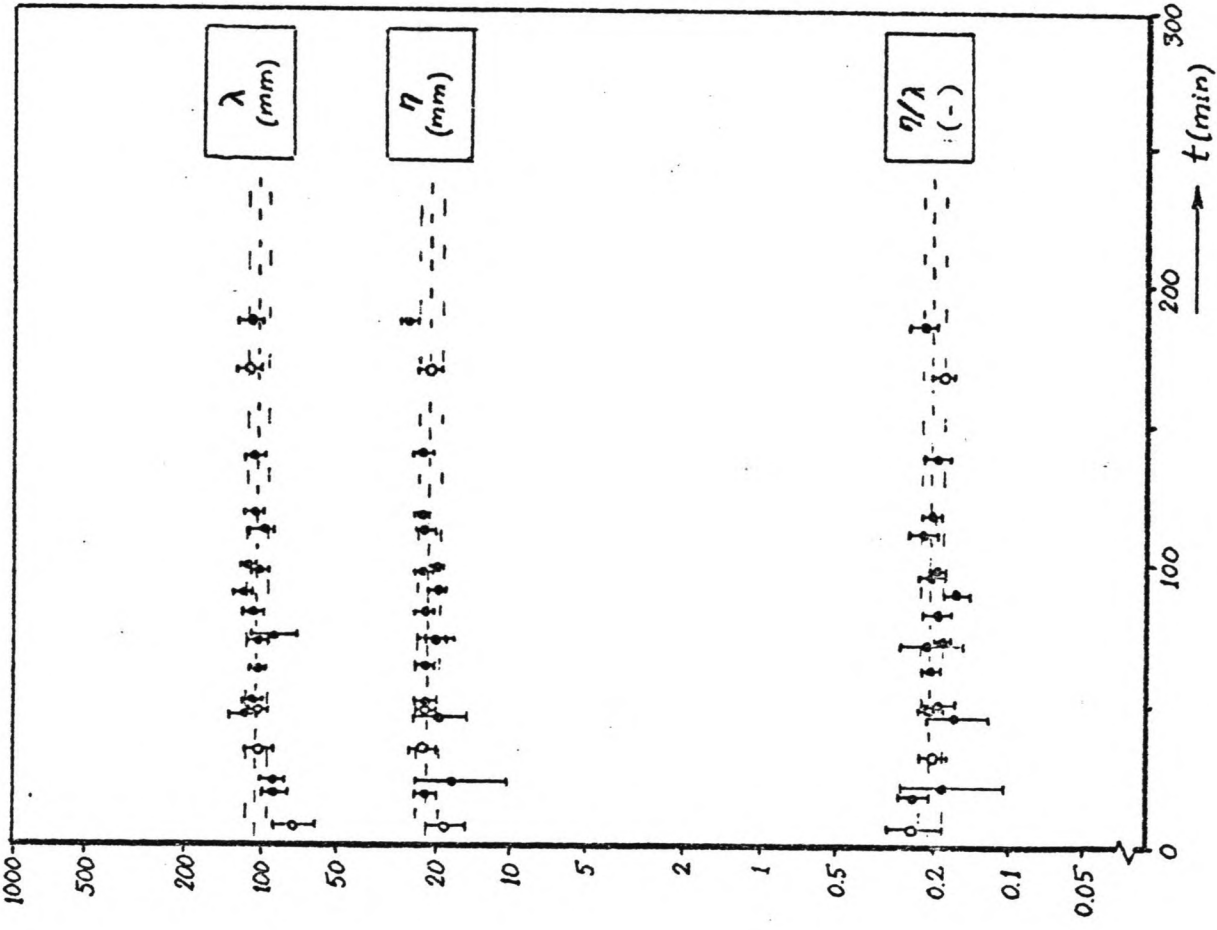
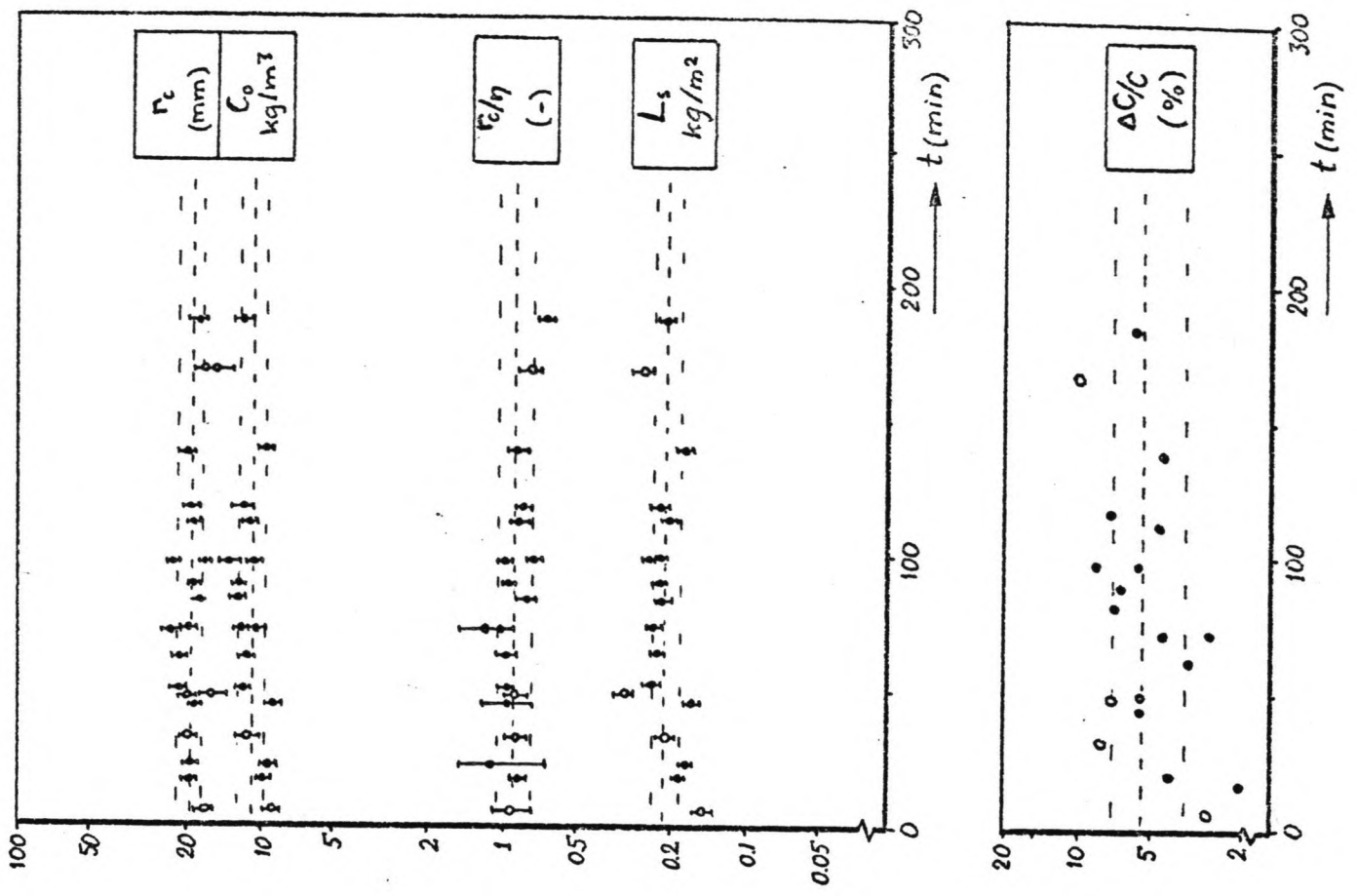


Figuur 25: Overzicht uitgevoerde proeven.

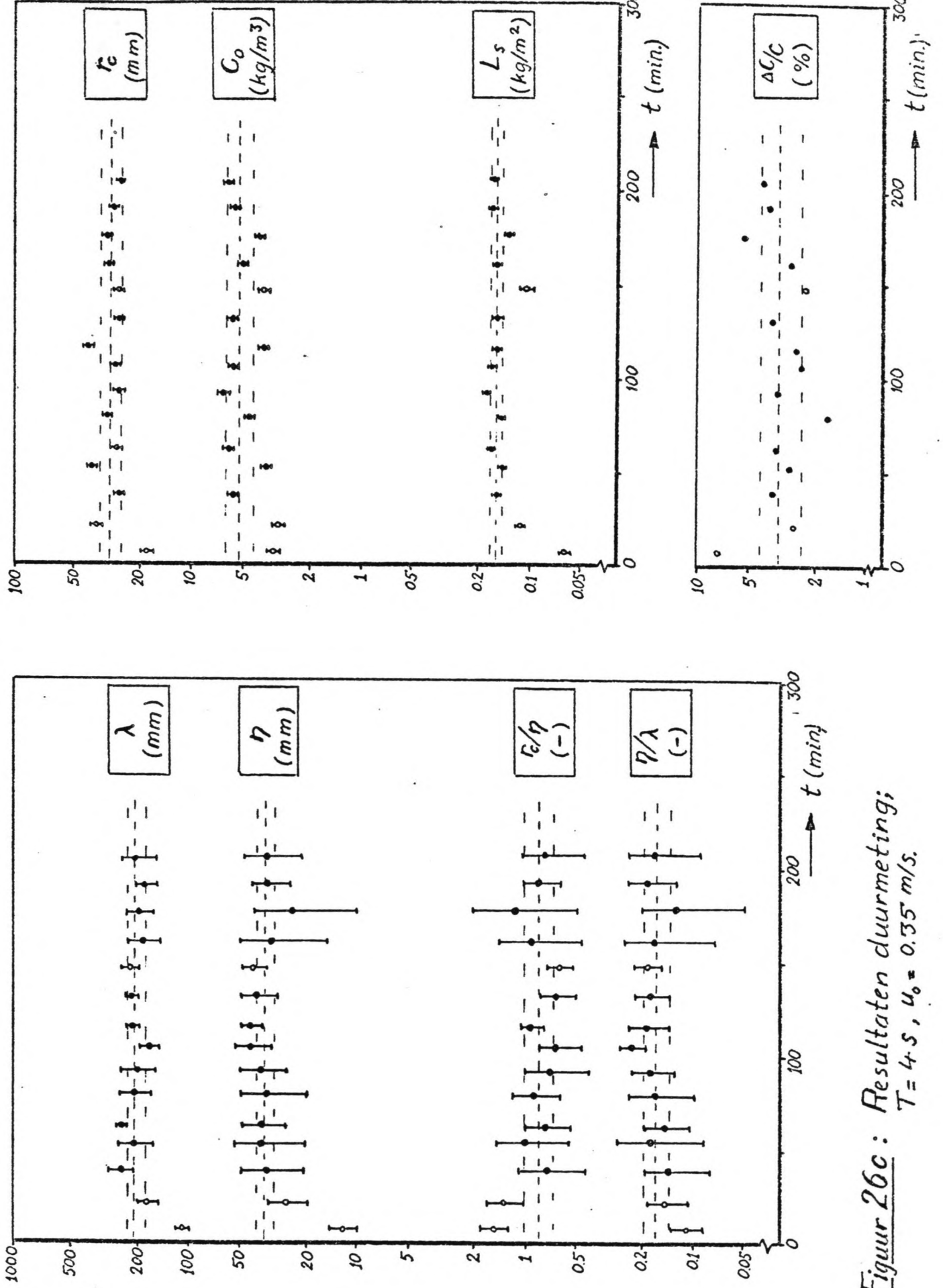
Verklaring:



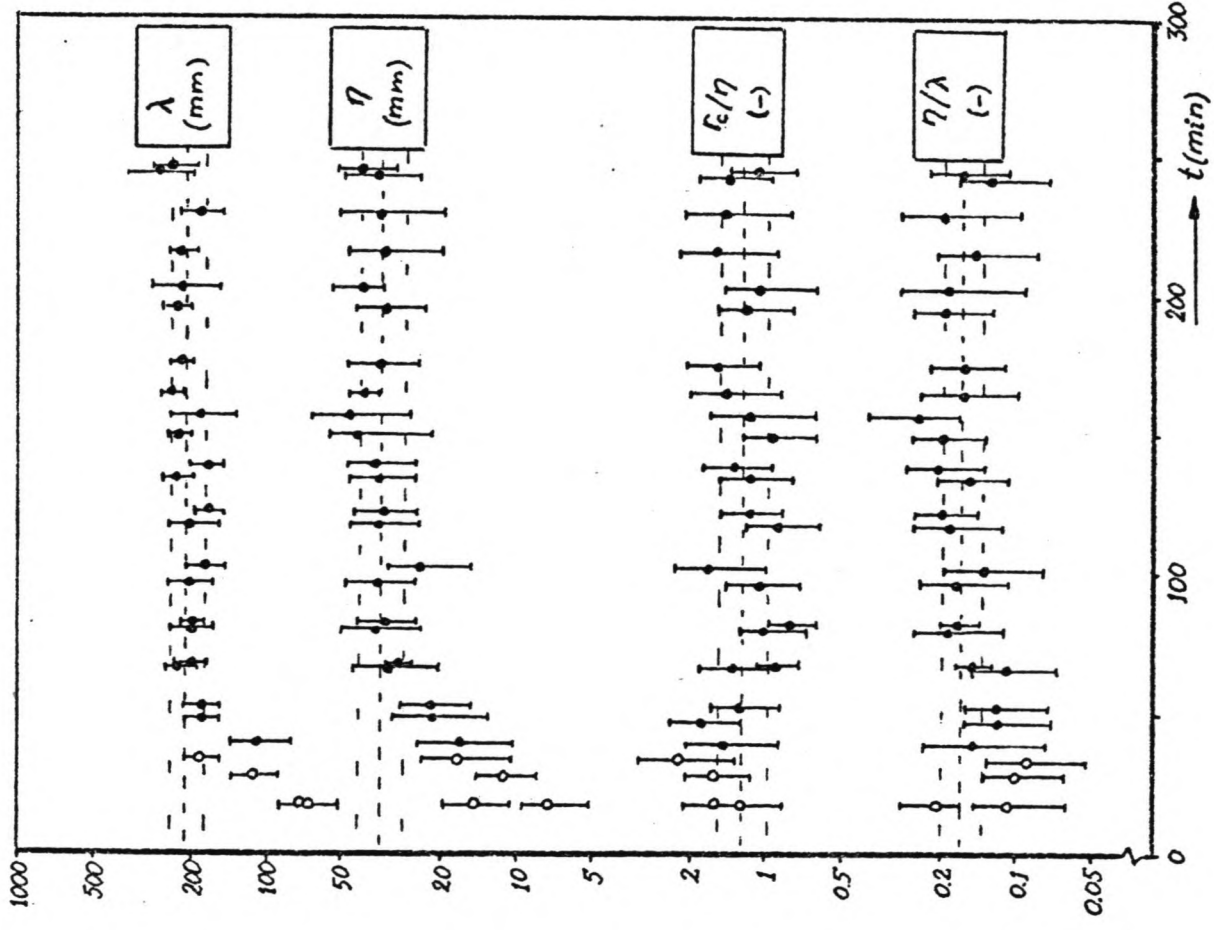
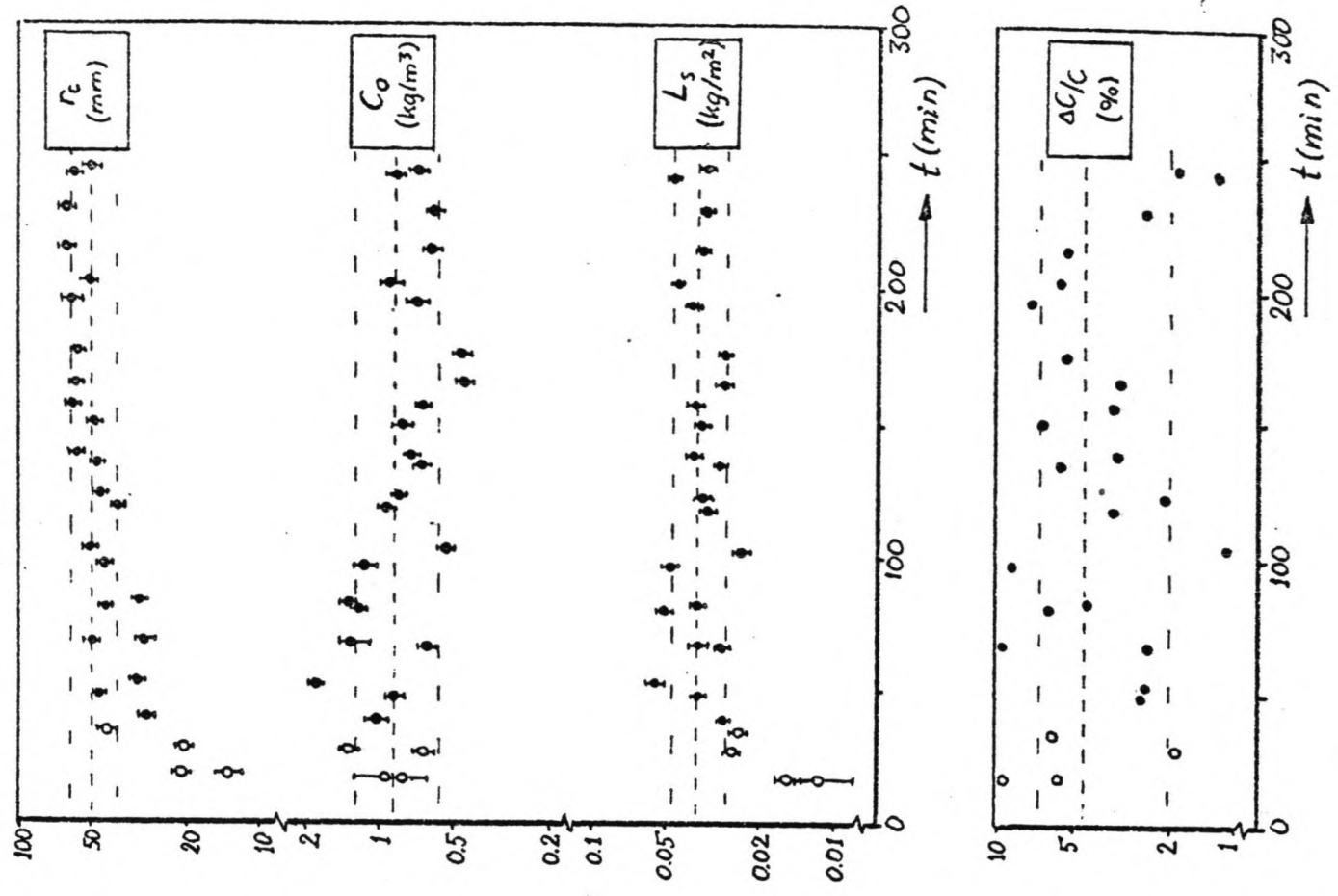
Figuur 26a: Resultaten duurmeting;
 $T = 1 \text{ s}$, $u_0 = 0.40 \text{ m/s}$.



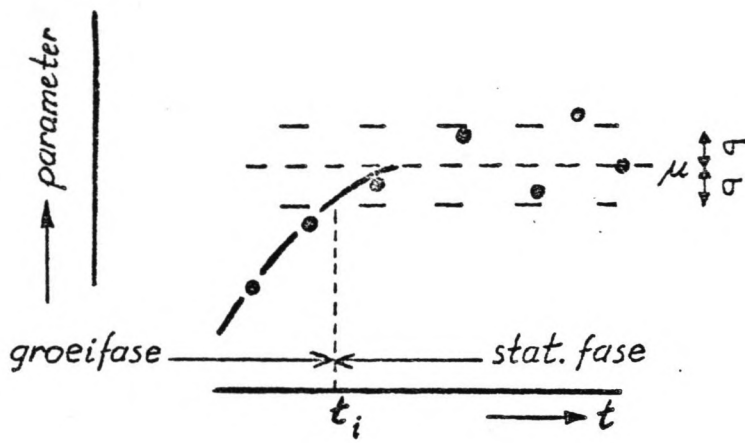
Figuur 26 b: Resultaten duurmeting;
 $T = 2$ s, $U_0 = 0,30$ m/s.



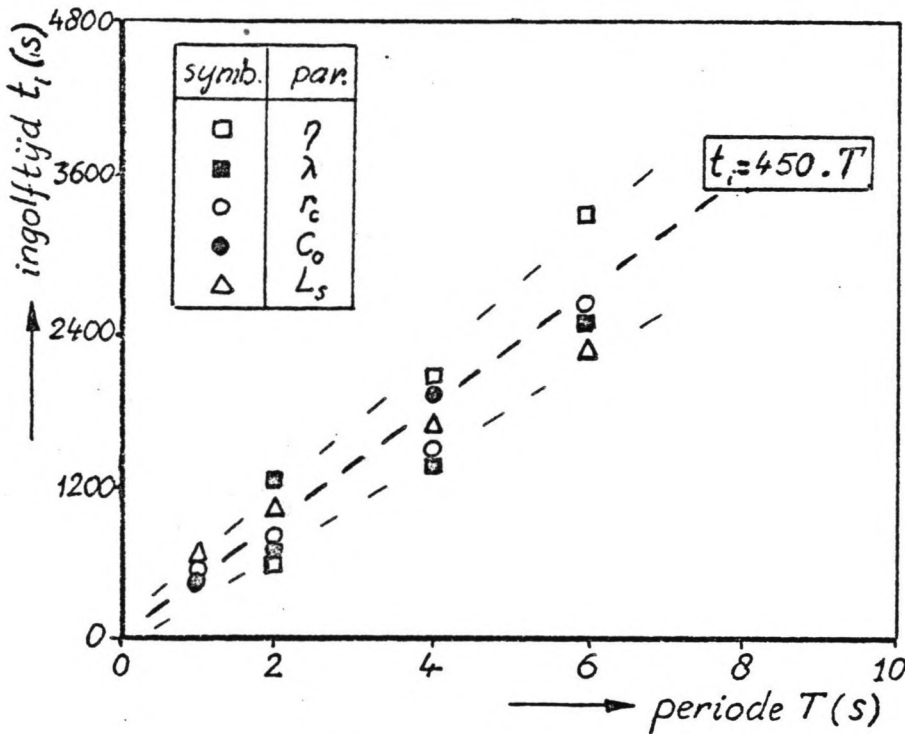
Figur 26c: Resultaten duurmeting;
 $T = 4.5$, $u_0 = 0.35$ m/s.



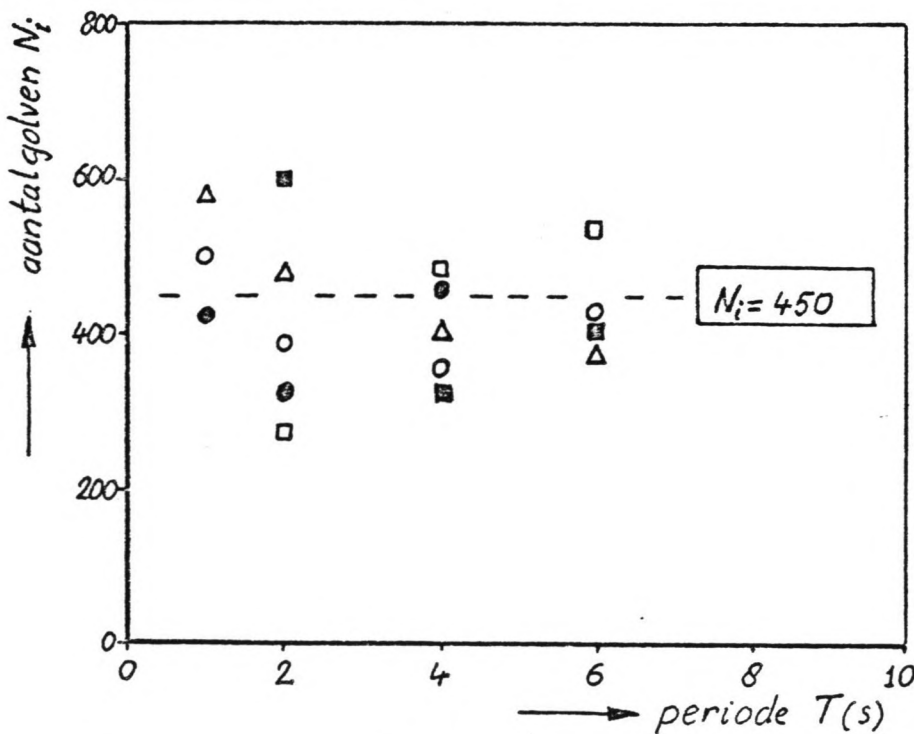
Figuur 26d: Resultaten duurmeting;
 $T = 6$ s, $u_0 = 0,2875$ m/s.



27a: Definitie ingolftijd.

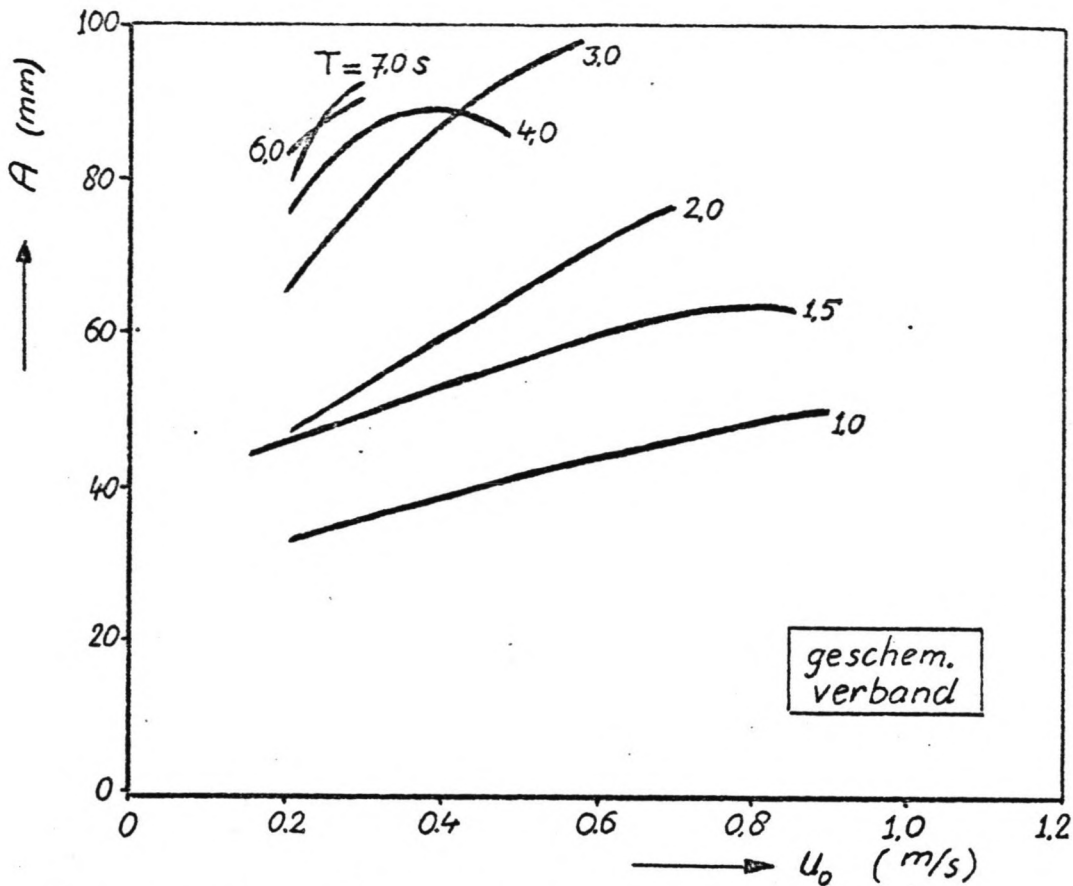


27b: Afhankelijkheid van de periode.

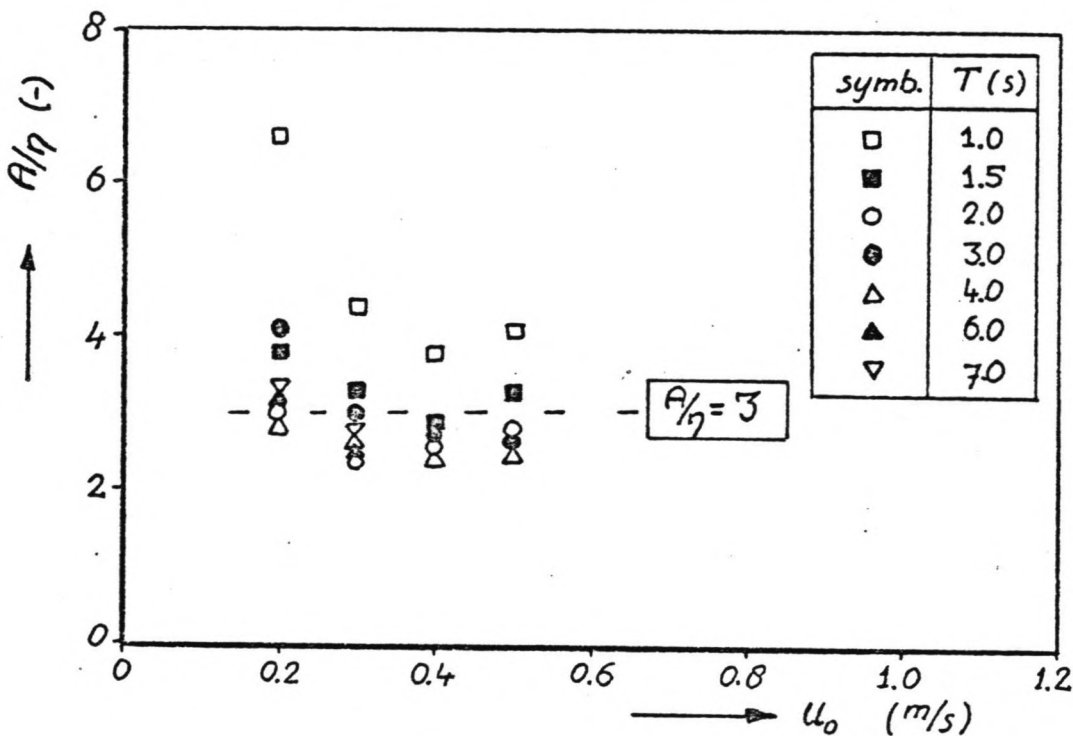


27c: Afhankelijkheid van het aantal golven (N_i).

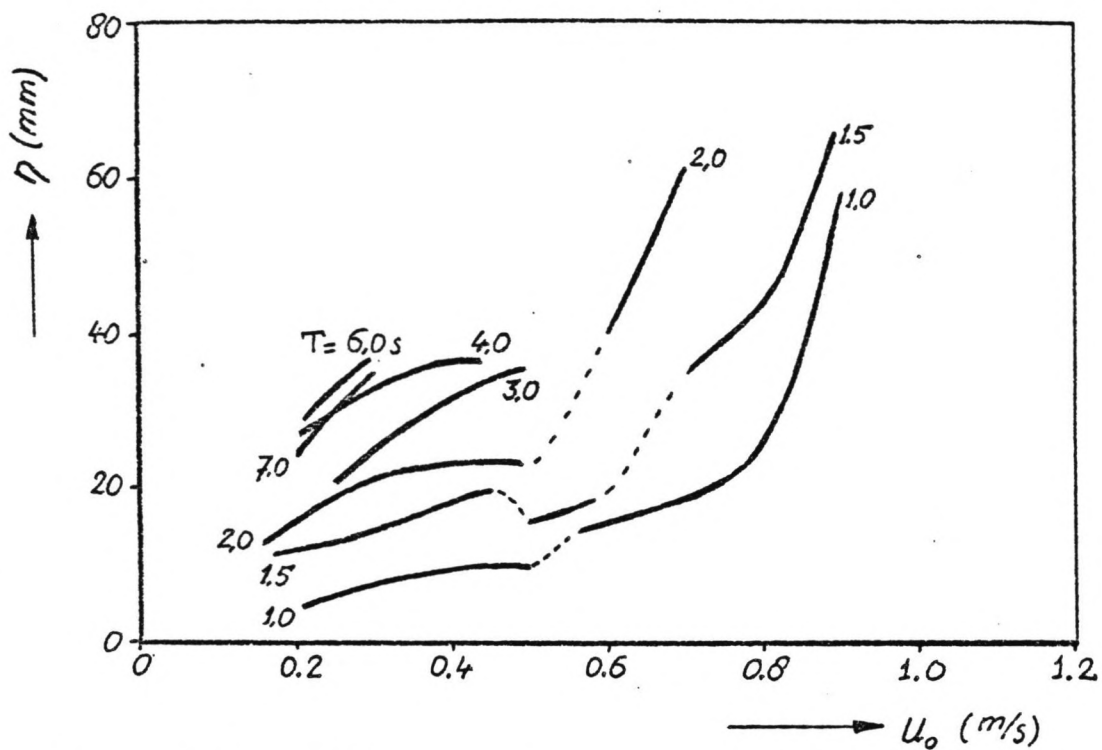
Figuur 27: Ingolftijd bij de duurmetingen.



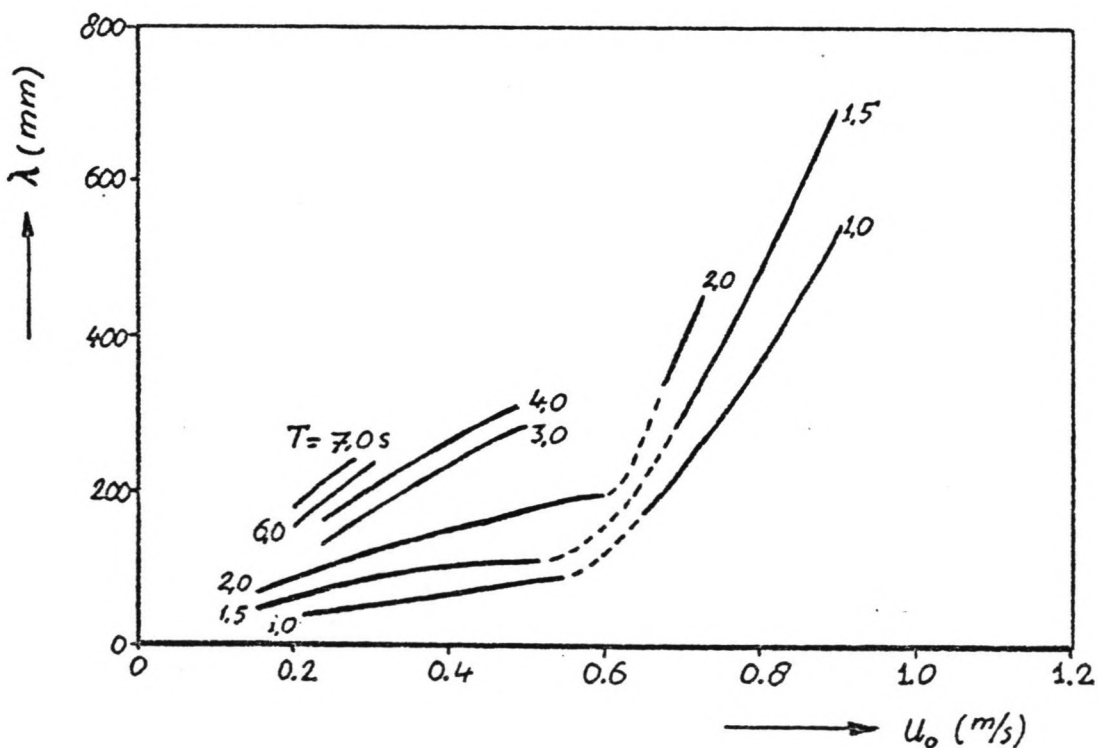
Figuur 28a : Bodemlaagdikte als functie van periode en snelheidsamplitudo.



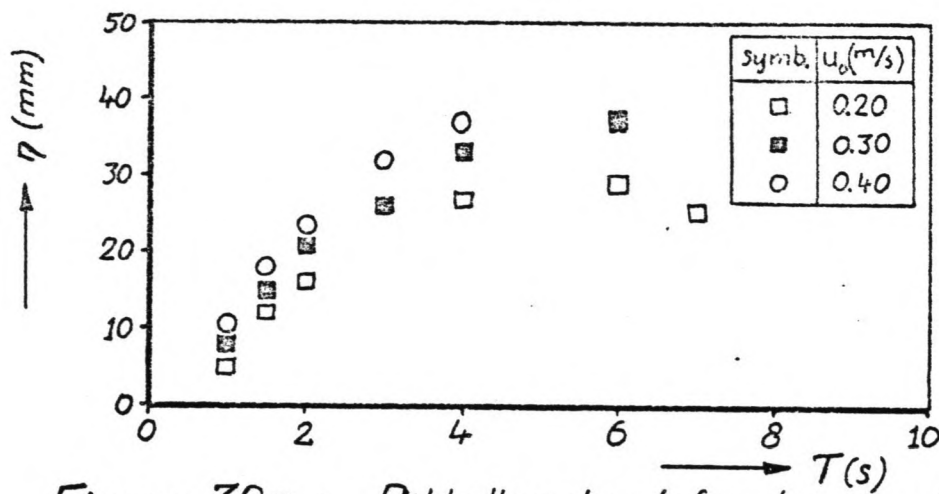
Figuur 28b : Relatie bodemlaaglaagdikte/ribbelhoogte.



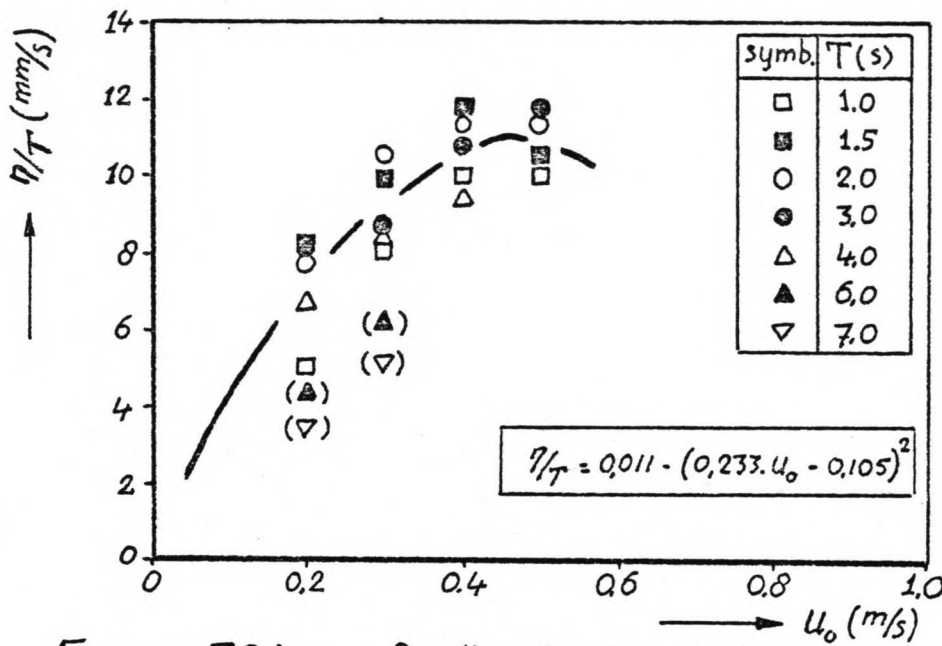
Figuur 29a: Geschematiseerde verbanden ribbelhoogte.



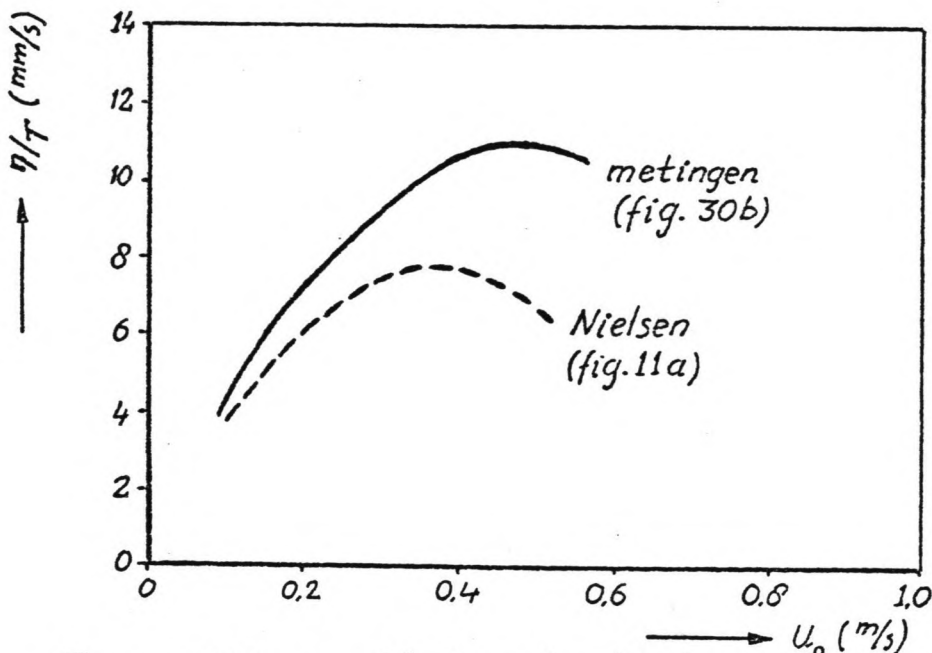
Figuur 29b: Geschematiseerde verbanden ribbellengte.



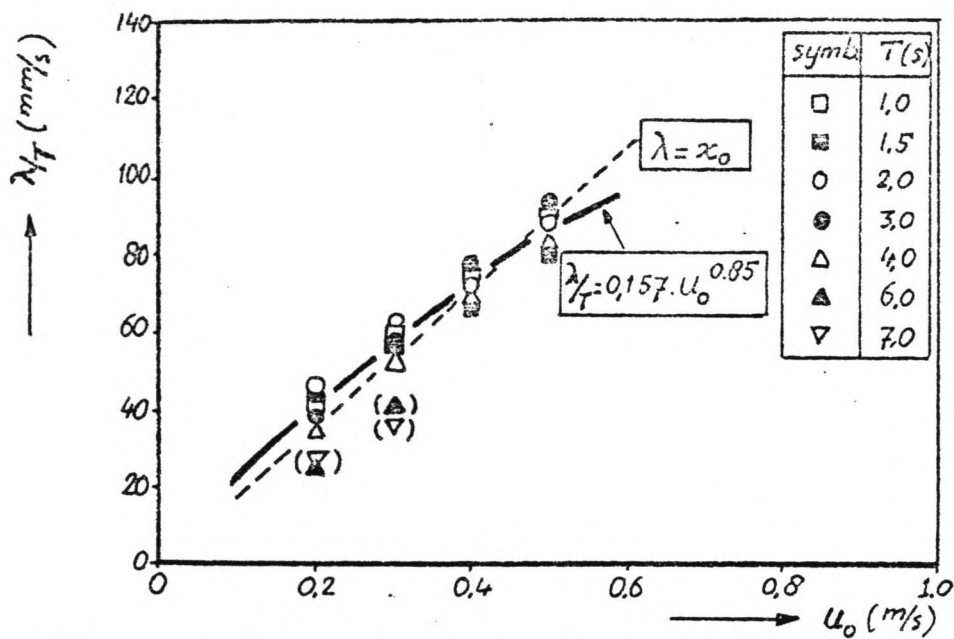
Figuur 30a : Ribbelhoogte als functie van de periode.



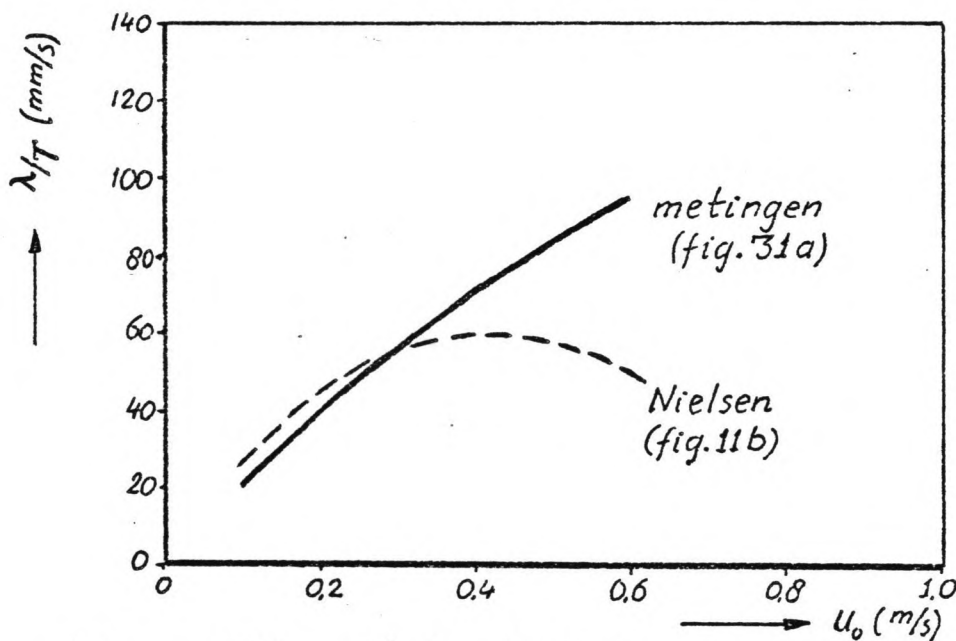
Figuur 30b : Snelheidsafhankelijkheid ribbelhoogte.



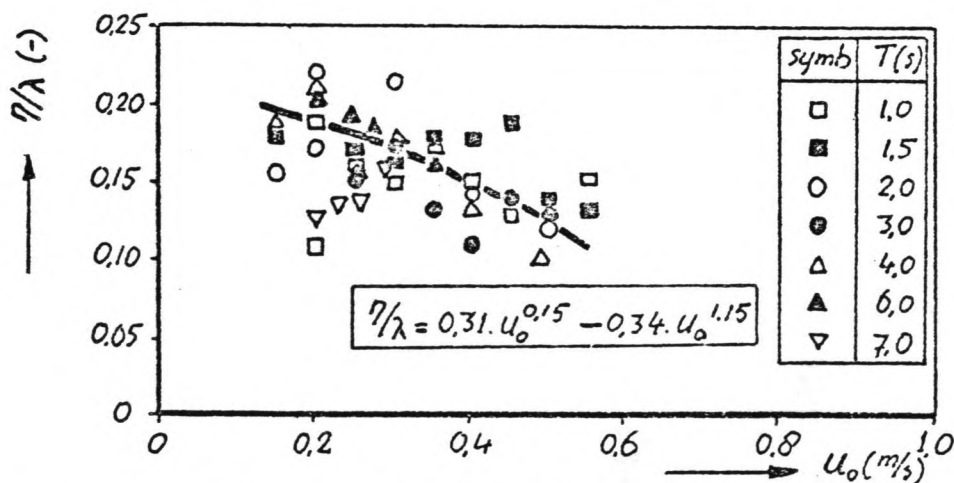
Figuur 30c : Verband ribbelhoogte; metingen en literatuur.



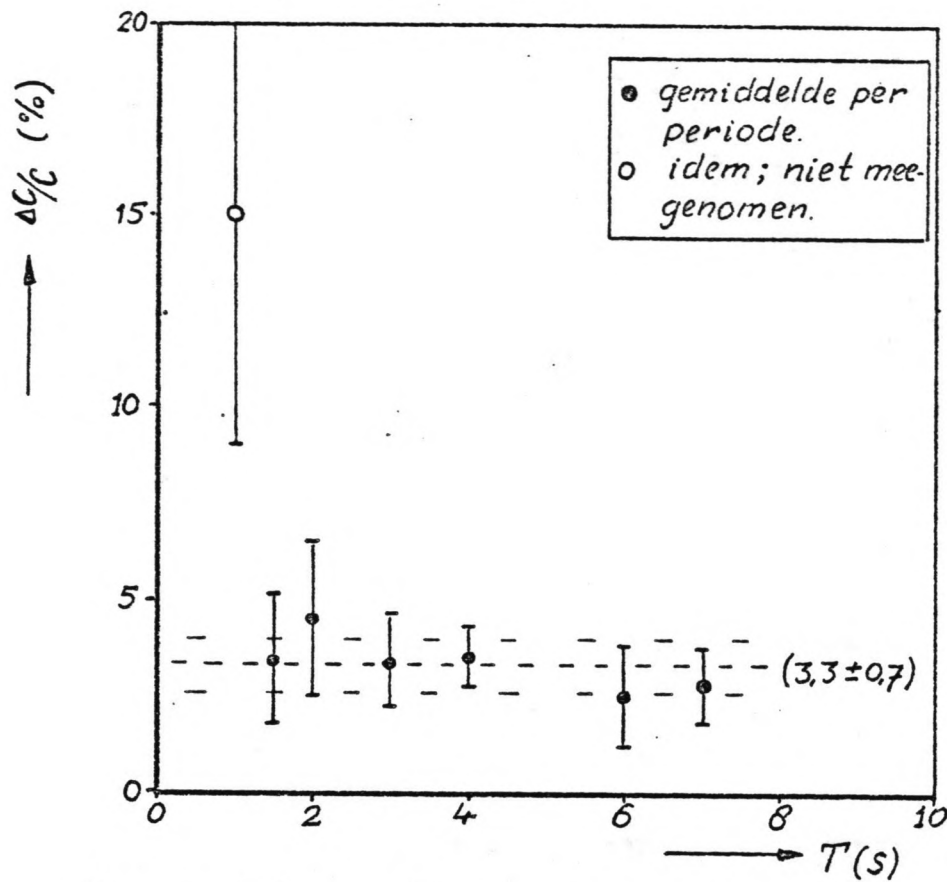
Figuur 31a: Snelheidsafhankelijkheid ribbellengte.



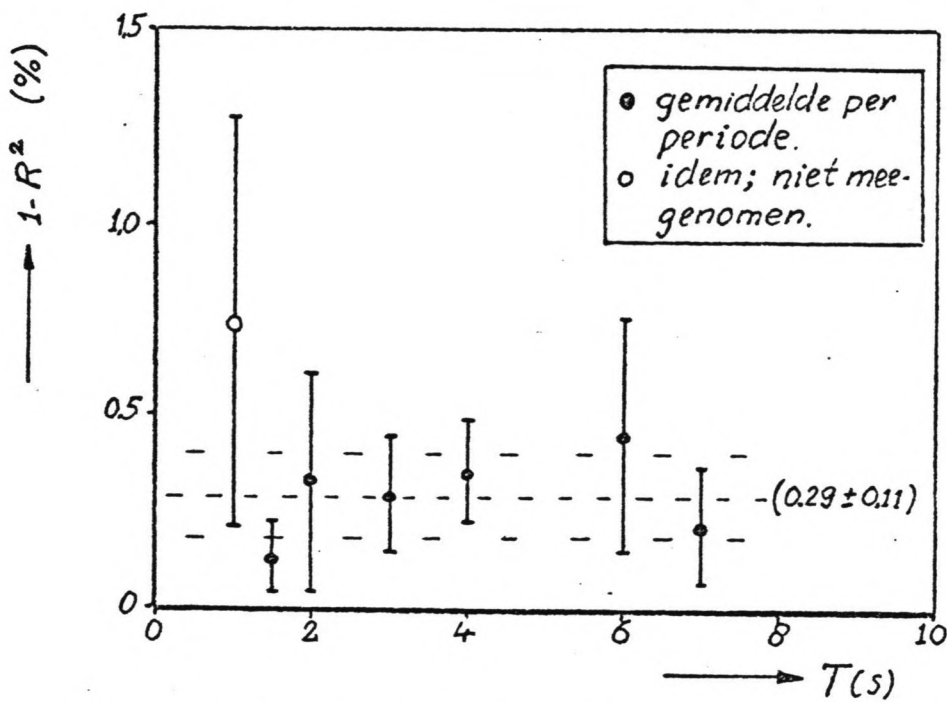
Figuur 31b: Verband ribbellengte; metingen en literatuur.



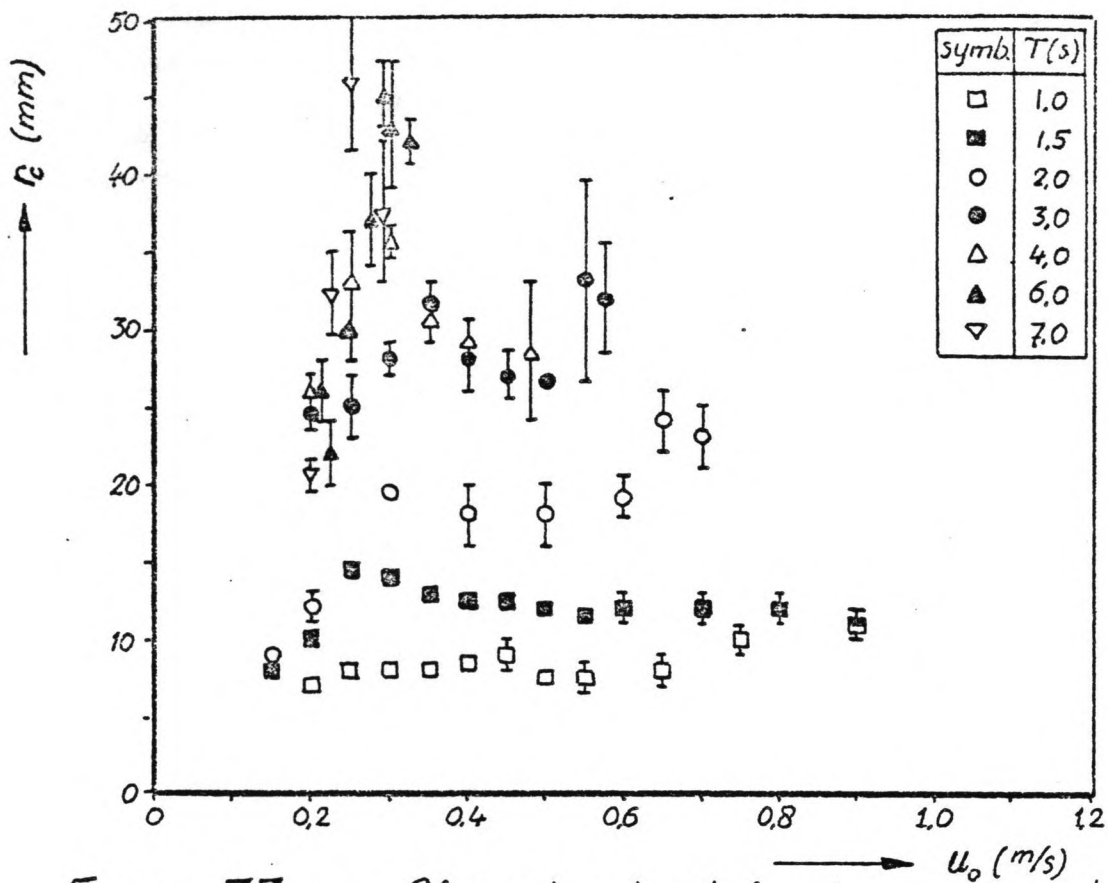
Figuur 31c: Afhankelijkheid ribbelsteilheid.



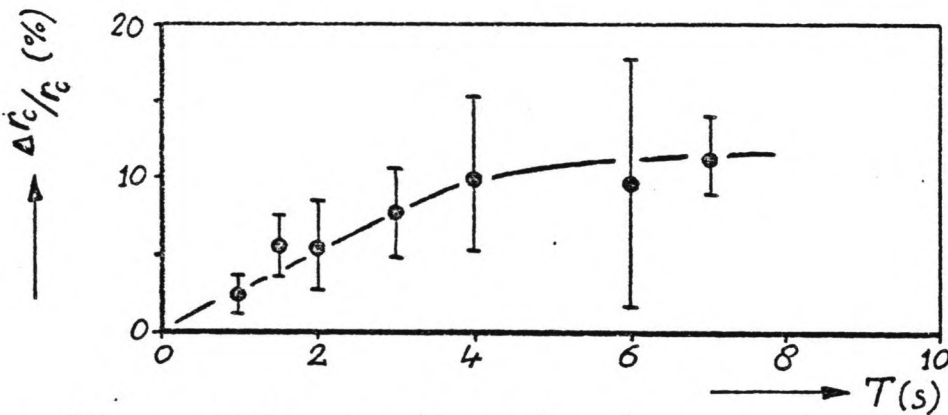
Figuur 32a : Random error als functie van de periode.



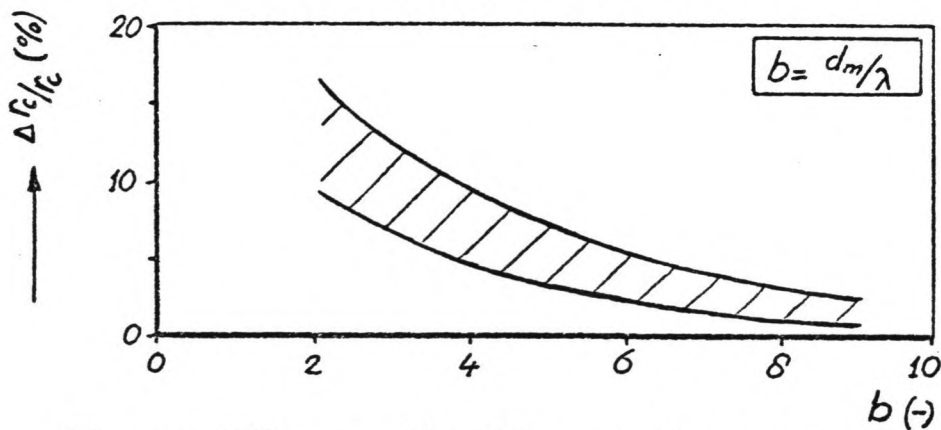
Figuur 32b : Onverklaarde variatie als functie van de periode.



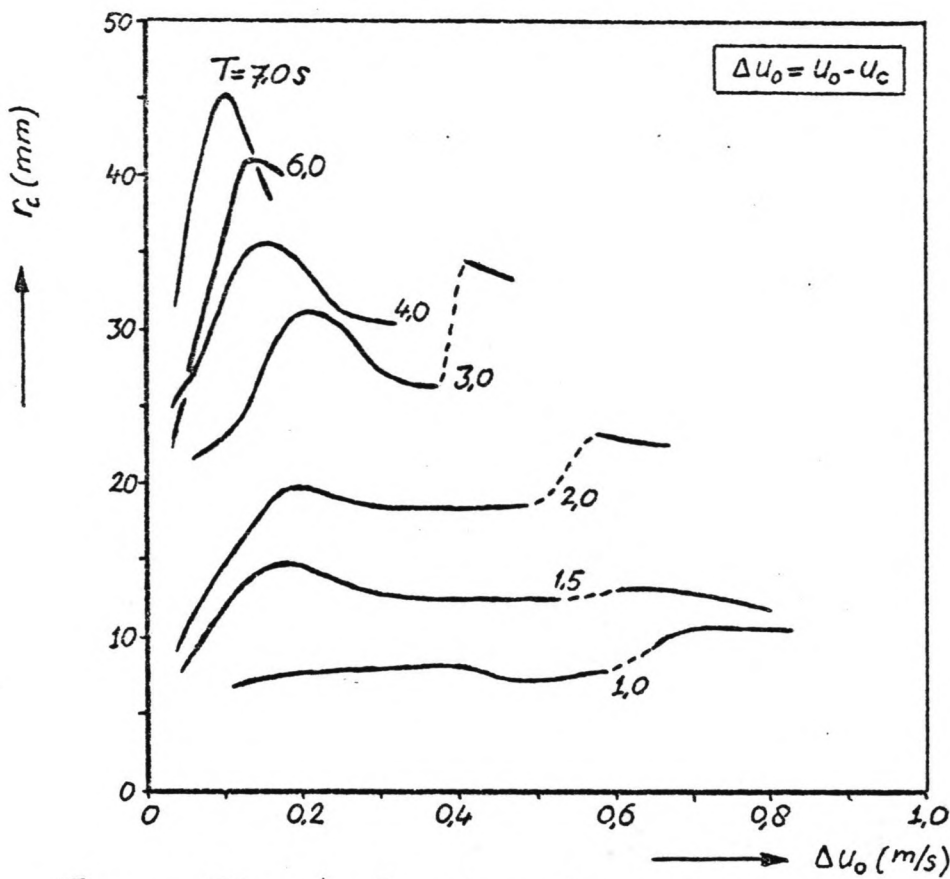
Figuur 33a : Afnamelengte als functie van periode en snelheid.



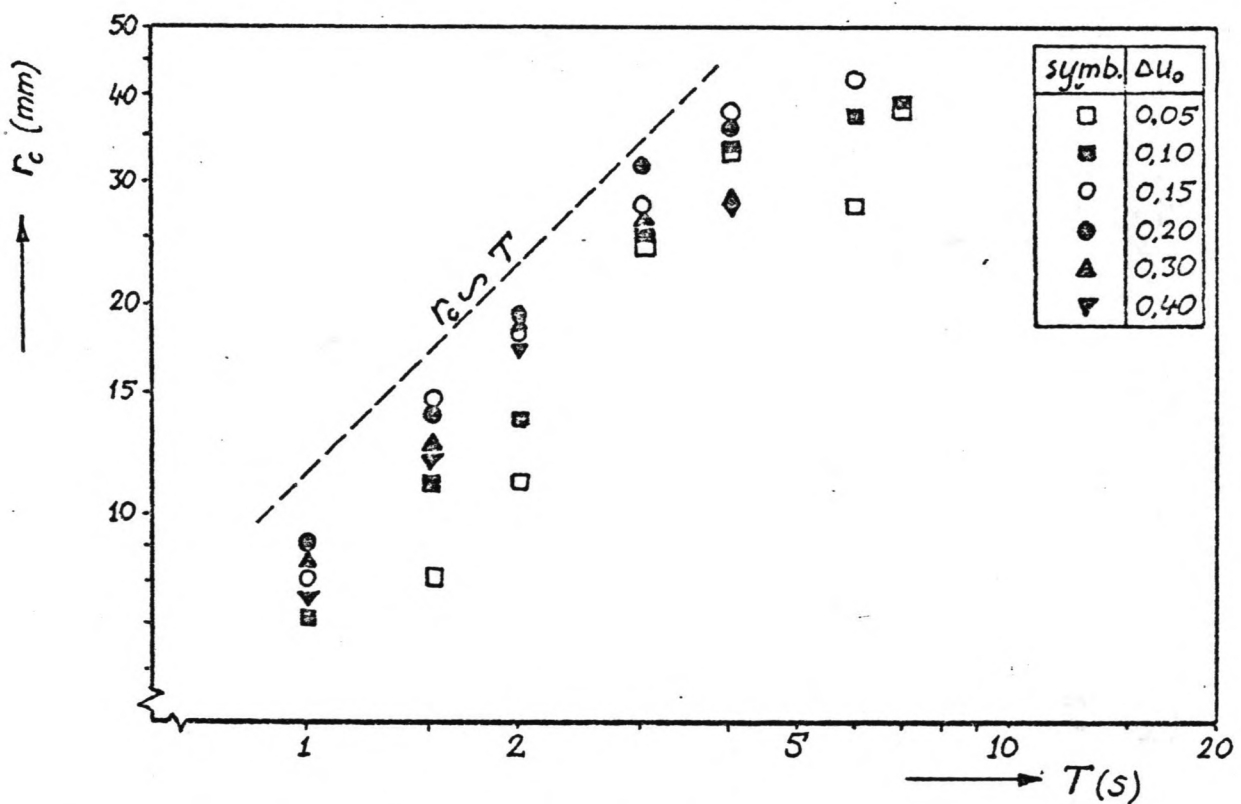
Figuur 33b : Karakteristieke relatieve spreiding als functie van de periode.



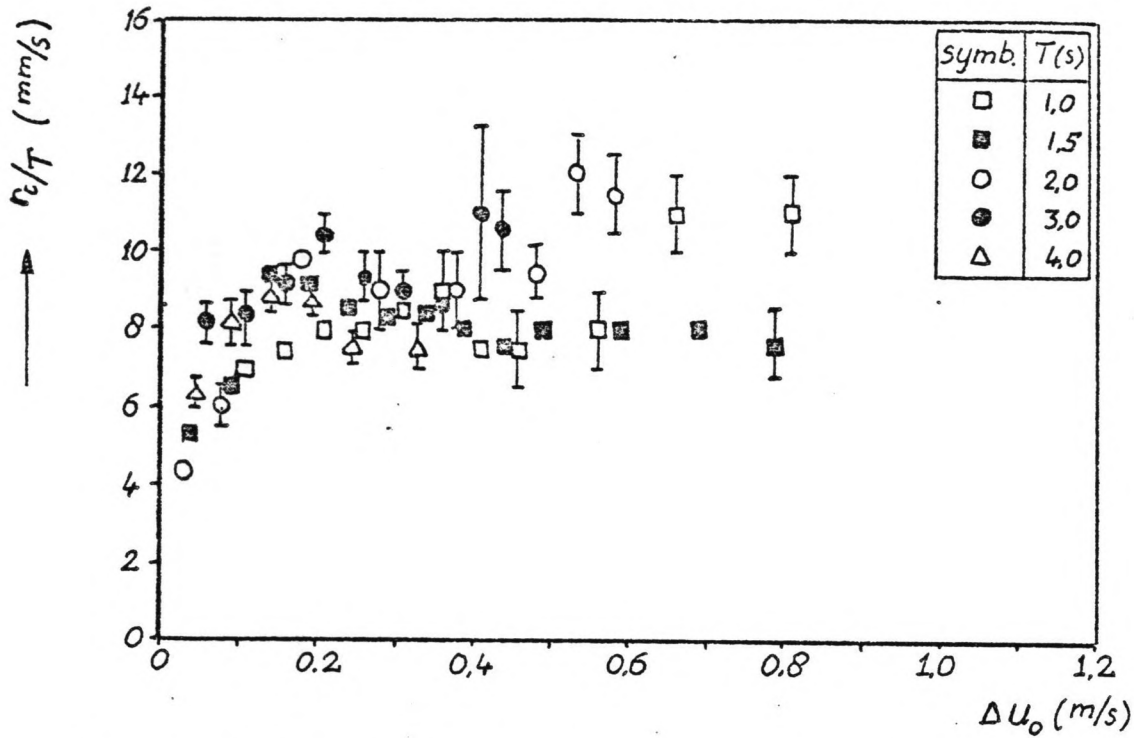
Figuur 33c : Karakteristieke relatieve spreiding als functie van de b -waarde.



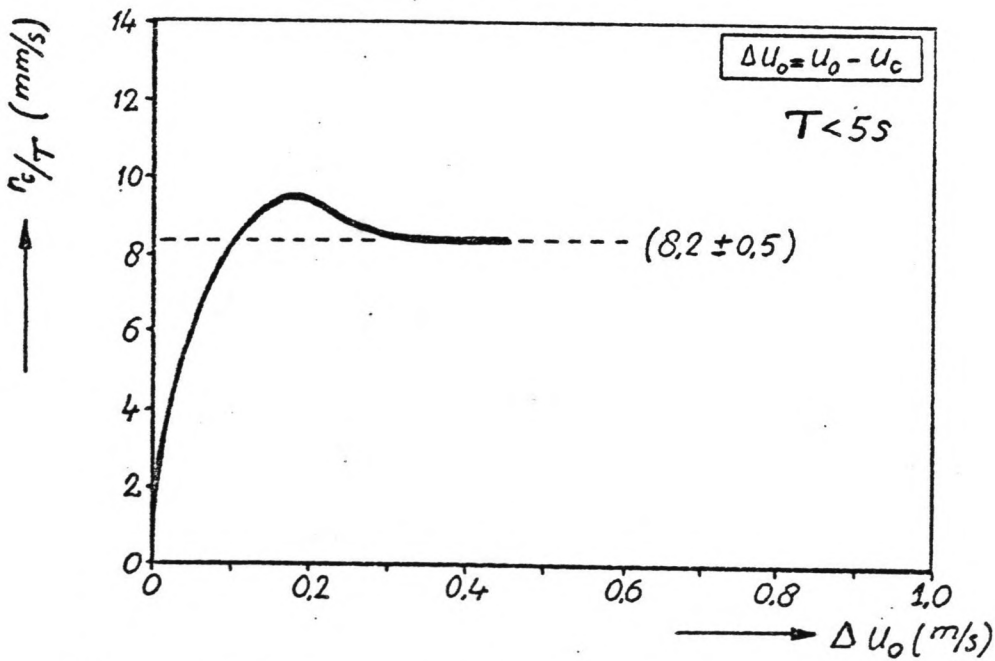
Figuur 34a : Geschematiseerd verband voor de afnamelengte per periode als functie van snelheid $\Delta u_0 (= u_0 - u_c)$.



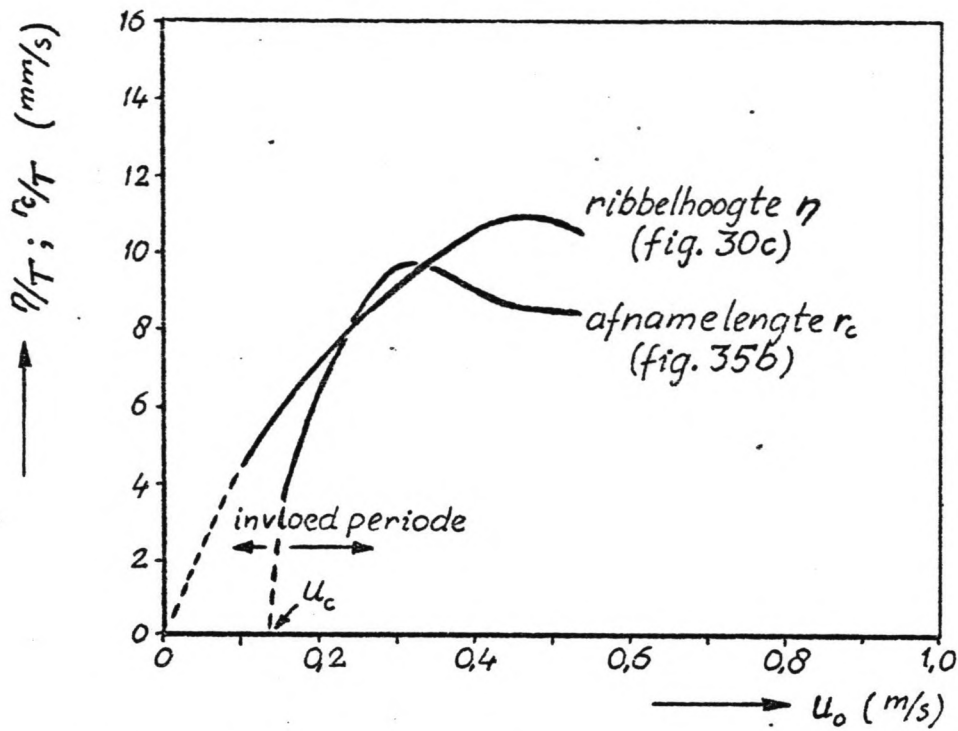
Figuur 34b : Periodeafhankelijkheid afnamelengte.



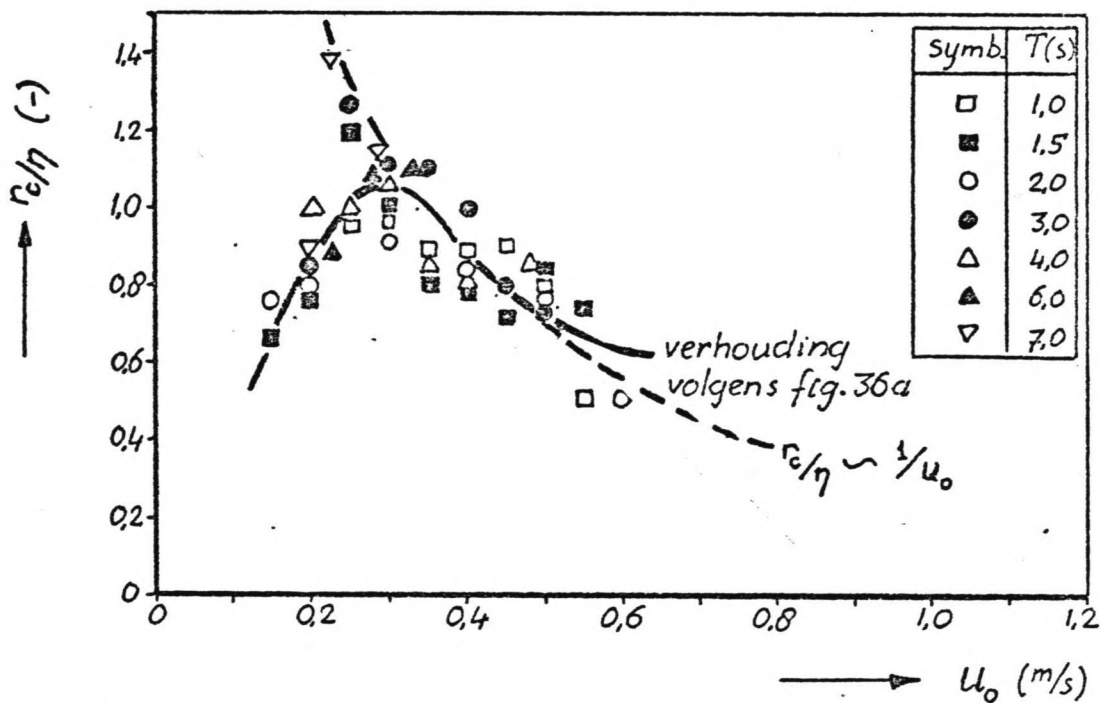
Figuur 35a : Snelheidsafhankelijkheid afnamelengte.



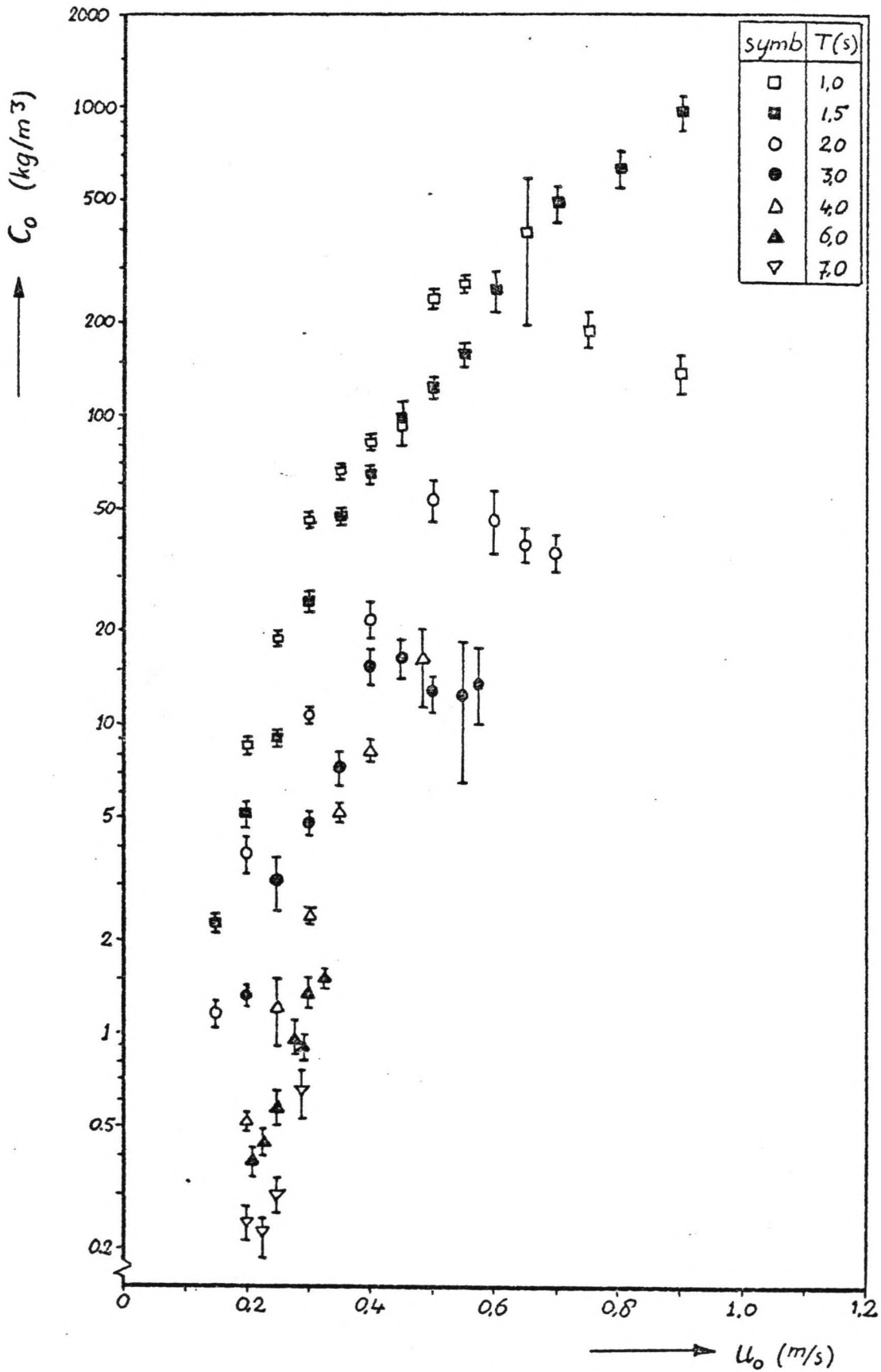
Figuur 35b : Verband afnamelengte.



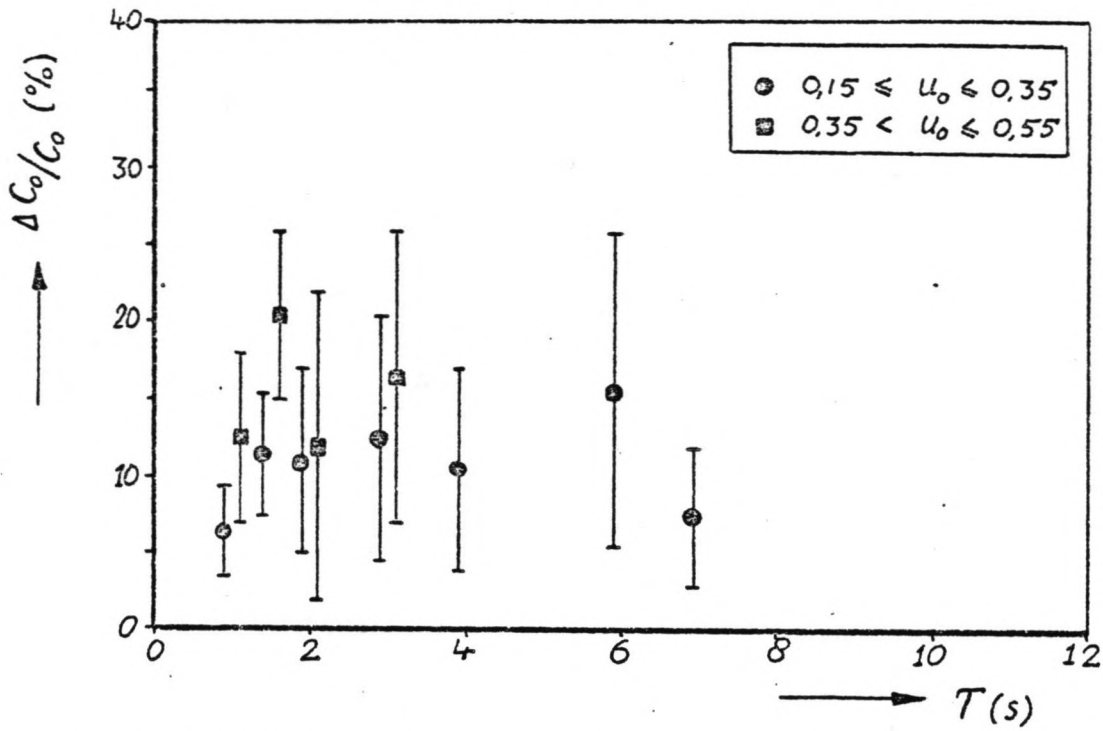
Figuur 36a : Verbanden afnamelengte en ribbelhoogte.



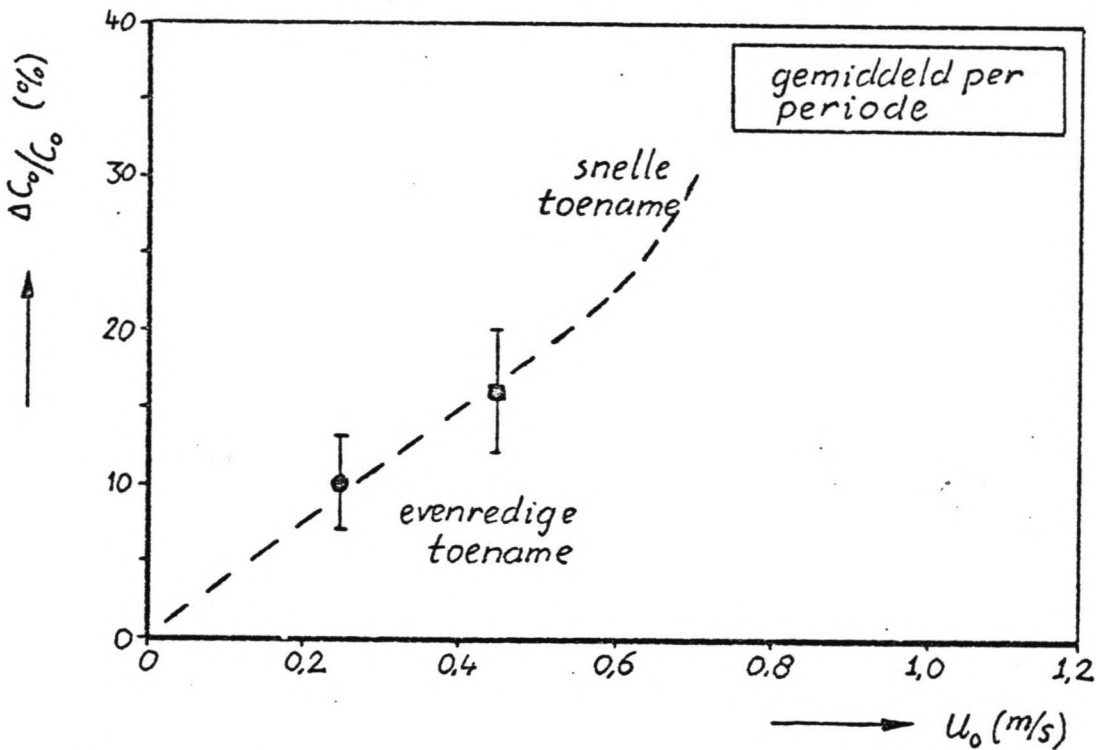
Figuur 36b : Verband afnamelengte/ribbelhoogte-verhouding.



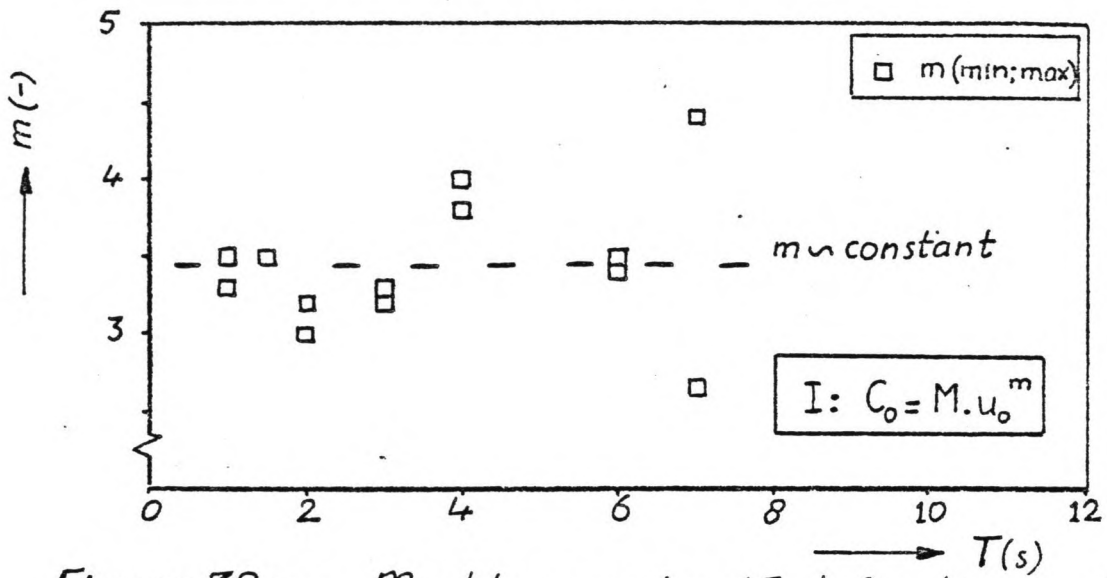
Figuur 37: Bodemconcentraties als functie van periode en snelheid.



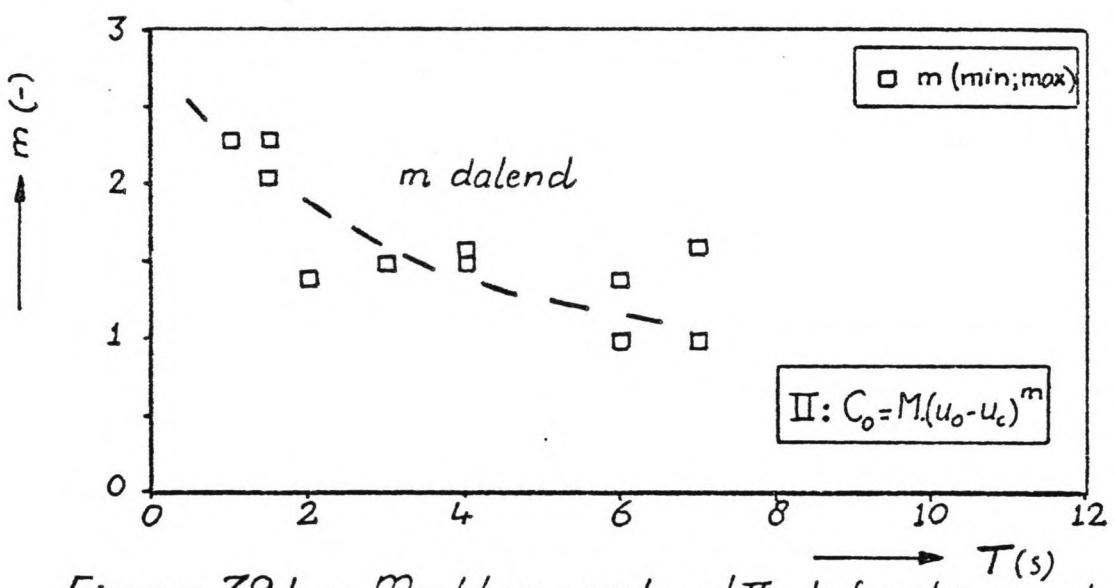
Figuur 38 a : Karakteristieke relatieve spreiding als functie van periode en snelheidsinterval.



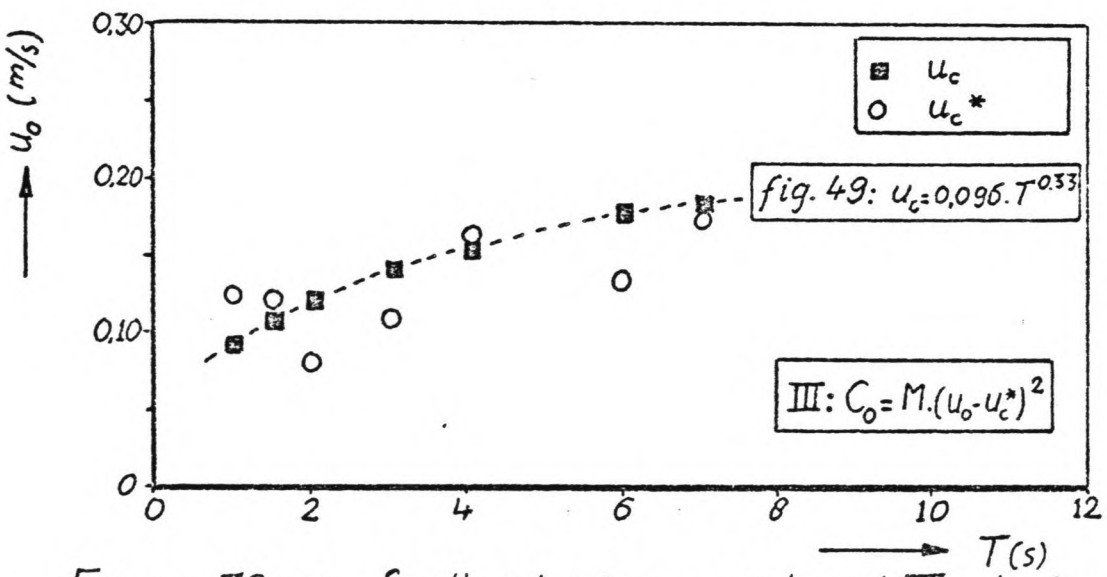
Figuur 38 b : Verband karakteristieke relatieve spreiding.



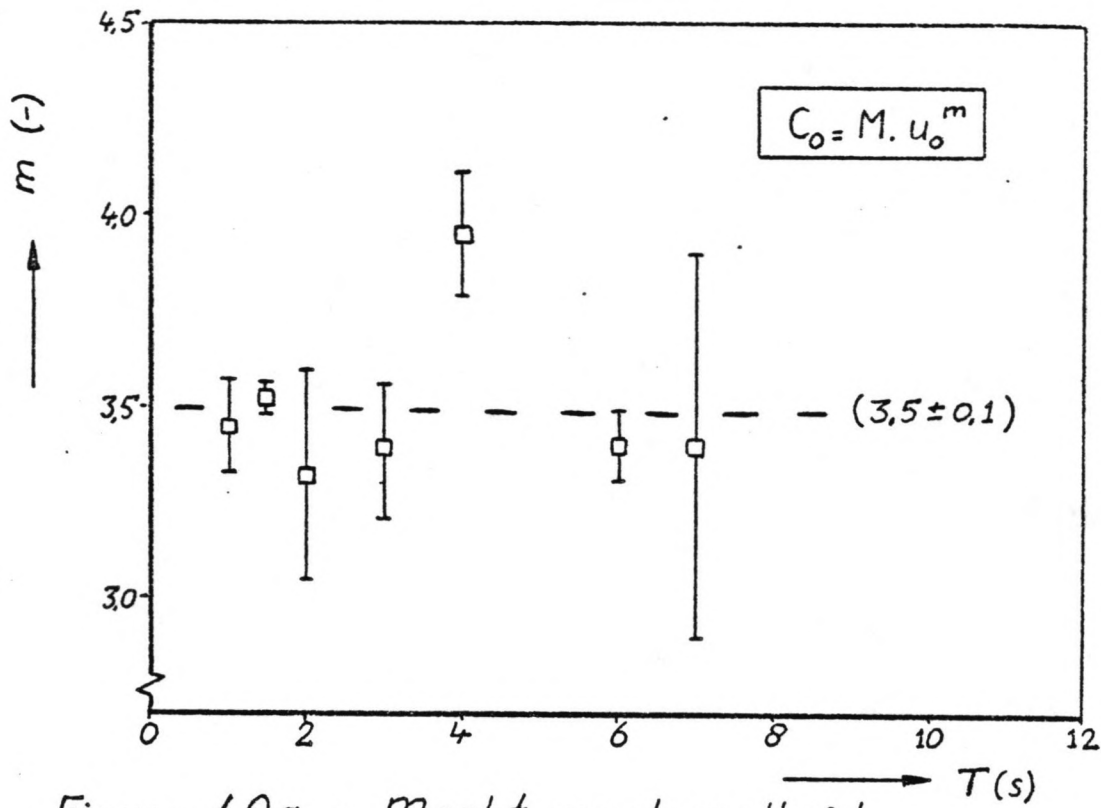
Figuur 39 a : Macht van verband I als functie van de periode.



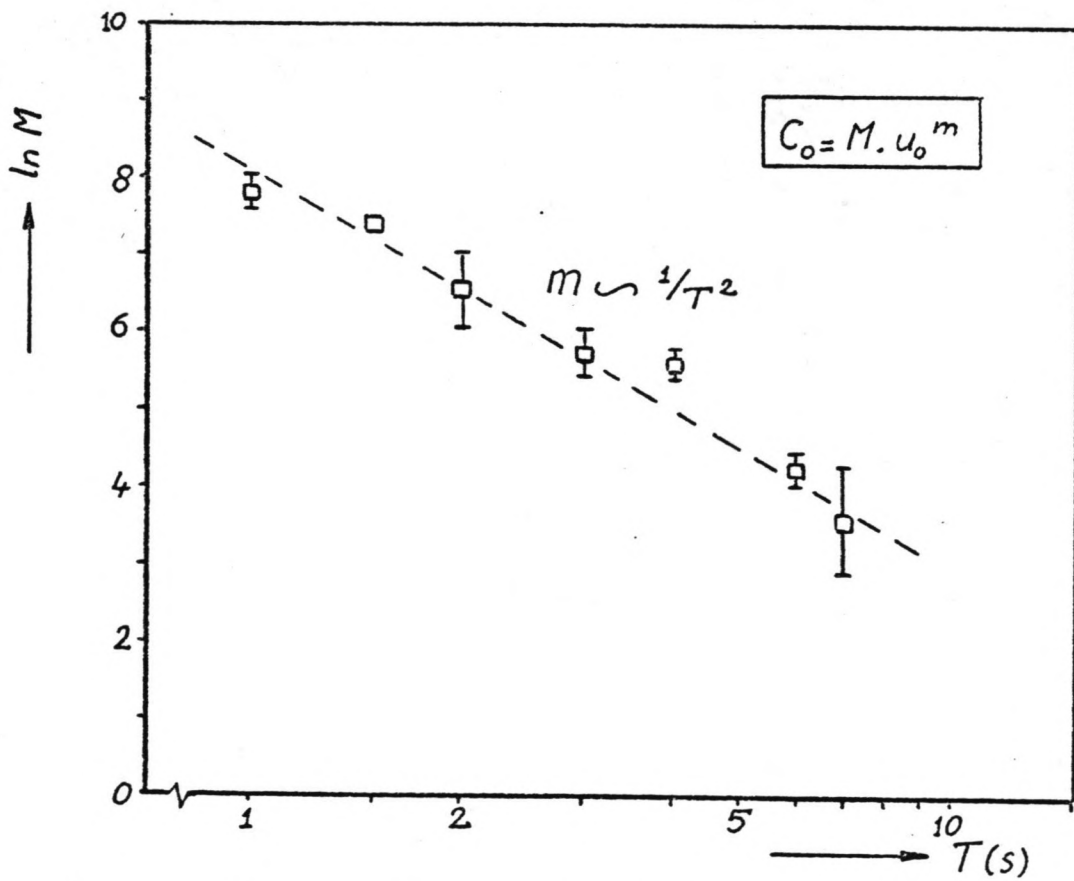
Figuur 39 b : Macht van verband II als functie van de periode.



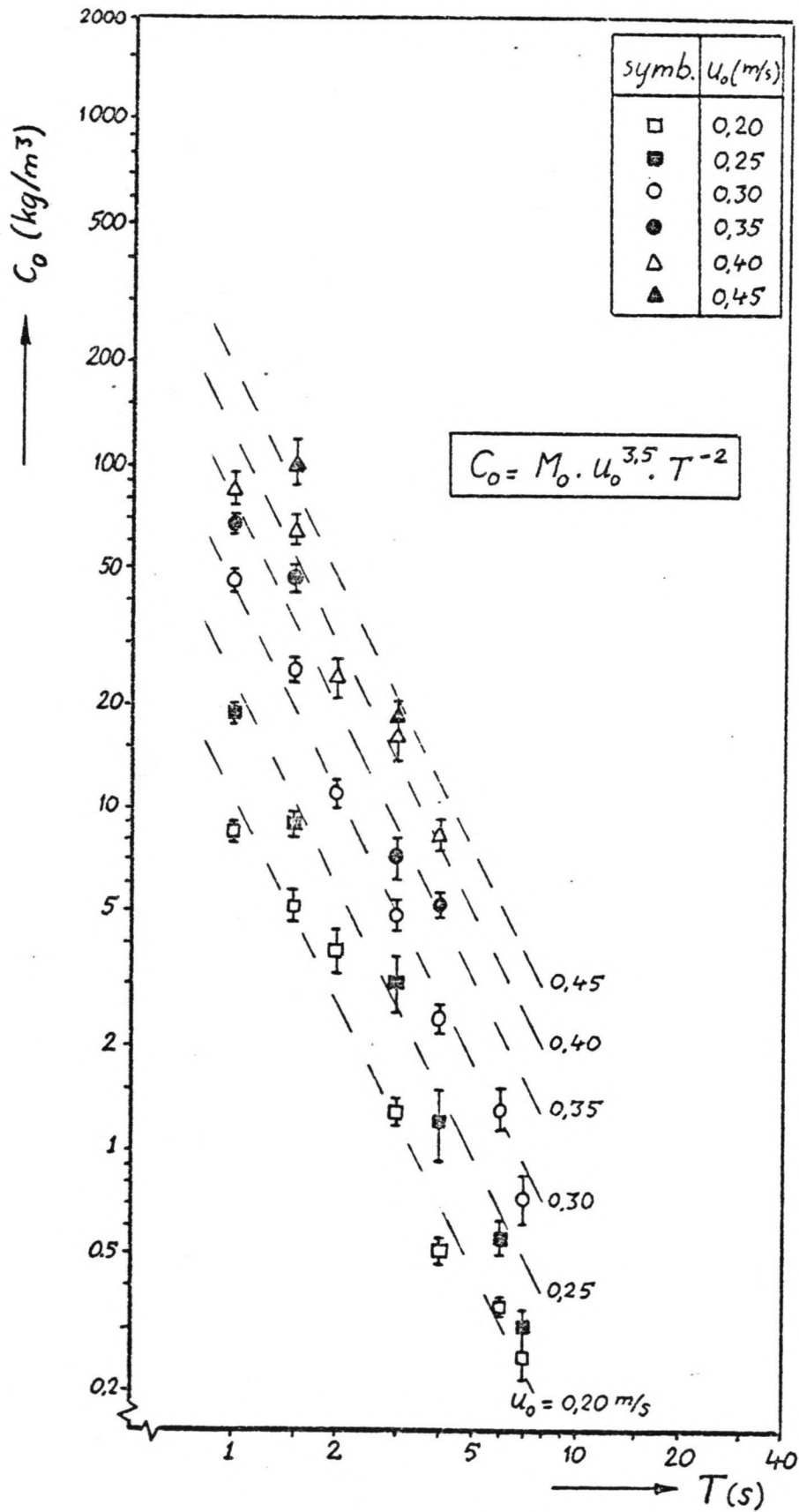
Figuur 39 c : Snelheid u_c^* van verband III als functie van de periode.



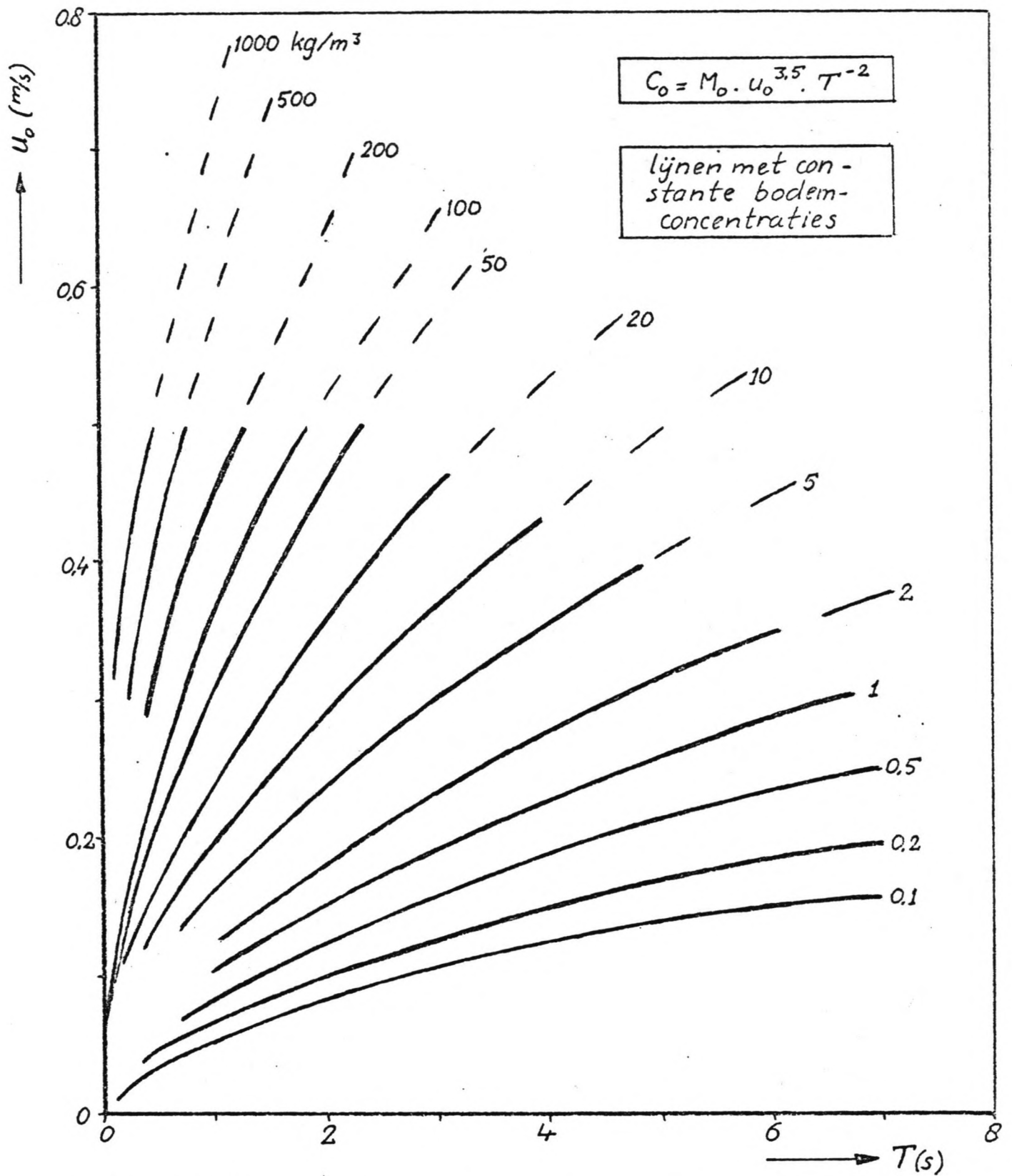
Figuur 40a : Macht van de snelheid.



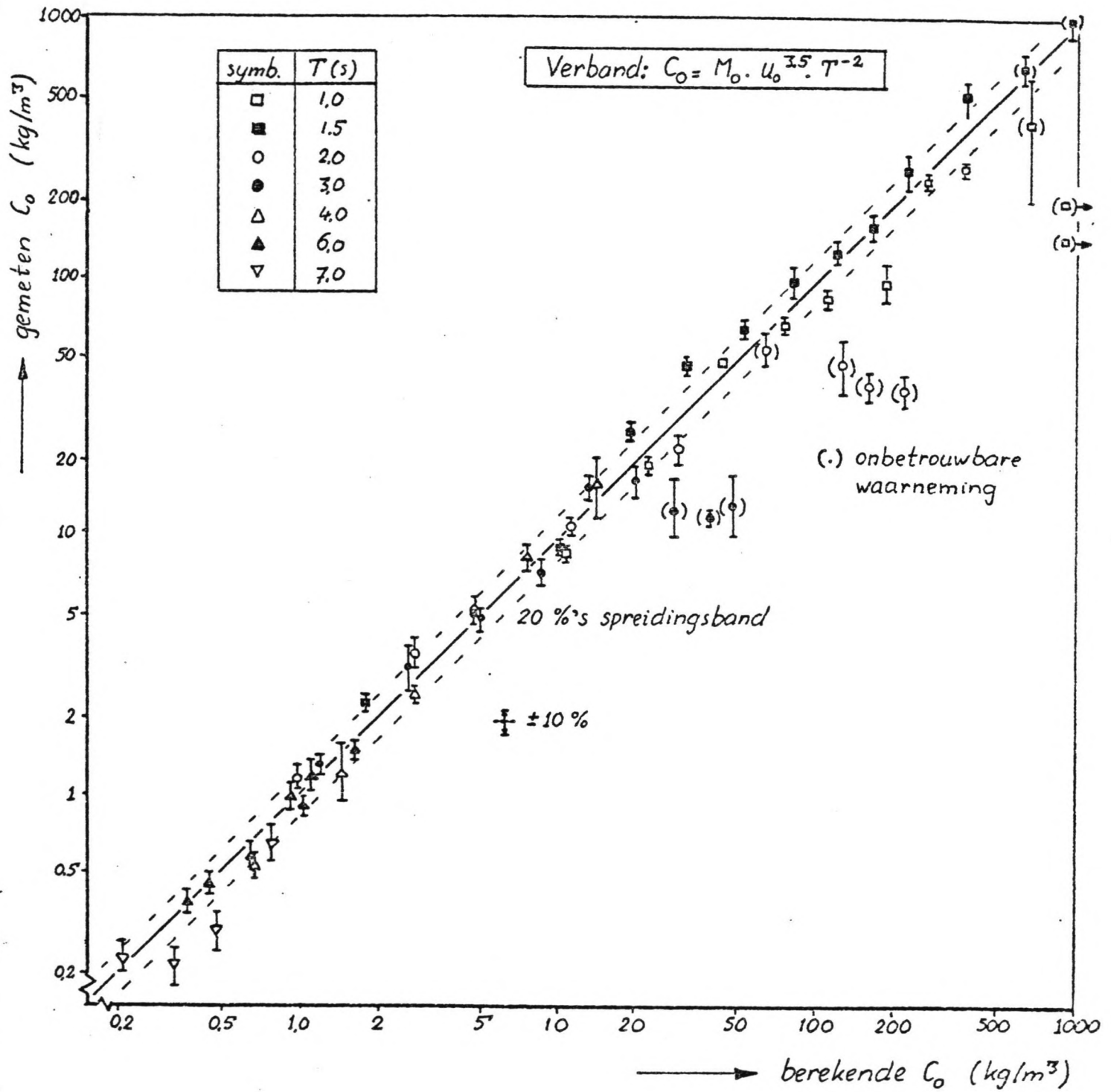
Figuur 40b : M -waarde als functie van de periode.



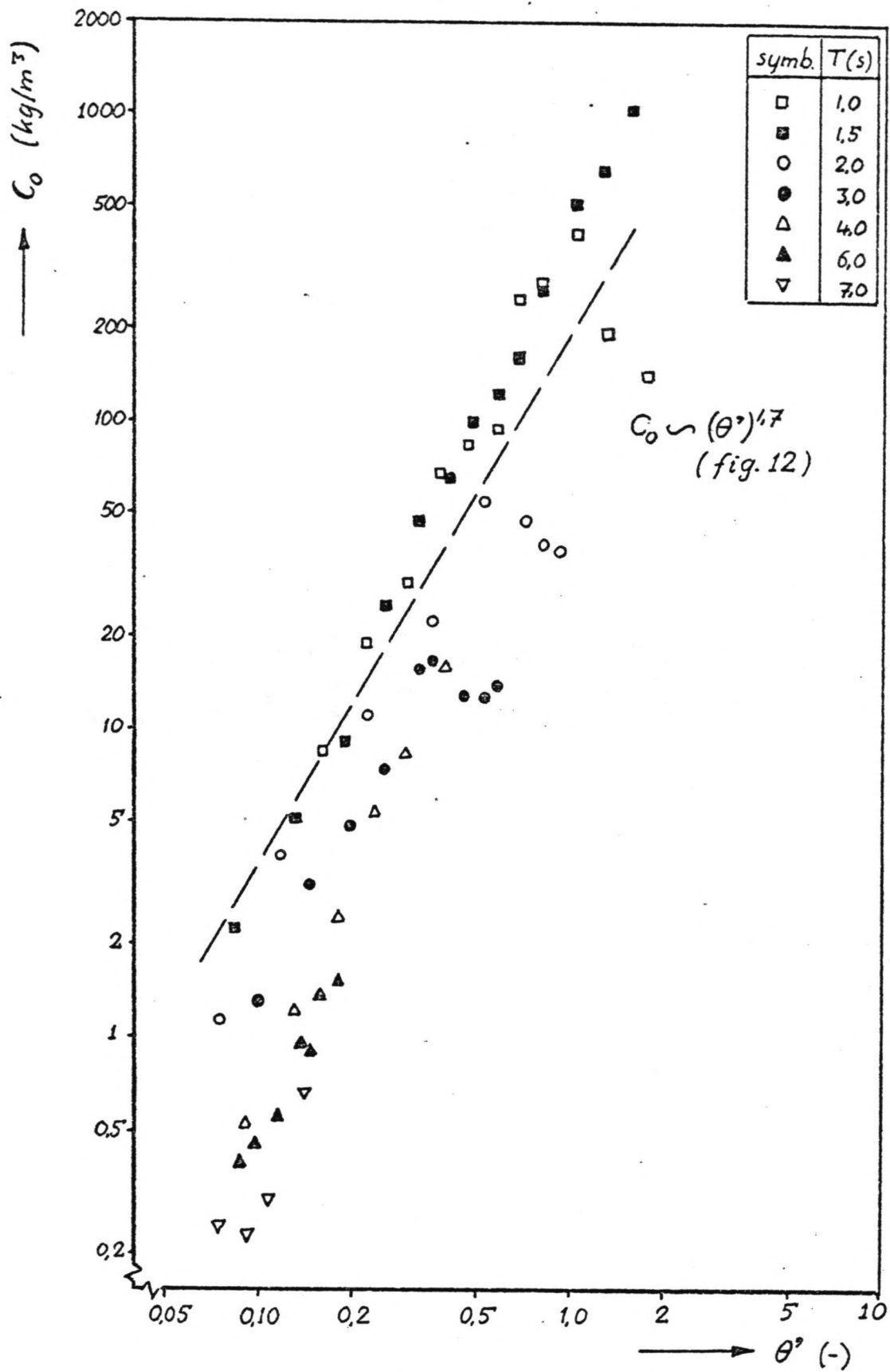
Figuur 41 : Concentratie C_0 als functie van periode en snelheid.



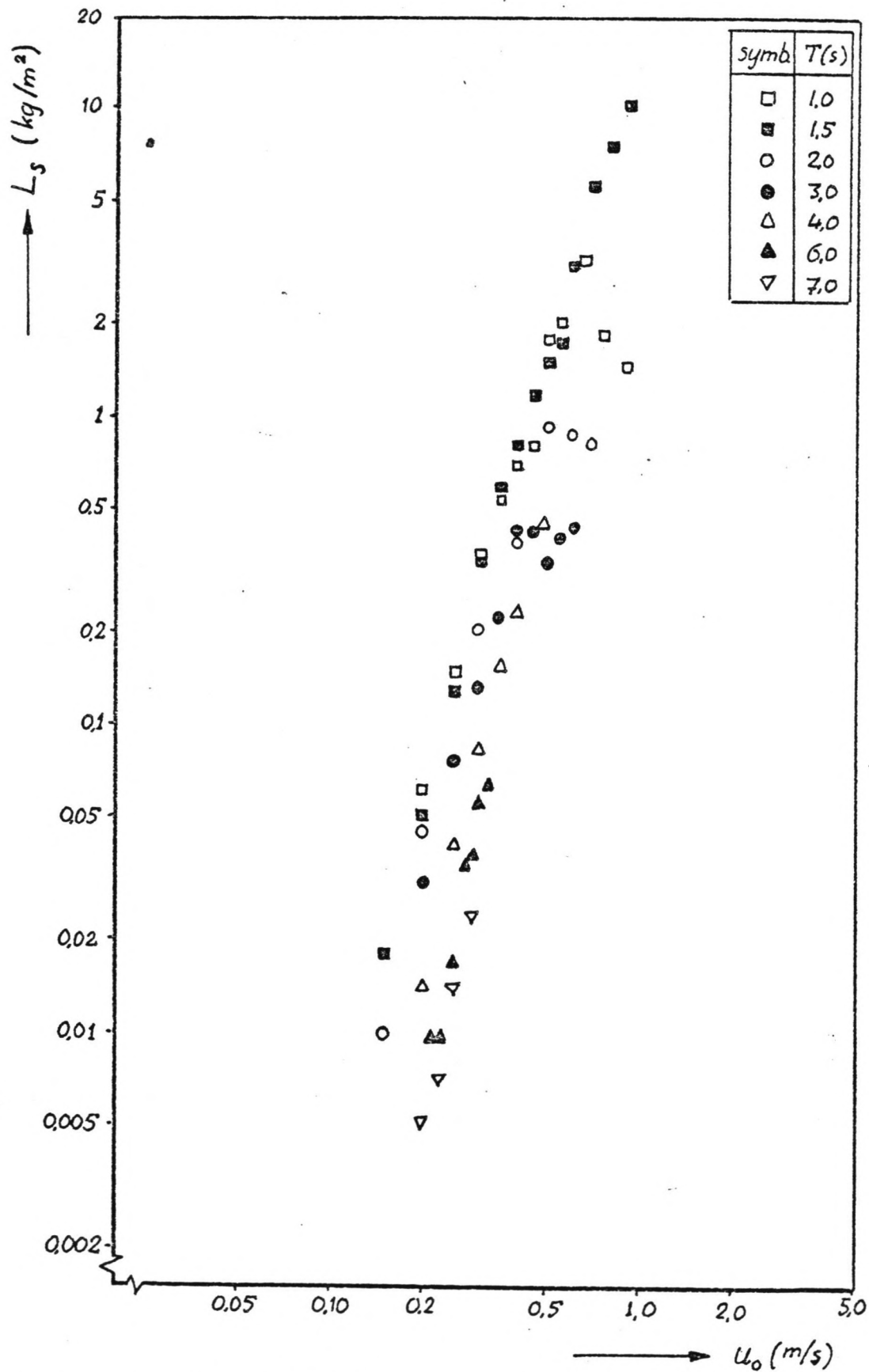
Figuur 42 : Lijnen met constante bodemconcentratie.



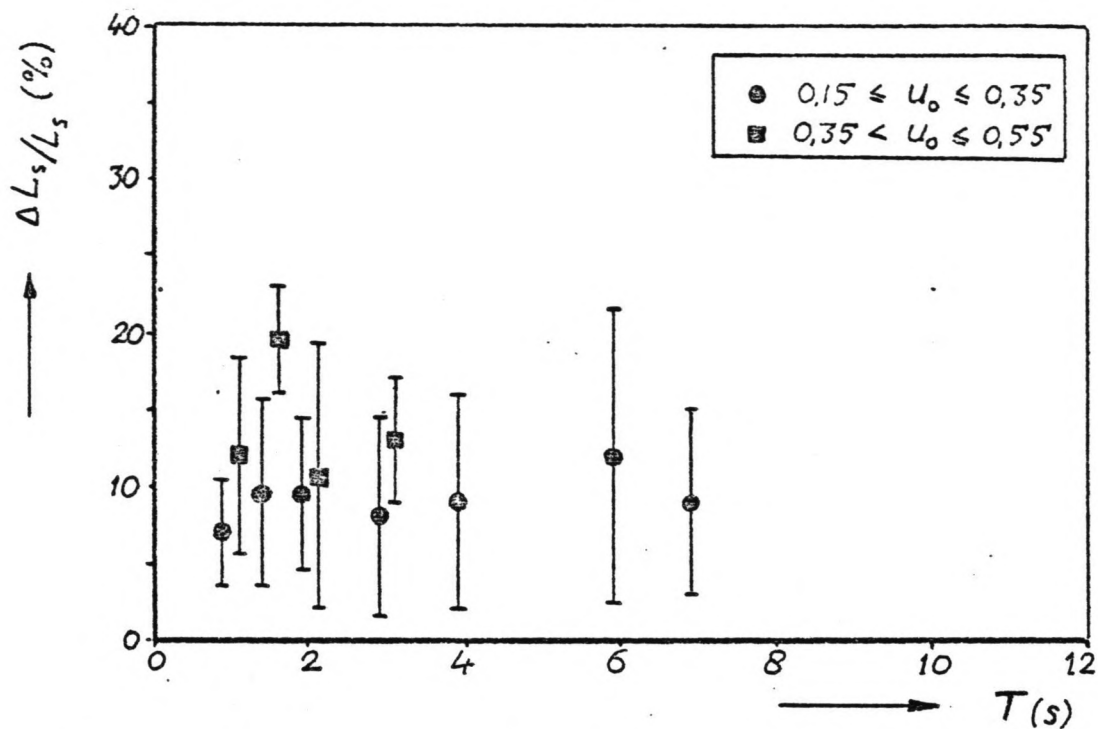
Figuur 43 : Vergelijking gemeten en volgens verband berekende concentraties.



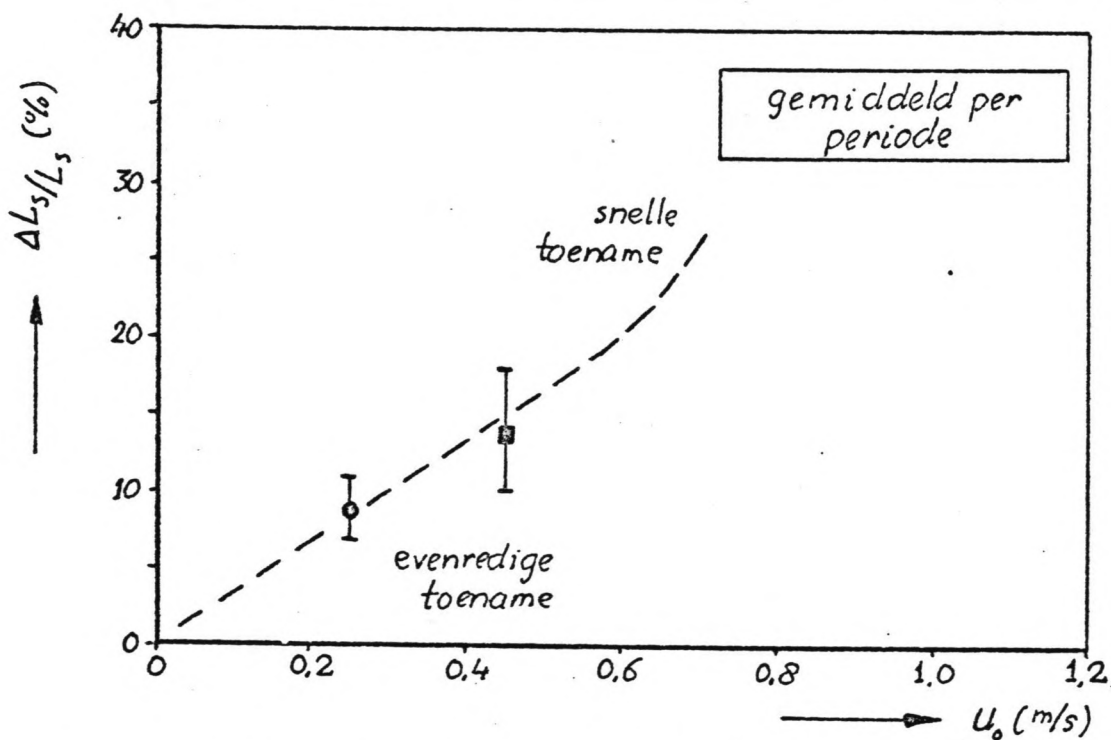
Figuur 44 : Verband bodemconcentraties volgens Nielsen.



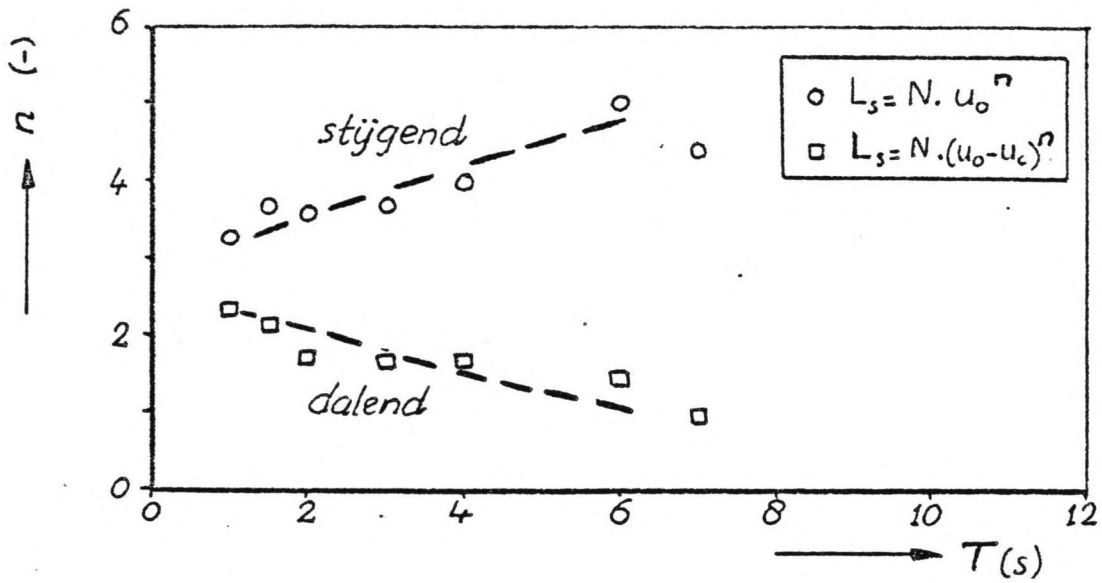
Figuur 45 : Totalload als functie van periode en snelheid.



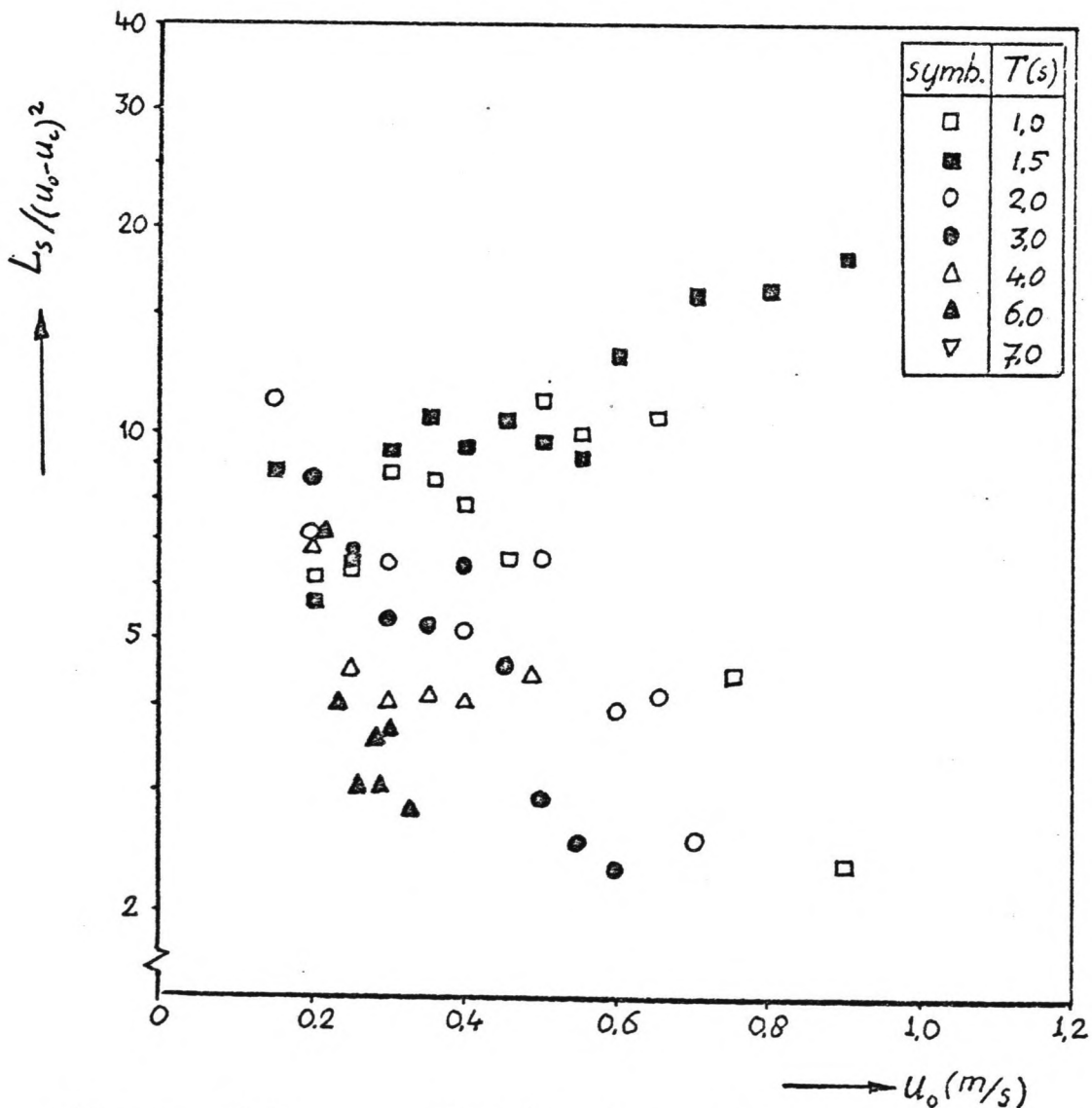
Figuur 46a : Karakteristieke relatieve spreiding als functie van snelheid en periode.



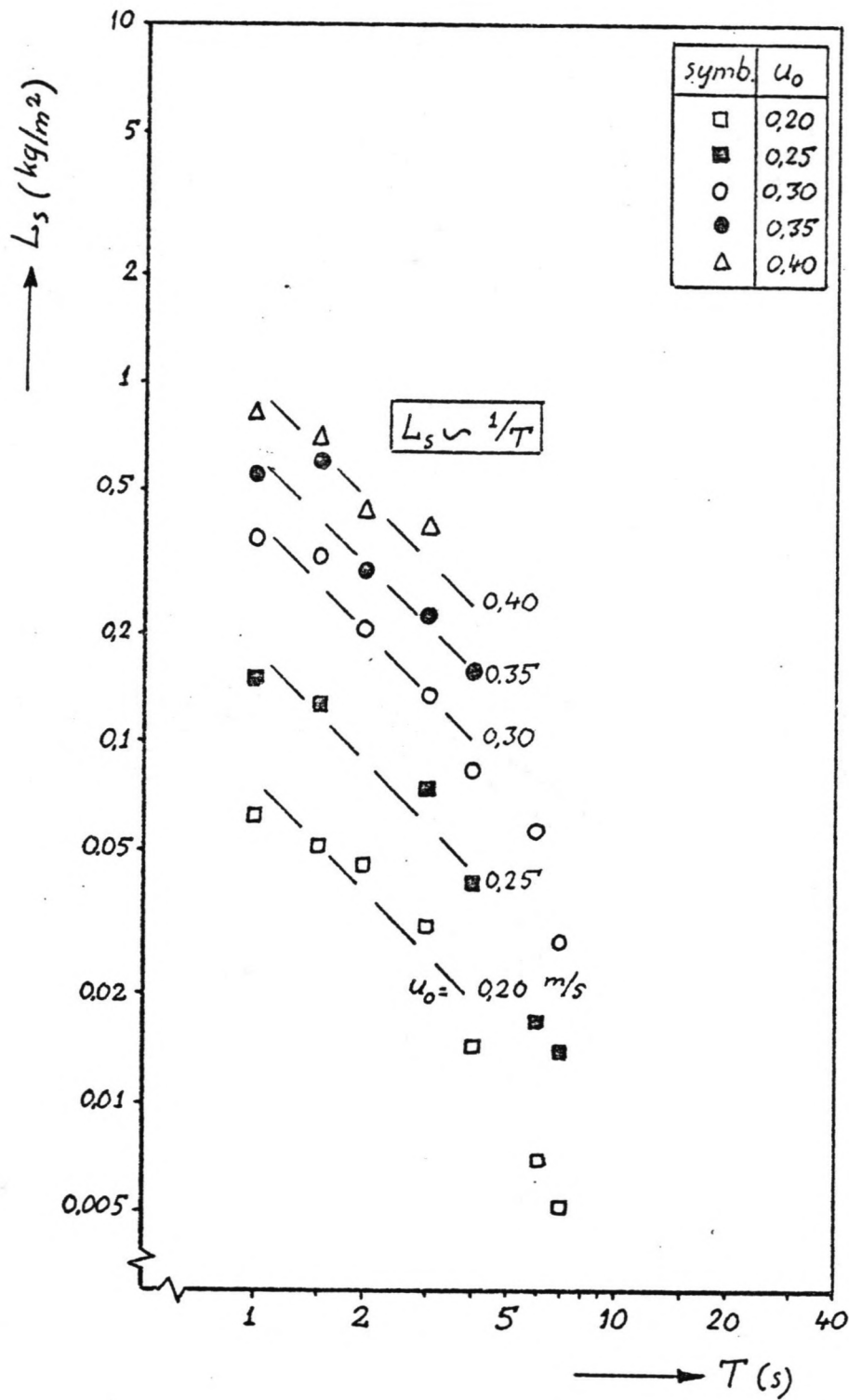
Figuur 46b : Verband karakteristieke relatieve spreiding.



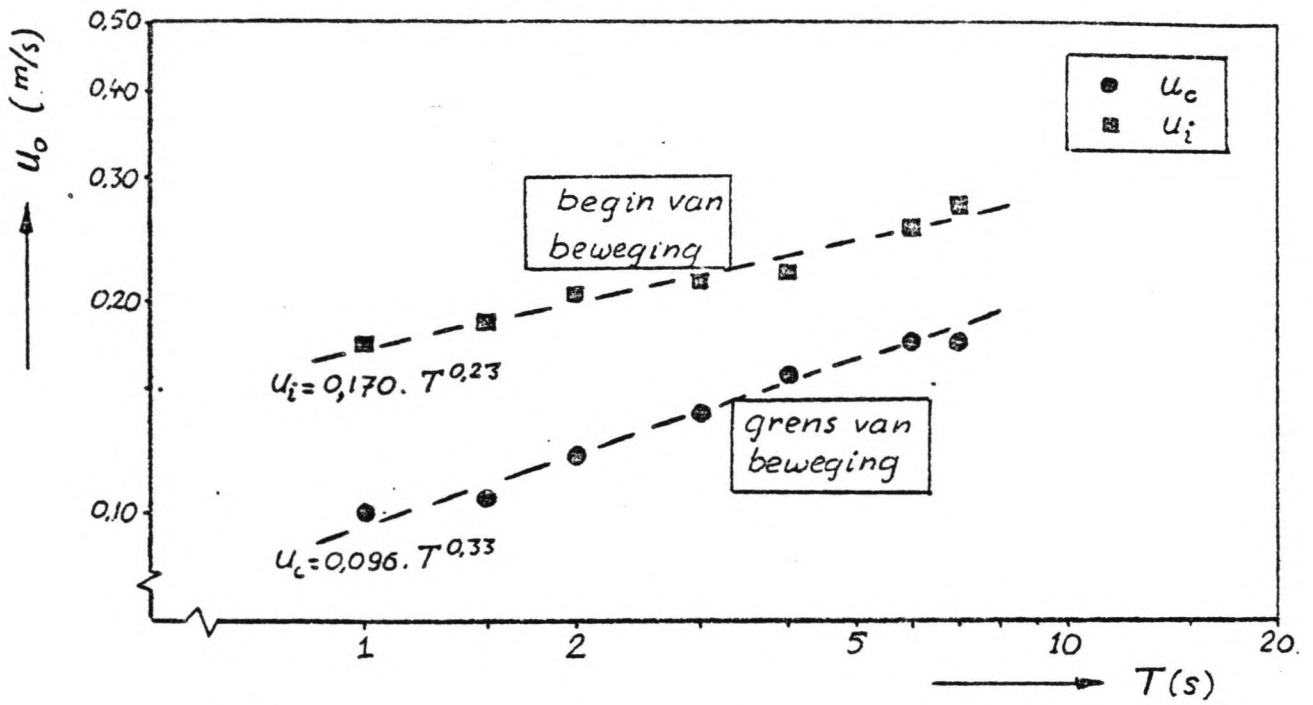
Figuur 47a : Macht van snelheid voor verschillende L_s -beschrijvende verbanden.



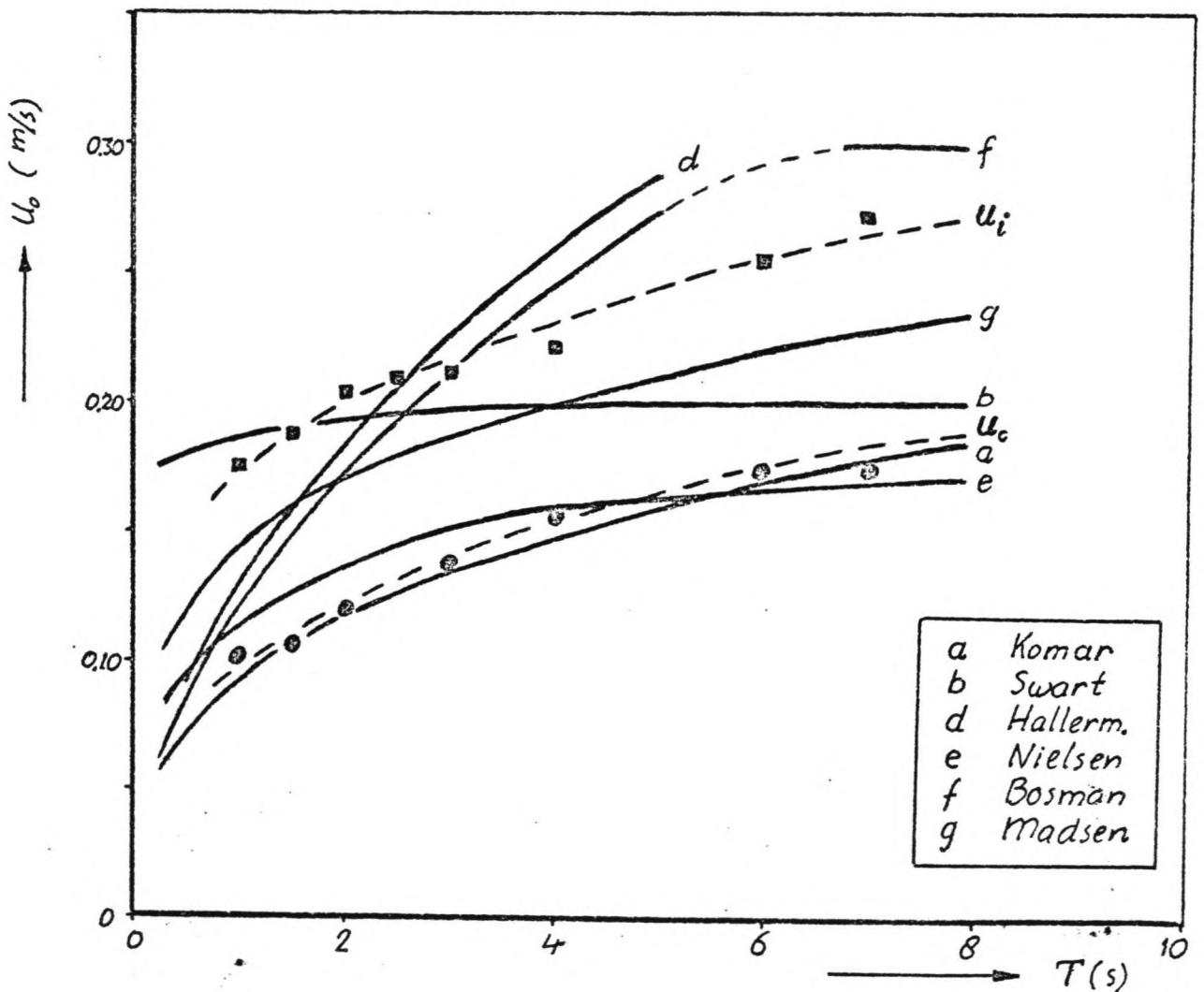
Figuur 47b : Relatie L_s met $(u_0 - u_c)^2$ als functie van snelheid en periode.



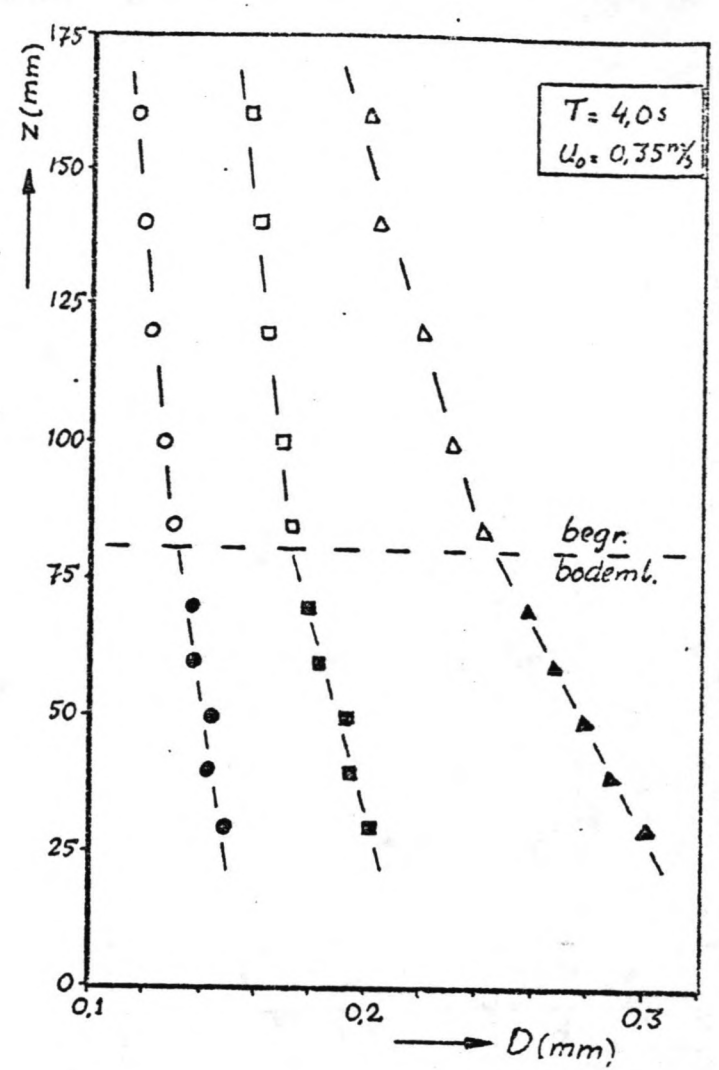
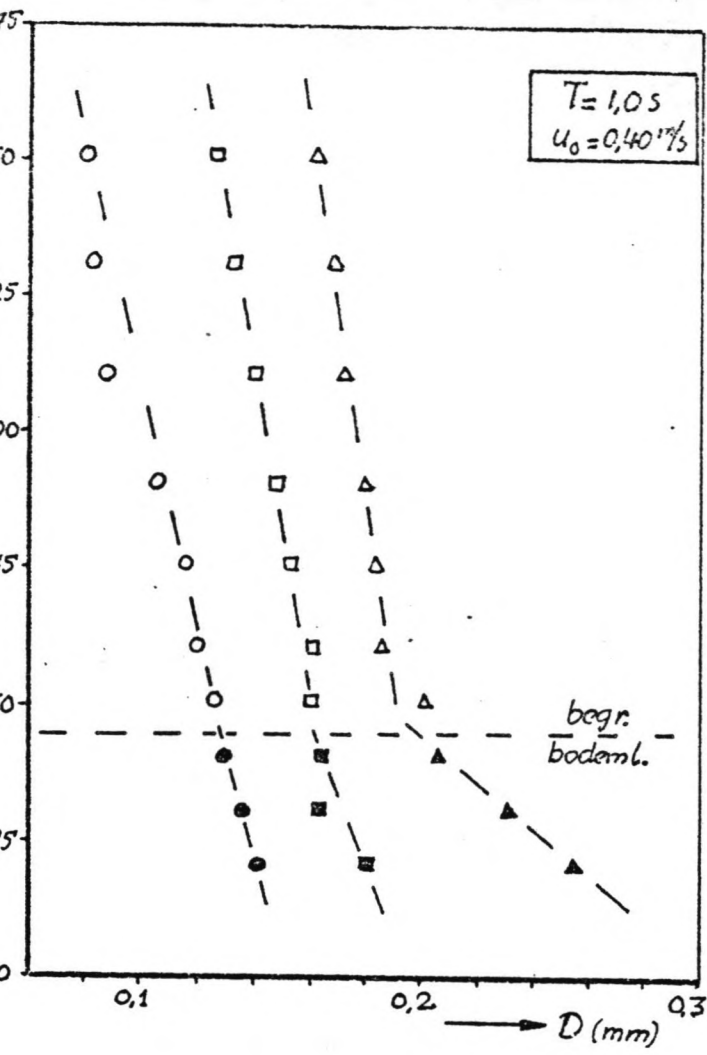
Figuur 4-8 : Snelheids- en periodeafhankelijkheid van de total load.



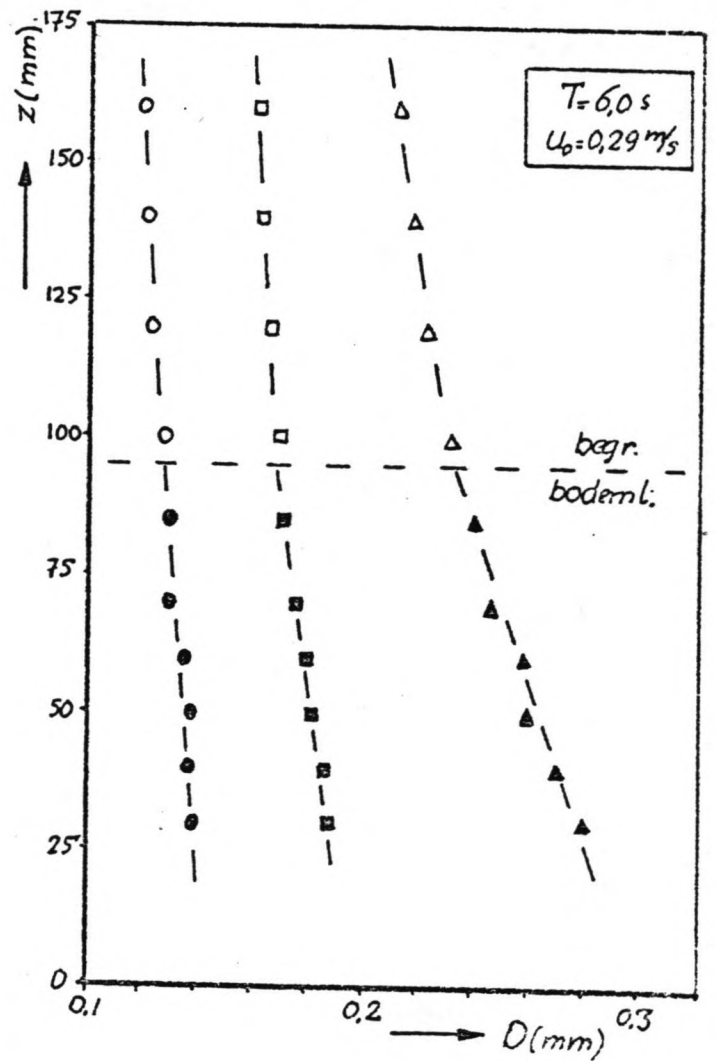
Figuur 49a : Kritieke snelheden als functie van de periode.



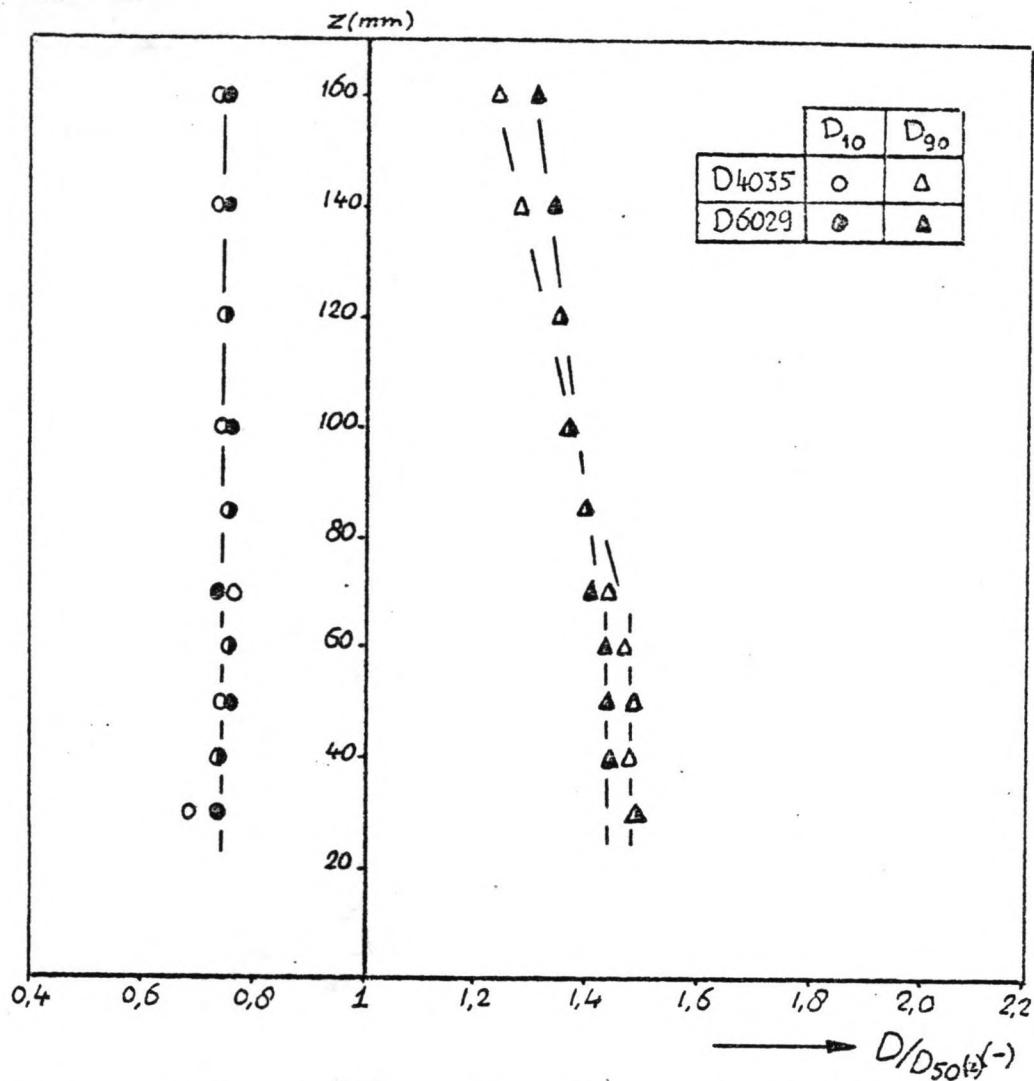
Figuur 49b : Vergelijking gevonden verbanden met die van figuur 13a.



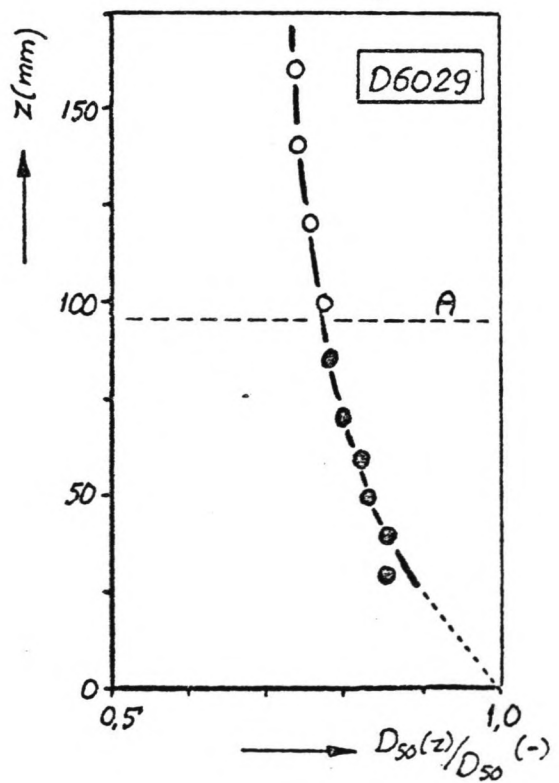
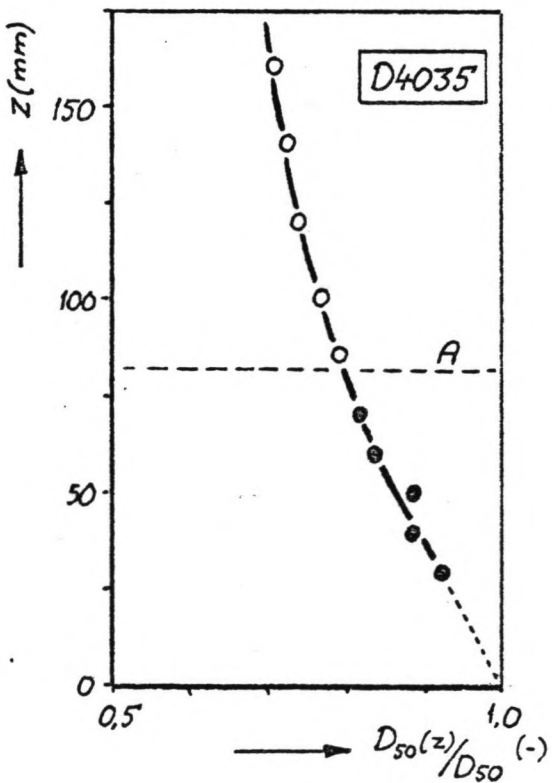
symp.	D_x
○	D_{10}
□	D_{50}
△	D_{90}



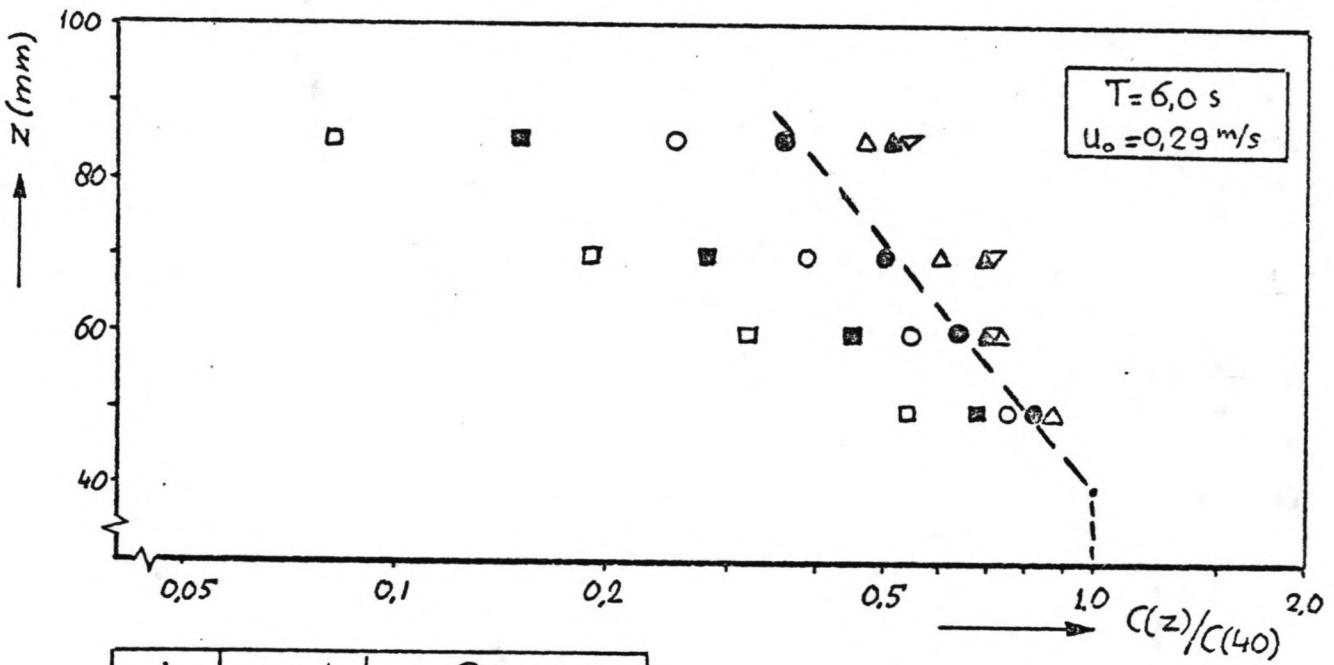
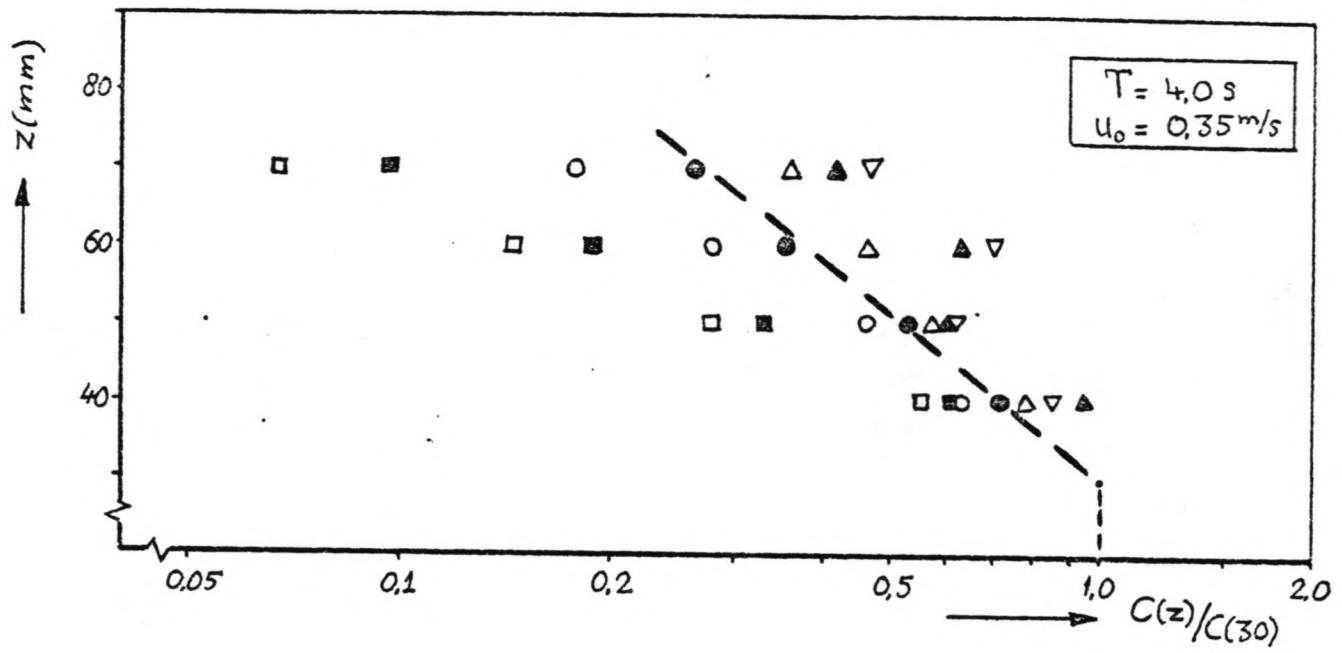
Figuur 50 : Zeefdiameters als functie van de hoogte.



Figuur 51 a : Parameter D/D_{50} als functie van de hoogte.

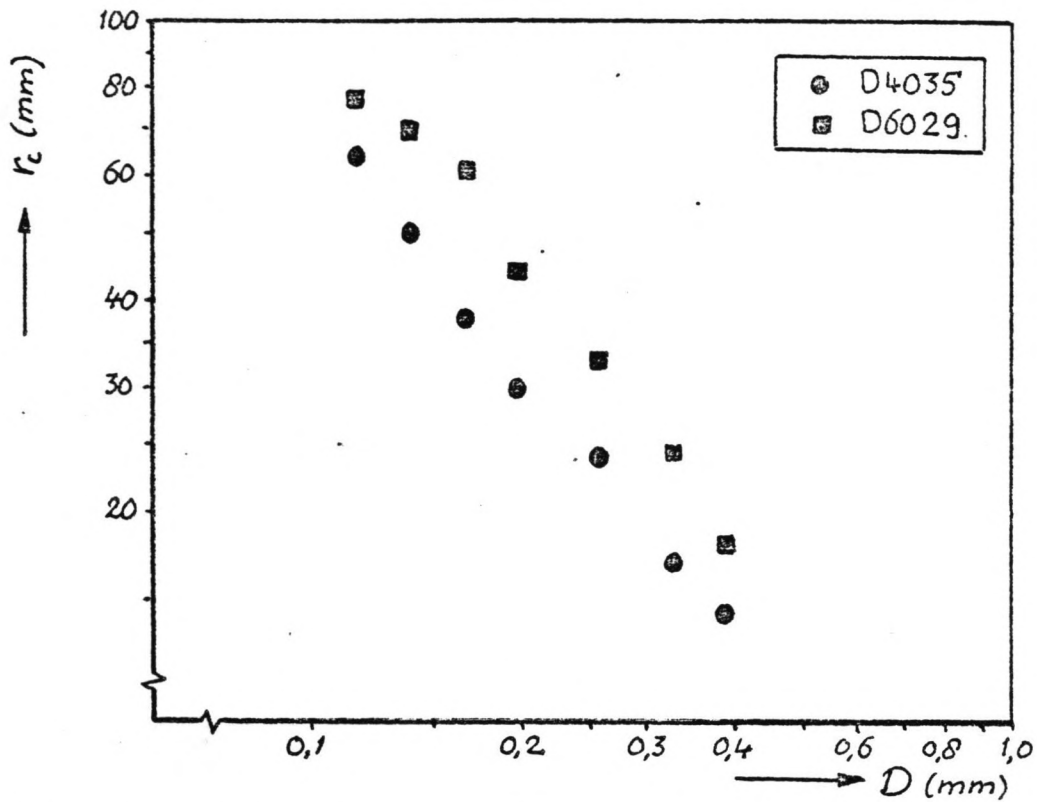


Figuur 51 b : Parameter $D_{50}(z)/D_{50}$ als functie van de hoogte.

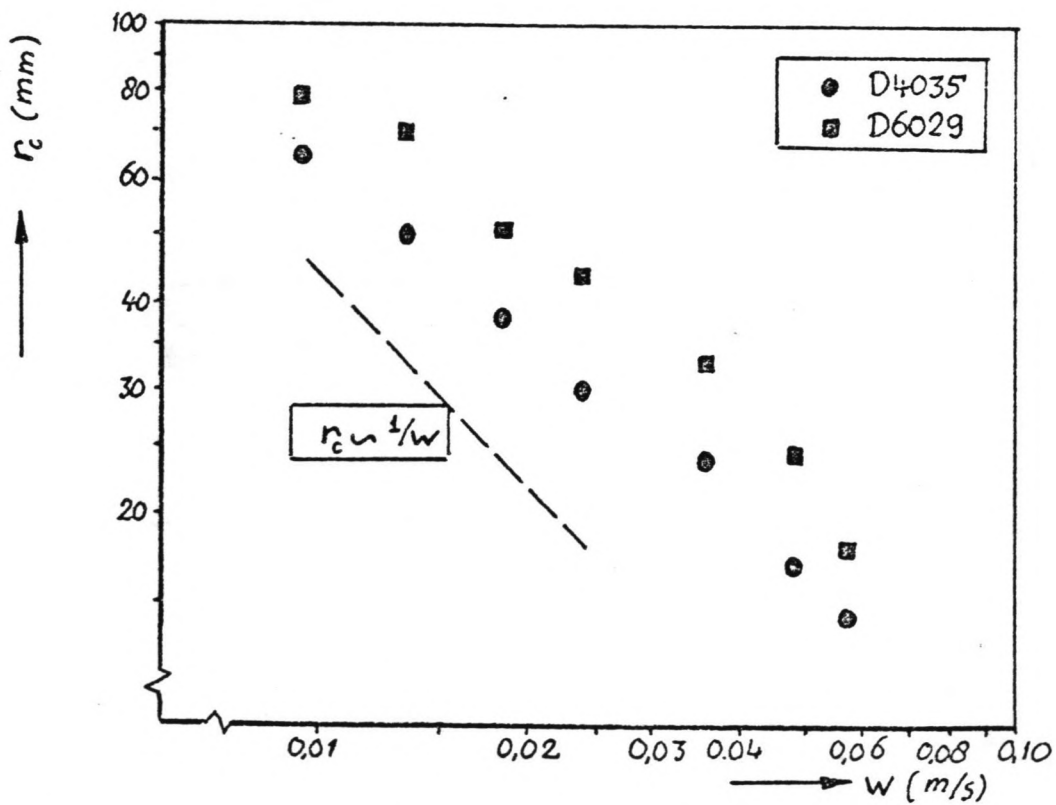


i	symp	$D(\text{mm})$
1	□	0.350 - 0.420
2	■	0.300 - 0.350
3	○	0.212 - 0.300
4	●	0.180 - 0.212
5	△	0.150 - 0.180
6	▲	0.125 - 0.150
7	▽	0.106 - 0.125
M	--	0.106 - 0.420

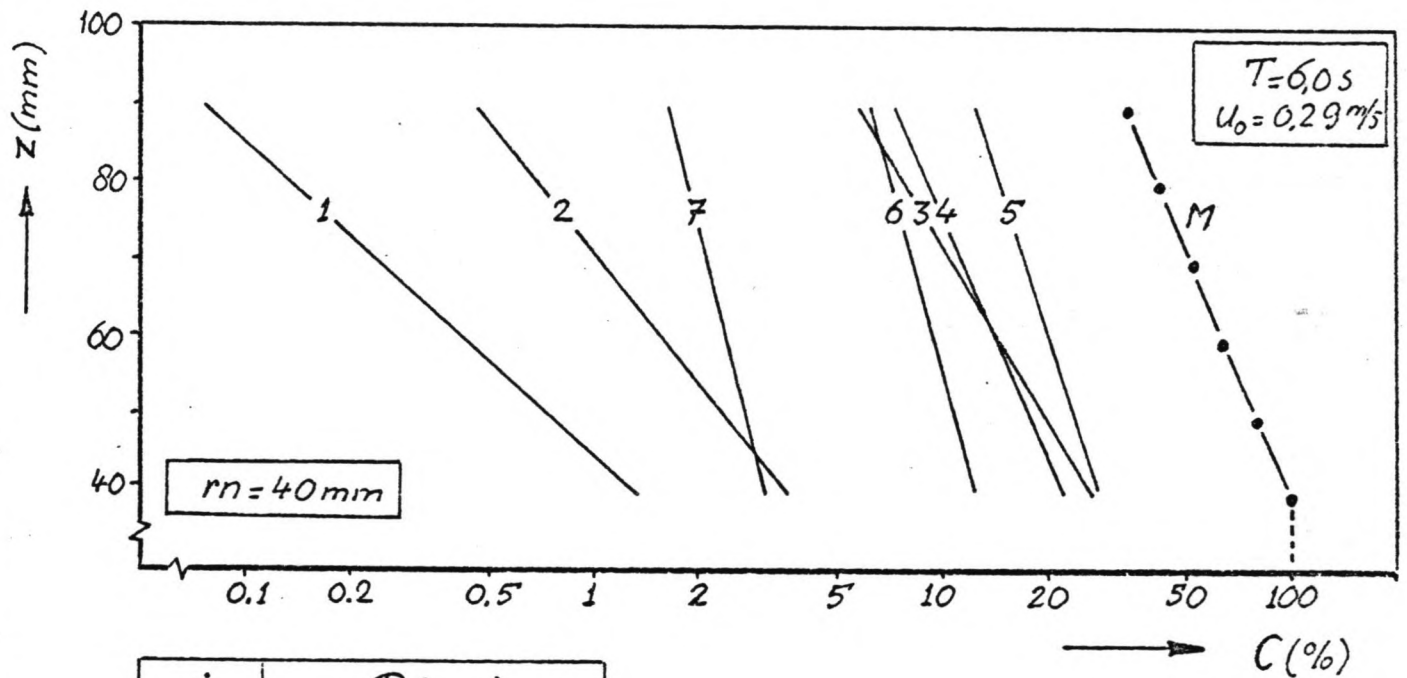
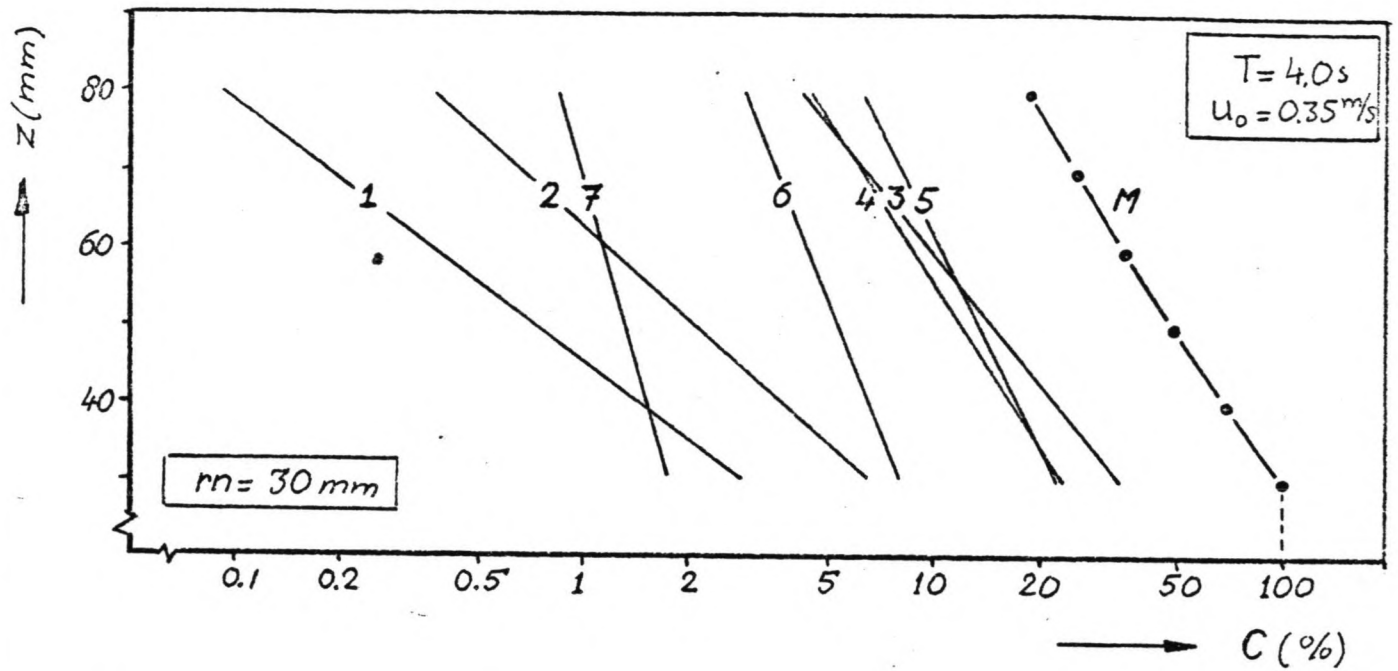
Figuur 52 : Invloed korreldiameter op concentratieverdeling.



Figuur 53 a : Verband tussen de korreldiameter (gem. per fractie) en de afnamelengte.

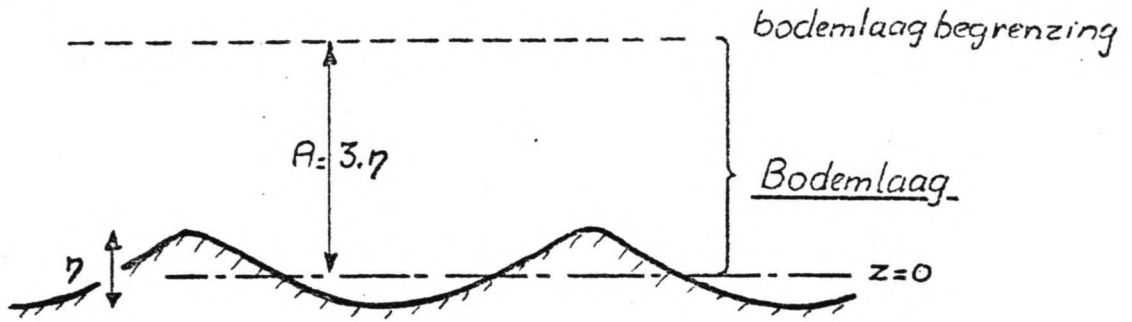


Figuur 53 b : Verband tussen de valsnelheid (gem. per korrelfractie) en de afnamelengte.



i	$D(mm)$
1	0.350 - 0.420
2	0.300 - 0.350
3	0.212 - 0.300
4	0.180 - 0.212
5	0.150 - 0.180
6	0.125 - 0.150
7	0.106 - 0.125
M	Σi

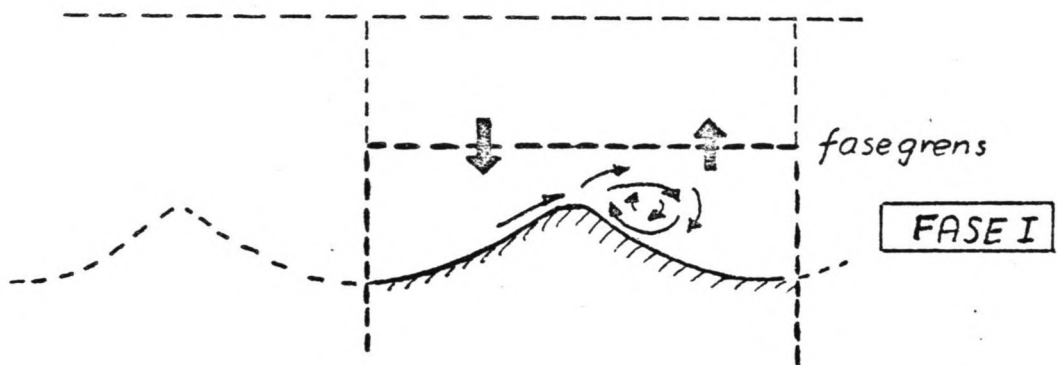
Figuur 54 : Mengsel samengesteld uit exponentieel concentratieverloop per korrel fractie (concentratie op ref.niv. is 100%).



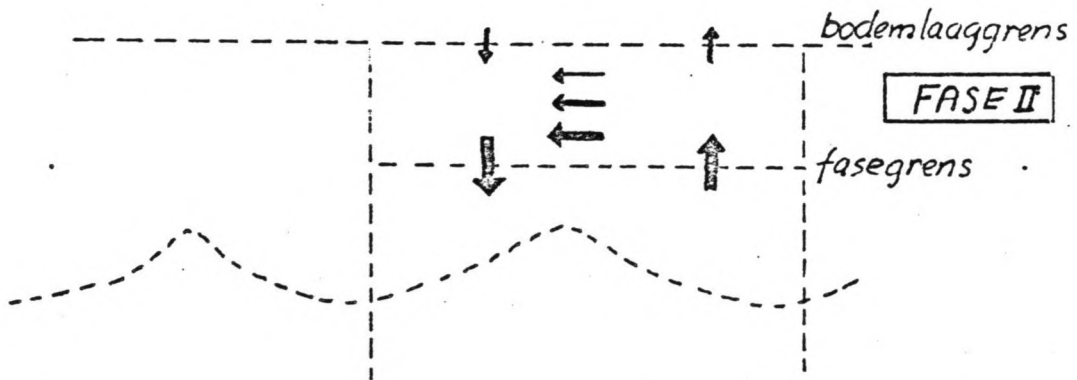
Figuur 55a : De bodemlaag.



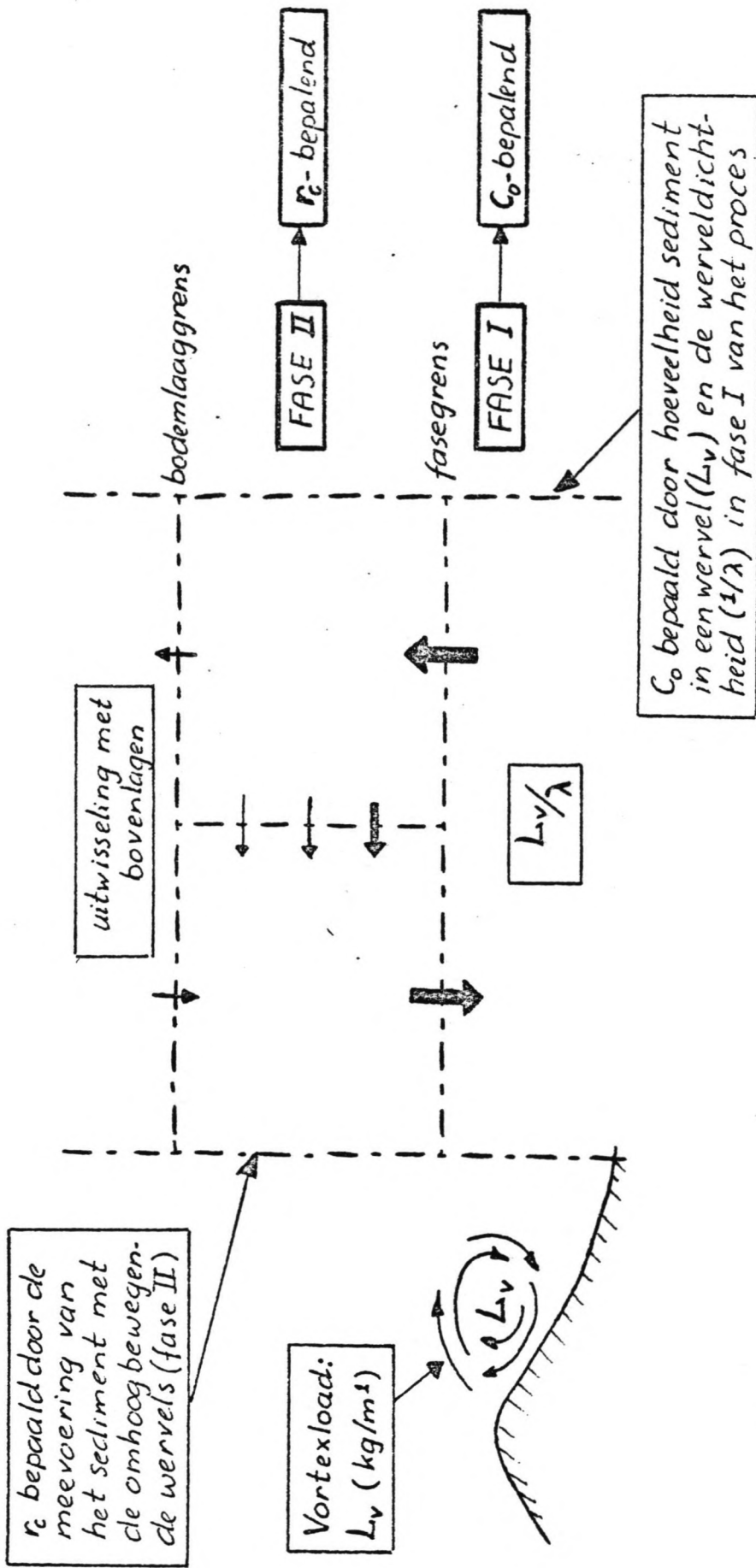
Figuur 55b : De waterwervel met daarin de zandwervel.



Figuur 55c : Fase I van het suspensie proces.



Figuur 55d : Fase II van het suspensie proces.



Figuur 56: Suspensie vorming/verdeling beschrijvend model.

