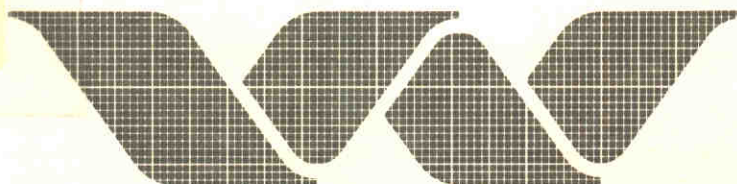


M 2130/Q 232



DOK

waterloopkundig laboratorium  
delft hydraulics laboratory

dimensies van beddingvormen onder  
permanente stromingsomstandigheden  
bij hoog sedimenttransport

AFGEHANDELD

verslag onderzoek

---

M 2130/Q 232

januari 1986

M2130

---

dimensies van beddingvormen onder  
permanente stromingsomstandigheden  
bij hoog sedimenttransport

verslag onderzoek

---

M 2130/Q 232

januari 1986

INHOUD

blz.

SUMMARY AND CONCLUSIONS..... i  
TABELLENLIJST..... vii  
FIGURENLIJST..... viii  
SYMBOLENLIJST..... xi

Samenvatting.....xiii

1. Inleiding..... 1  
1.1 Opdracht..... 1  
1.2 Probleemstelling..... 1  
1.3 Doel en opzet van het onderzoek..... 3  
2. Theorie evenwichtsafmetingen van beddingvormen..... 5  
2.1 Algemeen..... 5  
2.2 De theorie van Fredsøe..... 5  
2.3 De relaties van Van Rijn..... 7  
3. Ruwheidsvoorspellers..... 9  
3.1 Algemeen..... 9  
3.2 Ruwheidsvoorspeller van Van Rijn..... 9  
3.3 Ruwheidsvoorspeller van Engelund..... 10  
4. Uitvoering van de gootproeven..... 12  
4.1 Algemeen..... 12  
4.2 Beschrijving van de faciliteit..... 12  
4.3 Opzet van de gootproeven..... 13  
4.4 Metingen..... 14  
5. Bewerking van de meetresultaten..... 16  
5.1 Algemeen..... 16  
5.2 Stromingsgrootheden en ruwheidsvoorspellers voor de  
gootproeven..... 16  
5.3 Transportgrootheden en beddingvormen voor de gootproeven..... 16  
5.4 Bewerking resultaten van andere metingen..... 18  
5.4.1 Algemeen..... 18  
5.4.2 Bewerking metingen gootproeven andere instituten..... 18  
5.4.3 Bewerking prototypemetingen, buitenlandse rivieren..... 19

## INHOUD (vervolg)

blz.

5.4.3.1	Bewerking prototypemetingen Zaïre Rivier.....	19
5.4.3.2	Bewerking prototypemetingen Missouri Rivier.....	20
5.4.4	Bewerking prototypemetingen Nederlandse Rijntakken en de Maas.....	20
5.4.5	Bewerking prototypemetingen buitenlandse rivieren, alleen stromingsparameters.....	21
6.	<u>Resultaten</u> .....	22
6.1	Algemeen.....	22
6.2	Resultaten van de gootproeven.....	22
6.3	Resultaten van andere metingen.....	29
6.3.1	Algemeen.....	29
6.3.2	Resultaten van gootproeven, andere instituten.....	29
6.3.3	Resultaten van prototypemetingen, buitenlandse rivieren.....	32
6.3.3.1	Algemeen.....	32
6.3.3.2	Resultaten prototypemetingen Zaïre Rivier.....	33
6.3.3.3	Resultaten prototypemetingen Missouri Rivier.....	37
6.3.4	Resultaten prototypemetingen Nederlandse Rijntakken en Maas..	40
6.3.5	Resultaten prototypemetingen buitenlandse rivieren, alleen stromingsparameters.....	43
6.4	Resultaten van alle gootproeven en prototypemetingen.....	44
7.	<u>Conclusies en aanbevelingen</u> .....	48
7.1	Conclusies gootproeven.....	48
7.2	Conclusies prototypemetingen.....	49
7.3	Algemeen conclusies.....	51
7.4	Aanbevelingen.....	52

## LITERATUUR

## TABELLEN

## FIGUREN

APPENDIX A (Theorie van Fredsøe)

APPENDIX B (Formuleringen)

APPENDIX C (Bepaling beddingvormafmetingen)

APPENDIX D (Korrelaties beddingvormen, voortplantingssnelheid)

...the ... of ...

...the ... of ...

...the ... of ...

...the ... of ...

...the ... of ...

...the ... of ...

...the ... of ...

...the ... of ...

...the ... of ...

## SUMMARY AND CONCLUSIONS

### SUMMARY

To compute extreme stages during floods, along the Dutch branches of the River Rhine, the bed roughness is of great importance. The bed roughness is determined, among other things, by the dimensions of bedforms. A theoretical and empirical method to predict bedform dimensions under certain flow conditions were presented by Fredsøe and Van Rijn respectively. It appears from the methods mentioned that the bedform height decreases for high flow velocities and subsequently causes a lower bed resistance. This reduction of bed roughness has important consequences for the computation of the extreme stages during floods.

To investigate the applicability of the bedform predictors for extreme river discharges on the branches of the Rhine, the theory of Fredsøe was tested by using results of measurements. A series of tests with graded bed material was carried out in the sand flume of the Delft Hydraulics Laboratory, to study the dimensions of bedforms under various flow conditions. The range from low flow velocities (growth of bedforms) to high flow velocities (predicted decrease of bedform height) was investigated. During the tests quantities used in the theory such as bedform dimensions and sediment transports, were measured. Supplemental experimental results were used to test the theory, including flume tests carried out by other institutes, the Zaïre and Missouri River and the Dutch branches of the Rhine and the Meuse River. The relations for bedform dimensions by Van Rijn were also tested, as well as the roughness predictors of Van Rijn and Engelund.

The results of the sand flume tests, supplemented with other flume tests and prototype results indicate that the theoretical relation for the bedform height by Fredsøe is not supported by measured results. Generally Van Rijn's empirical relations for bedform dimensions are in better agreement with the measured values. The sand flume tests indicate that the bed roughness is decreasing for increasing discharge due to stretching of bedforms, while the relative bedform height remains more or less constant. It appears that the definition of flat bed for high discharges is arbitrary; it is more appropriate to speak of smooth bed for high discharges. For some measurements in pro-

prototype it is observed that the bedforms are increasing in length instead of decreasing in bedform height for increasing discharge. For all results, flume tests and prototype, it appears that the bed roughness is decreasing slightly for increasing discharge. Note that this tendency is based on overall results but does not necessarily hold for any single given series of experiments.

In general for prototype conditions during extreme floods there is no drastic decrease of the roughness height to account for. Extrapolation of the roughness to extreme flood conditions, based on the measured roughness during low and median discharges, remains speculative. In the recommendations (paragraph 7.4) a method is presented using the provided information to make a reasonable estimate of the bed roughness of a river for extreme floods.

## CONCLUSIONS

### Conclusions of flume tests

#### Tests in the sand flume of DHL:

- a. From the 9 permanent flow conditions in the sand flume, with T-parameter range from 5 to 25, it appears that the relative bedform height ( $H/h$ ) is almost constant (for  $5 < T < 15$ ). In terms of the dimensionless grain shear stress at the bedform top ( $\theta'_{top}$ ) it means that  $H/h$  is almost constant for  $0.35 < \theta'_{top} < 0.75$  (see Figure 16). The bedform steepness ( $H/L$ ) decreases for increasing T, as L increases (Figure 10-E).
- b. The Chézy coefficient (C) increases with increasing grain shear stress ( $\theta'$ ) Figure 9. The increase of C with  $\theta'$ , is due to the stretching of the bedforms. It is noted that a complete flat bed did not occur, even for  $T=25$  and a Froude number of 0.8.
- c. The theory of Fredsøe for bedform dimensions under permanent flow conditions ( $5 < T < 25$ ) predicts the bedform heights a factor 4 too low compared to the sand flume results. No clear decrease of bedform height was observed for high discharges, while the theory predicts a decrease of bedform height. The bedform steepness curve from the flume tests shows the same tendency as the relation of Fredsøe. However, the relation predicts the steepness too low by a factor 3 compared to the sand flume results, for  $T > 8$  (see Figure 16).

- d. The relations of Van Rijn for bedform dimensions underestimate the bedform height from the tests for  $T > 8$  by a factor 2. The bedform steepness is underestimated for  $T > 8$  by a factor 1.5. In the sand flume tests the bedform height and steepness appear not to approach zero for  $T = 25$  (in deviation from the relations). For high values of  $T$  the bedform height is not decreasing drastically but the steepness of the bedforms does decrease (see Figure 18).
- e. Using the measured bedform dimensions the roughness predictor of Van Rijn predicts too high roughness heights ( $k$ ) under all flow conditions in the flume, (see Figure 19). It is noted, however, that the validity range of Van Rijn's formulae was only fulfilled for the flow situations,  $T = 15$  and  $T = 25$ .
- f. The roughness predictor of Engelund predicts too high values for  $k$  compared to the results from the sand flume. It gives, however, closer estimates for  $k$  than the predictor of Van Rijn. (see Figure 20).

Flume testst carried out by other institutes:

- g. The conclusions with respect to the Chézy coefficient and the theory of Fredsøe under b and c are valid for these tests. The results of the tests are divided in three ranges for the mean grain size;  $200 \mu\text{m} < D_{50} < 400 \mu\text{m}$ ,  $400 \mu\text{m} < D_{50} < 600 \mu\text{m}$  and  $600 \mu\text{m} < D_{50} < 850 \mu\text{m}$ . Every range shows similar results (see Figure 21 and 22). The deviations of the test results from the relations of Fredsøe for bedform height and steepness vary by a factor 1 to 10.
- h. The conclusion with respect to the relations of Van Rijn under d is valid for these tests as well. The relations of Van Rijn show deviations from the measured bedform dimensions by a factor 2 to 3 except for the range  $T < 3$  where the discrepancies are larger, see Figure 23.
- i. The roughness length based on the predictors of Van Rijn and of Engelund deviate considerably from the roughness length  $k$  determined from the flow parameters (see Figure 24, 25-A and 25-B). However, here the Van Rijn predictor felt outside of its valid range of applicability, as mentioned under conclusion e.
- j. Various methods have been used to determine the bedform dimensions for the various tests carried out by other institutes.



### Conclusions of prototype measurements

#### Zaire River:

- k. The conclusion with respect to the Chézy coefficient under b is valid for the results of the Zaire River, see Figure 27.
- l. The large bedforms in the Zaire River are predicted well by the relations of Fredsøe. The number of results, however, is limited as well as the range of the T-parameter ( $10 < T < 15$ ), see Figure 30. Dimensions of smaller bedforms superimposed on the large bedforms are not predicted well by the relations.
- m. Van Rijn's bedform formulae predict the large bedforms well, see Figure 31. The smaller bedforms are not predicted properly. It is noted that the relations have been set up using large bedforms, without regarding smaller bedforms.
- n. The roughness predictor of Van Rijn, using the large bedform dimensions, predicts the Chézy coefficient, with a spreading of 20 % compared to the roughness computed from the flow parameters, see Figure 33. The method of Engelund shows larger deviations. The Chézy coefficient lies between 50 and  $60 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ .

#### Missouri River:

- o. The conclusion with respect to the Chézy coefficient under b is valid for the results of the Missouri River, see Figure 35.
- p. The theory of Fredsøe underestimates the measured bedform height, by a factor 6. The measured bedform steepness is predicted well (see Figure 37).
- q. The relations of Van Rijn underestimate the measured bedform height by a factor 5 and the bedform steepness is predicted reasonably well, see Figure 38,
- r. The roughness predictors of Van Rijn and of Engelund overestimate the measured Chézy coefficient by a mean factor of 2 and 1.5 respectively (see Figure 40). Here only the large bedforms are considered.

Dutch branches of the Rhine River and Meuse River:

- s. Taking into account all investigated river branches a slight increase of the Chézy coefficient with increasing  $\theta'$  is noticeable. For the separate branches this tendency is absent, due to the limited number of results, see Figure 41.
- t. The theory of Fredsøe predicts the relative bedform height well for  $\theta'_{top} > 0.5$ . The bedform steepness is predicted too low by a factor 1.5, for  $\theta'_{top} > 0.5$ , see Figure 42.
- u. The relation of Van Rijn predicts the relative bedform height by a factor 1.5 to 2 too low, for  $T > 13$ . The bedform steepness is estimated by a factor 8 too low, see Figure 43. The bedform steepness of the prototype results, defined according to Van Rijn, does not show a decrease of the steepness for increasing T-parameter (from  $T=10$  to  $T=18$ ).
- v. The roughness predictors of Van Rijn and of Engelund both predict the Chézy coefficient about 10% too low. The predictor of Van Rijn is somewhat better than the predictor of Engelund, see Figure 45.

Some other foreign rivers:

- w. The conclusion with respect to the Chézy coefficient under b is valid for all rivers considered (Atchafalaya, Mississippi, Red River, Rio Grande, U.S. Rivers, Colorado and Snake River) see Figure 46-A to 46-G.

General conclusions

From the results of the flume tests and measurements in prototype the following general conclusions can be drawn:

1. From the various cases where bedforms were recorded it appears that the relative bedform height does not change significantly with increasing discharge. The bedform length, increases with increasing discharge, and the bedform steepness decreases with increasing discharge.
2. Making the Chézy coefficient dimensionless with the flow depth and a characteristic grain size for all prototype results and plotting it against the T-parameter, it appears that a lower limit for the Chézy coefficient is present. This lower limit, which increases slightly with increasing T, can be used to estimate a conservative Chézy coefficient for extreme floods (see Figure 47-B). Based on the results of all prototype measurements the bed roughness height  $k$  shows a decreasing tendency with increasing flow

velocity (see Figure 48-B). However, per river this tendency is not that obvious (see paragraph 6.4), possibly due to the unsteady flow conditions.

3. Under prototype conditions the large bedforms (length a few times 10 meters, height in the order of a meter) have in general a gentle slope of the leeward side so that separation of the flow at the top of the bedforms does not occur. Separation of the flow is the main cause of the form resistance of the riverbed. The smaller bedforms (length a few meters, height some tenth of meters) superimposed on the large bedforms often do have a steep leeward side so that the bed roughness is determined mainly by these smaller bedforms (see Ogink, 1984). The dimensions of the smaller bedforms are not considered in many results of prototype measurements.

The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every entry, no matter how small, should be recorded to ensure the integrity of the financial statements. This includes not only sales and purchases but also expenses and income. The document provides a detailed list of items that should be tracked, such as inventory levels, accounts payable, and accounts receivable. It also outlines the proper procedures for recording these transactions, including the use of double-entry bookkeeping and the importance of regular reconciliations.

The second part of the document focuses on the analysis of the recorded data. It explains how to interpret the financial statements to identify trends and potential areas of concern. Key indicators such as profit margins, liquidity ratios, and debt-to-equity ratios are discussed in detail. The document provides examples of how to calculate these ratios and how to compare them against industry benchmarks. It also offers advice on how to use this information to make informed business decisions and to identify opportunities for improvement.

Finally, the document addresses the importance of transparency and accountability in financial reporting. It stresses that all stakeholders, including investors, creditors, and regulatory bodies, have a right to know the true financial position of the company. To achieve this, the document recommends the use of standardized accounting practices and the engagement of independent auditors to verify the accuracy of the financial statements. It also discusses the consequences of providing false or misleading information and the importance of maintaining a strong ethical foundation in all financial reporting activities.

TABELLENLIJST

- 1: Stromingssituaties gootproeven
- 2: Sediment karakteristieken voor de gootproeven
- 3: Overzicht resultaten van de gootproeven
- 4: Overzicht resultaten prototypemetingen, Zaïre
- 5: Overzicht resultaten prototypemetingen, Missouri
- 6: Overzicht resultaten prototypemetingen, Ned. Rijntakken en Maas

FIGURENLIJST

- 1 Beddingvormhoogte en -steilheid volgens Fredsøe
- 2 Beddingvormhoogte en -steilheid volgens Van Rijn
- 3 Equivalente ruwheid van beddingvormen volgens Van Rijn
- 4 Overzicht van de zandgoot
- 5 Zeefkromme's zandgootmateriaal 1 en 2
- 6 Suspensietransport meetsysteem
- 7-A Foto's bodemtransport opvangbak en suspensietransport meetsysteem
- 7-B Foto's volumemeter en overzicht meetsysteem
- 7-C Foto's transport op beddingvormen
- 7-D Foto's transport op beddingvormen
- 8-A Karakteristieken korrelmateriaal in de tijd,  
bodemmateriaal en suspensietransport
- 8-B Karakteristieken korrelmateriaal in de tijd,  
bodemtransport en zandvang
- 9 Stromingsweerstand als functie van de korrelweerstand
- 10-A Beddingvormregistraties,  $Q = 0,101 \text{ m}^3/\text{s}$  en  $Q = 0,173 \text{ m}^3/\text{s}$
- 10-B Beddingvormregistraties,  $Q = 0,235 \text{ m}^3/\text{s}$  en  $Q = 0,295 \text{ m}^3/\text{s}$
- 10-C Beddingvormregistraties,  $Q = 0,353 \text{ m}^3/\text{s}$  (T1-E1 en T1-E2)
- 10-D Beddingvormregistraties,  $Q = 0,392 \text{ m}^3/\text{s}$  en  $Q = 0,411 \text{ m}^3/\text{s}$
- 10-E Beddingvormregistratie,  $Q = 0,441 \text{ m}^3/\text{s}$  en beddingvormafmetingen  
als functie van  $\theta'$
- 11 Dimensieloos totaal- en bodemtransport op de beddingvormtop.
- 12-A Totaal sedimenttransport als functie van de tijd,  $Q = 0,101 \text{ m}^3/\text{s}$   
en  $Q = 0,173 \text{ m}^3/\text{s}$
- 12-B Totaal sedimenttransport als functie van de tijd,  $Q = 0,235 \text{ m}^3/\text{s}$   
en  $Q = 0,295 \text{ m}^3/\text{s}$
- 12-C Totaal sedimenttransport als functie van de tijd,  $Q = 0,353 \text{ m}^3/\text{s}$   
(T1-E1) en  $Q = 0,411 \text{ m}^3/\text{s}$
- 13-A Gemeten suspensie transport op beddingvormtop
- 13-B Gemeten suspensie transport op beddingvormtop
- 13-C Concentratie- en snelheidsprofielen op de beddingvormtop
- 13-D Concentratie- en snelheidsprofielen op de beddingvormtop
- 13-E Concentratie- en snelheidsprofielen op de beddingvormtop
- 13-F Concentratie- en snelheidsprofielen op de beddingvormtop

FIGURENLIJST (vervolg)

- 14 Dimensieloos gemiddeld totaal- en bodemtransport als functie van de T-parameter
- 15 Dimensieloos gemiddeld totaaltransport als functie van  $\theta$  en  $\theta'$
- 16 Relatieve beddingvormhoogte en -steilheid volgens Fredsøe
- 17 Relatieve beddingvormhoogte volgens Fredsøe, gemeten grootheden
- 18 Beddingvormhoogte en -steilheid volgens Van Rijn
- 19 Equivalente ruwheid als functie van de steilheid van beddingvormen
- 20 Ruwheidshoogte en Chézy-coëfficiënt gemeten en volgens Van Rijn en Engelund.
- 21 Stromingsweerstand als functie van de korrelweerstand, S6-goten
- 22 Relatieve beddingvormhoogte en -steilheid volgens Fredsøe, S6-goten
- 23 Beddingvormhoogte en -steilheid volgens Van Rijn, S6-goten
- 24 Equivalente ruwheid als functie van de steilheid van beddingvormen, S6-goten
- 25-A Ruwheidshoogte en Chézy-coëfficiënt gemeten en volgens Van Rijn, S6-goten
- 25-B Ruwheidshoogte en Chézy-coëfficiënt gemeten en volgens Engelund, S6-goten
- 26 Meetraaien Matéba Amont en voorbeelden bodemvormen bij verschillende afvoeren, Zaïre
- 27 Stromingweerstand als functie van de korrelweerstand, Zaïre
- 28 Dimensieloos gemiddeld totaal- en bodemtransport als functie van de T-parameter, Zaïre
- 29 Dimensieloos gemiddeld totaal- en bodemtransport als functie van  $\theta'$  en  $\theta$ , Zaïre
- 30 Relatieve beddingvormhoogte en -steilheid volgens Fredsøe, Zaïre
- 31 Beddingvormhoogte en -steilheid volgens Van Rijn, Zaïre
- 32 Equivalente ruwheid als functie van de steilheid van beddingvormen, Zaïre
- 33 Ruwheidshoogte en Chézy-coëfficiënt gemeten en volgens Van Rijn en Engelund, Zaïre
- 34 Verloop korrelkarakteristieken in de tijd van de Missouri Rivier 1966-1975
- 35 Stromingsweerstand als functie van de korrelweerstand, Missouri

FIGURENLIJST (vervolg)

- 36 Beddingvormen Missouri Rivier bij verschillende afvoeren (USAE, 1969)
- 37 Relatieve beddingvormhoogte en -steilheid volgens Fredsøe, Missouri
- 38 Beddingvormhoogte en -steilheid volgens Van Rijn, Missouri
- 39 Equivalente ruwheid als functie van de steilheid van beddingvormen, Missouri
- 40 Ruwheidshoogte en Chézy-coëfficiënt gemeten en volgens Van Rijn en Engelund, Missouri
- 41 Stromingsweerstand als functie van de korrelweerstand, Ned. Rijntakken en Maas
- 42 Relatieve beddingvormhoogte en -steilheid volgens Fredsøe, Waal
- 43 Beddingvormhoogte en -steilheid volgens Van Rijn, Waal
- 44 Equivalente ruwheid als functie van de steilheid van beddingvormen, Waal
- 45 Ruwheidshoogte en Chézy-coëfficiënt gemeten en volgens Van Rijn en Engelund, Waal.
- 46-A Stromingsweerstand als functie van de korrelweerstand, Atchafalaya
- 46-B Stromingsweerstand als functie van de korrelweerstand, Mississippi
- 46-C Stromingsweerstand als functie van de korrelweerstand, Red River
- 46-D Stromingsweerstand als functie van de korrelweerstand, Rio Grande
- 46-E Stromingsweerstand als functie van de korrelweerstand, U.S. Rivers
- 46-F Stromingsweerstand als functie van de korrelweerstand, Colorado
- 46-G Stromingsweerstand als functie van de korrelweerstand, Snake River
- 47-A Chézy-coëfficiënt gekorrigeerd voor waterdiepte als functie van T, alle resultaten, S6-goten
- 47-B Chézy-coëfficiënt gekorrigeerd voor waterdiepte als functie van T, alle resultaten, S6-proto
- 48-A Effektieve bodemruwheid als functie van de stroomsnelheid, S6-goten
- 48-B Effektieve bodemruwheid als functie van de stroomsnelheid, S6-proto



SYMBOLENLIJST

a	=	coefficient	(-)
a'	=	coefficient	(-)
B	=	breedte van goot of rivier	(m)
c <sub>b</sub>	=	voortplantingssnelheid beddingvormen	(m/s)
C	=	Chézy-coefficient	(m <sup>1/2</sup> /s)
D <sub>n</sub>	=	korreldiameter waarvan n% van het materiaal fijner is dan D <sub>n</sub>	(m)
f	=	bodemweerstandsfactor	(-)
f'	=	korrelweerstandsfactor	(-)
f''	=	vormweerstandsfactor	(-)
Fr	=	Froude-getal	(-)
g	=	zwaartekrachtsversnelling	(m/s <sup>2</sup> )
h	=	gemiddelde waterdiepte	(m)
h'	=	grenslaagdikte	(m)
H	=	beddingvormhoogte	(m)
i	=	verhang van de energiehoogte	(-)
k	=	ruwheidslengte	(m)
k'	=	korrelruwheidslengte	(m)
k''	=	vormruwheidslengte	(m)
L	=	beddingvormlengte	(m)
n	=	poriëngehalte bodemmateriaal	(-)
q	=	specifiek debiet	(m <sup>2</sup> /s)
Q	=	totaal debiet	(m <sup>3</sup> /s)
R	=	hydraulische straal	(m)
R <sub>b</sub>	=	hydraulische straal van de bodem	(m)
R' <sub>b</sub>	=	grenslaagdikte	(m)
R <sub>w</sub>	=	hydraulische straal van de wand	(m)
s <sub>b</sub>	=	bodemtransport	(m <sup>2</sup> /s)
s <sub>s</sub>	=	suspensietransport	(m <sup>2</sup> /s)
s <sub>t</sub>	=	totaaltransport	(m <sup>2</sup> /s)
T	=	transportparameter	(-)
Te	=	temperatuur	(°C)
u	=	gemiddelde stroomsnelheid	(m/s)
u*	=	bodemschuifspanningssnelheid	(m/s)
u' <sub>*</sub>	=	korrelschuifspanningssnelheid	(m/s)

SYMBOLENLIJST (vervolg)

$w_s$	=	valsnelheid	(m/s)
$\Delta$	=	relatieve dichtheid, $(\rho_s - \rho)/\rho$	(-)
$\theta$	=	dimensieloze bodemschuifspanning	(-)
$\theta'_R$	=	dimensieloze korrelschuifspanning volgens Van Rijn	(-)
$\theta'$	=	dimensieloze korrelschuifspanning	(-)
$\theta''$	=	dimensieloze vormschuifspanning	(-)
$\nu$	=	kinematische viscositeit van water	(m <sup>2</sup> /s)
$\rho_s$	=	dichtheid sediment	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho$	=	dichtheid water	(kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma_D$	=	korrelgradatie	(-)
$\tau_b$	=	bodemschuifspanning ( $\rho g R_b i$ )	(N/m <sup>2</sup> )
$\phi_b$	=	dimensieloos bodemtransport	(-)
$\phi_s$	=	dimensieloos suspensietransport	(-)
$\phi_t$	=	dimensieloos totaaltransport	(-)

The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every entry, no matter how small, should be recorded to ensure the integrity of the financial data. This includes not only sales and purchases but also expenses and income. The text suggests that a systematic approach to record-keeping is essential for identifying trends and making informed decisions.

In addition to record-keeping, the document highlights the need for regular audits. Audits help to verify the accuracy of the records and identify any discrepancies or errors. It is recommended that audits be conducted at regular intervals, such as quarterly or annually, depending on the nature of the business. The text also notes that audits can provide valuable insights into the financial health of the organization and help to prevent fraud.

Another key aspect of financial management is the use of budgeting. A budget provides a clear picture of the organization's financial goals and helps to allocate resources effectively. It allows management to track actual performance against the budget and make adjustments as needed. The document stresses that a well-defined budget is crucial for long-term success and stability.

Finally, the document discusses the importance of transparency and communication in financial management. It encourages organizations to be open about their financial status and to provide regular reports to stakeholders. This helps to build trust and ensures that everyone is on the same page. The text also suggests that clear communication is essential for identifying potential risks and opportunities.

In conclusion, the document provides a comprehensive overview of financial management practices. It covers the basics of record-keeping, auditing, budgeting, and communication. By following these guidelines, organizations can ensure the accuracy and reliability of their financial data, which is essential for making sound business decisions and achieving long-term success.

## Samenvatting

Voor het berekenen van maatgevende hoogwaterstanden langs de Rijntakken is de bodemruwheid van groot belang. De bodemruwheid wordt onder meer bepaald door de dimensies van beddingvormen. Fredsøe en Van Rijn geven een theoretische respectievelijk empirische methode om de beddingvormafmetingen onder bepaalde stromingsomstandigheden te voorspellen. Uit de genoemde methoden volgt dat bij hoge stroomsnelheden de beddingvormen afvlakken en daardoor een lagere bodemweerstand veroorzaken. Deze reductie in bodemruwheid heeft belangrijke consequenties voor de te berekenen maatgevende hoogwaterstanden.

Teneinde de toepasbaarheid van de beddingvoorspellers voor maatgevende afvoeromstandigheden op de Rijntakken te onderzoeken, is met name de theorie van Fredsøe getoetst aan meetresultaten. In de zandgoot van het Waterloopkundig Laboratorium is een proevenserie uitgevoerd met gegradeerd materiaal, waarmee de beddingvormafmetingen onder verschillende stromingssituaties zijn bestudeerd. Het gebied van lage stroomsnelheden (beddingvormgroei) naar hoge stroomsnelheden (afvlakking beddingvormen) is onderzocht. Tijdens de proeven zijn grootheden, zoals beddingvormafmetingen en sedimenttransporten, die in de theorie worden gebruikt, gemeten. Verder zijn voor het toetsen van de theorie aanvullende meetresultaten gebruikt van gootproeven uitgevoerd bij andere instituten, de Zaire en Missouri Rivier, de Nederlandse Rijntakken en de Maas. Aansluitend zijn de relaties van Van Rijn betreffende beddingvormafmetingen getoetst en verder de ruwheidvoorspellers van Van Rijn en van Engelund.

De resultaten van de zandgootproeven en alle aanvullend gebruikte metingen duiden er op dat de theoretische relatie van Fredsøe voor de relatieve beddingvormhoogte niet onderbouwd wordt door de resultaten. De empirische relaties van Van Rijn voor de beddingvormafmetingen voldoen in het algemeen beter aan de meetresultaten. De zandgootproeven tonen aan dat de bodem bij toenemende afvoer gladder wordt als gevolg van het langer worden van de beddingvormen, terwijl de beddingvormhoogte ongeveer konstant blijft. Verder blijkt de definitie van vlakbed bij hoge afvoeren arbitrair te zijn, beter is het te spreken van een gladbed bij hoge afvoeren. Ook bij prototypemetingen wordt opgemerkt dat de beddingvormen eerder langer worden dan dat de hoogte afneemt bij toenemende afvoer. Voor alle resultaten, zowel gootproeven als prototypemetingen blijkt enige afname van de bodemruwheid op te treden bij toenemende afvoer.

Opgemerkt wordt dat deze tendens gebaseerd is op alle resultaten en niet op de resultaten per goot of riviertrajekt.

Voor prototype omstandigheden kan in het algemeen niet gerekend worden op een drastische afname van de ruwheidslengte bij extreem hoogwater. Extrapolatie van de ruwheid bij extreem hoogwater, vanuit gemeten ruwheden behorende bij lagere rivierafvoeren, is speculatief. In de aanbevelingen (paragraaf 7.4) wordt een procedure gegeven om met de beschikbare informatie een redelijke schatting te maken van de bodemruwheid van een rivier bij extreme afvoer. Met deze geschatte ruwheid kan dan een berekening van de waterstanden gemaakt worden bij maatgevende rivierafvoer.

DIMENSIES VAN BEDDINGVORMEN ONDER PERMANENTE STROMINGSOMSTANDIGHEDEN BIJ HOOG  
SEDIMENTTRANSPORT

1. Inleiding

1.1 Opdracht

Voor het berekenen van maatgevende hoogwaterstanden langs de Rijntakken is de bodemruwheid van groot belang. De bodemruwheid wordt onder meer bepaald door de dimensies van de beddingvormen. Fredsøe en Van Rijn geven een theoretische respectievelijk empirische methode om de beddingvormafmetingen onder bepaalde stromingsomstandigheden te berekenen. Uit de genoemde methoden volgt dat bij hoge stroomsnelheden de beddingvormen afvlakken en daardoor een lagere bodemweerstand veroorzaken. Deze reductie in bodemruwheid heeft belangrijke consequenties voor de te berekenen maatgevende hoogwaterstanden.

Per brief van 6 mei 1985 met kenmerk 550 is door het hoofd van de distrikt Zuidoost van Rijkswaterstaat aan het Waterloopkundig Laboratorium opdracht gegeven de methoden van Fredsøe en Van Rijn, betreffende beddingvormafmetingen, te toetsen aan de hand van een proevenserie in de zandgoot van het Laboratorium De Voorst gebaseerd op het voorstel RS1334/K3223/AT/lh d.d. 9 april 1985.

De onderzoeksresultaten zijn beschreven in dit rapport dat is samengesteld door ir. A.P.P. Termes. Aan het onderzoek hebben meegewerkt prof. dr. ir. M. de Vries en prof. dr. ir. J.P.Th. Kalkwijk beiden van de Technische Hogeschool Delft, dr. J. Fredsøe van de Danmarks Tekniske Højskole en voorts dhr. J. Driegen, ir. H.J.M. Ogink, ir. L.C. Van Rijn, ir. J.H.A. Wijbenga en het personeel van de zandgoot van het Waterloopkundig Laboratorium De Voorst. Tot slot is veel dank verschuldigd aan het Waterbouwkundig Laboratorium van Borgerhout (Belgie) en ir. J.J. Peters voor het beschikbaarstellen van meetresultaten van de Zaïre Rivier.

1.2 Probleemstelling

De stormvloed van 1953 heeft ertoe geleid dat de ontwerpnorm voor rivierdijken in 1956 werd aangepast. Besloten werd een overschrijdingsfrequentie te hantieren van 1/3000 per jaar ( $Q_{Lobith} = 18000 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Op grond van deze afvoernorm

werden maatgevende waterstanden langs de rivieren bepaald. De gevolgen van de noodzakelijke dijkverbeteringen en de reacties in den lande daarop hebben tot een herbezinning door de Commissie Rivierdijken geleid. Naar aanleiding van het rapport van deze commissie werd in tweede instantie een overschrijdingsfrequentie van 1/1250 per jaar gekozen voor de afvoernorm ( $Q_{\text{Lobith}} = 16500 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Opnieuw werd de berekening van de maatgevende waterstanden langs de rivieren ter hand genomen. De voorlopige maatgevende waterstanden langs de Waal werden in 1984 gepresenteerd.

Ondanks de verlaagde norm werden in het benedenstroomse deel van de Waal maatgevende waterstanden voorgesteld, die circa 0,8 m hoger uit kwamen dan de oorspronkelijke waarden, die berekend waren bij een afvoernorm van 1/3000 per jaar. Zonder uitgebreid op de berekeningen in te gaan kan worden gesteld dat vooral een toepassing van een grotere ruwheid voor het zomerbed van de rivier tijdens maatgevend hoogwater hiervan de belangrijkste oorzaak is.

Om de keuze van de zomerbedruwheid te onderbouwen is nader onderzoek uitgevoerd naar de hydraulische ruwheid van de Bovenrijn en de Waal, zie Ogink (1984). Uit een extrapolatie van tijdens hoogwater gemeten stroomomstandigheden en geregistreerde afmetingen voor de beddingvormen naar extreme stroomomstandigheden (extreem hoogwater), wordt op basis van bestaande empirische relaties een afvlakking van beddingvormen bij deze extreme condities in het gebied van de beneden-Waal verwacht. Daar de ruwheid van het zomerbed voor een belangrijk deel wordt bepaald door de voorkomende beddingvormen mag dan een afname van de zomerbedruwheid en een afname van de waterstanden in de beneden-Waal worden verwacht. De vragen die zich nu voordoen luiden: zal het afvlakkingsproces van de beddingvormen zich tijdens extreem hoogwater in de beneden-Waal inderdaad manifesteren en zo ja, is het afvlakkingsproces van de beddingvormen dusdanig snel dat tijdens de top van het hoogwater de beddingvormen in afmeting belangrijk zijn afgenomen? Door afvlakkingsproeven in de zandgoot uit te voeren wordt meer inzicht verkregen in het afvlakkingsproces van beddingvormen.

De resultaten van de gootproeven zullen gebruikt worden om de methoden van Fredsøe en Van Rijn betreffende beddingvormafmetingen te toetsen. Verder worden resultaten van andere gootproeven en prototypemetingen gebruikt om de geldigheid van de methoden te onderzoeken. De reden voor het uitvoeren van een

proevenserie in de zandgoot is de methoden van Fredsøe en Van Rijn te toetsen aan proefresultaten. Mogelijkerwijs gelden de methoden ook voor prototype omstandigheden, omdat de theorie van Fredsøe is gebaseerd op algemeen geldende veronderstellingen en de empirische relaties van Van Rijn zijn gebaseerd op zowel gootproeven als prototypemetingen.

In paragraaf 1.3 worden doel en opzet van het onderzoek gegeven. De methoden van Fredsøe en Van Rijn betreffende het voorspellen van beddingvormafmetingen worden gegeven in hoofdstuk 2. De ruweheidsvoorspellers van Van Rijn en Englund worden in hoofdstuk 3 behandeld. De opzet van de gootproeven wordt behandeld in hoofdstuk 4, de bewerking van de gegevens en de formuleringen van de verschillende parameters worden gegeven in hoofdstuk 5. De resultaten van de gootproeven, de resultaten van gootproeven bij andere instituten en prototypesresultaten worden behandeld in hoofdstuk 6. De conclusies en aanbevelingen tenslotte zijn opgenomen in hoofdstuk 7.

### 1.3 Doel en opzet van het onderzoek

Het doel van het onderzoek naar beddingvormafmetingen is de toetsing van de theorie van Fredsøe en de empirische relaties van Van Rijn, betreffende het gedrag van beddingvormen onder verschillende permanente stromingsomstandigheden en de koppeling van beddingvormafmetingen aan ruweheidsparameters.

In hoeverre de theorie van Fredsøe voor de beddingvormafmetingen onder permanente stromingsomstandigheden ook voor prototype omstandigheden geldt is moeilijk na te gaan. De volgende redenen daarvoor zijn:

- In het prototype zijn de stromingsomstandigheden zelden permanent waardoor evenwichtsbeddingvormen in het prototype nauwelijks of niet voorkomen.
- Bij stromingsomstandigheden voor hoge afvoeren is het aantal metingen van beddingvormen gering. Hoge afvoeren komen weinig voor in het prototype of duren te kort om metingen uit te voeren. Ook is het meten onder deze omstandigheden vaak niet goed mogelijk.

Voor de relaties van Van Rijn gelden dezelfde redenen, hier zijn het aantal metingen bij hoge afvoeren waarop de relaties zijn gebaseerd ook gering.



Het onderzoek bestaat uit twee gedeelten:

- Het uitvoeren van een proevenserie in de zandgoot van het Waterloopkundig Laboratorium, waarbij onder verschillende stromingsomstandigheden de beddingvormafmetingen worden gemeten ter verificatie van de twee genoemde beddingvormvoorspellers.
- Een aantal resultaten van gootexperimenten van andere instituten en resultaten van prototypemetingen worden gebruikt om de genoemde beddingvormvoorspellers te toetsen. De aandacht is hierbij gericht op resultaten in het overgangsgebied van beddingvormen naar vlakbed, dus bij relatief hoge stroomsnelheden.

## 2. Theorie evenwichtsafmetingen van beddingvormen

### 2.1 Algemeen

In deze studie worden twee methoden voor het voorspellen van beddingvormafmetingen onder stationaire stromingsomstandigheden getoetst.

Ten eerste de theorie van Fredsøe die gebaseerd is op theoretische veronderstellingen. Ten tweede de empirische relaties van Van Rijn gebaseerd op een groot aantal meetresultaten. Vergeleken met andere empirische relaties blijkt de methode van Van Rijn de beste resultaten te geven (Van Rijn, 1982,b).

### 2.2 De theorie van Fredsøe

Fredsøe (1984) leidt, met behulp van een analyse van verstoringen in het beddingvormoppervlak (zie Appendix A), voor de hoogte van beddingvormen als functie van de korrelschuifspanning op de top van de beddingvorm, een relatie af. Aangetoond wordt dat een beddingvorm slechts voor één bepaalde vorm stabiel is. Voor de beddingvormlengte wordt een empirische relatie gegeven. De karakteristieke relaties voor de evenwichtsbeddingvormhoogte en -lengte luiden:

$$\frac{H/h}{(1-0,5H/h)} = \frac{\phi_b}{2\theta' \frac{d\phi_t}{d\theta'}_{top}} \quad (2-1)$$

en

$$L = \frac{16 H \phi_b + (16H+\delta) \phi_s}{\phi_t} \quad (2-2)$$

Hierin is:

H = beddingvormhoogte

h = waterdiepte

L = beddingvormlengte

$\phi_b$  = dimensieloos bodemtransport

$\phi_s$  = dimensieloos suspensietransport

$\phi_t$  =  $\phi_b + \phi_s$  = dimensieloos totaaltransport

$\theta'$  = dimensieloze schuifspanning betrokken op de korrels

$\delta$  = afstand tussen lokatie van maximale schuifspanning en maximaal suspensietransport

Voor de transportformules voor bodem- en totaaltransport kunnen in beginsel

willekeurige relaties worden gebruikt (zie appendix A). De keuze van de transportrelaties heeft invloed op het verloop van  $H/h$  en  $H/L$  (zie Ogink, 1984), maar de vorm van de grafieken zoals aangegeven in Figuur 1 blijft gehandhaafd. Uit Figuur 1 blijkt dat volgens de theorie bij zeer grof bodemmateriaal,  $H/h$  bij vergroting van de  $\theta'$ -waarde blijft toenemen. Er treedt geen afvlakking van de beddingvormen op. Is het materiaal fijner dan kan voor toenemende  $\theta'$  wel afvlakking van beddingvormen optreden. Volgens Fredsøe wordt het afvlakkingsproces ingeleid op de beddingvormtoppen door het in suspensie gaan van materiaal, zodat op het moment van afvlakken zowel bodem- als suspensietransport aanwezig is. Om het afvlakken van beddingvormen in de relaties  $H/h$  en  $H/L$  weer te geven zal dus een totaaltransport formule moeten worden gebruikt waarin beide vormen van transport zijn opgenomen.

Het afvlakkingsproces van beddingvormen begint volgens de theorie nadat de maximale waarde van  $H/h$  bereikt is; bij verdere toename van  $\theta'$  neemt  $H/h$  af (zie Figuur 1). Het begin van afvlakken hangt ook af van de korrelafmetingen van het bodemmateriaal. Voor grof materiaal begint het afvlakkingsproces gedefinieerd volgens  $H/h$  na  $\theta'_{\max} = \theta'_g$  en voor fijner materiaal na  $\theta'_{\max} = \theta'_f$ . Uit Figuur 1 blijkt dat  $\theta'_g > \theta'_f$  ofwel het afvlakkingsproces van beddingvormen begint voor fijn materiaal bij een lagere  $\theta'$  dan voor grof materiaal.

In de beneden-Waal is het bodemmateriaal fijner dan op de Bovenwaal, zodat afvlakken van beddingvormen eerder zal optreden in het benedenstroomse deel van de Waal.

Opgemerkt wordt dat in het algemeen vlakbed bij hoge stroomsnelheden niet alleen veroorzaakt wordt bij  $Fr = 1$ . In het prototype is het Froude-getal in het algemeen veel kleiner dan 1 (zelfs  $< 0,5$ ). Toch kan dan een vlakbed optreden als gevolg van de hoge bodemschuifspanning (volgens Van Rijn  $T = 25$ , zie 2.3). Door de hoge bodemschuifspanning en waarschijnlijk als gevolg van het hoge sedimenttransport en onderdrukking van de turbulentie door hoge concentraties worden de beddingvormen langer. Er blijven echter plaatsen op de bodem waar loslating optreedt, tussen deze lokaties is de bodem min of meer vlak. Over grotere lengte bezien is de bodem dus glad in plaats van vlak. Onder gootomstandigheden kan vlakbed wel optreden als gevolg van een hoog Froude-getal. Fredsøe (1984) leidt af, met behulp van stabiliteitsanalyse, dat een stabiel vlakbed als gevolg van het Froude-getal kan optreden in het gebied  $0,7 < Fr < 1,5$  (afhankelijk van de stromingsomstandigheden). Een vlakbed dat door een

hoog Froude-getal wordt veroorzaakt heeft een vorm die overeenkomt met de vorm van de waterspiegel. Meestal is dit een sinus-achtige vorm, dus de bodem is glad (geen loslating van de stroming) in plaats van vlak.

### 2.3 De relaties van Van Rijn

Van Rijn (1982,b) formuleert relaties voor beddingvormafmetingen gebaseerd op meetgegevens. De criteria voor de selectie van de gegevens zijn:

- de waterdiepte is groter dan 0,1 m.
- de korreldiameters vallen binnen de grenzen 100-2500  $\mu\text{m}$ .
- de breedte-diepte verhouding is groter dan 3.

Gesteld wordt dat de beddingvormafmetingen en de voortplantingssnelheid van de beddingvormen voornamelijk bepaald worden door het bodemtransport. Met behulp van de "simple wave"- en de continuïteitsvergelijking wordt het bodemtransport uitgedrukt als functie van de beddingvormhoogte, de vorm, bodemmateriaal-karakteristieken en stromingsgrootheden. In Van Rijn (1981) wordt afgeleid dat deze grootheden zijn uit te drukken als functies van:

$$D_* = \left(\frac{\Delta g}{v^2}\right)^{1/3} D \quad (2-3)$$

en

$$T = (\theta' - \theta_{cr}) / \theta_{cr} \quad (2-4)$$

met  $\theta_{cr}$  als dimensieloze kritieke schuifspanning voor het bodemmateriaal met diameter  $D$ . Uiteindelijk wordt in Van Rijn (1982,b) afgeleid dat de relatieve beddingvormhoogte en -steilheid uitgedrukt kunnen worden als:

$$H/h = f_1(D_*, T, D_{50}/h) \quad (2-5)$$

en

$$H/L = f_2(D_*, T, D_{50}/h) \quad (2-6)$$

De functies  $f_1$  en  $f_2$  zijn bepaald met behulp van "curve-fitting" van de meetgegevens en weergegeven in Figuur 2. Een duidelijke afhankelijkheid tussen de beddingvormafmetingen en  $D_*$  bleek niet aanwezig, zodat de parameter  $D_*$  niet gebruikt is bij het opstellen van de uiteindelijke relaties. Dit resulteert in

de volgende relaties:

$$H/h = 0,11 (D_{50}/h)^{0.3} [1 - e^{-0.5T}] [25 - T] \quad (2-7)$$

en

$$H/L = 0,015 (D_{50}/h)^{0.3} [1 - e^{-0.5T}] [25 - T] \quad (2-8)$$

Gesteld wordt dat bij  $T < 0$  en  $T > 25$  de bodem nagenoeg vlak is (afgevlakte beddingvormen), waarbij anti-duinen niet worden beschouwd. Betreffende het optreden van vlakbed zie de opmerking aan het eind van 2.2. Uit de relaties (2-7) en (2-8) volgt:

$$L/h = 7,3 \quad (2-9)$$

De beddingvormlengte is dus volgens (2-9) alleen afhankelijk van de waterdiepte.

### 3. Ruwheidsvoorspellers

#### 3.1 Algemeen

In deze studie worden de ruwheidsvoorspellers van Van Rijn en van Engelund getoetst aan de ruwheid bepaald uit de gemeten stromingsparameters. Voor toepassen van beide ruwheidsvoorspellers moeten enkele eenvoudige stromingsparameters bekend zijn alsmede de gemiddelde beddingvormafmetingen.

Er is voor deze ruwheidsvoorspellers gekozen omdat van alle voorspellers Van Rijn het beste algehele resultaat geeft, terwijl Engelund voor gootproeven goed voldoet (zie Van Rijn, 1982,b).

#### 3.2 Ruwheidsvoorspeller van Van Rijn

De bodemruwheidslengte  $k$  wordt opgebouwd gedacht uit een deel ten gevolge van de vormweerstand van beddingvormen en een deel ten gevolge van korrelweerstand van het bodemmateriaal. Voor de ruwheidslengte  $k''$  als gevolg van de vormweerstand is door Van Rijn (1982,b) een empirische relatie afgeleid, gebaseerd op zowel gootmetingen als prototypemetingen. Van Rijn stelt dat  $k''$  afhankelijk is van de beddingvormafmetingen die zich onder de gegeven stromingsomstandigheden ontwikkeld hebben. De relatie voor  $k''$  als functie van de beddingvormsteilheid is gegeven in Figuur 3 en luidt:

$$k'' = 1,1 H [1 - \exp(-25 H/L)] \quad (3-1)$$

Verder leidt Van Rijn (1982,b) voor de korrelruwheid  $k'$  van het bodemmateriaal af:

$$k' = 3 D_{90} \quad (3-2)$$

gebaseerd op goot- en prototypemetingen. De bodemruwheid wordt als volgt uit beide ruwheden samengesteld:

$$k = k' + k'' \quad (3-3)$$

De procedure voor het bepalen van  $k$  is gebaseerd op de veronderstelling dat voor  $T < 0$  en  $T > 25$  (vlakbed) de  $k$ -waarde gelijk is aan de korrelruwheid  $k'$ .

Tenslotte wordt de Chézy-coëfficiënt berekend als:

$$C = 18 \log (12R_b/k) \quad (3-4)$$

Aan de voorspellingsmethode voor  $k$  van Van Rijn is de restrictie  $10 < R_b/k < 250$  verbonden (zie Van Rijn, 1982,b).

### 3.3 Ruwheidsvoorspeller van Engelund

De bodemweerstand  $f$ , volgens Darcy - Weisbach, wordt opgesplitst in een vormweerstand  $f''$  en een korrelweerstand  $f'$ , die als volgt samengesteld zijn (Engelund, 1967):

$$f = f' + f'' \quad (3-5)$$

De bodemweerstand is gekoppeld aan de Chézy-coëfficiënt via:

$$C = (8g/f)^{\frac{1}{2}} \quad (3-6)$$

Voor de vormweerstand geeft Engelund (1977) de volgende empirische relatie:

$$f'' = 10 \exp(-2,5H/L) \cdot H^2 / (hL) \quad (3-7)$$

Voor de korrelweerstand gelden de volgende relaties:

$$f' = [8g / (C')^2] \quad (3-8)$$

en

$$C' = 18 \log [11R'_b / (2D_{50})] \quad (3-9)$$

De waarde voor  $R'_b$  wordt iteratief bepaald volgens Einstein uit:

$$u / (gR'_b)^{\frac{1}{2}} = 6 + 2,5 \ln [R'_b / (2D_{50})] \quad (3-10)$$

Tot slot moet de op deze wijze berekende bodemruwheid  $f'+f''$  voldoen aan vergelijking (3-6). Uit de Chézy-coëfficiënt kan de bodemruwheid  $k$  bepaald worden, met vergelijking (3-4).



#### 4. Uitvoering van de gootproeven

##### 4.1 Algemeen

Voor het toetsen van de methoden van Fredsøe en Van Rijn betreffende beddingvormafmetingen zijn gootproeven uitgevoerd, om onder gekonditioneerde omstandigheden stromingsgrootheden en beddingvormkarakteristieken te bepalen.

In dit hoofdstuk worden de faciliteit, de opzet van de gootproeven en de uitgevoerde metingen beschreven.

##### 4.2 Beschrijving van de faciliteit

De proeven zijn uitgevoerd in de zandgoot van het Waterloopkundig Laboratorium De Voorst. Een overzicht van de gootafmetingen en de inrichting van de faciliteit is gegeven in Figuur 4. Voor uitgebreide behandeling van de zandgoot wordt verwezen naar Bakker (1984).

Ieder gewenst debiet tussen 0 en 800 l/s kan worden ingesteld en daarbij een gewenste waterdiepte of een gewenst energie verhang. Voor deze proevenserie is de gootbreedte gereduceerd tot 1 m. In de goot is een meetsektie in langsrichting ingesteld van 30 m. In de meetsektie worden het waterspiegelverloop in de gootas en de bodemligging in drie raaien (33 cm links en rechts van de gootas en in de gootas) vanaf een meetwagen met behulp van een Wapro en drie Provo's geregistreerd. De gegevens worden digitaal opgeslagen en zijn direkt voor bewerking gereed. Aan het einde van de goot wordt het sediment dat door de goot getransporteerd wordt in een zandvang opgevangen en teruggepompt naar het begin van de goot. Alvorens het zand terug te brengen in de goot wordt het zand gewogen in een meetcycloon (zie Bakker, 1984) zodat het totale sedimenttransport door de goot bekend is. Enkele extra aangebrachte installaties voor het meten van transporten die niet standaard tot de faciliteit behoren, worden in 4.4 beschreven. Enkele gegevens van de zandgoot zijn:

lengte meetsektie	30 m
gereduceerde gootbreedte	1 m
gootdiepte	1 m
debiet	0-0,8 m <sup>3</sup> /s
sedimenttransport	0-800 kg/h

kortste tijd tussen twee bodemprofielmetingen	10 min
nauwkeurigheid bodemprofielmetingen horz./vert.	10 mm/1mm

#### 4.3 Opzet van de gootproeven

Om de methoden van Fredsøe en Van Rijn betreffende beddingvormafmetingen te toetsen, zijn 9 permanente stromingssituaties ingesteld. Deze situaties zijn zo gekozen, dat een groot gebied van de stromingsparameters doorlopen wordt. De voor de theorie van Fredsøe belangrijke parameter  $\theta'_{top}$  loopt van 0,3 tot 0,9 en de T- parameter van Van Rijn loopt van 5 tot 25. Om de veranderingen van bodemvormen, gaande van de ene stromingstoestand naar de volgende, relatief snel te laten verlopen is gekozen voor een konstant bodem- en waterspiegelverhang van ongeveer  $3 \times 10^{-3}$  voor alle 9 stromingssituaties. Bij een vast ingesteld debiet en een konstant verhang kan de waterdiepte zich instellen. De ingestelde debieten zijn opgenomen in Tabel 1. De watertemperatuur is ingesteld op 18° C en is verder konstant gehouden.

Voor het bodemmateriaal is gekozen voor een materiaal met ongeveer gelijke karakteristieken als het materiaal in de beneden-Waal (zie Ogink, 1984). De zeefkrommes van de gebruikte materialen zijn gegeven in Figuur 5. De karakteristieke diameters

zijn:  $D_{10} = 215 \mu\text{m}$ ,  $D_{50} = 390 \mu\text{m}$ ,  $D_{90} = 850 \mu\text{m}$ . Tijdens de proeven bleek dat het materiaal geleidelijk grover werd omdat de fijne fraktie niet geheel in de zandvang gevangen werd maar in de retourgoot bezonk (materiaal  $< 250 \mu\text{m}$ ). Daarom is na enige tijd nieuw zand in de goot gebracht (materiaal 2 na proef T1-E1, in volgorde nummer 6). De karakteristieke korrelafmetingen van beide materialen zijn gegeven in Tabel 2. Het effect van het geleidelijk grover worden van het materiaal op de proefresultaten wordt in hoofdstuk 6 besproken.

Tijdens iedere ingestelde stromingssituatie zijn meerdere malen het energieverhang, het totale sedimenttransport en de beddingvormen gemeten en vast gelegd. Ook zijn geregeld (na afloop van iedere stromingssituatie) monsters van het bodemmateriaal in de goot genomen, voor het bepalen van de zeefkromme van het bodemmateriaal tijdens de proevenserie. Ter controle van het verlies aan fijn materiaal zijn ook geregeld monsters uit de zandvang van de goot genomen. Verder zijn ten behoeve van de theorie van Fredsøe het bodemtransport en suspensietransport afzonderlijk gemeten, naast het totaaltransport dat met de

meetcyclus wordt bepaald. Het meten van het bodem- en suspensietransport wordt behandeld in 4.4. Van deze transporten zijn geregeld monsters genomen tijdens de metingen.

#### 4.4 Metingen

De methoden voor het meten in de zandgoot van stromingsgrootheden, zoals watterdiepte, energieverhang en debiet staan beschreven in Bakker (1984), evenals het meten van het totale sedimenttransport met de meetcyclus. In deze paragraaf wordt ingegaan op de methoden van het meten van het bodemtransport en suspensietransport.

##### Bodemtransport, dune tracking:

Bij deze methode wordt het bodemprofiel in de meetsectie in de 3 raaien 10 maal achter elkaar met provo's gemeten met een interval van 10 minuten (10 minuten is nodig voor een bodemregistratie, gegevensopslag en terugrijden van de meetwagen). Uit de bodemregistraties wordt de voortplantingssnelheid van de beddingvormen bepaald met een procedure zoals beschreven in Appendix D. Het bodemtransport wordt bepaald zoals beschreven in 5.3.

##### Bodemtransport, directe meting:

Aan het einde van de gootsectie bovenstrooms van de grote zandvang is een opvangbak voor bodemtransport aangebracht, zie Figuur 7-A, foto 1. De bak heeft een afsluitbare spleet van 33 cm breed ( $1/3$  van de gootbreedte) en 5 cm lang in de stroomrichting gezien. Het doel van de opvangbak is, dat alleen materiaal dat over de beddingvormen getransporteerd wordt en aan de lijzijde van de beddingvorm, net bovenstrooms van de opvangbak gedeponereerd wordt, in de spleet gevangen wordt. De lengte van de spleet (5 cm) is zo gekozen dat alleen bodemtransport gevangen wordt en nagenoeg geen suspensietransport. In feite wordt alleen sediment gevangen dat bijdraagt aan de voortplanting van de beddingvorm. Per stromingssituatie is 4 maal gedurende 5 minuten het bodemtransport op deze wijze gemeten. Het bodemtransport dat gevangen is, wordt met een pomp uit de opvangbak verwijderd en onder water gewogen. Het onderwater gewicht van het gevangen materiaal wordt omgerekend naar een volume zonder poriën en met de bekende meettijd is nu het bodemtransport te berekenen. Het totale gemiddelde bodemtransport door de goot is 3 maal het gemeten gemiddelde transport. De gelijkmatigheid van het bodemtransport over de gootbreedte is gecontroleerd

met behulp van de resultaten van het computerprogramma waarmee de voortplantingssnelheid van de beddingvormen in de drie meettraaien is berekend.

#### Suspensietransport:

Op een duintop is, met een suspensietransport meetsysteem op verschillende hoogten boven de bodem, gelijktijdig water en sediment afgezogen en met pitotbuizen is de stroomsnelheid op dezelfde hoogten bepaald. Het gebruikte systeem, dat bestaat uit een concentratiemeetsysteem en een stroomsnelheidsmeetsysteem, staat weergegeven in Figuur 6 en in Figuur 7-A, foto 2. Het concentratiemeetsysteem zuigt het sediment dwars op de stroom af, een methode die uitvoerig is getest en geijkt, zie Bosman (1982). De concentratie wordt bepaald met een geijkte volumemeter, zie Figuur 7-B, foto 3, die het gevangen volume aan sediment direkt omzet in een gewicht, zie Bosman (1982). Het volume van het afgezogen water is bekend, zodat de concentratie in mg/l berekend kan worden, op iedere hoogte waar gemeten is. De stroomsnelheden zijn met pitotbuizen evenwijdig aan de stroomrichting gemeten. De pitotbuizen zijn aangesloten op manometers, zodat met de afgelezen snelheidshoogte de stroomsnelheid berekend kan worden volgens Bernoulli. Het produkt van snelheid en concentratie geeft het suspensietransport op iedere hoogte boven de bodem. Voor een overzicht van het meetsysteem zie Figuur 7-B, foto 4. Er is boven 4 verschillende beddingvormtoppen per stromingssituatie, gemeten. Eén meting duurt 15 minuten, waarbinnen suspensie afgezogen wordt en tegelijkertijd de manometerbuizen 10 maal zijn afgelezen. Het suspensietransport is dus een gemiddelde waarde over de meettijd.

## 5. Bewerking van de meetresultaten

### 5.1 Algemeen

De resultaten van de stromingsgootheden, de transportgootheden en de beddingvormen zijn bewerkt volgens procedures die in dit hoofdstuk en in de Appendices B, C en D zijn beschreven. Deze procedures worden standaard gebruikt voor zandgootproeven of zijn speciaal voor deze proevenserie vastgesteld. Voor de bewerking van resultaten van gootmetingen uitgevoerd bij andere instituten en prototypemetingen worden de genoemde procedures ook gebruikt met uitzondering van gegevens van de Zaïre Rivier waarbij een aparte procedure is gebruikt voor het bepalen van de beddingvormafmetingen.

### 5.2 Stromingsgootheden en ruwheidsvoorspellers voor de gootproeven

De formuleringen van de bewerkingen van de stromingsgootheden en ruwheidsvoorspellers zijn opgenomen in Appendix B. Hier wordt volstaan met een opsomming van de verschillende bewerkingen:

- Correctie voor de wandinvloed, volgens de Einstein procedure, zie B.1 (zie ook Bakker, 1984)
- Chézy-coëfficiënt en Froude-getal, zie B.2.
- Dimensieloze bodemschuifspanningen, de totale bodemschuifspanning, en de korrelschuifspanning, volgens de formulering van Engelund / Einstein en volgens Van Rijn, zie B.3.
- Stromingsparameter volgens Van Rijn en valsnelheid, zie B.4.
- Ruwheidsvoorspellers volgens Van Rijn en volgens Engelund, zie B.6.

### 5.3 Transportgootheden en beddingvormen voor de gootproeven

De formuleringen voor de transportgootheden en de bepaling van de beddingvormafmetingen zijn opgenomen in de Appendices B, C en D. Hier worden de formuleringen opgesomd en wordt nader ingegaan op de bepaling van de transporten op de beddingvormtop.

- De gemeten beddingvormen in de 3 langsraaien in de meetsektie van de goot worden volgens een bepaalde procedure behandeld, beschreven in Appendix C. Met de methode worden de gemiddelde en de dominante beddingvormhoogtes en -lengtes bepaald.
- De voortplantingssnelheid van de beddingvormen uit de frequente bodemregistraties wordt bepaald uit de kruiskorrelatie tussen opeenvolgende metingen. De achtergronden van de procedure staan in Appendix D.
- Het bodemtransport op de beddingvormtoppen wordt bepaald met de "dune-tracking"-methode. Er geldt voor onvervormde voortplanting:  $s_{b,top} = (1-n) * c_b H$ , met  $n$  = poriengetal en  $c_b$  = voortplantingssnelheid. Het bodemtransport dat bepaald is met de opvangbak is een gemiddeld bodemtransport  $s_b$  (willekeurig gemeten). Voor het transport op de top wordt gesteld dat  $s_{b,top} \approx 1,8 s_b$ . De faktor 1,8 is een empirisch bepaalde faktor die geldt bij onvervormde voortplanting van beddingvormen en hangt af van de vorm.
- Suspensietransport  $s_{s,top}$  is gedefinieerd als  $s_{s,top}(z) = u(z).c(z)$  (met  $u(z)$  = lokale snelheid boven de bodem en  $c(z)$  = lokale concentratie boven de bodem) waarbij  $u$  en  $c$  in een vertikaal op de beddingvormtop zijn gemeten. Het suspensietransport is gemeten tot op een afstand van enkele centimeters van de bodem. Voor het bepalen van het totale suspensietransport zijn door de gemeten waarden van  $u*c$  op semi-logaritmische schaal, rechte lijnen getrokken en is geëxtrapoleerd tot aan een afstand van  $10*D_{50}$  vanaf de bodem (enkele millimeters). Het suspensietransport is geïntegreerd van een afstand van  $10*D_{50}$  (bodem materiaal) van de bodem tot aan de waterspiegel. De grens van  $10*D_{50}$  wordt gegeven in Van Rijn (1981).
- Uit het totaaltransport gemeten met de meetcycloon is het totaaltransport op de beddingvormtoppen bepaald. Het totaaltransport wordt met intervallen van enkele minuten tijdens een permanente stromingssituatie gemeten. Bij het totaaltransport als functie van de tijd, is duidelijk vast te stellen wanneer er een beddingvormtop (groot transport) in de zandvang komt. Door nu alleen de grote pieken in het totaaltransport, dat wil zeggen het totaaltransport ter plaatse van een beddingvormtop, te beschouwen is het mogelijk om het gemiddeld totaaltransport op de beddingvormtoppen tijdens een stromingssituatie te bepalen.
- Voor het totaal- en bodemtransport wordt verondersteld dat de korrelsamenstelling van het bodemmateriaal in de goot karakteristiek is. Voor het suspensietransport is de korrelsamenstelling van de afgezogen hoeveelheden sediment in de vertikaal karakteristiek verondersteld. Het bodemmateriaal is

gezeefd met een standaard serie zeven (NEN 2560). De korrelkarakteristieken van de kleine hoeveelheden afgezogen sediment van de suspensiemetingen zijn in een valkolom (2 m lang) onderzocht. Van beide typen monsters zijn de belangrijkste karakteristieke korreldiameters bepaald ( $D_{10}$ ,  $D_{50}$  en  $D_{90}$ ).

- Het dimensieloze bodem-, suspensie- en totaaltransport wordt bepaald zoals aangegeven in Appendix B, B.5.

#### 5.4 Bewerking resultaten van andere metingen

##### 5.4.1 Algemeen

Voor het toetsen van de beddingvormvoorspellers van Fredsøe en Van Rijn en de ruwheidsvoorspellers van Van Rijn en Engelund worden resultaten van zowel gootproeven van andere instituten als prototypemetingen gebruikt. Tevens wordt per proevenserie de ontwikkeling van de ruwheidsparameters als functie van stromingsparameters bestudeerd. De resultaten van andere metingen die gebruikt worden zijn:

- Resultaten van proevenseries uitgevoerd bij andere instituten. De gegevens zijn in het World Flume Data bestand opgenomen (S6-bestand).
- Resultaten van prototypemetingen op de Zaïre Rivier.
- Resultaten van prototypemetingen op de Missouri Rivier.
- Resultaten van prototypemetingen op de Nederlandse Rijntakken en de Maas.
- Resultaten van prototypemetingen op buitenlandse rivieren waarbij geen beddingvorm afmetingen zijn geregistreerd. De gegevens zijn in het World Flume Data bestand opgenomen.

Het bewerken van de resultaten van de verschillende metingen gebeurt grotendeels zoals beschreven in de paragrafen 5.2 en 5.3. Echter afhankelijk van de bewerking die de gegevens al hebben ondergaan en de vorm waarin ze beschikbaar zijn, zijn er verschillen die in deze paragraaf behandeld worden.

##### 5.4.2 Bewerking metingen gootproeven andere instituten

Het bewerken van de stromingsgrootheden ( $Q$ ,  $h$ ,  $i$ ,  $R$ ) en het gebruik van ruwheidsvoorspellers is beschreven in 5.2. Bodemtransporten en totaaltransporten worden niet beschouwd omdat ze in het World Flume Data bestand niet opgenomen

zijn. Gemiddelde beddingvormafmetingen zijn in het World Flume Data bestand opgenomen. De beddingvormafmetingen zijn niet bepaald met de procedure zoals beschreven is in 5.3, maar zijn per proevenserie op verschillende wijze bepaald (visueel, of uit registraties).

#### 5.4.3 Bewerking prototypemetingen, buitenlandse rivieren

##### 5.4.3.1 Bewerking prototypemetingen Zaïre Rivier

De metingen uitgevoerd op de Zaïre Rivier zijn op een aparte wijze behandeld. In het riviergedeelte Matéba Amont, zie Figuur 26, is in enkele dwarsdoorsneden bij één bepaalde rivierafvoer de snelheidsverdeling in een aantal raaien gemeten. Bij andere afvoeren zijn uit drijvermetingen oppervlaktesnelheden bekend. Tussen de oppervlaktesnelheid in een bepaalde raai en de gemiddelde stroomsnelheid over de diepte gemiddeld in die raai is een relatie gelegd. Zodat bij een willekeurige afvoer uitgaande van de bekende oppervlaktesnelheid de gemiddelde snelheid langs de meetraaien te bepalen is. Het verhang over het beschouwde riviergedeelte is bij verschillende rivierafvoeren gemeten zodat een relatie tussen  $Q$  en  $i$  afgeleid kon worden. De stromingsparameters zijn bepaald en de ruweheidsvoorspellers zijn gebruikt, zoals beschreven in 5.2.

Het suspensietransport nabij de bodem is bij één bepaalde afvoer gemeten in een aantal dwarsdoorsneden met de Delftse fles. De meting is uitgevoerd tussen 0,05 en 0,5 m van de bodem. Het suspensietransport tussen 0,5 m van de bodem tot aan het wateroppervlak is in dezelfde dwarsdoorsneden in verschillende raaien gemeten met een Delftse fles (zie ook Peters, 1978).

Voor de beddingvormafmetingen in de meetraaien 1, 2 en 3 (zie Figuur 26) is een aparte procedure gevolgd, omdat de beddingvormregistraties niet in digitale vorm beschikbaar zijn. Er is een onderscheid gemaakt tussen beddingvormen waarbij op de lijzijde loslating van de stroming kan worden verwacht en beddingvormen waar loslating van de stroming niet plaatsvindt. In Ogink (1984) is het Carnot-verlies als functie van de steilheid van de lijzijde onderzocht. Het blijkt dat de vormruwheid van de bodem in belangrijke mate bepaald wordt door beddingvormen waar loslating van de stroming op de lijzijde optreedt. Voor deze studie zijn beddingvormen waar loslating kan worden verwacht gedefinieerd als vormen waar de lijzijde steiler is dan 1:3. Van deze steile bed-



dingvormen is de gemiddelde beddingvormhoogte en -lengte bepaald per raai waarlangs het bodemprofiel gemeten is. Verder zijn de beddingvormhoogte en -lengte van beddingvormen ongeacht de vorm van de lijzijde bepaald. Tot slot zijn er op de bodemregistraties nog grote beddingvormen te onderscheiden waarvan de beddingvormhoogte en -lengte bepaald zijn. Deze grote beddingvormen hebben in het algemeen een flauwe lijzijde (flauwer dan 1:3). Resumerend zijn er drie typen beddingvormen te onderscheiden:

- steile beddingvormen (lijzijde steiler dan 1:3), type A en valt ook onder type B.
- alle kleine beddingvormen (ongeacht de steilheid van de lijzijde), type B.
- grote beddingvormen (lengte en hoogte enkele malen die van de eerste twee beddingvormtypen), type C.

Een indruk van de drie genoemde typen beddingvormen wordt gegeven in Figuur 26.

#### 5.4.3.2 Bewerking prototypemetingen Missouri Rivier

De stromingsgrootheden (Q, B, h, i) zijn bewerkt zoals beschreven in 5.2 en de ruwheidsvoorspellers zijn gebruikt zoals eveneens beschreven in 5.2. Totaal- en bodemtransporten zijn niet gemeten. De beddingvormafmetingen waren al bepaald uit de bodemregistraties, zie Shen (1978). Opgemerkt wordt dat de methode voor het bepalen van de beddingvormafmetingen niet dezelfde is zoals beschreven in 5.3.

#### 5.4.4 Bewerking prototypemetingen Nederlandse Rijntakken en de Maas

De stromingsgrootheden (h,u,i) zijn bepaald uit metingen in het prototype en uit berekeningsresultaten. Berekeningsresultaten, van de computerprogramma's WAQUA en ZWENDL geijkt op prototypeomstandigheden, dienen voor deze studie als basis voor het bepalen de gemiddelde waterdiepte en het verhang in de verschillende riviertakken (zie Van Urk, 1983 en Ogink, 1986).

De stromingsgrootheden zijn bewerkt zoals beschreven in 5.2, waarin ook het gebruik van de ruwheidsvoorspellers is beschreven. De beddingvormregistraties in gedigitaliseerde vorm zijn bewerkt volgens de procedure beschreven in 5.3. Beddingvormregistraties op de Waal zijn in gedigitaliseerde vorm beschikbaar. De beddingvormregistraties op de Nederrijn en de Maas zijn voor deze studie niet gebruikt. Op de Nederrijn zijn geen registraties beschikbaar. Op de Maas

zijn de registraties niet in analoge vorm beschikbaar hetgeen het bepalen van de beddingvormafmetingen bemoeilijkt. Verder is er slechts in één raai gevaren op een kwart van de breedte uit de linker oever. Om deze redenen zijn de registraties van beddingvormen op de Maas niet gebruikt.

#### 5.4.5 Bewerking prototypemetingen buitenlandse rivieren; alleen stromingsparameters

De bepaling van de stromingsparameters en het voorspellen van de ruwheidsparameter gebeurt zoals beschreven in 5.2. Totaal- en bodemtransporten en beddingvormafmetingen zijn bij deze metingen niet beschikbaar.

## 6. Resultaten

### 6.1 Algemeen

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de gootproeven, uitgevoerd bij het Waterloopkundig Laboratorium, behandeld en vergeleken met de methoden van Fredsøe en Van Rijn betreffende beddingvormafmetingen onder verschillende stromingsomstandigheden. Opgemerkt wordt dat de relaties van Fredsøe op lineaire schaal zijn uitgezet. De relaties van Van Rijn zijn op logaritmische schaal uitgezet. De presentatie van resultaten op verschillende schaal kan aanleiding geven tot een onjuiste beoordeling bij onderlinge vergelijking van beide methoden. Tevens worden de ruweidvoorspellers van Van Rijn en van Engelund getoetst. Naast de gootproeven worden resultaten van gootproeven uitgevoerd bij andere instituten en prototypemetingen gebruikt om de genoemde methoden en ruweidvoorspellers te toetsen. Het betreft hier gootproeven en prototypemetingen uit het World Flume Data bestand en prototypegegevens van de Zaïre en de Missouri Rivier, de Nederlandse Rijntakken en de Maas.

### 6.2 Resultaten van de gootproeven

De resultaten van de gootproeven zijn opgenomen in Tabel 3. Eerst worden hier de gemeten grootheden (stromingsparameters en beddingvormafmetingen) behandeld en daarna de toetsing van de theorieën betreffende beddingvormafmetingen en de ruweidvoorspellers.

#### Sediment

Omdat in de zandvang niet al het materiaal, fijner dan 250  $\mu\text{m}$ , gevangen wordt, vindt in de goot een geleidelijke vergroving plaats van het materiaal. Het fijnere materiaal wordt over de benedenstroomse overstortrand van de goot getransporteerd en blijft in de retourgoot achter. Ook wordt niet al het fijne materiaal door de meetcyloon gevangen, een deel wordt zonder te wegen direct met het water in de retourgoot teruggevoerd. Het verlies van materiaal fijner dan 250  $\mu\text{m}$  is over de proevenserie maximaal 5% van het totaaltransport. Een aanvaardbaar percentage gezien de onnauwkeurigheden bij het bepalen van de verschillende transporten.

Het verloop van de karakteristieke korrelafmetingen ( $D_{10}$ ,  $D_{50}$  en  $D_{90}$ ) in de tijd voor het bodemmateriaal (materiaal in de goot) en materiaal gevangen tijdens het meten van het suspensietransport zijn opgenomen in Figuur 8-A. In de figuur staan de oorspronkelijke materiaal karakteristieken, bij het begin van de proevenserie weergegeven en na T1-E1 en de gemeten karakteristieken na iedere stromingssituatie. Tevens staat de grootte van het debiet aangegeven. Door de gemeten waarden is een vloeiende lijn getrokken, die aangehouden wordt voor het bepalen van de korrelkarakteristieken per stromingssituatie. Uit de figuur blijkt dat het bodemmateriaal gemiddeld grover van samenstelling is dan het materiaal in suspensie. En dat de spreiding van het korrelmateriaal in suspensie kleiner is dan die van het bodemmateriaal. In Figuur 8-B zijn opgenomen de karakteristieke korrelafmetingen van het materiaal dat gevangen is in de opvangbak voor het bodemtransport en materiaal dat in de zandvang gevangen is. Het bodemtransportmateriaal (in Figuur 8-B) heeft een wat ander verloop in de tijd dan het bodemmateriaal (in Figuur 8-A) en het materiaal in de zandvang (in Figuur 8-B). Een reden hiervoor kan zijn het pompen van het materiaal uit de opvangvak, waarbij fijner materiaal aangezogen is. (zie ook onder sedimenttransport). Het materiaal in de zandvang is gemiddeld grover van samenstelling dan het bodemmateriaal, hetgeen veroorzaakt wordt door het verlies van fijn materiaal over de overstortrand van de goot.

#### Stromingsparameters

Het Froude-getal varieert voor deze proevenserie van 0,5 tot 0,9. De grootte van het Froude-getal is van invloed op het afvlakkingsproces van de beddingvormen, zoals blijkt in de theorie van Fredsøe. Voor het geval van  $Fr = 0,9$  (vlakbed), is de waterspiegel in sommige delen van de meetsektie in fase met de bodemvorm (sinus-achtige bodemvormen, zie Figuur 10-D).

In Figuur 9 is de Chézy-coëfficiënt als functie van  $\theta'$  uitgezet. Het blijkt dat de C-waarde, berekend uit de hydraulische parameters, toeneemt met toenemende  $\theta'$ , van  $30 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$  tot  $50 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$ . Als  $\theta$  als functie van  $\theta'$  uitgezet worden in de figuur van Engelund blijkt dat de gemeten waarden ten opzichte van de empirische relatie te hoog liggen. Alleen in de vlakbed situatie  $\theta' = 0,72$  blijkt  $\theta$  in het overgangsgebied van de figuur te liggen.

De T-parameter varieert voor de proevenserie van 5 tot 25, er zijn twee waarden rond  $T=10$  en twee waarden rond  $T=15$ .

### Beddingvormen

In Figuur 10-A t/m 10-E zijn de geregistreeerde beddingvormen opgenomen voor alle stromingssituaties. Gaande van het laagste debiet naar het hoogste debiet is het volgende op te merken (zie Figuur 10-E waarin de gemiddelde beddingvormafmetingen zijn verzameld): De beddingvormhoogte en -lengte groeien als het debiet van  $0,101 \text{ m}^3/\text{s}$  via  $0,173 \text{ m}^3/\text{s}$  en  $0,235 \text{ m}^3/\text{s}$  naar  $0,295 \text{ m}^3/\text{s}$  gaat. Daarna blijft de beddingvormhoogte ongeveer konstant en groeit de beddingvormlengte verder. Bij een debiet van  $0,411 \text{ m}^3/\text{s}$  (vlakbed) is de beddingvormhoogte afgenomen. Alle top-dalhoogte verschillen groter dan 2,5 cm worden meegenomen voor het bepalen van de beddingvormhoogte. Voor de dominante beddingvormhoogte en -lengte (zie Appendix C) blijkt er eenzelfde tendens in de groei te zijn als voor de gemiddelde beddingvormhoogte en -lengte. Voor de vlakbed situatie ( $0,411 \text{ m}^3/\text{s}$ ) is het bepalen van de beddingvormhoogte en -lengte met de methode beschreven in Appendix C, discutabel. De beddingvormlengte is door het beperkte aantal top-dalen in de meetsectie minder eenduidig (zie Figuur 10-D). Dit blijkt ook uit het verschil tussen de gemiddelde en dominante beddingvormlengte, respectievelijk 4,8 m en 8,9 m. Een visuele interpretatie van de bodem bij vlakbed situatie in Figuur 10-D, geeft beddingvormafmetingen met een gemiddelde beddingvormhoogte zoals volgt uit de procedure beschreven in Appendix C en een gemiddelde beddingvormlengte ongeveer ter grootte van de dominante beddingvormlengte zoals volgt uit de procedure. Bij een debiet van  $0,441 \text{ m}^3/\text{s}$  is de beddingvormhoogte en -lengte weer in de orde van grootte als bij de debieten van  $0,353 \text{ m}^3/\text{s}$  en  $0,392 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dit is een gevolg van het verlies van fijn bodemmateriaal waardoor het sediment grover is geworden. Ook de stromingsparameters  $\theta'$  en T duiden dan op een situatie die te vergelijken is met de situatie T1-F ( $0,392 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

De voortplantingssnelheid van de beddingvormen is bepaald met een korrelatiemethode zoals beschreven in Appendix D. De voortplantingssnelheid  $c_b$  loopt van 3,5 m/uur op tot 23 m/uur voor de vlakbed situatie. De voortplantingssnelheid wordt gebruikt voor het bepalen van het bodemtransport per stroomsituatie.

### Sedimenttransport

Een indruk van het sedimenttransport boven de beddingvormen bij verschillende debieten wordt gegeven op de foto's 5 t/m 8 in Figuur 7-C en 7-D. In Figuur 11 staan uitgezet het dimensieloze totaaltransport ( $\Phi_{t,top}$ ) en het bodemtransport op de beddingvormtop ( $\Phi_{b,top}$ ) als functie van de dimensieloze korrelschuif-

spanning op de top ( $\theta'_{top}$ ), per stromingssituatie. Deze functies zijn van belang voor de theorie van Fredsøe en zijn uitgezet op dubbel-logaritmische en op lineaire schaal.  $\Phi_{t,top}$  is bepaald uit de metingen met de cycloon zoals beschreven in 5.3. Zie Figuur 12-A t/m 12-C voor een indruk van het totale sedimenttransport als functie van de tijd. Het blijkt dat  $\Phi_{t,top}$  lineair met  $\theta'_{top}$  verloopt zodat de gradient van  $\Phi_{t,top}$  voor alle waarden van  $\theta'_{top}$  gelijk is aan 23,3 (zie Figuur 11). Het dimensieloze bodemtransport is bepaald met "dune-tracking" zoals beschreven in 5.3. Het blijkt dat  $\Phi_{b,top}$  toeneemt met  $\theta'_{top}$ , echter de gradient neemt met oplopende  $\theta'_{top}$  af, een effect dat verklaart kan worden door toename van het suspensie transport (zie ook Tabel 3, kolom 43). Opgemerkt wordt dat de vorm van de lijn door de meetresultaten bij de hogere stroomsnelheden sterk bepaald wordt door het ene meetresultaat bij de vlakbed situatie ( $\theta'_{top} = 0,89$ ).

De direkt gemeten en de berekende waarden van  $\Phi_{b,top}$  met "dune-tracking" verschillen voor waarden van  $\theta'_{top} > 0,50$  aanmerkelijk (25 tot 50%). Het bodemtransport bepaald met de opvangbak is mogelijk verstoort door het afzuigen van het opgevangen sediment tijdens de proef. Door het afzuigen van het sediment uit de opvangbak wordt sediment in de opvangbak gezogen zodat het bodemtransport hoger wordt. Er kan hierdoor ook een deel van het suspensie-transport aangezogen zijn. Het bodemtransport bepaald met de opvangbak is om deze redenen niet gebruikt bij de verder uitwerking (Tabel 3, kolom 34).

Het suspensietransport op de beddingvormtop gemeten met het afzuigstelsel en de pitotbuizen is bepaald door integratie van het lokale suspensietransport in de verticale richting. Het blijkt dat het lokale suspensietransport, uitgezet op logaritmische schaal, als functie van de hoogte boven de bodem, op lineaire schaal, twee lineair verlopende gedeelten vertoont met verschillende helling, zie de Figuren 13-A en 13-B. Het knikpunt ligt voor alle metingen op een afstand van ongeveer 1/3 deel van de waterdiepte boven de bodem. In de Figuren 13-C t/m 13-F zijn afzonderlijk het gemeten concentratieprofiel en snelheidsprofiel weergegeven. Het suspensietransport berekend uit het verschil van  $s_{t,top}$  en  $s_{b,top}$  verschilt van het direkt gemeten suspensietransport met ongeveer een faktor twee. Gezien de problemen bij het meten van  $s_{s,top}$  met het afzuigstelsel en het geringe aantal metingen (vier) per stromingssituatie, maakt dat de direkt gemeten  $s_{s,top}$  bij de verdere uitwerking niet gebruikt is (Tabel 3, kolom 36). De problemen bij deze metingen zijn:

- Meten boven scheve (in horizontaal vlak) beddingvormkammen.
- Het ontstaan van kleine ribbels op de beddingvormtop tijdens de meting, waardoor het suspensietransport lokaal toeneemt.
- Het veranderen van de beddingvormtophoogte tijdens de meting.
- Het goed volgen van de voortschrijdende beddingvormtop tijdens de meting met het meetsysteem.

Verder is het extrapoleren van het transport tussen het onderste meetpunt en de grens  $10 \cdot D_{50}$  boven de bodem ook een oorzaak voor onnauwkeurigheden in  $s_{s,top}$ . Verschillen in de helling van de rechte lijn door de meetpunten kan resulteren in afwijkingen van  $\pm 100\%$  ten opzichte van het veronderstelde gemiddelde.

Het suspensietransport kan onderverdeeld worden in een deel  $s_1$  boven de knik in het suspensieverloop in de vertikaal en een deel  $s_2$  daar beneden (zie Figuur 13-B). Het blijkt dat voor het lage debiet ( $Q = 0,101 \text{ m}^3/\text{s}$ )  $s_2$  70% van het totale suspensietransport uitmaakt en voor een hoog debiet ( $Q = 0,392 \text{ m}^3/\text{s}$ )  $s_2$  50% van het totaal uitmaakt. Tussen deze twee waarden verloopt het aandeel van  $s_2$  in het totale suspensietransport lineair met het debiet. Voor het debiet ( $Q = 0,411 \text{ m}^3/\text{s}$ ) maakt  $s_2$  75% van het totale suspensietransport uit. Deze waarde is vergeleken met de lagere debieten hoog. Er wordt juist verwacht dat het aandeel van  $s_1$  bij toenemend debiet ook toeneemt (toename van de concentratie in de vertikaal). De oorzaak van het hoge aandeel van  $s_2$  en daardoor lage aandeel van  $s_1$  kan zijn de relatief lage ruwheid van de bodem bij deze stromingssituatie (vlakbed) waardoor de turbulentie intensiteit lager is en er daardoor relatief minder materiaal in suspensie gaat.

Tot slot is de suspensieparameter  $u_*'/w_s$  bepaald. Deze parameter varieert van 0,8 tot 1,5, zie Tabel 3, kolom 38. De grens voor het in belangrijke mate in suspensie gaan van bodemmateriaal wordt door Van Rijn (1982,a) gesteld op een waarde voor  $u_*'/w_s > 1$ .

In Figuur 14 zijn  $\phi_t$  en  $\phi_b$  als functie van de T-parameter uitgezet. De functies vertonen een zelfde verloop als de transporten op de top in Figuur 11, hoewel de afname van de gradient met toenemende T voor beide transporten hier duidelijker is.

In Figuur 15 is  $\phi_t$  als functie van  $\theta'$  uitgezet. De functie vertoont een soortgelijk verloop als  $\phi_{t,top}$  ( $\theta'_{top}$ ) in Figuur 11. De functie  $\phi_t(\theta)$  toont aan dat

deze relatie minder geschikt is doordat  $\phi_t$  afneemt bij toenemende  $\theta > 1$ . Dit is een gevolg van een toenemende C-waarde en dus afnemende  $\theta$  bij vlakbed, zie ook Figuur 9.

### Theorie Fredsøe

In Figuur 16 wordt de gemeten relatieve beddingvormhoogte  $H/h$  als functie van  $\theta'_{top}$  uitgezet en vergeleken met de relatie zoals Fredsøe (1984) die geeft. Het blijkt dat de gemeten punten ver boven de theoretische relatie liggen. Het afnemen van de beddingvormhoogte gebeurt bij  $\theta'_{top} > 0,7$  terwijl de theorie dat voorspelt bij  $\theta'_{top} > 0,2$ . Ook de tendens van de gemeten relatieve beddingvormhoogte stemt niet overeen met de theorie. Zoals eerder opgemerkt blijft  $H/h$  ongeveer konstant voor  $0,4 < \theta'_{top} < 0,8$ . De dominante relatieve beddingvormhoogte volgt de theorie evenmin.

De beddingvormsteilheid  $H/L$  voldoet beter aan het theoretisch verloop van  $H/L$ . De variatie van de gemiddelde korreldiameter tijdens de proevenreeks en de invloed daarvan op  $H/L$  is niet terug te vinden in de resultaten. De beddingvormsteilheid volgens de dominante  $H$  en  $L$  vertoont dezelfde tendens als die volgens de gemiddelde  $H$  en  $L$ . De afname van de steilheid uit de metingen is niet consistent met de theorie van Fredsøe. In de theorie wordt de afname van  $H/L$  bij grotere  $\theta'_{top}$  veroorzaakt door een afname in  $H$ , terwijl uit de metingen blijkt dat de afname van  $H/L$  een gevolg is van een toename in  $L$ . In Figuur 17 is de linkerterm van vergelijking (2-1) uitgezet tegen de rechterterm van die vergelijking. Beide termen zijn bepaald uit gemeten grootheden. De waarden zijn opgenomen in Tabel 3 evenals de waarden voor  $\theta'_{top}$ . De waarden voor  $H/h$  voor  $\phi_{b,top}$  en  $d\phi_{t,top} / d\theta'_{top}$  zijn bepaald uit Figuur 11. Als de theorie met de metingen zou overeenstemmen zouden de punten in de figuur op de lijn van volledige overeenstemming moeten liggen. Dit blijkt alleen enigszins op te gaan voor de vlakbed situatie ( $\theta'_{top} = 0,89$ ). Als de invloed van het Froude-getal in de relatie wordt ingebracht, zie Fredsøe (1984), dan wijken de gemeten waarden nog meer van de theorie af. De afwijkingen zijn hier ook voor de dominante beddingvormhoogte groter dan voor de gemiddelde beddingvormhoogte.

### Relaties van Van Rijn

In Figuur 18 staat de gemeten relatieve beddingvormhoogte uitgezet in de relatie van Van Rijn. Het blijkt dat de gemeten waarden in het gebied van  $5 < T < 11$  binnen de omhullende liggen (bovenste lijn faktor 2 keer de relatie, onder-



ste lijn faktor  $\frac{1}{2}$  keer de relatie). Voor  $T \approx 15$  liggen de gemeten waarden buiten de omhullende. Voor  $T = 25$  ligt de relatieve beddingvormhoogte geheel buiten de omhullende. Echter hier speelt de definitie van vlakbed een rol. Is vlakbed werkelijk geheel vlak, of is vlakbed die situatie waarbij de Chézy-coëfficiënt overeenkomt met die volgend uit de korrelruwheid? De gemeten relatieve beddingvormhoogte voor  $T = 25$  wordt niet in beschouwing genomen. In de figuur staat ook de gemeten beddingvormsteilheid uitgezet tegen de T-parameter. Het blijkt dat de gemeten waarden redelijk de relatie van Van Rijn volgen. Ook hier is de waarde van  $H/L$  voor  $T = 25$  arbitrair en afhankelijk van de interpretatie van vlakbed. De waarden van de relatieve steilheid volgend uit de dominante beddingvormafmetingen voldoen beter aan de relatie.

#### Ruwheidsvoorspellers

In Figuur 19 is de door Van Rijn (1982,b) afgeleide relatie van de bodemruwheidshoogte als functie van de beddingvormsteilheid weergegeven. De k-waarde die uit de gootproeven volgt is daarin uitgezet. Het blijkt dat de theoretische k-waarde bepaald uit de beddingvormhoogte en -lengte te hoge waarden geeft vergeleken met de gemeten k-waarden. De gemeten k-waarden als functie van de gemeten dominante beddingvormsteilheid sluit beter aan bij de theorie. Ogink (1984) merkt op dat resultaten van gootproeven in het algemeen door de ruwheidsvoorspeller van Van Rijn overschat worden. De k-waarden en steilheden voor de vlakbed situatie zijn hier ook minder relevant om bovengenoemde redenen betreffende de arbitraire definitie van vlakbed bij  $T = 25$ . Tot slot wordt opgemerkt dat de vergelijking van de meetresultaten met de relatie van Van Rijn niet geheel oprecht is, omdat voor een aantal resultaten niet aan de voorwaarde  $R_b/k > 10$  wordt voldaan (zie ook 3.2).

In Figuur 20 staan de k-waarden volgens de ruwheidsvoorspeller van Van Rijn en Engelund voor zowel gemiddelde als dominante H en L uitgezet tegen de k-waarden volgend uit de proevenserie. De k-waarden berekend met dominante H en L liggen dicht bij de gemeten k-waarden. Ook hier geldt de opmerking dat aan  $R_b/k > 10$  niet door alle resultaten wordt voldaan. De ruwheidsvoorspeller van Engelund uitsluitend geijkt op gootproefresultaten voldoet beter voor de lage k-waarden,  $k < 0,08$  m, voor vlakbed voldoet de voorspeller van Van Rijn beter. In de grafiek van gemeten C-waarde tegen de berekende C-waarde liggen de waarden dicht bij de lijn van overeenkomst. Dit is een gevolg van de formulering van C waarbij grote variaties in k-waarde grotendeels te niet worden gedaan

doordat de logaritme van k wordt genomen. Voor vlakbed wijkt de C-waarde het sterkst af van de gemeten C-waarde.

### 6.3 Resultaten van andere metingen

#### 6.3.1 Algemeen

Naast de resultaten van de gootproeven worden de methoden van Fredsøe en van Van Rijn, betreffende het voorspellen van beddingvormafmetingen, getoetst aan resultaten van gootproeven van andere instituten en prototypemetingen. Verder worden de ruwheidsvoorspellers van Van Rijn en van Engelund aan dezelfde serie resultaten getoetst. Het betreft hier resultaten van gootproeven uitgevoerd bij andere instituten, prototypemetingen van de Zaïre Rivier, de Missouri Rivier, de Nederlandse Rijntakken en de Maas en enkele andere buitenlandse rivieren. De volgorde van behandelen van de resultaten is gelijk aan die in 6.2.

#### 6.3.2 Resultaten van gootproeven, andere instituten

De resultaten van gootproeven, uitgevoerd bij andere instituten, opgenomen in het World Flume Data bestand zijn bewerkt zoals aangegeven in 5.4.2. Er zijn drie gebieden onderscheiden voor de gemiddelde korreldiameter en voor alle gebruikte proeven is  $Fr < 0,7$ . De bewerkte resultaten zijn opgenomen in de Figuren 21 t/m 25.

#### Sediment

Er zijn drie gebieden voor de gemiddelde korreldiameter onderscheiden. In ieder gebied liggen enkele gootproeven, voor het gebied  $200 \mu\text{m} < D_{50} < 400 \mu\text{m}$  zijn dat:

onderzoeker	aantal proeven	$D_{50} (\mu\text{m})$	$D_{90} (\mu\text{m})$
Guy (1966)	12	270	550
Guy (1966)	22	280	710
Guy (1966)	4	330	440
Mutter (1971)	22	260	301
Mutter (1971)	10	210	260

voor het gebied  $400 \mu\text{m} < D_{50} < 600 \mu\text{m}$  zijn dat:

onderzoeker	aantal proeven	$D_{50} (\mu\text{m})$	$D_{90} (\mu\text{m})$
Guy (1966)	24	450	790
Guy (1966)	33	470	820

voor het gebied  $600 \mu\text{m} < D_{50} < 850 \mu\text{m}$  zijn dat:

onderzoeker	aantal proeven	$D_{50} (\mu\text{m})$	$D_{90} (\mu\text{m})$
Znamenskaya	9	802	1390
W.L.	12	780	850

De waarde voor de gradatie van het bodemmateriaal,  $\sigma_D$  varieert voor deze proeven van 1,1 tot 2,5.

#### Stromingsparameters

Het Froude-getal varieert van 0,15 tot 0,7. De bovengrens van 0,7 is ingesteld voor het selekteren van de proeven om effecten van een hoog Froude-getal op het afvlakkingsproces te beperken en om anti-duinen uit te sluiten.

In Figuur 21 is de Chézy-coëfficiënt als functie van  $\theta'$  uitgezet. Er is enigzins een tendens van toenemende  $C$  met toenemende  $\theta'$  waar te nemen. Van  $C = 30 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$  naar  $C = 40 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$  respectievelijk voor  $\theta' = 0,1$  naar  $\theta' = 0,5$  respectievelijk. De hoge  $C$ -waarden (lage ruwheid) voor  $\theta' < 0,2$  worden veroorzaakt door de uitgangssituatie bij de proef, namelijk vlakbed. Voor het gebied  $600 \mu\text{m} < D_{50} < 850 \mu\text{m}$  zijn alle waarden van  $\theta' < 0,2$ , een gevolg van het grove materiaal. De resultaten van de gootproeven in de figuur van Engelund,  $\theta$  tegen  $\theta'$ , volgen de relatie van Engelund redelijk. Voor  $\theta' < 0,06$  voldoen de resultaten minder goed aan de relaties.

De  $T$ -parameter varieert van 1 tot 16 voor het gebied  $200 \mu\text{m} < D_{50} < 400 \mu\text{m}$ , voor  $400 \mu\text{m} < D_{50} < 600 \mu\text{m}$  varieert  $T$  van 1 tot 13 en voor  $D_{50} > 600 \mu\text{m}$  varieert  $T$  van 1 tot 4.

#### Beddingvormen

De beddingvormafmetingen zijn overgenomen uit het World Flume Data bestand. De methode voor het bepalen van  $H$  en  $L$  verschilt per proevenserie en komt niet

overeen met de methode zoals beschreven in 5.3 en Appendix C. De gegeven beddingvormafmetingen per proef worden ondanks de verschillende bepalingsmethoden gebruikt voor het toetsen van de beddingvormvoorspellers en ruwheidsvoorspellers.

### Theorie van Fredsøe

In Figuur 22 zijn de gemeten beddingvormafmetingen als functie van  $\theta'_{top}$  in de relaties van Fredsøe getekend. Voor de relatieve beddingvormhoogte  $H/h$  is de spreiding per gebied waarin de  $D_{50}$  ligt groot. Een duidelijke afname van de relatieve beddingvormhoogte is niet te onderscheiden bij toenemende  $\theta'_{top}$ .

De groei van  $H/h$  met  $\theta'_{top}$  in het gebied van  $\theta'_{top} = 0$  tot 0,2 volgt de relatie redelijk, als de beginsituaties met vlakbed beschouwd worden. Voor  $\theta'_{top} > 0,2$  voldoen de resultaten niet aan de relatie van Fredsøe. Zoals Ogink (1984) opmerkt liggen resultaten van gootproeven meestal hoger dan de relatie voor  $H/h$  aangeeft. De beddingvormsteilheid  $H/L$  die volgt uit de proeven vertoont een afnemende tendens met toenemende  $\theta'_{top}$ . Hier liggen de gootproefresultaten ook hoger dan de relatie van Fredsøe aangeeft.

### Relaties van Van Rijn

In Figuur 23 zijn de resultaten van de gootproeven uitgezet in de relaties van Van Rijn. In het gebied  $T < 5$  liggen de resultaten redelijk rond de relatie voor de relatieve beddingvormhoogte. De spreiding is echter groot. Voor  $T > 5$  volgen de resultaten de tendens van de relatie van Van Rijn niet. De spreiding in de resultaten is groot en de relatieve beddingvormhoogte blijft ongeveer konstant. In de relatie voor de beddingvormsteilheid liggen de resultaten voor  $T < 5$  hoger dan de relatie aangeeft. Voor  $T > 5$  komt de tendens in de resultaten overeen met de tendens in de relatie van Van Rijn (afnemende  $H/L$  bij toenemende  $T$ ) Ook hier is de spreiding in de resultaten groot. De relaties van Van Rijn zijn gebaseerd op empirische resultaten van goten en prototype. De resultaten van een aantal van de hier gebruikte gootproeven zijn ook door Van Rijn (1982,b) gebruikt. Hetgeen de overeenkomst van resultaten en relaties deels verklaart.

### Ruwheidsvoorspellers

In Figuur 24 is de equivalente bodemruwheid, berekend uit de stromingsparameters en de beddingvormhoogte, voor de gootproeven uitgezet tegen de bedding-

vormsteilheid in de relatie van Van Rijn. Voor de meeste gootproeven ligt  $H/L$  tussen 0,02 en 0,1, en vertoont  $k/H$  een grote spreiding. In Figuur 25-A wordt de ruwheidsvoorspeller van Van Rijn getoetst aan de resultaten van de gootproeven. Een grote spreiding in de figuur  $k_{\text{meting}} - k_{\text{theorie}}$  is waar te nemen, waarbij voor  $k_{\text{theorie}} < 0,02$  m de resultaten in het gebied  $200 \mu\text{m} < D_{50} < 400 \mu\text{m}$  te laag zijn. Voor  $k_{\text{theorie}} > 0,02$  m zijn de waarden voor dit gebied te hoog vergeleken met de gemeten waarden. De resultaten in de andere gebieden voor de gemiddelde korreldiameter liggen rond de lijn van overeenkomst. In de figuur  $C_{\text{meting}} - C_{\text{theorie}}$  liggen de punten rond de lijn van overeenkomst, echter de spreiding is groot. Voor beide figuren wordt opgemerkt dat de ruwheidsvoorspeller van Van Rijn opgesteld is voor het gebied  $10 < R_b/k < 250$ , zie 3.2. In een aantal gevallen voldoen de resultaten niet aan de voorwaarde  $R_b/k > 10$ , zodat een vergelijking met de relatie niet oprecht is.

In Figuur 25-B wordt de ruwheidsvoorspeller van Engelund getoetst aan de resultaten van de gootproeven. De punten vertonen een grote spreiding rond de lijn van overeenkomst voor zowel  $k$  als  $C$ . Echter voor zowel  $k$  als  $C$  is de overeenkomst tussen meting en theorie iets beter dan de voorspeller van Van Rijn. Oorzaken hiervoor zijn dat de voorspeller van Engelund enkel gebaseerd is op gootproeven en dat niet alle resultaten voldoen aan de voorwaarde  $R_b/k > 10$ , hetgeen vereist is voor toepassing van de relatie van Van Rijn. Voorts wordt opgemerkt dat enkele gebruikte resultaten van gootproeven, voor deze studie, uit het World Flume Data bestand ook door Engelund zijn gebruikt om de voorspeller te ijken.

### 6.3.3 Resultaten van prototypemetingen, buitenlandse rivieren

#### 6.3.3.1 Algemeen

In deze paragraaf worden meetresultaten van de Zaïre en Missouri rivier behandeld. Naast stromingsparameters zijn ook bodemvormen geregistreerd op de Zaïre en Missouri Rivier. De resultaten van de Zaïre Rivier zijn in detail bestudeerd. Vooral het definieren van beddingvormafmetingen heeft veel aandacht gekregen, omdat er gedetailleerde bodemvormregistraties beschikbaar zijn. De resultaten van de metingen op de Zaïre en Missouri Rivier zijn gebruikt om de beddingvormafmetingvoorspellers en ruwheidsvoorspellers te toetsen. Het behandelen van de resultaten gebeurt in dezelfde volgorde als in 6.2.

### 6.3.3.2 Resultaten prototypemetingen Zaïre Rivier

De resultaten van de prototypemetingen op de Zaïre Rivier zijn opgenomen in Tabel 4. De riviertak waar de metingen zijn uitgevoerd (Matéba Amont) en waarlangs ca. 46% van het totale debiet van de Zaïre afgevoerd wordt is weergegeven in Figuur 26. Voor de positie van de tak in het stroomgebied van de Zaïre, wordt verwezen naar Peters (1978). Een intensieve meetcampagne van stroomsnelheden in de meetraai aangegeven in Figuur 26 is uitgevoerd in september 1968. Verder zijn intensieve snelheidsmetingen in de meetraaien III, IV aangegeven in Figuur 26, uitgevoerd in juni 1975 en december 1975. Oppervlakte snelheden met behulp van drijvers zijn frequenter gemeten. Bodemprofielen zijn in 1968 maandelijks gemeten in de raaien 1 tot en met 5 (zie Figuur 26) en in juni en december 1975 zijn bodemprofielen gemeten langs de vaarroute zoals aangegeven in Figuur 26. Voor de onderhavige studie is gekozen voor meetresultaten in de periode oktober 1968 tot en met april 1969, een periode waarin het op één na hoogste hoogwater in de Zaïre tot dan toe voorkomt en verder voor de meetresultaten van juni en december 1975. Opgemerkt wordt dat in 1975 in de tak Matéba Amont baggerwerken zijn uitgevoerd, om de geul op diepte te houden ten behoeve van de scheepvaart, hetgeen invloed op de beddingvormen heeft.

#### Sediment

Uit zeefanalyses (Matéba 21, 1983) van bodemmateriaal volgt dat voor de beschouwde periode 1968-1969 het bodemmateriaal de volgende karakteristieken heeft:  $D_{50} = 345 \times 10^{-6} \text{ m}$ ,  $D_{90} = 545 \times 10^{-6} \text{ m}$  en  $\sigma_D \approx 1,6$ . Voor de beschouwde perioden in 1975 zijn de korrelkarakteristieken van het bodemmateriaal:  $D_{50} = 300 \times 10^{-6} \text{ m}$ ,  $D_{90} = 430 \times 10^{-6} \text{ m}$  en  $\sigma_D \approx 1,4$ .

#### Stromingsparameters

Het Froude-getal varieert weinig onder het passeren van de hoogwatergolf en heeft een waarde kleiner dan 0,2.

In Figuur 27 is de Chézy-coëfficiënt als functie van  $\theta'$  uitgezet. Voor de periode 1968-1969 vertonen de C-waarden een willekeurige variatie van 45 tot 60  $\text{m}^{1/2}/\text{s}$  bij een beperkte variatie van  $\theta'$  van 0,4 tot 0,5. De resultaten van de periode 1975 vertonen een duidelijk verloop van de C-waarde van 30  $\text{m}^{1/2}/\text{s}$  bij  $\theta' \approx 0,1$  via  $C \approx 60 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$  bij  $\theta' \approx 0,4$  tot  $C \approx 55 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$  bij  $\theta' \approx 0,7$ . In de periode 1975 is er echter intensief gebaggerd in de Matéba Amont tak zodat de

resultaten voorzichtig geïnterpreteerd moeten worden. De resultaten van de periode 1968-1969 in de figuur van Engelund,  $\theta$  als functie van  $\theta'$ , liggen vrijwel allemaal boven de empirische relatie. De resultaten van de periode 1975 liggen voor  $\theta' > 0,6$  boven de relatie. Voor  $\theta' < 0,2$  liggen de waarden van  $\theta$  een faktor 2 à 3 te hoog ten opzichte van de empirische relatie van Engelund. De oorzaak hiervan ligt bij het bepalen van het verhang zoals behandeld wordt in Matéba 7 (zie Peters, 1968-1977). Het verhang is over relatief grote afstand bepaald (10 km ten opzichte van 3 km tak lengte) terwijl bij het installeren van een extra meetstation in 1969 tussen de twee bestaande stations, het verhang in de Matéba Amont tak kleiner bleek te zijn dan gebaseerd op de vervallen van de twee bestaande stations. Bij gebruik van de juiste verhangen zou dit resulteren in hogere C-waarden en dus lagere  $\theta$ -waarden. De verhangen over de korte afstand zijn echter over te korte periode gemeten om betrouwbaar te zijn.

De T-parameter varieert van 9 tot 15 voor de periode 1968-1969 en van 1 tot 19 voor de periode 1975.

#### Beddingvormen

Zoals in 5.4.3.1 aangegeven worden er drie typen beddingvormen onderkend. Namelijk beddingvormen met steile lijzijde (type A), alle kleinere beddingvormen (type B) en grote beddingvormen (type C), zie voor een indicatie Figuur 26. In Figuur 26 is aangegeven hoe de beddingvormen zich onder verschillende rivierafvoeren gedragen. Een meer gedetailleerd overzicht is te vinden in Matéba 7 (Peters, 1968-1977). Het blijkt dat bij toenemend debiet de grote beddingvormen (type C, lengte orde 100 m) langer worden, alle kleinere beddingvormen (type B) ongeveer even hoog en lang blijven en dat de kleine beddingvormen met steile lijzijde (type A) ook ongeveer even hoog en lang blijven. De waarden van de beddingvormsteilheid in Tabel 4 voor de beddingvormen met steile lijzijde (type A) zijn gedefinieerd zoals aangegeven in 5.4.3.1. Aangezien het aantal beddingvormen met steile lijzijde (type A) lager is dan alle kleine beddingvormen (type B), is  $H_s/L_s$  kleiner dan  $H_a/L_a$ . De resultaten van de periode 1975 (zie Tabel 4) vertonen een afname van de beddingvormhoogte en -lengte bij toenemend debiet voor alle kleine beddingvormen (type B). Bij de beddingvormen met steile lijzijde (type A) neemt alleen de beddingvormlengte af. Grote beddingvormen (type C) zijn op de bodemregistraties niet te onderscheiden. Voor de resultaten van de periode 1975 zijn de volgende opmerkingen te

maken. Tijdens 1975 is intensief gebaggerd in de Matéba Amont tak en de registraties zijn gesitueerd in de vaarroute en niet in de raaien zoals in 1968-1969 (zie Figuur 26). Verder zijn de beddingvormregistraties in 1975 minder gedetailleerd dan die van 1968-1969. Om een indruk te geven de lengte schaal op de registraties van 1975 is 1 cm = 100 m, terwijl voor 1968-1969 de lengte schaal 1 cm = 10 m is. Het onderscheiden van beddingvormen met steile lijzijde (type A) voor de periode 1975 is dan ook minder nauwkeurig. De reden voor het gebruik van de registraties uit 1975 is dat dit de enige registraties zijn die overeenkomstige stromingsomstandigheden hebben met de registraties uit 1968-1969 in dezelfde riviertak.

Tot slot wordt opgemerkt dat de rivierafvoer bij de verschillende gebruikte beddingvormregistraties in alle gevallen gedurende 1 à 2 weken nagenoeg konstant is.

#### Sedimenttransport

In Figuur 28 is het gemeten gemiddelde dimensieloze totaal- en bodemtransport als functie van de T-parameter gegeven. Voor  $T > 3$  is door de enkele punten een toename van  $\Phi_b$  en  $\Phi_t$  met T waar te nemen. De gemeten transporten voor  $T < 2$  liggen niet in lijn met de overige gemeten transporten voor  $T > 3$ . Oorzaken hiervoor kunnen zijn; baggerwerkzaamheden, lokale turbulente stroming, speiding in meetresultaten en meetfouten. In Figuur 29 zijn de transporten uitgezet als functie van  $\theta'$ . De transporten vertonen een verloop overeenkomend met dat in Figuur 28. De transporten  $\Phi_b$  en  $\Phi_t$  als functie van  $\theta$  tonen aan dat deze relatie geen eenduidig verloop vertoont.

#### Theorie van Fredsøe

In Figuur 30 zijn de drie typen beddingvormen, zoals gedefinieerd in 5.4.3.1, getoetst aan de theorie van Fredsøe. De grote beddingvormen (type C) in de periode 1968-1969 liggen te hoog ten opzichte van de relatie voor de relatieve beddingvormhoogte, de beddingvormen met steile lijzijde (type A) en alle kleine beddingvormen (type B) liggen te laag. Verder is het gebied waarin  $\theta'_{top}$  ligt beperkt, van 0,4 tot 0,6. Alle kleine beddingvormen (type B) in de periode 1975 lijken redelijk de relatie van Fredsøe te volgen voor  $\theta'_{top} > 0,4$ . Voor lagere  $\theta'_{top}$ -waarden voldoen de metingen minder goed aan de relatie van Fredsøe. De relatieve beddingvormhoogte van de beddingvormen met steile lijzijde (type A) liggen te laag. Opgemerkt wordt dat er voor de beddingvormen in



de periode 1975 nauwelijks sprake is van afvlakken van de beddingvormhoogte en verder is in 1975 intensief gebaggerd in de Matéba Amont tak. Er wordt dan ook minder waarde aan deze resultaten toegekend met betrekking tot het toetsen van de theorie.

De steilheid van alle kleine beddingvormen (type B) in de periode 1968-1969 ligt te hoog in de relatie voor de beddingvormsteilheid van Fredsøe in Figuur 30. De steilheid van de grote beddingvormen (type C) en de beddingvormen met steile lijzijde (type A) ligt te laag ten opzichte van de relatie. Een tendens in de resultaten is niet te onderscheiden, omdat de  $\theta'_{top}$  een beperkt gebied bestrijkt. Voor de periode 1975, is de steilheid van alle kleine beddingvormen (type B) en de beddingvormen met steile lijzijde (type A) nagenoeg konstant bij variërende  $\theta'_{top}$  van 0,1 tot 0,7.

Resumerend kan gesteld worden dat de theorie van Fredsøe betreffende beddingvormafmetingen niet duidelijk wordt onderbouwd door de meetresultaten van de Matéba Amont tak in de Zaïre. Ook gedragen de beddingvormafmetingen, H/h en H/L, van de verschillende onderscheidde beddingvormtypen zich niet eenduidig in de relaties van Fredsøe.

#### Relaties van Van Rijn

In Figuur 31 zijn de drie typen beddingvormen uit gezet in de relaties voor beddingvormhoogte en -steilheid van Van Rijn. Het blijkt dat voor de periode 1968-1969 de grote beddingvormen (type C) het best voldoen aan de empirische relaties voor relatieve beddingvormhoogte en beddingvormsteilheid. De afmetingen van de beddingvormen met steile lijzijde (type A) voldoen alleen redelijk aan de relatie voor de steilheid en de afmetingen van alle kleine beddingvormen (type B) voldoen aan beide relaties niet. De beddingvormafmetingen in de periode 1975 voldoen redelijk goed aan beide relaties, waarbij opgemerkt wordt dat beide typen beddingvormen (alle kleine beddingvormen (type B) en beddingvormen met steile lijzijde (type A)) ongeveer evengoed voldoen. Uit de meetresultaten uitgezet in de relaties van Van Rijn blijkt dat de relatieve beddingvormhoogte voor de verschillende waarden van T ongeveer konstant is, hetgeen ook geldt voor de beddingvormsteilheid. Afvlakken van beddingvormen of een duidelijke tendens van afnemende steilheid is niet te konstateren.

### Ruwheidsvoorspellers

In Figuur 32 wordt de k-waarde, berekend uit de stromingsparameters en de afmetingen van de drie afzonderlijke typen beddingvormen, getoetst aan de ruwheidsvoorspeller van Van Rijn. Het gewogen samenstellen van de afzonderlijke beddingvormtypen tot karakteristieke beddingvormafmetingen wordt in deze studie niet gedaan. De resultaten van de grote beddingvormen (type C) blijken het best aan de empirische relatie te voldoen, hoewel de waarden in een beperkt gebied van H/L liggen ( $H/L < 0,02$ ). De resultaten van alle kleine beddingvormafmetingen (type B) voldoen goed aan de relatie, maar liggen in het beperkte gebied van  $0,02 < H/L < 0,06$ . De resultaten van de beddingvormen met steile lijzijde (type A) liggen vrijwel allen te hoog ten opzichte van de empirische relatie. In Figuur 33 zijn de gemeten k-waarden (uit stromingsparameters) vergeleken met de k-waarden berekend volgens Van Rijn en Engelund. Tevens zijn in de figuur de gemeten en voorspelde C-waarden vergeleken. Ook hier blijkt de ruwheid berekend uit de grote beddingvormen (type C) het best te voldoen aan de gemeten ruwheid. Ook de ruwheid berekend uit de afmetingen van alle kleine beddingvormen (type B) blijkt voor de voorspeller van Van Rijn goed te voldoen, de voorspeller van Engelund voldoet hier iets minder goed. De ruwheid berekend uit de afmetingen van de beddingvormen met steile lijzijde (type A) ligt te laag ten opzichte van de gemeten waarden. Opgemerkt wordt dat het bepalen van de C-waarde uit de gemeten stromingsparameters op de Zaïre een beperkte nauwkeurigheid heeft. De nauwkeurigheid van het verhang speelt hierin een belangrijke rol, zie de opmerking in 6.3.3.2 onder stromingsparameters.

#### 6.3.3.3 Resultaten prototypemetingen Missouri Rivier

De resultaten van metingen op de Missouri Rivier zijn samengevat in Tabel 5. De metingen zijn uitgevoerd in de periode 1966-1975 telkens tijdens het passeren van een hoogwatergolf. De gegevens zijn ontleend aan Shen (1978) en de metingen zijn uitgevoerd tussen km 616 en km 609.

### Sediment

Tijdens iedere periode waarin gemeten is, zijn bodemonsters genomen en geanalyseerd langs het traject. De belangrijkste korrelkarakteristieken ( $D_{10}$ ,  $D_{50}$  en  $D_{90}$ ) zijn samengevat in Figuur 34. Er is een lichte toename van de karakteristieke korreldiameters waar te nemen van 1966 tot 1975.  $D_{50}$  van  $200 \times 10^{-6} \text{ m}$

naar  $250 \times 10^{-6} \text{ m}$ ,  $D_{90}$  van  $300 \times 10^{-6} \text{ m}$  naar  $400 \times 10^{-6} \text{ m}$  en  $D_{10}$  van  $120 \times 10^{-6} \text{ m}$  naar  $150 \times 10^{-6} \text{ m}$ . Het bodemmateriaal is dus langzaam grover geworden. Opgemerkt wordt dat de bodemonsters op een beperkt aantal dagen tijdens de metingen zijn genomen.

### Stromingsparameters

Het Froude-getal is onder alle gemeten omstandigheden 0,25 à 0,30.

In Figuur 35 is de Chézy-coëfficiënt als functie van  $\theta'$  uitgezet. Opvallend is dat de C-waarden hoog zijn, ze liggen boven de  $60 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$  en de  $\theta'$ -waarden zijn groter dan 0,8. Er is een tendens waar te nemen van toenemende C met toenemende  $\theta'$ . In de figuur van Engelund ( $\theta = f(\theta')$ ) liggen de  $\theta$ - en  $\theta'$ -waarden dicht bij elkaar in het overgangsgebied, rond de empirische relaties in dat gebied.

De T-parameter ligt voor alle gemeten omstandigheden tussen 15 en 22. De omstandigheden bevinden zich dus duidelijk in het overgangsgebied van beddingvormen naar vlakbed (zie Van Rijn, 1982,b).

### Beddingvormen

In Figuur 36 zijn enkele bodemregistraties opgenomen voor de perioden maart-november 1967 en september-december 1968. De registraties van 1967 vertonen bij toenemende rivierafvoer respectievelijk korte beddingvormen ( $L \approx 10 \text{ m}$ ), vlakbed, lange beddingvormen ( $L \approx 350 \text{ m}$ ) en hoge beddingvormen ( $H \approx 1,50 \text{ m}$  en  $L \approx 100 \text{ m}$ ). De overgang van vlakke bodem naar hoge beddingvormen kan veroorzaakt zijn door toenemende stroming door de uiterwaarden. Bij afnemende rivierafvoer worden de beddingvormen langer en tot slot treedt vlakbed weer op. Voor de periode 1968 is een soortgelijk gedrag als in de periode 1967 te onderkennen. Opgemerkt wordt dat de beddingvormen geen evenwichtsvormen, behorende bij de stromingsituatie, behoeven te zijn. De beddingvormafmetingen zoals opgenomen in Tabel 5 zijn direkt bepaald uit de bodemregistraties (Shen, 1978), er is geen onderscheid gemaakt in verschillende beddingvormtypen. Het blijkt uit de bodemregistraties (U.S. Army Engineer District, 1969) dat de steilheid van de lijzijde van de grote beddingvormen in het algemeen veel flauwer is dan 1:3, dus energie verliezen door loslaten van de stroming op de beddingvormtop zullen klein zijn.

### Theorie van Fredsøe

In Figuur 37 worden de resultaten van de prototypemetingen van de Missouri vergeleken met de relaties voor H/h en H/L van Fredsøe. De meetresultaten voor de relatieve beddingvormhoogte liggen boven de theoretische relatie. Verder zijn de  $\theta'_{top}$ -waarden hoog, van 1,1 tot 1,8. Een duidelijke tendens in de gemeten H/h-waarden is niet te onderkennen. Binnen het beperkte gebied van  $\theta'_{top}$  blijft de H/h-waarde gemiddeld konstant. De gemeten beddingvormsteilheid volgt de relatie van Fredsøe beter, hoewel het gebied van  $\theta'_{top}$  beperkt is en de waarden van  $\theta'_{top}$  relatief hoog zijn. Voor H/L is geen duidelijke tendens aanwezig bij toenemende  $\theta'_{top}$ . De resultaten ondersteunen de theorie van Fredsøe evenwel niet.

### Relaties van Van Rijn

In Figuur 38 zijn de relatieve beddingvormhoogte en beddingvormsteilheid als functie van de T-parameter uitgezet in de relaties van Van Rijn. De relatieve beddingvormhoogte ligt te hoog ten opzichte van de relatie en blijft ongeveer konstant in het interval van  $T = 15$  tot  $T = 22$ . De beddingvormsteilheid voldoet beter aan de relatie voor H/L. Hoewel de spreiding in de resultaten groot is, is er geen tendens van afnemende beddingvormsteilheid bij toenemende T in de gemeten grootheden te onderkennen.

### Ruwheidsvoorspellers

In Figuur 39 staan de k-waarde berekend uit de Chézy-coëfficiënt en de gemeten beddingvormafmetingen uitgezet in de empirische relatie voor de equivalente ruwheid van Van Rijn. De gemeten k-waarde ligt zeer laag, zoals uit Tabel 5 blijkt, in de orde van 1 cm. Voor het overgrote deel van de meetresultaten is  $h/k > 250$ , hetgeen buiten het geldigheidsgebied van de White-Colebrook formule voor de ruwheid ligt. Vergelijking met de relatie van Van Rijn is dus niet oprecht (zie ook 3.2). De resultaten van de metingen voldoen alleen voor  $H/L < 0,004$  aan de relatie van Van Rijn voor grotere beddingvormsteilheid overschat de relatie de ruwheid.

In Figuur 40 staan de C-waarden uit de metingen uitgezet tegen de C-waarden berekend met de ruwheidsvoorspellers van Van Rijn en van Engelund. De berekende ruwheden zijn vrijwel allemaal te hoog ten opzichte van de gemeten waarden.

De voorspeller van Engelund voldoet iets beter voor de Missouri dan de voorspeller van Van Rijn. De berekende k-waarden vergeleken met de k-waarden uit de metingen vertonen het zelfde beeld, namelijk overschatting van de ruwheid door de voorspellers. Zoals opgemerkt onder beddingvormen hebben de grote beddingvormen lijzijdes met een flauwe helling (flauwer dan 1:3) waardoor de energieverliezen klein zullen zijn en is de ruwheid van de bodemvormen ook klein. Dit kan een oorzaak zijn voor de gemeten hoge C-waarden.

#### 6.3.4 Resultaten prototypemetingen Nederlandse Rijntakken en de Maas

De resultaten van metingen tijdens hoge rivierafvoeren op de Nederlandse Rijntakken en de Maas zijn opgenomen in Tabel 6. De volgorde van behandeling van de resultaten is gelijk aan die in 6.2. De betreffende riviertakken en het aantal gebruikte resultaten zijn:

riviertak	trajekt (km)	aantal resultaten	hoogwater
Nederrijn	881-909	17	1983,1984
Waal	934-960	9	1980,1982,1983
Boven Merwede	953-961	2	1983
Beneden Merwede	961-976	4	1983
Nieuwe Merwede	961-980	4	1983
Maas/Bergsche Maas	202-250	4	1984

#### Sediment

Bodemmonsters in de Nederrijn en Waal zijn genomen in 1974/1976. In de Merwede's zijn bodemmonsters genomen in 1985 en in de Maas/Bergsche Maas in 1985. De stromingssituaties die in deze studie worden gebruikt zijn resultaten van metingen tijdens hoogwaterafvoeren in de periode 1980-1984. De resultaten van de analyse van de bodemmonsters ( $D_{50}$  en  $D_{90}$ ) in genoemde jaren worden gebruikt als karakteristieke korrelsamenstellingen. Een eventuele verandering van de korrelsamenstellingen in de verschillende riviertakken in de tijd wordt niet beschouwd. De karakteristieke korrelsamenstelling per riviertak is globaal:

riwiertak	variatie in $D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	variatie in $D_{90}$ ( $\mu\text{m}$ )	variatie in $\sigma_D$ (-)
Nederrijn	960-1750	3190-9200	3 - 5
Waal	480-850	1840-2800	3 - 4
Boven Merwede	390-900	590-6550	1,5 - 5
Beneden Merwede	470-550	-	-
Nieuwe Merwede	290-500	390-865	1,2 - 1,5
Maas/Bergsche Maas	180-550	240-1300	1,2 - 2,5

### Stromingsparameters

Het Froude-getal is voor alle gebruikte resultaten kleiner dan 0,2.

In Figuur 41 is de Chézy-coëfficiënt als functie van  $\theta'$  uitgezet. Als alle resultaten worden beschouwd is een lichte toename van de C-waarde met toenemende  $\theta'$  waarneembaar. Per riviertak is deze tendens niet aanwezig. De oorzaken hiervoor zijn dat het aantal resultaten beperkt is en dat per riviertak het bereik van  $\theta'$  beperkt is. De C-waarden voor de Waal vertonen echter een tegengestelde tendens, afnemende C-waarden (van  $45 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$  tot  $40 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$ ) bij toenemende  $\theta'$  (van 0,3 tot 0,6). In de figuur van Engelund,  $\theta$  als functie van  $\theta'$ , voldoen de resultaten voor  $\theta' < 0,4$  redelijk aan de relatie van Engelund. Voor grotere korrelschiufspanningen  $\theta' > 0,4$  liggen de resultaten boven de relatie van Engelund. Opgemerkt wordt dat de Merwede's en de Bergsche Maas zich in een gebied bevinden waar de invloed van het getij ook tijdens hoge rivierafvoeren merkbaar is. Het getij beïnvloedt de waterbeweging en de bodemruwheid. Daardoor zijn de resultaten van deze riviertakken niet direkt te vergelijken met de andere resultaten.

De T-parameter ligt voor de Nederrijn tussen  $T=5$  en  $T=10$ . Voor de Waal ligt de T-parameter tussen  $T=10$  en  $T=17,5$ . De T-parameter voor de Merwede's ligt tussen  $T=11$  en  $T=15$  en voor de Maas/Bergsche Maas tussen  $T=11$  en  $T=17$ .

### Beddingvormen

Alleen beddingvormafmetingen tijdens hoge rivierafvoeren op de Waal zijn gebruikt. Resultaten van beddingvormregistraties op de andere riviertakken zijn niet opgenomen in deze studie. De beddingvormafmetingen op de Waal tijdens de hoogwaters van 1982 en 1983 zijn overgenomen uit Van Urk (1983). De geregi-

streerde beddingvormen hebben een lijzijde met dusdanige steilheid dat loslating van de stroming op de beddingvormtop verwacht mag worden. De hoogte van de beddingvormafmetingen is orde 1 m en de lengte is orde 10 m. In Ogink (1984) wordt nader ingegaan op de beddingvormafmetingen tijdens hoge rivierafvoeren op de Waal.

#### Theorie van Fredsøe

In Figuur 42 worden de resultaten van de beddingvormregistraties op de Waal vergeleken met de relaties van Fredsøe. De relatie voor de relatieve beddingvormhoogte ( $H/h$ ) voorspelt  $H/h$  goed voor  $\theta'_{top} > 0,5$ . Opmerkelijk is de tendens in de meetresultaten van licht toenemende  $H/h$  bij toenemende  $\theta'_{top}$  (van 0,30 naar 0,7) terwijl de theorie afname voorspelt. De relatie voor de beddingvormsteilheid ( $H/L$ ) voorspelt te lage waarden vergeleken met de meetresultaten, ongeveer een faktor 1,5 à 2 te laag. Er is in de meetresultaten een duidelijke tendens van afnemende  $H/L$  bij toenemende  $\theta'_{top}$  aanwezig, voor  $\theta'_{top} > 0,5$ . Het aantal meetresultaten is echter zeer beperkt.

#### Relaties van Van Rijn

In Figuur 43 zijn de gemeten beddingvormafmetingen uitgezet in de relaties van Van Rijn. De relatieve beddingvormhoogte wordt door de relatie van Van Rijn onderschat met een faktor 1,5 à 2 voor  $T > 13$ . De meetresultaten vertonen een licht toenemende relatieve beddingvormhoogte bij toenemende  $T$ , terwijl de relatie van Van Rijn afname van de relatieve beddingvormhoogte voorspelt. De beddingvormsteilheid wordt door de relatie van Van Rijn onderschat met een faktor 8. Er is geen duidelijke afname van de beddingvormsteilheid (gedefinieerd volgens Van Rijn) te onderkennen in de meetresultaten bij toenemende  $T$ . Het aantal meetresultaten is echter zeer beperkt.

#### Ruwheidsvoorspellers

In Figuur 44 zijn de  $k$ -waarden berekend uit de Chézy-coëfficiënt en de gemeten beddingvormafmetingen uitgezet in de empirische relatie van Van Rijn voor de equivalente ruwheid. De relatie van Van Rijn voorspelt te hoge waarden voor  $k/H$ , ongeveer een faktor 2 te hoog. Het bereik van  $H/L$  is echter zeer beperkt.

In Figuur 45 worden de gemeten  $C$ -waarden vergeleken met de ruwheidsvoorspellers van Van Rijn en van Engelund. De berekende  $C$ -waarden zijn lager (orde

10%) dan de gemeten waarden. De voorspeller van Van Rijn voldoet iets beter dan de voorspeller van Engelund. De gemeten k-waarden vergeleken met de voorspelde k-waarden tonen aan dat de voorspeller van Van Rijn goed voldoet, hoewel de spreiding in de resultaten groot is. De voorspeller van Engelund geeft te grote waarden vergeleken met de gemeten k-waarde. Tot slot wordt nogmaals opgemerkt dat het aantal meetresultaten zeer beperkt is.

### 6.3.5 Resultaten prototypemetingen buitenlandse rivieren, alleen stromingsparameters

Uit het World Flume Data bestand zijn een aantal geschikte prototypemetingen geselecteerd. De beddingvormafmetingen zijn niet gemeten bij hogere afvoeren ( $T > 5$ ) zodat alleen de bodemruwheid bepaald uit de stromingsparameters voor deze studie beschouwd wordt. De prototypemetingen zijn onderverdeeld in drie gebieden waarbinnen de gemiddelde korreldiameter ligt.

#### Sediment

Per gebied voor de gemiddelde korreldiameter zijn de volgende rivieren gebruikt:

rivier	aantal metingen in gebied voor $D_{50}$		
	(150 $\mu$ m-400 $\mu$ m)	(400 $\mu$ m-600 $\mu$ m)	(600 $\mu$ m-850 $\mu$ m)
Atchafalaya	40	-	-
Mississippi	103	40	21
Red River	15	-	-
Rio Grande	37	-	-
U.S. Rivers	66	2	-
Colorado	103	-	-
Snake River	1	12	3

De gradatie  $\sigma_D$  van het bodemmateriaal is voor alle genoemde rivieren onbekend.



### Stromingsparameters

Het Froude-getal is voor alle gebruikte resultaten kleiner dan 0,5.

In Figuur 46-A tot en met 46-G in per genoemde rivier de Chézy-coëfficiënt uitgezet tegen de dimensieloze korrelschuifspanning  $\theta'$ . Vrijwel alle rivieren vertonen een toename van C met toenemende  $\theta'$ , behalve de U.S. Rivers en de Colorado die alleen resultaten hebben in een beperkt gebied van  $\theta'$  ( $<0,6$ ) waardoor geen tendens onderkend kan worden. De resultaten van rivieren met een  $D_{50} > 600\mu\text{m}$  bevinden zich ook in een beperkt gebied van  $\theta'$  ( $<0,6$ ). De Snake River is hier een uitzondering, deze rivier vertoont nagenoeg konstante C-waarden bij zeer hoge  $\theta'$ -waarden tot 1,3. De resultaten van vrijwel alle rivieren liggen in de figuur van Engelund ( $\theta$  als functie van  $\theta'$ ) als een wolk rond de empirische relaties. Uitzondering hierop vormen de Red River en de Snake River die resultaten geven die boven de empirische relaties liggen.

De T-parameter ligt voor een tiental prototypesresultaten tussen 25 en 35, voor de overige prototypesresultaten is  $T < 25$ .

#### 6.4 Resultaten van alle gootproeven en prototypemetingen

In deze paragraaf worden de resultaten van alle gootproeven gezamenlijk gepresenteerd evenals de resultaten van alle prototypemetingen. Alle resultaten zijn in de voorgaande paragrafen afzonderlijk behandeld en gebruikt, om de theorie van Fredsøe en de relaties van Van Rijn betreffende beddingvormafmetingen en de ruwheidsvoorspellers van Van Rijn en Engelund, te toetsen. Het presenteren van alle goot- of prototypesresultaten in de genoemde relaties zal geen nieuwe informatie opleveren en een onoverzichtelijk beeld geven. Verder blijkt de voorspelde Chézy-coëfficiënt gebaseerd op de beddingvormafmetingen een grote spreiding te vertonen, zowel per meetserie als voor de meetseries gezamenlijk.

### Chézy-coëfficiënt

Er is gekozen voor het vergelijken van de Chézy-coëfficiënt bepaald uit de stromingsparameters. De Chézy-coëfficiënt wordt dimensieloos gemaakt met de waterdiepte en een karakteristieke korrelafmeting en uitgezet tegen de T-parameter. Het dimensieloos maken van de C-waarde gebeurt met behulp van de vergelijking voor de ruwheid volgens Strickler:

$$C = a \cdot \left[ \frac{h}{k'} \right]^{1/6} \quad (6-1)$$

Bij hoge afvoeren zal de totale bodemruwheid de korrelruwheid naderen, zodat  $k' \approx 3 D_{90}$  volgens Van Rijn (1982, b). Substitueren van de korrelruwheid in (6-1) en omwerken geeft:

$$a' = C [D_{90}/h]^{1/6} \quad (6-2)$$

Voor de lagere afvoeren zal  $a'$  een willekeurige waarde aannemen, maar bij hoge afvoeren die vlakbed kunnen veroorzaken zal  $a'$  naar een konstante waarde gaan. In het geval met hoge afvoeren zou  $a'$  in principe voor alle goot- en prototypeomstandigheden dezelfde konstante zijn. De waarde van de coëfficiënt in (6-1) is  $a = 26,4$ , een empirische grootheid. Van Rijn (1982, b) geeft aan dat de spreiding rond  $k' = 3 D_{90}$  groot is en dat  $k'$  voor de meeste gevallen ligt tussen  $D_{90}$  en  $10 D_{90}$ . Dit geeft volgens (6-2) aan dat  $a'$  ligt tussen 18,0 en 26,4 met een gemiddelde waarde van 21,9 als vlakbed optreedt. In Figuur 47-A worden alle resultaten van de gootproeven gepresenteerd als  $a' = f(T)$ , voor alle resultaten van de prototypemetingen gebeurt dat in Figuur 47-B. Opgemerkt wordt dat voor de gootproeven in plaats van de waterdiepte ( $h$ ) de hydraulische straal van de bodem  $R_b$  is gebruikt.

Bij de resultaten van de gootproeven (Figuur 47-A) is het aantal waarden van  $a'$  voor  $T > 10$  beperkt, voor  $T > 15$  zijn er slechts twee waarden van  $a'$  beschikbaar. De enige situatie waarbij nagenoeg vlakbed optreedt is proef T1-G uitgevoerd in de zandgoot van het Waterloopkundig Laboratorium de Voorst. Voor dat geval is  $T = 25$  en  $a'$  ligt tussen de aangegeven grenzen, onder de gemiddelde waarde voor  $a' = 21,9$ . Er is in Figuur 47-A een ondergrens voor  $a'$  aangegeven waarboven alle resultaten liggen. Deze ondergrens vertoont een oplopende tendens met toenemende  $T$ . Gezien het geringe aantal resultaten waarop de ondergrens is gebaseerd voor  $T > 10$ , is het gebruik van deze ondergrens voor gootproeven niet aan te bevelen.

De resultaten van de prototypemetingen (Figuur 47-B) tonen een concentratie van waarden van  $a'$  in het gebied  $T < 15$ . Voor  $T > 15$  zijn er echter een redelijk aantal waarden van  $a'$  te vinden, zelfs een tiental voor  $25 < T < 35$ . De waarden van  $a'$  liggen voor  $T > 20$  vrijwel allemaal buiten het gebied  $18,0 < a' < 26,4$ . De meeste waarden zijn kleiner dan 18,0. Dit kan veroorzaakt worden door

de aanwezigheid van beddingvormen onder deze stromingsomstandigheden (zeker geen anti-duinen). Ook voor de prototypesresultaten wordt een ondergrens voor de waarde van  $a'$  aangegeven. De ondergrens vertoont een licht toenemende tendens met toenemende  $T$ . Gezien het redelijk grote aantal resultaten voor  $T > 15$  kan de ondergrens gebruikt worden als grens waarboven  $C$ -waarden liggen, als hoge  $T$ -waarden optreden in het prototype. Gesteld wordt dat in het algemeen de waarde van  $a'$  boven de ondergrens ligt. Opgemerkt wordt dat de Chézy-coëfficiënt bepaald is uit stromingsparameters en niet afgeleid is uit geregistreerde beddingvormen.

### Ruwheidslengte

Het verloop van de ruwheidslengte ( $k$ ) met de gemiddelde stroomsnelheid ( $u$ ) wordt gepresenteerd in Figuur 48-A en 48-B. Er wordt uitgegaan van de Chézy-vergelijking en de uitdrukking voor de Chézy-coëfficiënt volgens White-Colebrook:

$$u = C(hi)^{1/2} \tag{6-3}$$

$$C = 18 \log\left\{\frac{12h}{k}\right\} \tag{6-4}$$

Uit (6-3) en (6-4) is de relatie  $\log(k) = f(u)$  af te leiden:

$$\log(k) = \log(12h) - \frac{u}{18 (hi)^{1/2}} \tag{6-5}$$

Uit (6-5) volgt dat  $k$  ook van de waterdiepte  $h$  en het verhang  $i$  afhangt. Resultaten van gootproeven zullen in het algemeen lagere  $k$ -waarden geven dan prototypesresultaten. Dit is als volgt aan te tonen; stel dat de gemiddelde bodemschuifspanning in beide gevallen gelijk is ( $hi_{\text{goot}} = hi_{\text{proto}}$ ) dan hangt  $k$  alleen van  $u$  en  $h$  af. De waterdiepte in goten is in het algemeen een orde kleiner dan die in het prototype, zodat de eerste term van het rechterlid in (6-5) voor gootproeven kleiner is dan voor het prototype. De tweede term in het rechterlid van (6-5) kan voor beide gevallen in dezelfde orde van grootte liggen. Dit resulteert voor gootproeven in lagere  $k$ -waarden te opzichte van het prototype.

De resultaten van de gootproeven (Figuur 48-A) geven een lichte tendens te zien van afnemende  $k$ -waarde met toenemende stroomsnelheid. Opgemerkt wordt dat

de resultaten van de afzonderlijke proevenseries in het algemeen een wolk in een beperkt gebied vormen. De onderkende tendens is dus opgebouwd uit de resultaten van alle gootproeven en geldt in het algemeen niet voor de afzonderlijke proevenseries. De zandgootproeven uitgevoerd bij het Waterloopkundig Laboratorium de Voorst vormen hierop een uitzondering. In deze resultaten is wel een tendens van afnemende  $k$  met toenemende  $u$  waar te nemen.

De resultaten van de prototypemetingen (Figuur 48-B) vertonen een tendens van afnemende  $k$ -waarde met toenemende  $u$ . Per rivier liggen de punten in veel gevallen in een wolk in een bepaald gebied. De genoemde tendens is waar te nemen als alle resultaten beschouwd worden, per rivier is die tendens niet altijd aanwezig. Daardoor is extrapoleren van  $k$ , voor extreme afvoeren, in het algemeen niet aan te raden met behulp van Figuur 48-B. Als de resultaten in Figuur 48-B met die in Figuur 48-A worden vergeleken blijkt dat, zoals eerder opgemerkt, de  $k$ -waarden voor het prototype in het algemeen hoger liggen dan die voor gootomstandigheden, bij vergelijkbare gemiddelde stroomsnelheid ( $u$ ).

## 7. Conclusies en aanbevelingen

### 7.1 Conclusies gootproeven

#### Afvlakkingsproeven uitgevoerd in de zandgoot van het WL:

- a. Bij het uitvoeren van proeven in de zandgoot bij 9 permanente stromingssituaties met een bereik van de stromingsparameter (T) van 5 tot 25, blijkt dat de relatieve beddingvormhoogte (H/h) nagenoeg konstant is (voor  $5 < T < 15$ ). In termen van de dimensieloze korrelschuifspanning op de beddingvormtop ( $\theta'_{top}$ ) is H/h nagenoeg konstant voor  $0,35 < \theta'_{top} < 0,75$  (zie Figuur 16). De afname van de beddingvormhoogte voor hoge T-waarden is het gevolg van de invloed van het Froude-getal op de relatieve beddingvormhoogte, zie Fredsøe (1984). De beddingvormsteilheid (beddingvormhoogte gedeeld door beddingvormlengte, H/L) neemt bij toenemende T af ofwel L neemt toe (zie Figuur 10-E).
- b. De Chézy-coëfficiënt (C) neemt toe met toenemende korrelschuifspanning ( $\theta'$ ) zie Figuur 9. Het toenemen van C met  $\theta'$  is een gevolg van het langer worden van de beddingvormen. Opgemerkt wordt dat de volledig vlakbed situatie ook bij een T-parameter van 25 en een Froude-getal van 0,8 niet geheel wordt bereikt.
- c. De theorie van Fredsøe betreffende beddingvormafmetingen onder permanente stromingssituaties ( $5 < T < 25$ ) voorspelt te lage beddingvormhoogtes. Een faktor 4 te laag vergeleken met de resultaten van de gootproeven. Er treedt bij de proeven geen duidelijke afvlakking van beddingvormen op bij hoge afvoeren, terwijl de theorie afvlakking voorspelt. De curve voor de beddingvormsteilheid uit de gootproeven vertoont dezelfde tendens als de relatie van Fredsøe voor H/L; afnemende H/L bij toenemend debiet. De relatie voorspelt de steilheid echter met een faktor 3 te laag vergeleken met de resultaten van de gootproeven, voor  $T > 8$  (zie Figuur 16).
- d. De relaties van Van Rijn betreffende beddingvormafmetingen onderschatten de gemeten relatieve beddingvormhoogte uit de gootproeven met een faktor 2 voor  $T > 8$ . De beddingvormsteilheid wordt met een faktor 1,5 onderschat voor  $T > 8$ . Voor  $T=25$  blijken de beddingvormhoogte en -steilheid, die volgen uit de gootproeven, niet naar nul te naderen zoals de relaties voorspellen. Bij hoge waarden van T vlakken de beddingvormen niet af maar neemt de steilheid van de beddingvormen wel af (zie Figuur 18).

- e. De ruwheidsvoorspeller van Van Rijn voorspelt, uitgaande van de gemeten beddingvormafmetingen (zie Figuur 19), te hoge ruwheidslengtes ( $k$ ) voor alle stromingsomstandigheden in de goot. Opgemerkt wordt dat de relatie van Van Rijn is opgesteld binnen het geldigheidsbereik van White-Colebrook formule ( $10 < h/k < 250$ ). Voor de gootproeven gaat deze voorwaarde alleen op voor de proeven T1-F en T1-G waarbij  $T=15$  respectievelijk  $T=25$ .
- f. De ruwheidsvoorspeller van Engelund voorspelt te hoge  $k$ -waarden vergeleken met de meetresultaten. De voorspeller van Engelund geeft  $k$ -waarden die minder afwijken van de gemeten  $k$ -waarden dan de voorspeller van Van Rijn (zie Figuur 20).

Gootproeven uitgevoerd bij andere instituten:

- g. De conclusies met betrekking tot de  $C$ -waarde en de theorie van Fredsøe onder b en c gelden ook voor proeven uitgevoerd bij andere instituten. De resultaten van de proeven zijn onderverdeeld in drie gebieden waarin de gemiddelde korreldiameter ligt;  $200 \mu\text{m} < D_{50} < 400 \mu\text{m}$ ,  $400 \mu\text{m} < D_{50} < 600 \mu\text{m}$  en  $600 \mu\text{m} < D_{50} < 850 \mu\text{m}$ . Per gebied vertonen de resultaten een gelijksoortig verloop (zie Figuur 21 en 22). De afwijkingen van de meetresultaten met de relaties van Fredsøe voor beddinghoogte en -steilheid variëren voor deze proevenseries met een faktor 1 à 10.
- h. De conclusie met betrekking tot de relaties van Van Rijn onder d geldt ook voor deze proeven. De waarde van  $T$  varieert van 1 tot 16. De relaties van Van Rijn geven een afwijking met een faktor 2 à 3 met uitzondering van het gebied  $T < 3$  waar grotere discrepanties optreden, zie Figuur 23.
- i. De ruwheidslengte op basis van de voorspellers van Van Rijn en van Engelund wijken nogal af van de ruwheidslengten bepaald uit de gemeten stromingsparameters (zie Figuur 24,25-A en 25-B). Echter ook hier geldt dat de voorspeller van Van Rijn buiten het geldigheidsgebied gebruikt wordt, zie onder conclusie e.
- j. Er is geen eenduidige methode gebruikt bij het bepalen van de beddingvormafmetingen voor de diverse proeven uitgevoerd bij verschillende instituten.

7.2 Conclusies prototypemetingen

Zaïre Rivier:

- k. De conclusie betreffende de Chézy-coëfficiënt onder b geldt ook voor de resultaten van de Zaïre, zie Figuur 27.

- l. De grote beddingvormen in de Zaïre worden door de relaties van Fredsøe, goed voorspeld. Het aantal resultaten is echter beperkt evenals het bereik van  $T$  ( $10 < T < 15$ ), zie Figuur 30. Kleinere beddingvormen die aanwezig zijn op de grote beddingvormen worden door de relaties qua afmetingen niet juist voorspeld.
- m. De relaties van Van Rijn voorspellen de waargenomen grote beddingvormafmetingen goed, zie Figuur 31. De kleinere beddingvormen worden niet juist voorspeld. Opgemerkt wordt dat de relaties zijn opgesteld voor grote beddingvormen in het prototype, waarbij kleinere beddingvormen niet in beschouwing zijn genomen.
- n. De ruweheidsvoorspeller van Van Rijn voorspelt de  $C$ -waarde, uitgaande van de grote beddingvormen, met een spreiding van 20 % rond de ruweheid bepaald uit de stromingsgroottheden (berekend uit stroomsnelheid, diepte en verhang), zie Figuur 33. De methode van Engelund vertoont grotere afwijkingen. De  $C$ -waarden liggen in het algemeen tussen 50 en  $60 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$ .

#### Missouri Rivier:

- o. De conclusie betreffende de Chézy-coëfficiënt onder b geldt ook voor deze resultaten, zie Figuur 35.
- p. De theorie van Fredsøe onderschat de gemeten beddingvormhoogte, met een faktor 6. De gemeten beddingvormsteilheid wordt redelijk voorspeld (zie Figuur 37).
- q. Bij de relaties van Van Rijn wordt de gemeten beddingvormhoogte met een faktor 5 onderschat en wordt de gemeten beddingvormsteilheid redelijk voorspeld, zie Figuur 38.
- r. De ruweheidsvoorspellers van Van Rijn en van Engelund overschatten de gemeten  $C$ -waarde gemiddeld met een faktor 2 respectievelijk 1,5 (zie Figuur 40). Ook hier zijn alleen de grote beddingvormen beschouwd.

#### Nederlandse Rijntakken en de Maas:

- s. Als alle riviertakken gezamenlijk worden beschouwd is een lichte toename van de Chézy-coëfficiënt met toenemende  $\theta'$  waarneembaar. Per riviertak is deze tendens niet aanwezig, mede door het beperkte aantal meetresultaten, zie Figuur 41.
- t. De theorie van Fredsøe voorspelt de relatieve beddingvormhoogte goed voor  $\theta'_{\text{top}} > 0,5$ . De beddingvormsteilheid wordt een faktor 1,5 te laag voorspelt voor  $\theta'_{\text{top}} > 0,5$ , zie Figuur 42.

- u. De relatie van Van Rijn voorspelt de relatieve beddingvormhoogte met een faktor 1,5 à 2 te laag voor  $T > 13$ . De beddingvormsteilheid wordt met een faktor 8 onderschat, zie Figuur 43. De beddingvormsteilheid, gedefinieerd volgens Van Rijn, geeft voor de meetresultaten geen duidelijke afname van de steilheid bij toenemende T-parameter (van  $T=10$  naar  $T=18$ ).
- v. De ruwheidsvoorspellers van Van Rijn en van Engelund voorspellen de C-waarden beide ongeveer 10% te laag. De voorspeller van Van Rijn voldoet iets beter dan de voorspeller van Engelund, zie Figuur 45.

#### Enkele andere buitenlandse rivieren:

- w. De conclusie betreffende de Chézy-coëfficiënt onder b geldt voor alle beschouwde rivieren (Atchafalaya, Mississippi, Red River, Rio Grande, U.S. Rivers, Colorado en Snake River) zie Figuur 46-A tot en met 46-G.

### 7.3 Algemene conclusies

Uit de resultaten van de gootproeven en prototypemetingen kunnen de volgende algemene conclusies worden getrokken:

1. Voor de verschillende gevallen waar beddingvormen geregistreerd zijn blijkt dat de relatieve beddingvormhoogte bij toenemende afvoer globaal konstant blijft. De beddingvormlengte neemt toe bij toenemende afvoer, waardoor de beddingvormsteilheid afneemt bij toenemende afvoer.
2. Als voor alle prototypresultaten de gemeten Chézy-coëfficiënt, dimensieloos gemaakt met de waterdiepte en een karakteristieke korreldiameter, wordt uitgezet tegen de T-parameter blijkt een ondergrens voor de Chézy-coëfficiënt aanwezig te zijn. Deze ondergrens, die enigszins toeneemt met toenemende T, kan gebruikt worden voor het aangeven van de laagst te verwachten Chézy-coëfficiënt bij extreme afvoeren (zie Figuur 47-B). Gebaseerd op resultaten van alle prototypemetingen vertoont de k-waarde een afnemende tendens bij toenemende stroomsnelheid (zie Figuur 48-B); per rivier is die tendens overigens niet duidelijk te onderkennen (zie ook paragraaf 6.4) mogelijk als gevolg van het ontbreken van permanente stromingsomstandigheden.
3. Onder prototype omstandigheden hebben de grote beddingvormen (lengte enkele tientallen meters, hoogte orde meters) meestal een zeer flauwe lijzijde zodat loslaten van de stroming daar niet optreedt. Juist dit loslaten van de stroming op de beddingvormtop veroorzaakt voor een belangrijk deel de vormweerstand van de bodem. De kleine beddingvormen (lengte enkele meters,



hoogte orde decimeters) op de grote beddingvormen hebben vaak wel een steile lijzijde (steiler dan 1:3) waardoor deze kleine beddingvormen de vormweerstand van de bodem in belangrijke mate bepalen (zie Ogink, 1984). De afmetingen van de kleine beddingvormen zijn in de meeste prototyperesultaten niet opgenomen.

#### 7.4 Aanbevelingen

Uit een groot aantal gootproefresultaten en prototypemetingen blijkt dat de beddingvormsteilheid een afnemende tendens vertoont bij toenemende afvoer. De relatieve beddingvormhoogte blijft bij toenemende afvoer ongeveer gelijk. Verder vertoont de Chézy-coëfficiënt bij toenemende afvoer een toenemende tendens (behalve de resultaten van de Waal). De beddingvormtheorie van Fredsøe wordt door de gootproefresultaten en prototypemetingen niet bevestigd. Dit geldt eveneens voor de beddingvormhoogte relatie van Van Rijn.

1. Daarom wordt een procedure voor prototype omstandigheden voorgesteld om vanuit k-waarden, gebaseerd op gemeten beddingvormafmetingen tijdens hoge rivierafvoeren, een ruwheidslengte te voorspellen bij extreem hoge rivierafvoeren. Uitgegaan wordt van de empirische relatie van Van Rijn voor de beddingvormruwheidslengte:

$$k'' = 1,1 H (1 - \exp[-25H/L]) \quad (7-1)$$

De beddingvormafmetingen ( $H_0$  en  $L_0$ ) en beddingvormruwheidslengte ( $k''_0$ ) gemeten bij een zo hoog mogelijke rivierafvoer dienen als uitgangspunt voor extrapolatie van de beddingvormruwheidslengte ( $k''_e$ ) naar extreem hoge rivierafvoeren. Er wordt gesteld dat de relatie van Van Rijn voor de beddingvormsteilheid gebruikt kan worden voor het extrapoleren van  $H/L$ . En verder wordt gesteld dat de relatieve beddingvormhoogten bij bekende hoge rivierafvoer en verwachte extreme rivierafvoer niet veel verschillen, in het gebied  $5 < T < 20$ . De procedure is voor  $5 < T < 20$  als volgt:

- Bepaal de beddingvormafmeting ( $H_0$  en  $L_0$ ), de waterdiepte ( $h_0$ ) en de T-parameter ( $T_0$ ) bij de hoogst bekende rivierafvoer.
- Bepaal de beddingvormruwheidslengte ( $k''_0$ ) bij de hoogst bekende rivierafvoer uit de gemeten stromingsgrootheden ( $h, i$  en  $u$ ).
- Schat de grootte van de waterdiepte ( $h_e$ ) en de T-parameter ( $T_e$ ) bij de verwachte extreem hoge rivierafvoer.

- Bepaal op grond van de relatie van Van Rijn voor de beddingvormsteilheid en de geschatte T-parameter ( $T_e$ ), de ontwikkeling van de beddingvormsteilheid van gemeten naar de extreme rivierafvoer  $(H/L)_e$  als volgt:

$$(H/L)_e = (H/L)_o (h_o/h_e)^{0.3} \left[ \frac{1-\exp[-0.5(H/L)_e]}{1-\exp[-0.5(H/L)_o]} \right] \left[ \frac{25-T_e}{25-T_o} \right] \quad (7-2)$$

- Bepaal op grond van de veronderstelling dat de relatieve beddingvormhoogte konstant blijft, de beddingvormhoogte bij extreme rivierafvoer volgens:

$$H_e = H_o \cdot h_e/h_o \quad (7-3)$$

- Bereken de beddingvormruweidslengte ( $k''_e$ ) bij extreme rivierafvoer uit:

$$\frac{k''_e}{k''_o} = \frac{H_e (1-\exp[-25 (H/L)_e])}{H_o (1-\exp[-25 (H/L)_o])} \quad (7-4)$$

Met de berekende waarde van de korrelruweidslengte bij extreme afvoer ( $k'_e$ ) kan de totale ruweidslengte ( $k_e$ ) berekend worden, volgens vergelijking (3-3). In beginsel moeten voor toepassing van vergelijking (7-4) enkele iteratie stappen worden uitgevoerd, immers de schattingen voor  $h_e$  en  $T_e$  zijn nodig om bovenstaande vergelijkingen op te lossen. Bij het berekenen van de Chézy-coëfficiënt voor extreme rivierafvoer (gebaseerd op  $k_e$ ) kan de ondergrens voor de C-waarde als functie van de T-parameter, zoals aangegeven in Figuur 47-B, gebruikt worden ter controle.

2. Er zal nader onderzoek moeten plaatsvinden naar de ontwikkeling van samengestelde beddingvormen (kleine beddingvormen op grote beddingvormen) onder verschillende stromingsomstandigheden, teneinde voorspellers te ontwikkelen voor de dimensies van samengestelde beddingvormen.
3. De theorie van Fredsøe zal nader bestudeerd moeten worden voor wat betreft de uitgangspunten van de theorie. Mogelijk kan de theorie met enige aanpassing resultaten geven die beter bij de meetresultaten aansluiten.
4. De nauwkeurigheid van bodempeilingen zal nader beschouwd moeten worden. Een juist beeld van de rivierbodem is van groot belang voor het interpreteren van de beddingvormen in relatie tot de bodemruweid.

5. De ontwikkeling van beddingvormen in detail onder gekonditioneerde stromingsomstandigheden, zal begrepen moeten worden en een goede fysische beschrijving van het proces zal moeten worden opgesteld. Met de kennis van dat proces zal het begrip van het beddingvormgedrag onder prototype omstandigheden verder ontwikkeld kunnen worden.

## LITERATUUR

Bakker, B (1978)

Rivieren, Experimentele bepaling voortplantingssnelheid van duinen in de zandgoot (beschrijving programma DUKO)

Waterloopkundig Laboratorium, informatie R657-XV

Bakker, B (1982)

Rivieren, Bepaling afmetingen beddingvormen in de zandgoot; met beschrijving van enige resultaten van het programma DULOC

Waterloopkundig Laboratorium, informatie R657-XLV

Bakker, B (1984)

Rivers, Straight sand flume: description, accuracy, data collection and pre-processing of data

Delft Hydraulics Laboratory, R657-XV, M1314 part VI

Bosman, J.J. (1982)

Concentration measurements under oscillary water motion

Delft Hydraulics Laboratory, M1695, Part II

Brownlie, W.R. (1981)

Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels

Pasadena, California Institute of Technology report no. KH-R-43A

Brownlie, W.R. (1981)

Compilation of alluvial channel data: laboratory and field

Pasadena, California Institute of Technology report no. KH-R-43B

Engelund, F. (1977)

Hydraulic resistance for flow over dunes

Progress Report 44, Institute of Hydrodynamic and Hydraulic Engineering

Technical University of Denmark, Copenhagen

Engelund, F., Hansen, E. (1967)

A monograph on sediment transport in alluvial streams

Technical University of Denmark, Copenhagen

LITERATUUR (vervolg)

Fredsøe, J. (1984)

Sediment transport in current and waves  
Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering,  
Technical University of Denmark, Lyngby

Fredsøe, J. (1985)

Numerical examples of calculations of sediment transport and flow resistance  
in alluvial rivers. Prepared for Course on River Engineering Argentina  
July/August 1985  
Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering,  
Technical University of Denmark, Lyngby

Havinga, H. (1982)

Bed load determination by dune-tracking  
Den Haag, RWS, Dir. W. en W., District ZO, nota 82-3

Jansen, P.Ph. (1979)

Principles of river engineering, the non-tidal alluvial river  
Pitman, London

Matéba 21 (1983)

Navigabilité du bief maritime du fleuve Zaïre  
Granulometrie des sediments du lit de la region divagante  
WLB 83-5, LRH 83-4  
Laboratoire de recherches hydrauliques, Borgerhout-Châtelet

Matéba 22 (1984)

Navigabilité du bief maritime du fleuve Zaïre  
Observations limnimetriques Kinshasa, Matadi, Boma inventaire 1903-1983  
WLB 84-6, LRH 84-1  
Laboratoire de recherches hydrauliques, Borgerhout-Châtelet

Ogink, H.J.M. (1984)

Hydraulische ruwheid van de Bovenrijn en de Waal  
Waterloopkundig Laboratorium, R2017

LITERATUUR(vervolg)

Ogink, H.J.M. (1986)

Hydraulische ruwheden van de Merweden en de Maas  
Waterloopkundig Laboratorium, R2393

Peters, J.J. & Sterling, A. (1968-1977)

Rapports d'activité Matéba 1 à Matéba 14 dans le cadre de l'étude de  
l'amélioration de la navigabilité du bief maritime du fleuve Zaïre  
Laboratoire de recherche hydraulique, Borgerhout, Anvers

Peters, J.J. (1978)

Discharge and sand transport in the braided zone of the Zaïre estuary  
Netherlands Journal of Sea Research 12(3/4) p. 273-292

Rijn, L.C. Van (1981)

Entrainment of fine sediment particles  
Computation of bed-load concentration and bed-load transport  
Delft Hydraulics Laboratorium, S487-part I

Rijn, L.C. Van (1982,a)

Entrainment of fine sediment particles  
Computation of bed-load and suspended-load transport  
Delft Hydraulics Laboratorium, S487-part II

Rijn, L.C. Van (1982,b)

The prediction of bedforms, alluvial roughness and sediment transport  
Delft Hydraulics Laboratory, S487-part III

Shen, H.W., Mellema, W.J., Harrison, A.S. (1978)

Temperature and Missouri river stages near Omaha  
Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 104, HY1

Urk, A. van (1983)

Hydraulische weerstand zomerbed Bovenrijn, Waal en Bovenmerwede  
Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging  
Distrikt Zuidoost, Arnhem, Nota 83.18

LITERATUUR (vervolg)

U.S. Army Engineer District (1969)

Missouri River channel regime studies

U.S. Army Engineer Division, Missouri River, Corps of Engineers, Omaha,  
report no. 13B

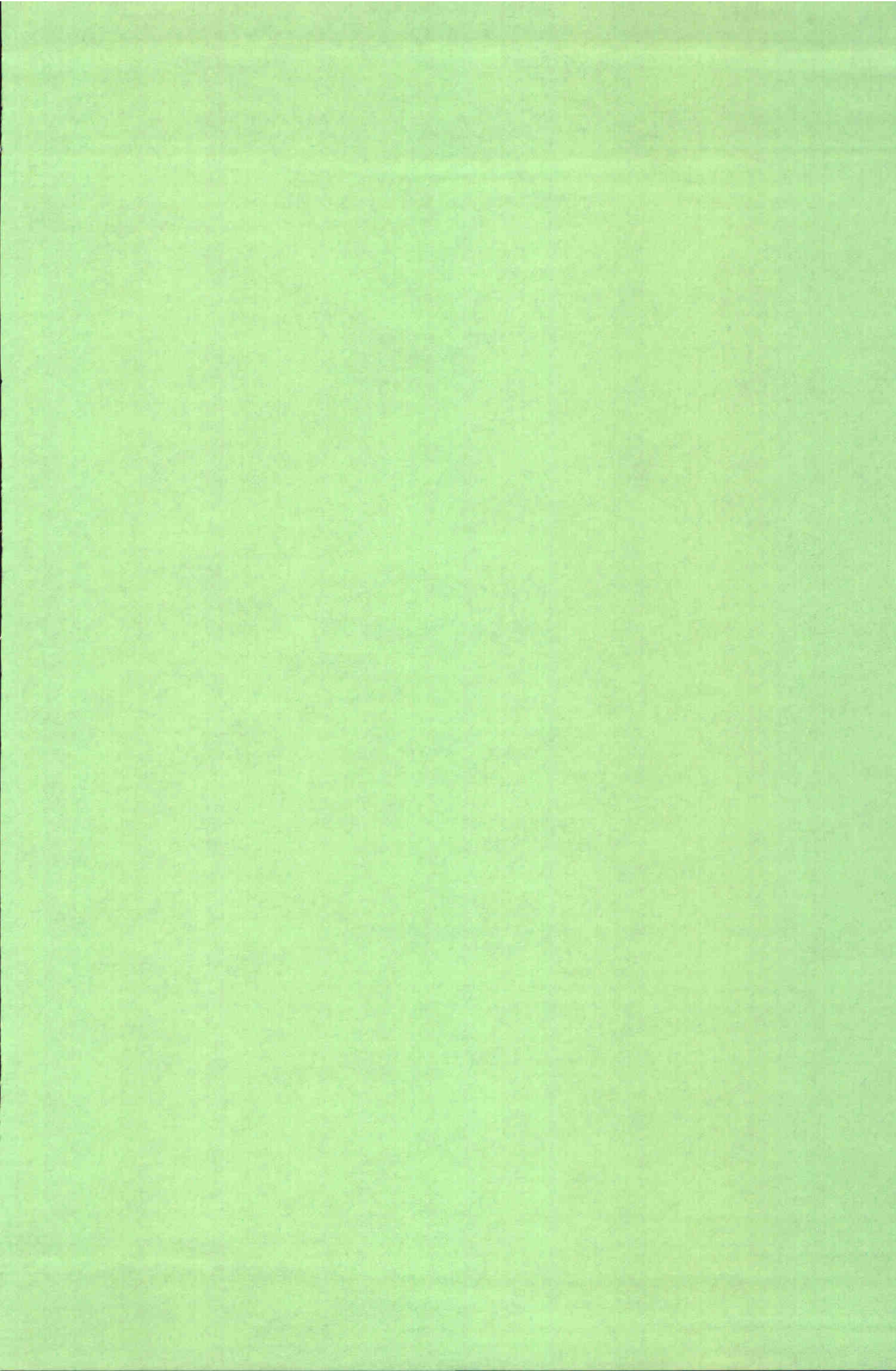
Yalin, M.S. (1977)

Mechanics of sediment transport

Pergamon Press, Oxford

Zeekant, J.

Enkele hydraulische en morfologische parameters van de Nederlandse Rijntakken  
Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging  
Distrikt Zuidoost, Arnhem, Nota 83.12





volgorde	situatie	Q (m <sup>3</sup> /s)
2	T1-A	0,101
3	T1-B	0,173
4	T1-C	0,235
5	T1-D	0,295
6/8	T1-E (1 en 2)	0,353 *
7	T1-F	0,392
1	T1-G	0,411
9	T1-H	0,441

Tabel 1: Stromingssituaties gootproeven (\* tweemaal ingesteld)

Materiaal 1	Materiaal 2
$D_{10} = 215 \mu\text{m}$	$D_{10} = 215 \mu\text{m}$
$D_{50} = 390 \mu\text{m}$	$D_{50} = 410 \mu\text{m}$
$D_{90} = 850 \mu\text{m}$	$D_{90} = 1010 \mu\text{m}$
$\sigma_D = 1,7$	$\sigma_D = 1,8$

Tabel 2: Sedimentkarakteristieken voor de gootproeven

kolonummer:	(1)*	(2)*	(3)*	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)*	(19)*	(20)	(21)	(22)*	(23)*	(24)	(25)
proef nummer	Q m <sup>3</sup> /s	l x10 <sup>-3</sup>	h m	R <sub>b</sub> m	u m/s	F <sub>r</sub> -	C m <sup>3</sup> /s	k m	D <sub>50</sub> bodem mat. 10 <sup>-6</sup> m	D <sub>90</sub> bodem mat. 10 <sup>-6</sup> m	D <sub>50</sub> bodem tr. 10 <sup>-6</sup> m	D <sub>50</sub> susp. tr. 10 <sup>-6</sup> m	D <sub>50</sub> zandvang 10 <sup>-6</sup> m	temp °C	v x10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s	M <sub>s</sub> susp. 10 <sup>-3</sup> m/s	θ <sub>or</sub> bodem mat.	H m	L m	H/h	H/L	H <sub>dom</sub> m	L <sub>dom</sub> m	H <sub>dom</sub> /h	H/L <sub>dom</sub>
T1-A	0,101	2,791	0,168	0,158	0,601	0,48	28,6	0,049	415	765	450	345	435	15,4	1,127	48,5	0,033	0,081	1,557	0,48	0,052	0,084	1,937	0,50	0,043
T1-B	0,173	2,853	0,229	0,209	0,757	0,53	31,0	0,048	435	800	455	360	460	15,4	1,127	50,9	0,032	0,093	2,080	0,41	0,045	0,101	2,651	0,44	0,038
T1-C	0,235	2,698	0,280	0,249	0,837	0,54	32,3	0,048	455	835	460	370	480	16,8	1,087	53,3	0,032	0,103	2,669	0,37	0,039	0,107	3,767	0,38	0,028
T1-D	0,295	2,829	0,335	0,297	0,881	0,52	30,4	0,073	470	865	465	385	500	17,7	1,061	56,4	0,031	0,129	2,707	0,39	0,048	0,136	3,179	0,41	0,043
T1-E	0,353	3,050	0,377	0,334	0,935	0,52	29,3	0,094	520	925	475	430	575	18,0	1,053	64,2	0,031	0,147	2,642	0,39	0,056	0,154	3,035	0,41	0,051
T1-E2	0,353	2,971	0,352	0,306	1,001	0,58	33,2	0,053	495	875	505	370	465	17,9	1,056	54,0	0,031	0,140	3,823	0,40	0,037	0,147	4,776	0,42	0,031
T1-F	0,392	2,888	0,344	0,287	1,140	0,68	39,6	0,022	485	860	500	365	450	18,1	1,051	53,3	0,031	0,130	4,740	0,38	0,027	0,134	6,128	0,39	0,022
T1-G	0,411	2,737	0,306	0,239	1,343	0,88	52,5	0,004	405	725	440	330	425	15,6	1,121	46,2	0,032	0,062	4,757	0,20	0,013	0,070	8,878	0,23	0,008
T1-H	0,441	3,118	0,388	0,328	1,139	0,64	35,6	0,041	510	900	510	375	475	17,9	1,056	54,8	0,031	0,151	3,424	0,39	0,044	0,158	3,960	0,41	0,040

proef nummer	(26)* c <sub>b</sub> m/h	(27)	(28)	(29)	(30)	(31)	(32)*	(33)	(34)*	(35)*	(36)*	(37)	(38)	(39)	(40)	(41)	(42)	(43)	(44)	(45)	(46)	(47)	(48)	(49)	(50)
Q m <sup>3</sup> /s		θ	θ'	θ' <sub>top</sub>	θ' <sub>g</sub>	T	s <sub>t</sub> x10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s	s <sub>t, top</sub> x10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s	s <sub>b, top</sub> x10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s	s <sub>s, top</sub> x10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s	s <sub>s, top</sub> x10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s	u <sub>g</sub> m/s	φ <sub>t, top</sub>	φ <sub>b, top</sub>	φ <sub>s, top</sub>	s <sub>t, top</sub> s <sub>t</sub>	s <sub>b, top</sub> s <sub>t</sub>	s <sub>s, top</sub> s <sub>t</sub>	k v. R1, Jn m <sup>3</sup> /s	C v. R1, Jn m <sup>3</sup> /s	k Eng. m	C Eng. m <sup>3</sup> /s	h Eng. m	k <sub>dom</sub> v. R1, Jn m	k <sub>dom</sub> Eng. m
T1-A	0,101	3,434	0,64	0,20	0,35	0,19	4,8	2,342	4,800	4,636	0,781	-	0,76	-	1,36	-	-	-	0,067	26,1	0,067	27,1	0,178	0,063	0,047
T1-B	0,173	6,546	0,83	0,27	0,43	0,27	7,5	6,039	10,46	10,15	2,071	0,309	0,86	2,86	2,78	0,11	1,73	0,97	0,072	27,8	0,074	28,8	0,246	0,071	0,056
T1-C	0,235	6,890	0,89	0,31	0,47	0,30	8,5	8,732	14,99	11,83	1,898	3,164	0,90	3,84	3,03	1,11	1,72	0,79	0,073	29,0	0,070	30,7	0,296	0,062	0,041
T1-D	0,295	6,986	1,08	0,32	0,49	0,31	8,9	10,72	18,30	15,02	1,941	3,278	0,87	4,46	3,66	1,08	1,71	0,82	0,102	27,8	0,112	28,5	0,358	0,101	0,094
T1-E1	0,353	8,226	1,19	0,33	0,51	0,32	9,3	11,20	20,04	20,15	1,834	-	0,82	4,20	4,22	-	1,79	1,01	0,125	27,1	0,160	26,8	0,412	0,125	0,138
T1-E2	0,353	11,01	1,11	0,39	0,61	0,38	11,2	16,38	31,94	-	25,68	6,260	1,04	7,21	5,80	2,19	1,95	0,80	0,096	28,5	0,082	31,3	0,374	0,090	0,059
T1-F	0,392	13,33	1,04	0,47	0,72	0,51	15,3	27,80	42,17	28,87	7,668	13,30	1,14	9,81	6,72	4,74	1,52	0,68	0,073	30,1	0,055	34,8	0,392	0,065	0,037
T1-G	0,411	22,99	0,98	0,72	0,89	0,86	24,9	32,38	44,41	23,75	9,291	20,66	1,49	13,5	7,24	8,56	1,37	0,53	0,021	38,4	0,012	45,9	0,350	0,016	0,007
T1-H	0,441	12,42	1,22	0,46	0,71	0,48	14,4	28,53	42,07	31,26	-	10,81	1,12	9,08	6,75	3,70	1,47	0,74	0,114	27,7	0,129	29,5	0,467	0,113	0,110

Tabel 3: Overzicht resultaten van de gootproeven (\* gemeten grootheden)  
 ( 1 = volgens B-23, 2 = volgens B-22, 3 = volgens B-25, 4 = volgens B-24)

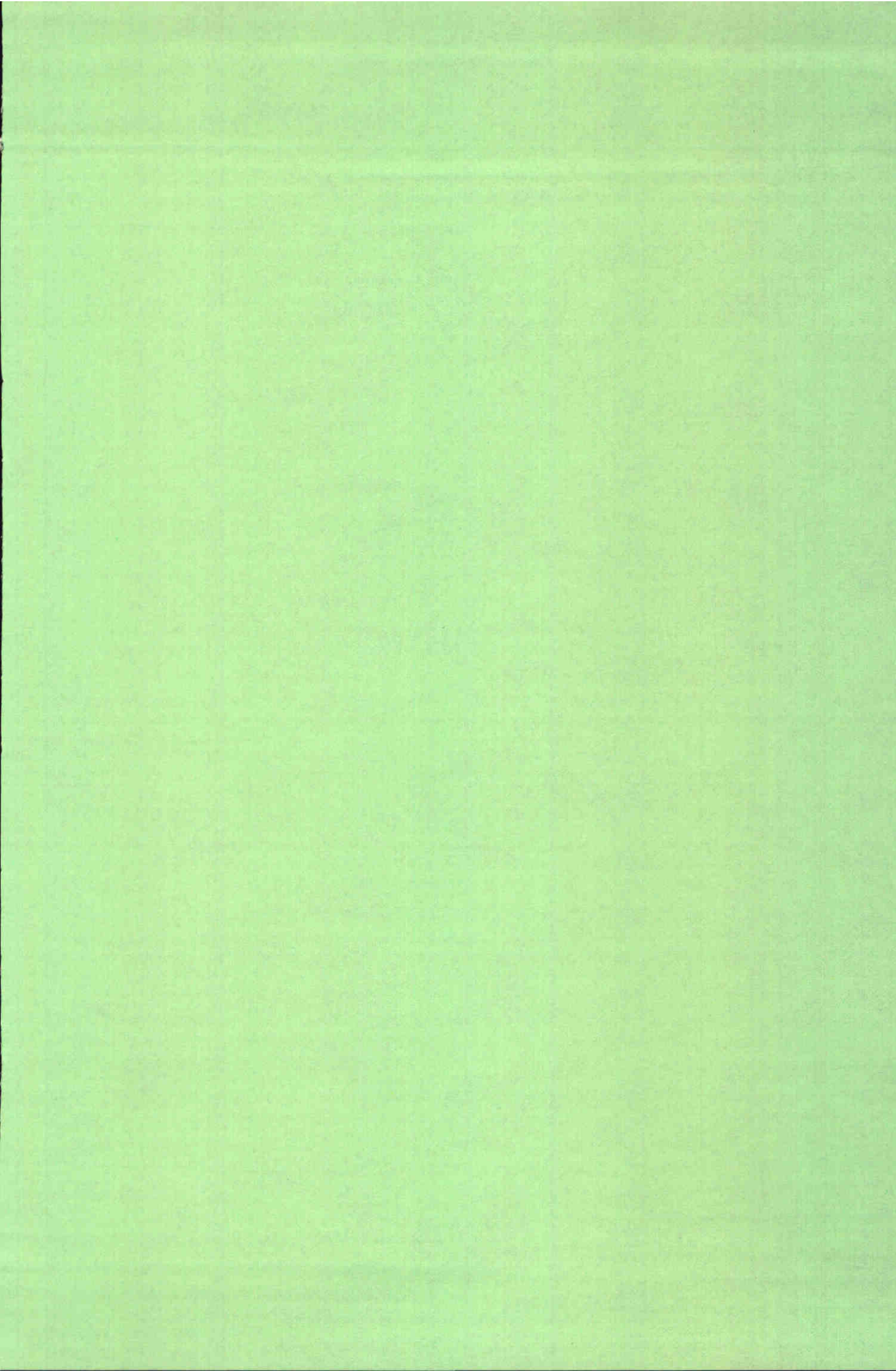


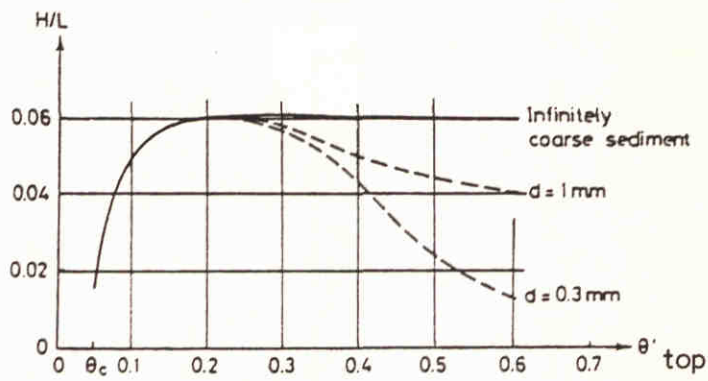
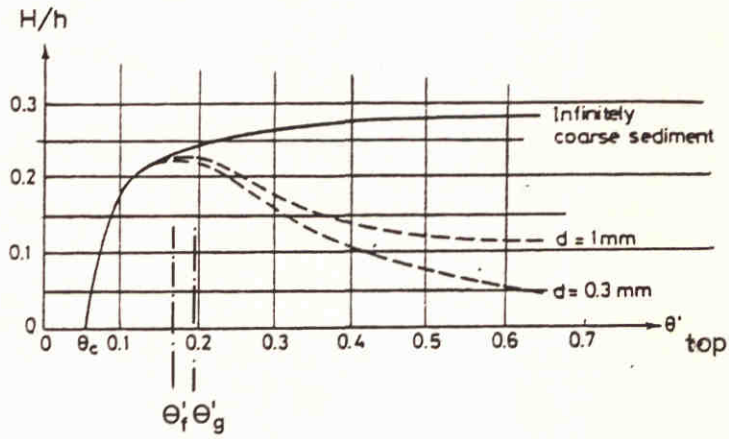
datum	Q m <sup>3</sup> /s	i x10 <sup>-4</sup>	h m	u m/s	v m/s	Fr	C	k	C'	D <sub>50</sub> x10 <sup>-6</sup> m	D <sub>90</sub> x10 <sup>-6</sup> m	temp. °C	v x10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s	W <sub>s</sub> x10 <sup>-3</sup> m/s	θ <sub>cr</sub>	H	L	H/h	H/L	θ	θ'	θ <sub>top</sub>	θ <sub>R</sub>	I	u <sub>0</sub> m/s	k	C	C	k	C	h Eng. m
08-09-66	2980	1,55	3,08	1,37	0,25	62,9	0,012	83,4	199	286	22	0,957	25,0	0,049	1,01	64	0,33	0,016	1,45	0,80	1,15	0,82	15,8	2,04	0,363	36,1	0,200	45,7	5,79		
13-09-66	3050	1,61	3,15	1,37	0,25	61,1	0,015	82,4	208	333	23	0,976	26,5	0,048	0,88	62	0,28	0,014	1,48	0,78	1,05	0,81	15,8	1,90	0,290	38,1	0,140	47,6	5,15		
19-09-66	2930	1,44	3,00	1,40	0,26	67,1	0,007	82,9	193	299	18	1,078	22,0	0,052	1,01	107	0,34	0,009	1,36	0,85	1,22	0,80	16,2	2,34	0,234	39,4	0,080	51,8	5,07		
26-09-66	2970	1,46	3,04	1,40	0,26	66,2	0,008	83,1	207	294	18	1,078	24,5	0,050	1,04	102	0,34	0,010	1,30	0,80	1,16	0,83	15,6	2,07	0,258	38,7	0,098	50,6	5,25		
03-10-66	2950	1,52	2,92	1,44	0,27	66,1	0,006	82,9	209	288	14	1,161	23,6	0,051	0,79	128	0,27	0,006	1,29	0,84	1,12	0,87	16,1	2,22	0,125	44,1	0,027	58,4	4,00		
10-10-66	3060	1,47	2,83	1,52	0,29	76,6	0,002	82,5	209	295	16	1,124	24,1	0,051	0,85	113	0,30	0,008	1,21	0,91	1,26	0,88	18,3	2,32	0,161	41,8	0,037	57,3	4,78		
17-10-66	3270	1,54	2,85	1,53	0,31	76,5	0,002	82,3	223	304	9	1,329	23,7	0,052	0,82	137	0,29	0,007	1,19	0,98	1,34	0,97	19,5	2,48	0,126	43,8	0,023	61,0	4,64		
24-10-66	3070	1,48	2,78	1,56	0,30	76,9	0,002	82,4	222	295	10	1,310	23,8	0,052	0,76	120	0,27	0,006	1,12	0,91	1,22	0,98	17,8	2,38	0,123	43,8	0,023	60,6	4,64		
07-11-66	3080	1,47	2,81	1,56	0,30	76,8	0,002	82,5	209	292	7	1,440	20,3	0,056	0,73	174	0,26	0,004	1,20	0,95	1,23	1,04	17,5	2,84	0,081	47,2	0,011	65,2	3,89		
25-09-67	3190	1,45	2,81	1,40	0,25	66,0	0,008	83,1	204	298	22	1,003	25,2	0,049	1,16	176	0,38	0,015	1,33	0,81	1,23	0,84	16,2	2,07	0,406	35,3	0,220	45,8	6,44		
24-10-67	3030	1,57	2,70	1,53	0,30	74,6	0,003	83,0	199	285	17	1,078	23,0	0,051	1,43	113	0,49	0,013	1,36	0,93	1,80	1,10	20,6	2,49	0,427	34,4	0,200	47,5	7,24		
22-11-67	3080	1,60	2,77	1,67	0,32	79,7	0,001	82,1	224	306	5	1,524	21,7	0,055	0,58	96	0,39	0,012	1,36	1,02	1,43	1,02	18,6	2,44	0,334	36,6	0,142	49,0	6,21		
10-09-68	2920	1,25	3,09	1,38	0,25	79,7	0,005	83,4	200	289	19	1,041	23,8	0,050	0,88	70	0,32	0,014	1,17	0,78	1,11	1,43	15,4	2,77	0,142	42,6	0,029	59,5	4,92		
07-10-68	3110	1,52	2,94	1,63	0,30	76,8	0,002	83,0	222	289	13	1,180	25,6	0,050	0,85	96	0,29	0,009	1,22	0,98	1,34	1,05	20,1	2,28	0,316	37,2	0,133	59,5	6,22		
02-12-68	2940	1,52	2,94	1,55	0,29	73,1	0,003	82,9	208	293	2	1,654	18,3	0,064	0,91	735	0,31	0,001	1,30	0,93	1,33	1,02	14,9	3,15	0,031	58,9	0,003	73,3	2,93		
23-09-69	5000	1,44	4,28	1,66	0,26	66,9	0,010	84,4	227	349	19	1,024	29,3	0,046	1,04	68	0,24	0,015	1,65	0,98	1,28	1,03	21,4	2,07	0,365	38,7	0,143	50,4	7,53		
04-11-69	4530	1,41	3,86	1,73	0,28	73,8	0,004	84,9	209	296	11	1,289	21,9	0,054	0,84	94	0,25	0,010	1,38	1,13	1,46	1,20	21,3	2,81	0,230	41,5	0,054	56,9	6,56		
01-12-69	4030	1,47	3,59	1,68	0,28	73,3	0,002	84,4	220	294	7	1,421	22,2	0,054	0,82	101	0,23	0,008	1,45	1,04	1,32	1,09	19,2	2,76	0,167	43,4	0,034	59,2	5,48		
09-10-75	3160	1,42	3,07	1,61	0,29	77,1	0,002	83,0	218	299	3	1,431	19,9	0,060	0,70	341	0,23	0,002	1,21	0,97	1,23	1,04	16,4	2,92	0,039	53,5	0,004	73,0	3,43		
29-10-75	5930	1,49	4,94	1,67	0,24	61,9	0,022	84,5	266	401	16	1,115	35,3	0,043	2,07	101	0,42	0,021	1,65	0,87	1,40	0,89	19,7	1,75	0,914	32,6	0,710	41,0	11,27		
18-11-75	6030	1,48	4,82	1,73	0,25	64,4	0,015	84,4	260	395	10	1,310	30,4	0,047	1,71	112	0,35	0,015	1,67	0,95	1,40	0,98	19,8	2,10	0,598	35,7	0,318	46,0	9,50		
			4,76	1,76	0,26	66,6	0,011	84,3	260	395	8	1,412	26,9	0,049	1,31	96	0,28	0,014	1,64	0,97	1,31	1,02	19,7	2,21	0,418	38,4	0,166	50,1	8,35		

Tabel 5: Overzicht resultaten prototypemetingen, Missouri.

rivier	datum	km	B	$l \times 10^{-4}$	h	u	Fr	C	k	C'	D <sub>50</sub> $\times 10^{-6}$	D <sub>90</sub> $\times 10^{-6}$	temp.	v $\times 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s	w <sub>B</sub> $\times 10^{-3}$ m/s	$\theta_{cr}$	H	L	H/h	H/L	$\theta$	$\theta'$	$\theta'_{top}$	$\theta'_R$	T	k v.R.I.jn m	C v.R.I.jn m <sup>2</sup> /s	k Eng. m	C Eng. m <sup>2</sup> /s	
Nederrijn	13-04-83	881	60	1,528	8,69	1,79	0,19	49,0	0,20	64,4	1750	9200	5	1,519	27,2	0,036	-	-	-	-	0,46	0,205	-	-	6,4	-	-	-	-	
	14-04-83			1,602	9,61	1,77	0,18	45,2	0,36	65,2											0,53	0,202			6,1					
	15-04-83			1,552	9,11	1,89	0,20	50,2	0,18	64,8											0,49	0,224			7,2					
	18-04-83			1,306	8,80	1,61	0,17	47,8	0,23	64,3											0,40	0,167			5,0					
	08-02-84	881	60	1,750	9,97	1,63	0,18	42,8	0,40	63,7	1750	9200	5	1,519	27,2	0,036	-	-	-	-	0,48	0,174			5,1					
	10-02-84			1,479	9,21	1,70	0,18	46,1	0,30	64,8											0,47	0,187			5,6					
	11-02-84			1,403	8,63	1,86	0,20	53,5	0,11	64,4											0,42	0,215			7,0					
	13-02-84	894	65	1,380	8,68	1,62	0,18	46,8	0,26	64,4											0,41	0,170			5,0					
	10-02-84			1,287	9,22	1,50	0,16	43,5	0,42	73,1	960	3190	5	1,519	13,7	0,030	-	-	-	-	0,75	0,244			7,9					
	11-02-84			1,186	9,77	1,43	0,15	42,1	0,54	73,6											0,73	0,222			6,9					
	12-02-84			1,074	9,44	1,42	0,15	44,5	0,38	73,3											0,64	0,216			6,9					
	14-02-84			1,086	9,01	1,22	0,13	39,0	0,74	73,0											0,62	0,168			4,9					
	10-02-84	909	80	1,719	7,86	1,61	0,18	43,8	0,35	69,8	1010	4150	5	1,519	14,5	0,030	-	-	-	-	0,81	0,276			9,6					
	11-02-84			1,719	7,83	1,59	0,18	43,4	0,36	69,8											0,81	0,270			9,4					
	12-02-84			1,633	8,28	1,50	0,17	40,9	0,53	70,2											0,81	0,243			8,1					
14-02-84			1,440	7,43	1,48	0,17	45,2	0,28	69,4											0,64	0,233			8,1						
15-02-84			1,332	6,78	1,45	0,18	48,4	0,17	68,7											0,54	0,222			7,9						
Maas	HW-1980	940	5740	1,429	9,25	1,662	0,16	45,7	0,32	74,2	850	2800	5	1,519	11,9	0,0304	-	-	-	-	0,943	0,325			10,8					
	950			1,702	8,75	1,737	0,17	45,0	0,33	75,7	660	2170									1,368	0,446			14,6					
	957			1,923	8,00	1,612	0,17	41,1	0,50	76,3	480	1840									1,942	0,522			15,6					
	HW-1982	940	5250	1,381	9,00	1,622	0,16	46,0	0,30	74,0	850	2800	5	1,519	11,9	0,0304	-	-	-	-	0,886	0,310			10,3					
	950			1,596	8,25	1,637	0,17	45,1	0,31	75,3	660	2170									1,209	0,400			13,0					
	957			1,827	8,00	1,598	0,18	41,8	0,46	76,3	480	1840									1,846	0,512			15,3					
	HW-1983	940	6250	1,357	9,30	1,641	0,16	45,7	0,33	74,4	850	2800	5	1,519	11,9	0,0304	-	-	-	-	0,919	0,315			10,4					
	950			1,649	9,00	1,734	0,17	45,0	0,34	76,0	660	2170									1,363	0,440			14,4					
	957			2,019	8,50	1,711	0,17	41,3	0,52	76,8	480	1840									2,167	0,582			17,5					
	06-1983	952			1,297	9,23	1,78	0,19	51,4	0,15	75,7	670	2300	5	1,519	9,1	0,0310	-	-	-	-	1,083	0,438			15,1				
	06-1983	957			1,727	8,72	1,60	0,17	41,2	0,54	81,6	500	1020									1,825	0,490			13,2				
	06-1983	963			1,614	7,31	1,45	0,17	42,2	0,40	78,3	550	1300	5	1,519	7,3	0,0316	-	-	-	-	1,300	0,380			10,9				
	06-1983	967			1,936	6,79	1,53	0,19	42,2	0,37	75,2	525	1805									1,518	0,445			14,1				
	06-1983	970			0,902	7,14	1,52	0,18	59,9	0,04	81,6	475	835									0,822	0,423			12,0				
	06-1983	974			0,621	7,33	1,28	0,15	60,0	0,04	81,6	475	855									0,581	0,299			8,2				
Nieuwe	1983	961		1,841	6,91	1,48	0,18	41,5	0,41	83,0	645	2200	5	1,519	5,3	0,0368	-	-	-	-	1,836	0,503			11,4					
Merwede	1983	964		1,329	5,96	1,59	0,21	56,5	0,05	84,4	490	1400									1,412	0,643			14,0					
1983	970			1,307	5,53	1,56	0,21	53,3	0,07	84,4	310	450									1,629	0,672			13,5					
1983	978			1,354	4,79	1,51	0,22	59,3	0,03	83,3	300	450									1,310	0,657			11,3					
Maas/	02-1984	210		1,056	7,11	1,53	0,17	52,2	0,11	83,8	303	489	5	1,519	3,5	0,0453	-	-	-	-	1,502	0,572			11,3					
Bergsche	02-1984	234		1,002	6,11	1,53	0,17	53,7	0,10	84,7	340	640									1,449	0,577			12,8					
Maas	02-1984	238		1,473	8,88	1,79	0,19	49,5	0,19	83,9	425	779									1,865	0,661			16,8					
02-1984	245			1,067	6,93	1,52	0,16	49,2	0,20	83,5	407	823									1,419	0,495			15,2					

Tabel 6: Overzicht resultaten prototypemetingen, Ned. Rijntakken en Maas.





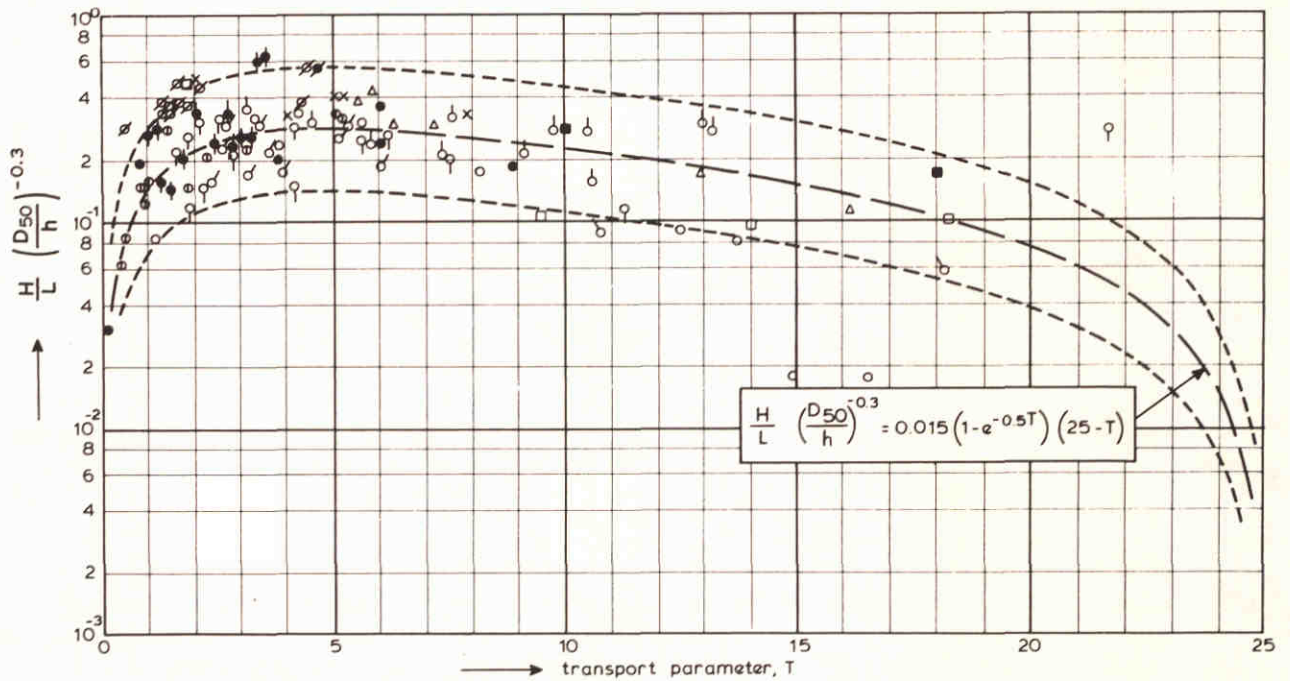
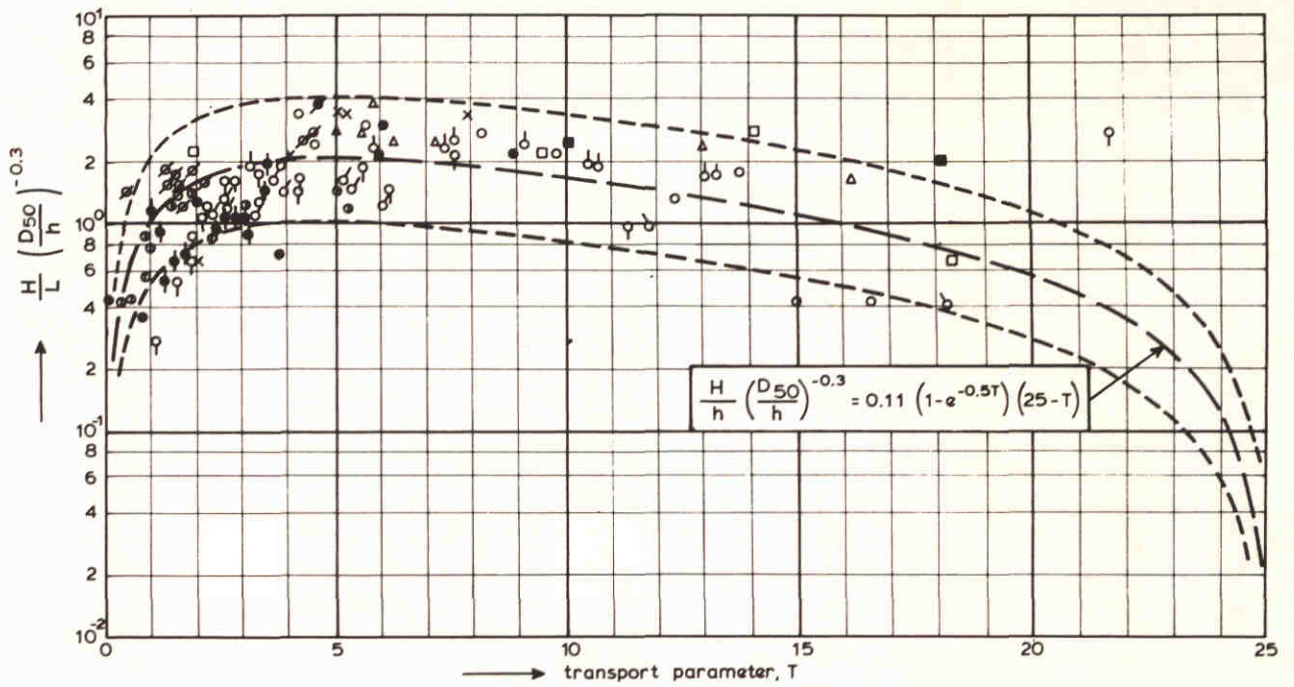
bron: Frødsøe (1984)

BEDDINGVORMHOOGTE EN - STEILHEID  
VOLGENS FREDSE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 1

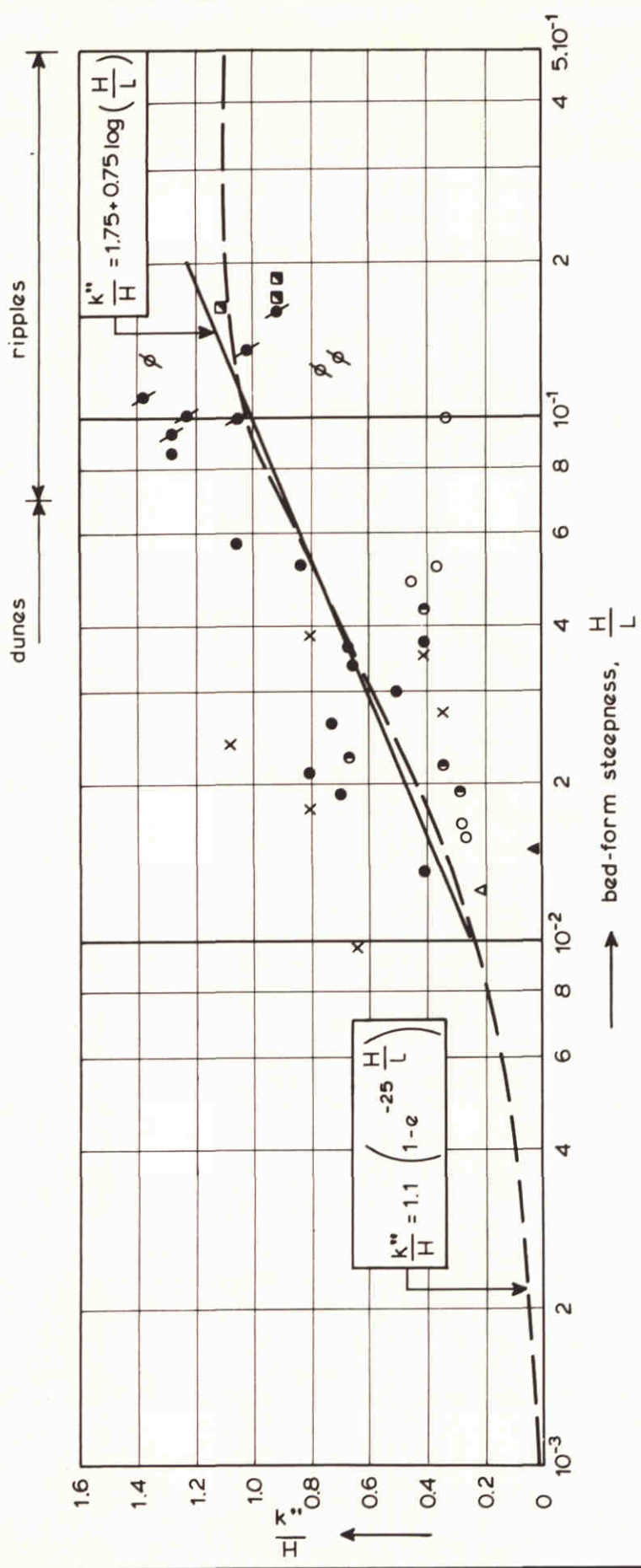


	source	flow velocity $\bar{u}$ (m/s)	flow depth h (m)	particle size $d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
flume data	o Guy et al	0.34-1.17	0.16-0.22	190	8-34
	x Guy et al	0.41-0.65	0.14-0.34	270	8-34
	$\Delta$ Guy et al	0.47-1.15	0.16-0.32	280	8-34
	b Guy et al	0.77-0.98	0.16	330	8-34
	$\square$ Guy et al	0.48-1.00	0.10-0.25	450	8-34
	$\phi$ Guy et al	0.53-1.15	0.12-0.34	930	8-34
	e Williams	0.54-1.06	0.15-0.22	1350	25-28
	$\rho$ Delft Hydr. Lab.	0.45-0.87	0.26-0.49	790	12-18
	o Stein	0.52-0.95	0.24-0.31	400	20-26
	d Znamenskaya	0.53-0.80	0.11-0.21	800	-

	source	$\bar{u}$ (m/s)	h (m)	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )
field data	• Dutch Rivers	0.85-1.55	4.4-9.5	490-3600	5-20
	$\rho$ Rio Parana	1.0	12.7	400	-
	$\phi$ Japanese Channels	0.53-0.89	0.25-0.88	1100-2300	-
	■ Mississippi River	1.35-1.45	6-16	350-550	-

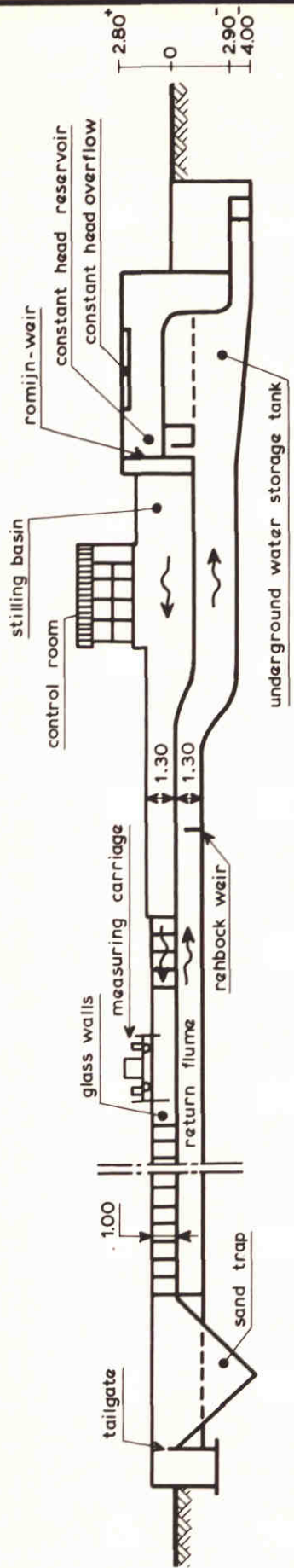
BEDDINGVORM HOOGTE EN - STEILHEID  
VOLGENS VAN RIJN (1982, b)



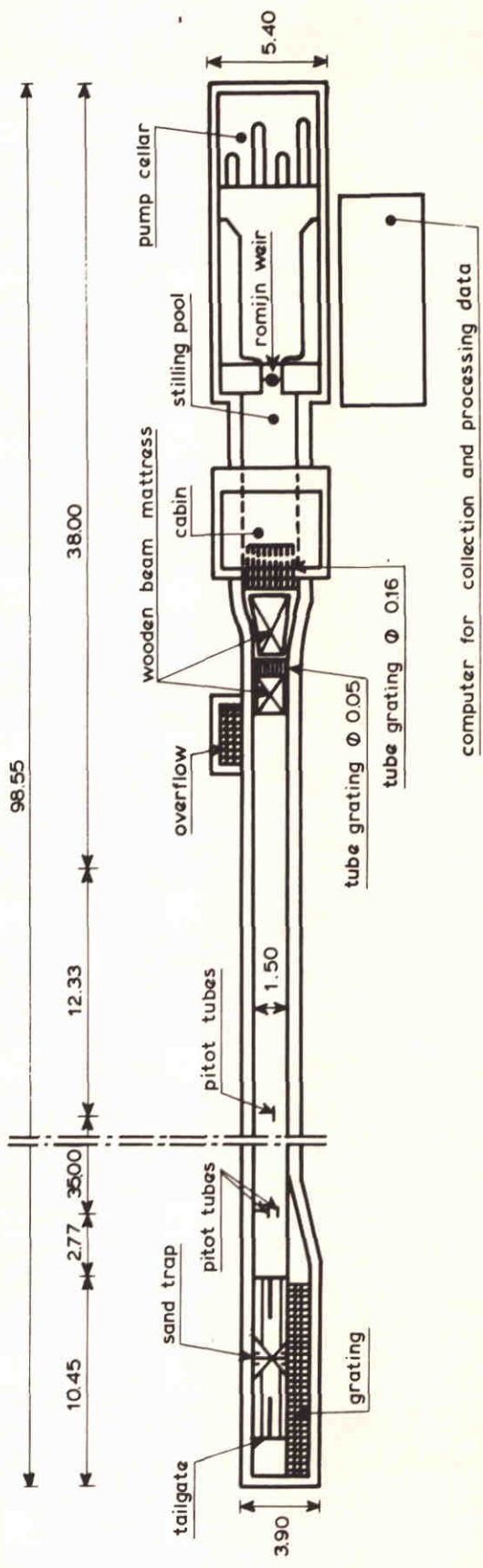


source	h (m)	$\bar{u}$ (m/s)	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )
● Guy et al	0.16 - 0.32	0.24 - 0.59	190 - 930
▲ Znamenskaya	0.08	0.49	800
⊙ Ackers	0.17 - 0.20	0.35 - 0.43	180
⊙ Stein	0.24 - 0.30	0.88 - 1.12	400
◻ Laursen	0.17 - 0.23	0.42 - 0.71	100
⊙ Barton-Lin	0.14 - 0.26	0.41 - 0.58	180
x Japanese Channels	0.11 - 0.43	0.55 - 0.73	1260 - 1440
o River Lužnic	0.14 - 0.75	0.35 - 0.74	2400
▲ Missouri River	4.5	1.5	240

EQUIVALENTE RUWHEID VAN BEDDINGVORMEN  
VOLGENS VAN RIJN (1982,b)



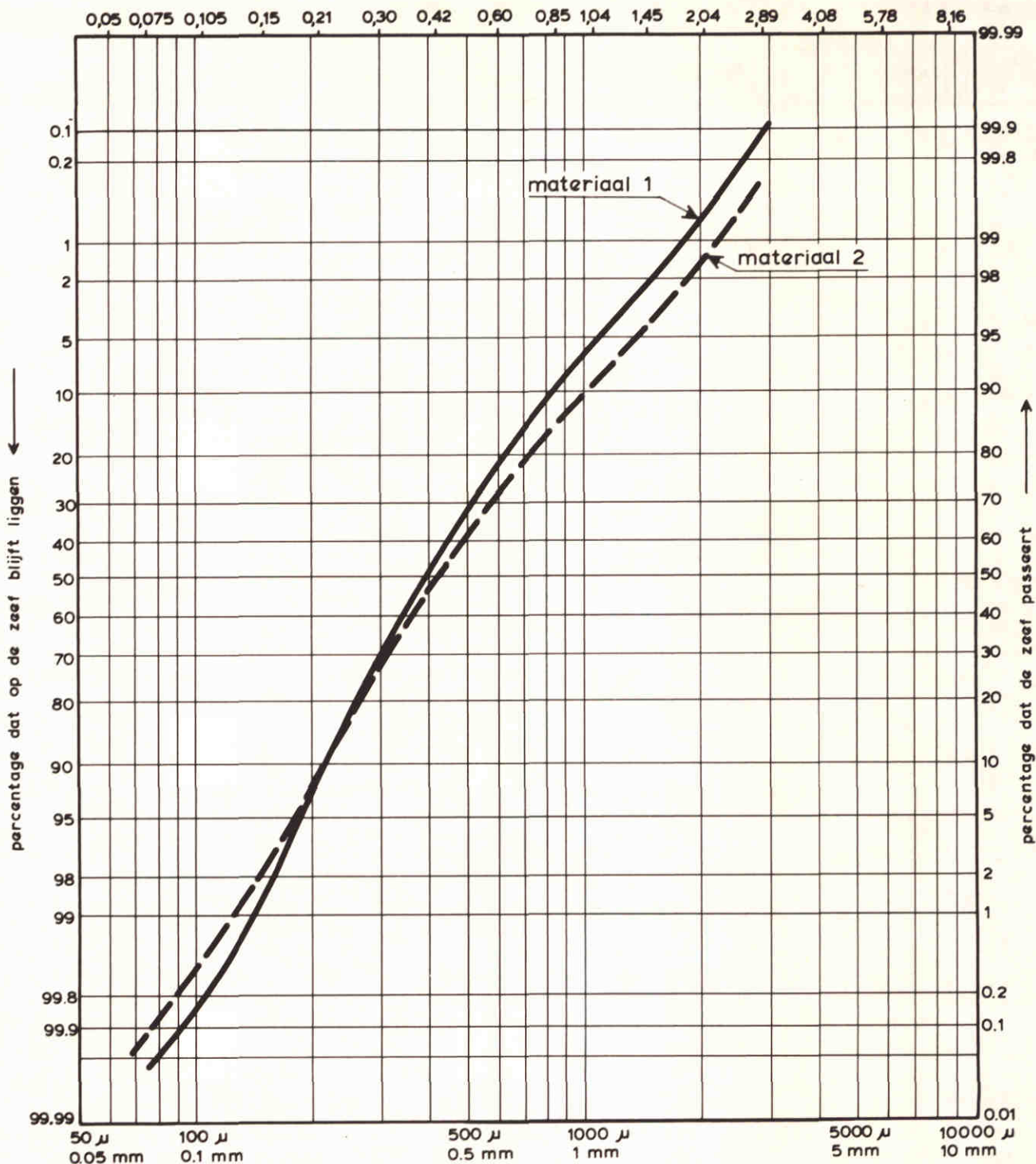
LONGITUDINAL SECTION



TOP VIEW

measurements in m

OVERZICHT VAN DE ZANDGOOT



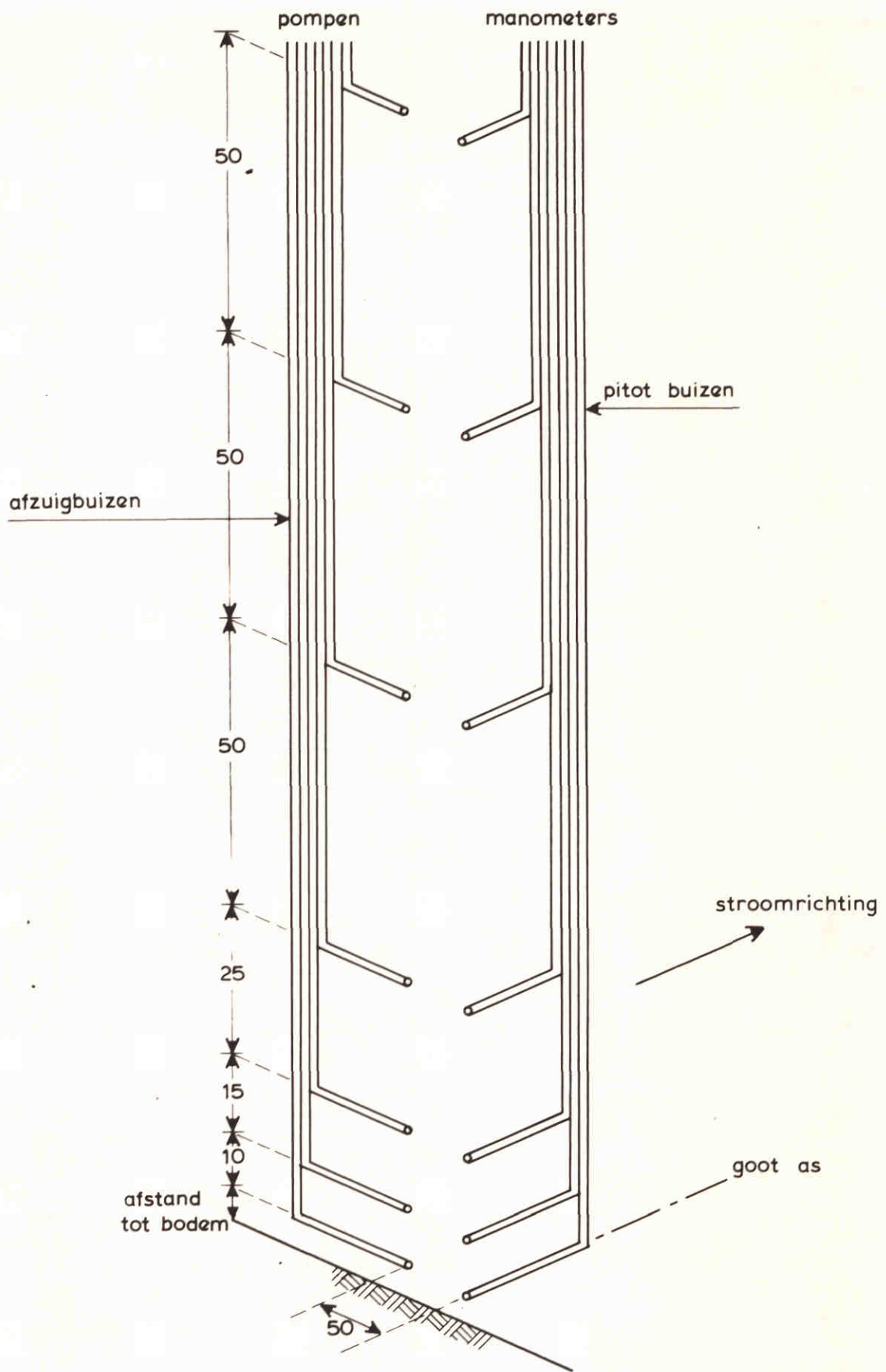
1<sup>e</sup> materiaal

$D_{90} = 850 \mu\text{m}$   
 $D_{50} = 390 \mu\text{m}$   
 $D_{10} = 215 \mu\text{m}$   
 $\sigma_D = 1.7$

2<sup>e</sup> materiaal

$D_{90} = 1010 \mu\text{m}$   
 $D_{50} = 410 \mu\text{m}$   
 $D_{10} = 215 \mu\text{m}$   
 $\sigma_D = 1.8$

ZEEFKROMME 'S ZANDGOOTMATERIAAL 1 EN 2



SUSPENSIE TRANSPORT MEETSISTEEM

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 6

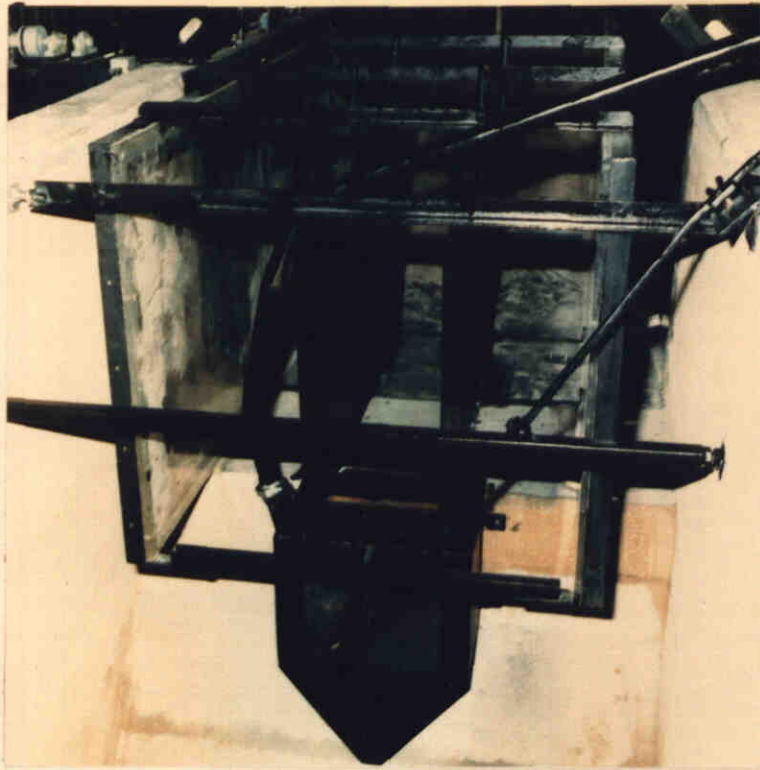


Foto 1 Bodemtransport opvangbak

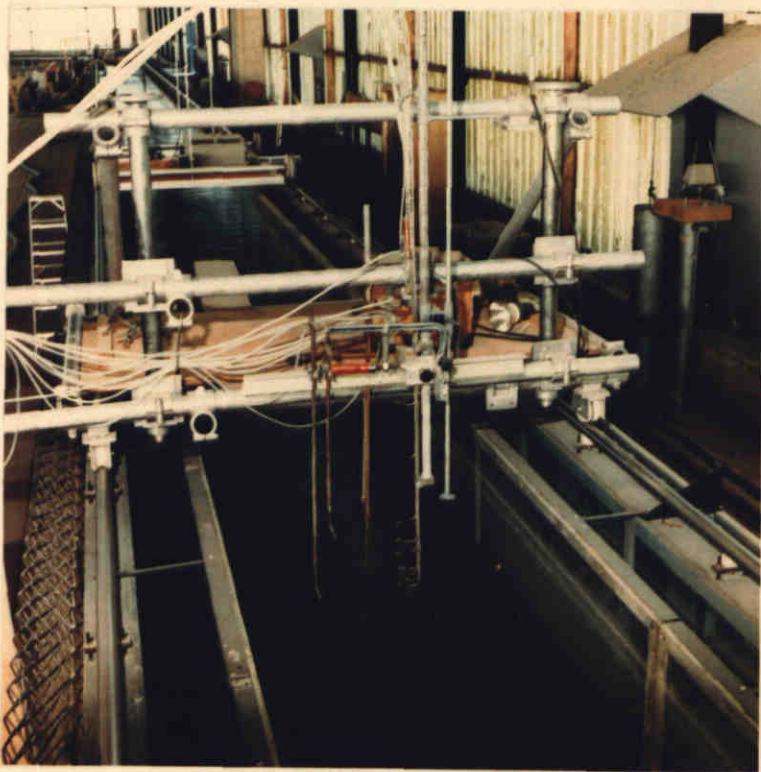


Foto 2 Suspensietransport meetsysteem  
pitotbuizen links, afzuigbuizen rechts

FOTO'S BODEMTRANSPORT OPVANGBAK  
EN SUSPENSIE TRANSPORT MEETSISTEEM

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 7 - A



Foto 3 Volumemeter

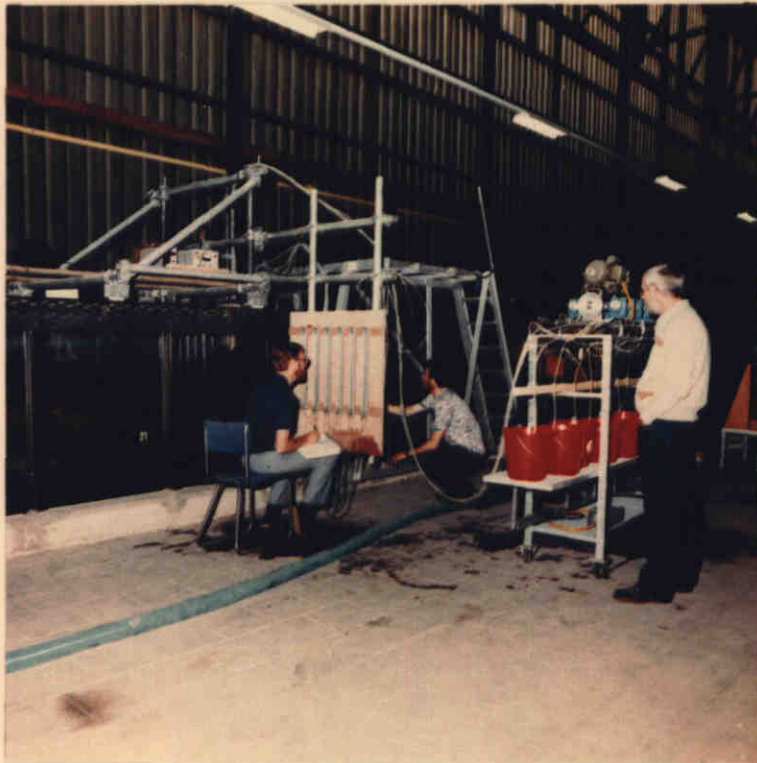


Foto 4 Meten van suspensietransport, meetwagen, manometerbord, afzuigpompen

FOTO'S VOLUMEMETER EN OVERZICHT MEETSISTEEM

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 7 - B

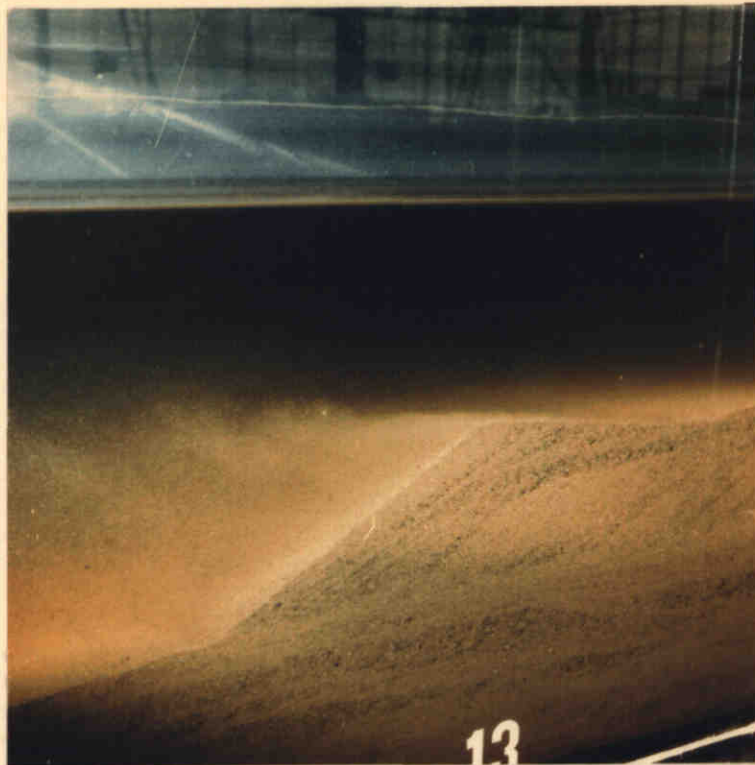


Foto 5 Sedimenttransport op een beddingvormtop,  $Q = 0,353 \text{ m}^3/\text{s}$



Foto 6 Sedimenttransport op een beddingvormtop,  $Q = 0,235 \text{ m}^3/\text{s}$

FOTO'S TRANSPORT OP BEDDINGVORMEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG 7 - C

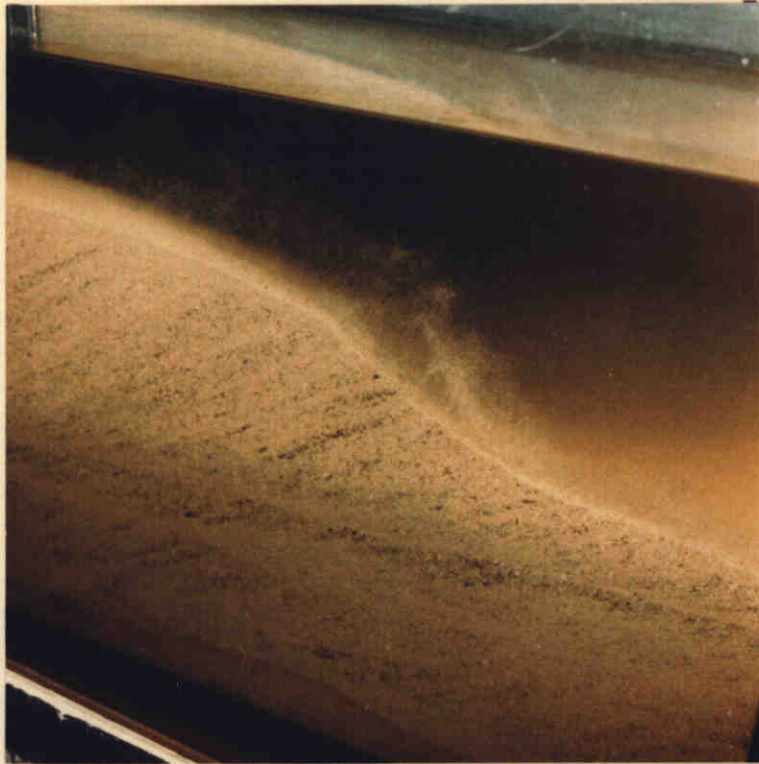


Foto 7 Sedimenttransport bij reattachment point



Foto 8 Sedimenttransport op een beddingvorm

FOTO'S TRANSPORT OP BEDDINGVORMEN

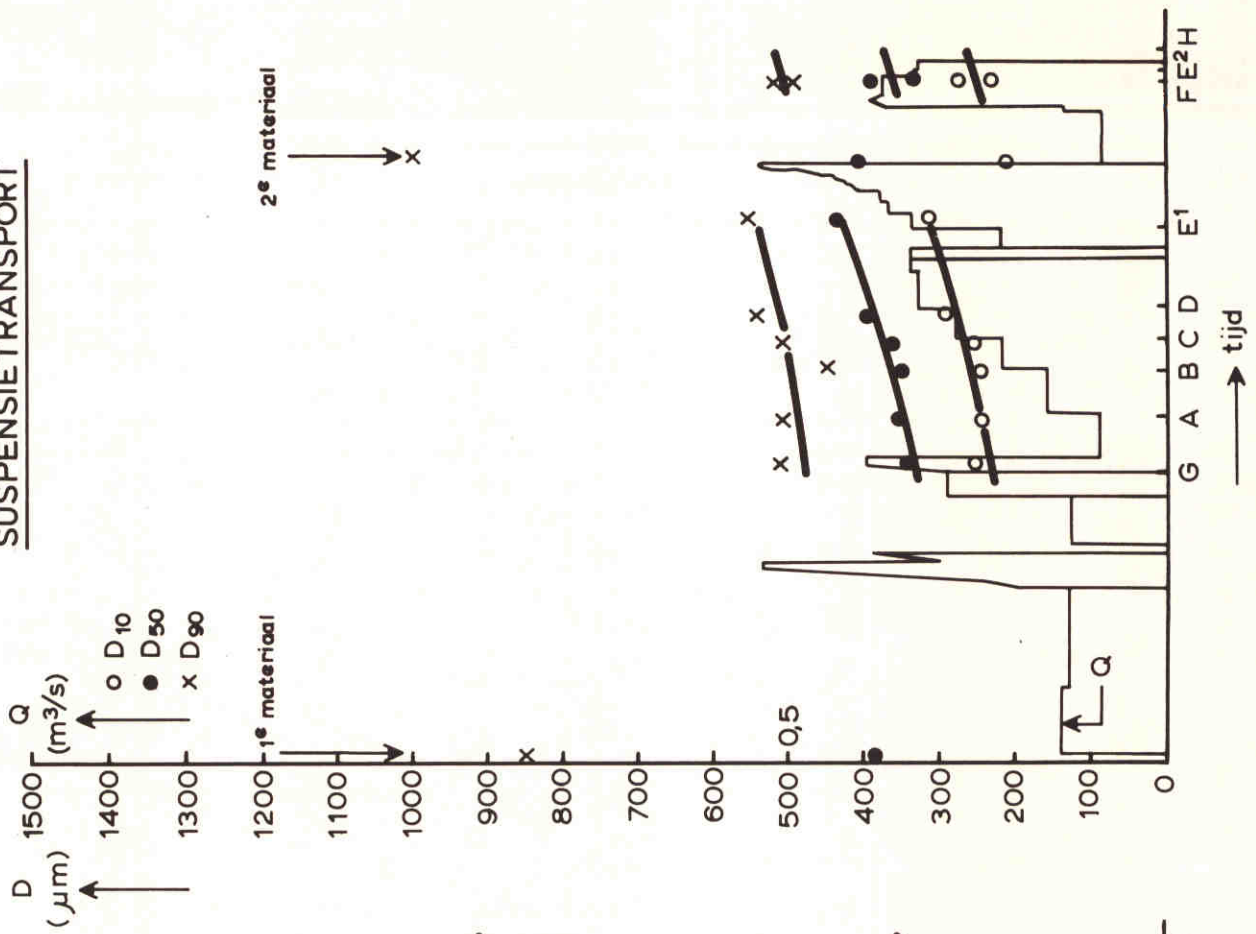
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

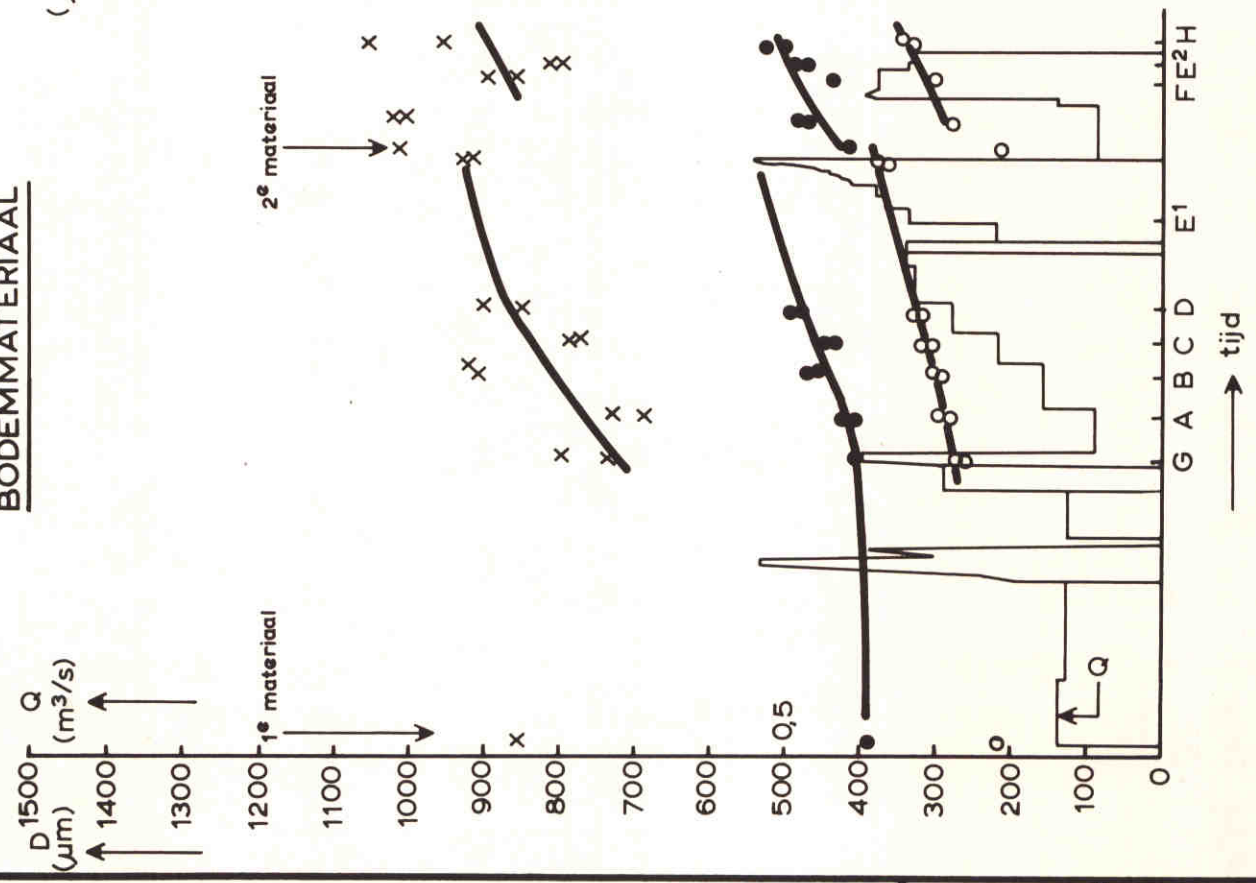
FIG. 7 - D



**SUSPENSIE-TRANSPORT**

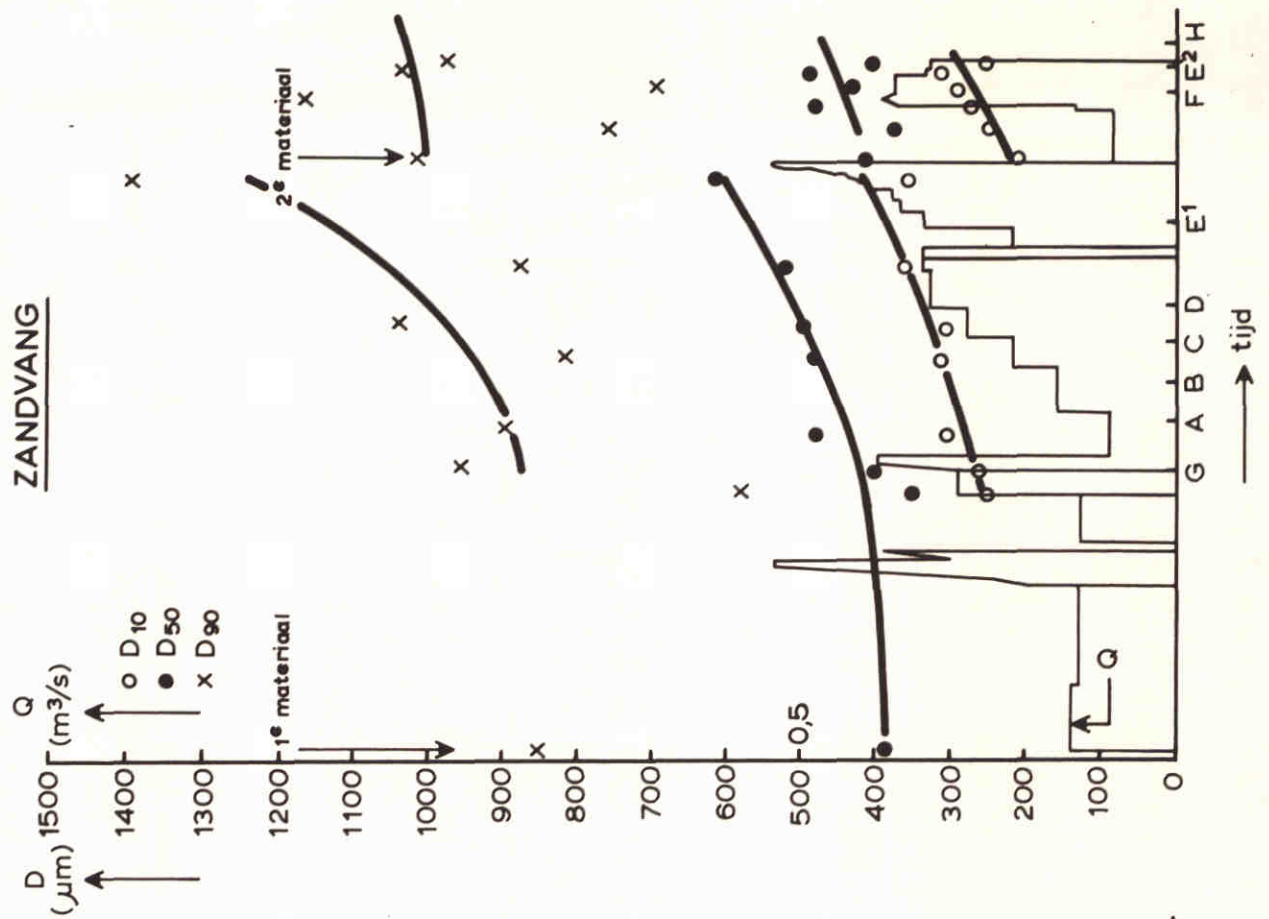


**BODEM-MATERIAAL**

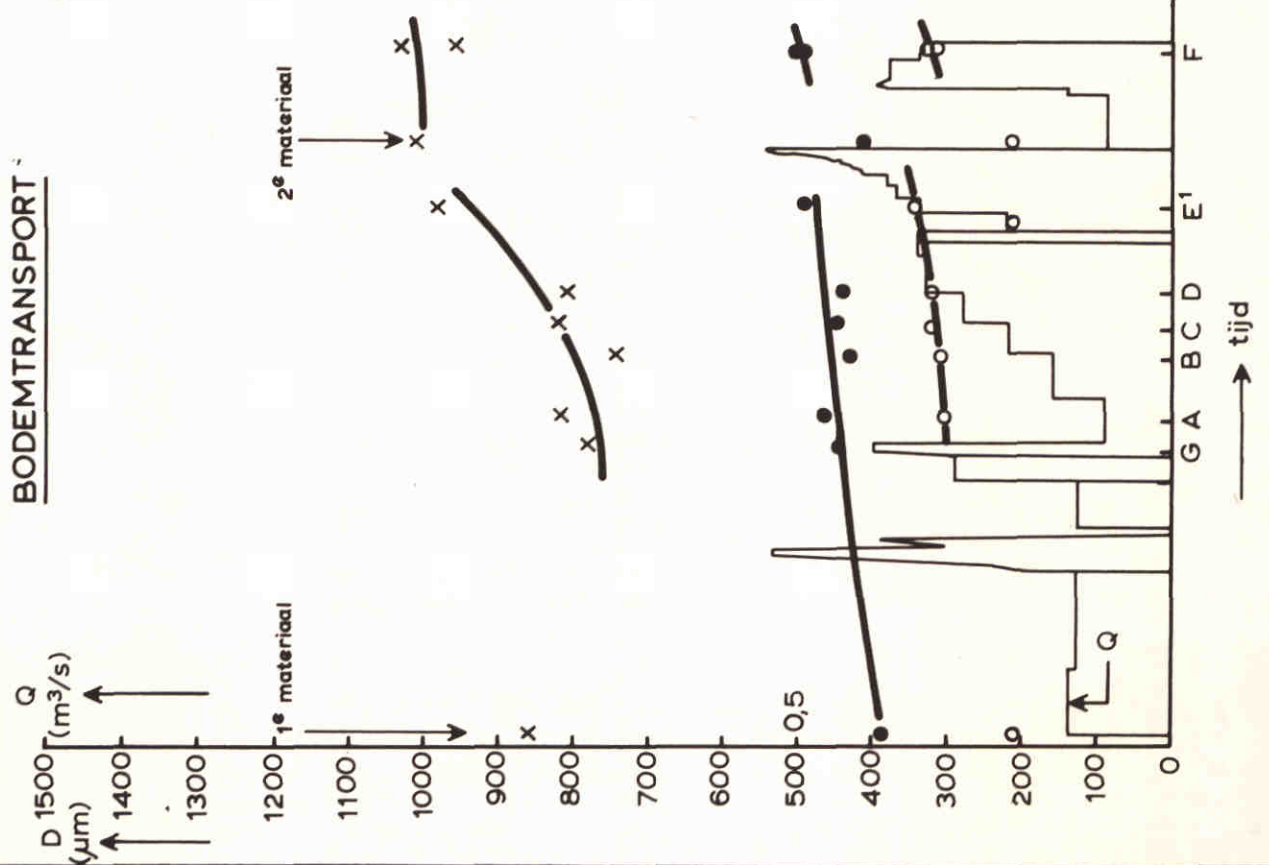


KARAKTERISTIEKEN KORRELMATERIAAL IN DE TIJD  
 BODEM-MATERIAAL EN SUSPENSIE-TRANSPORT

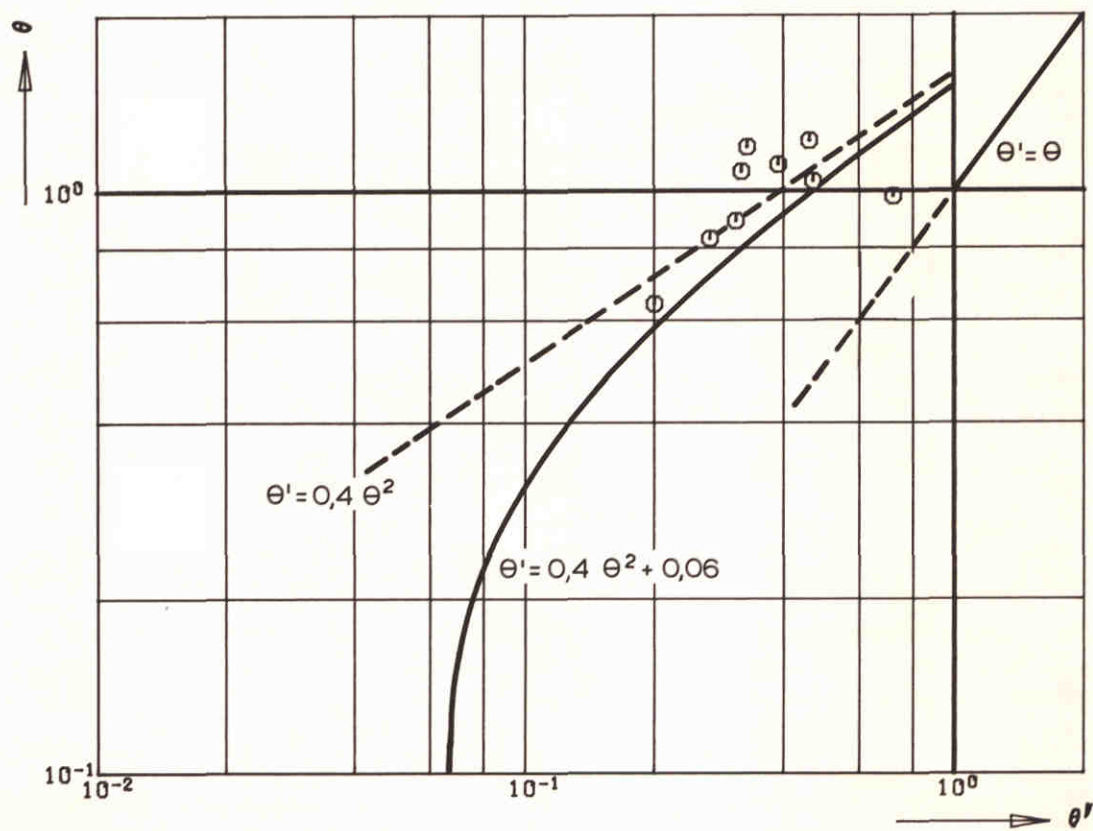
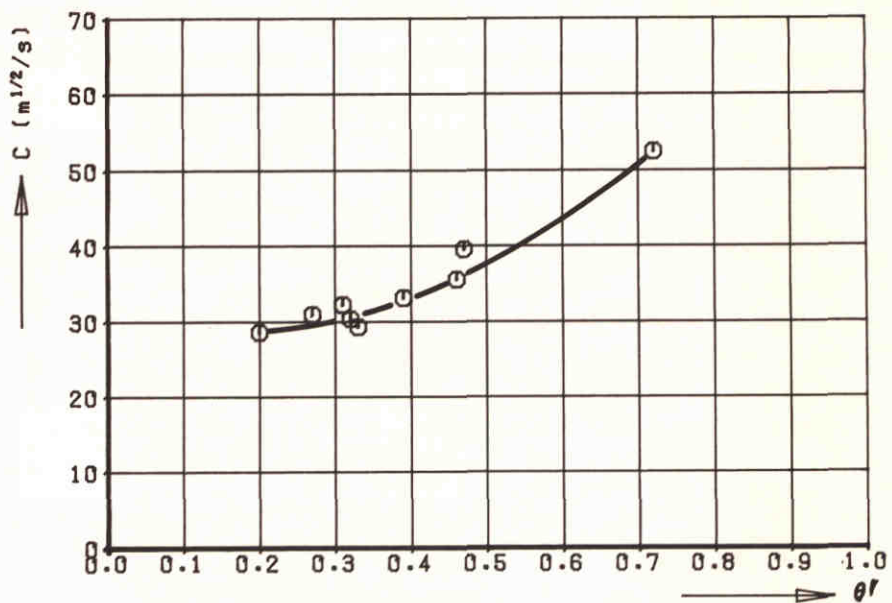
**ZANDVANG**



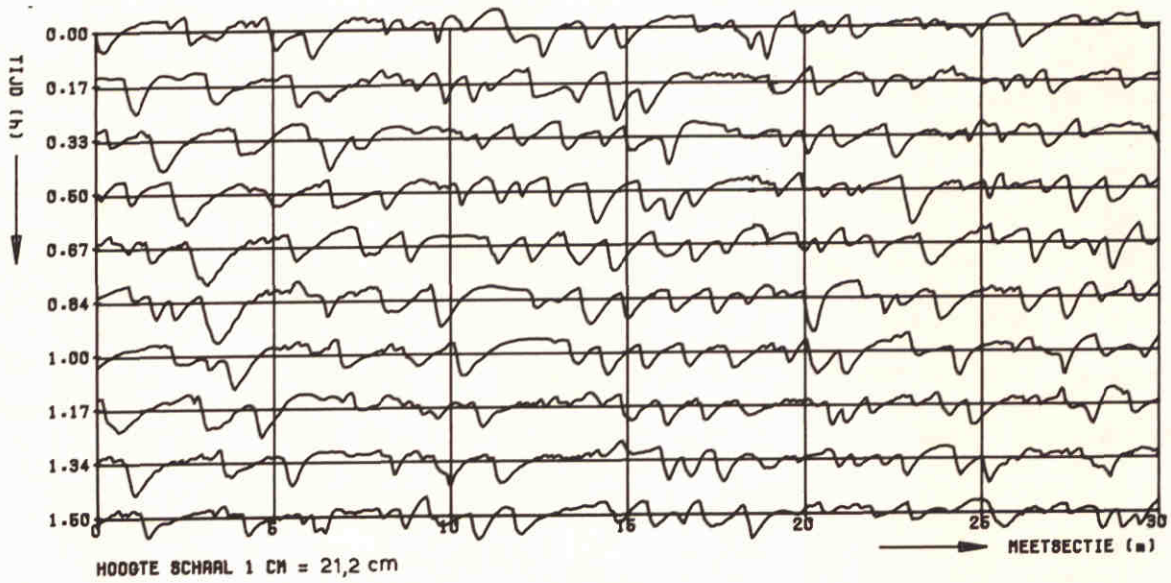
**BODEMTRANSPORT**



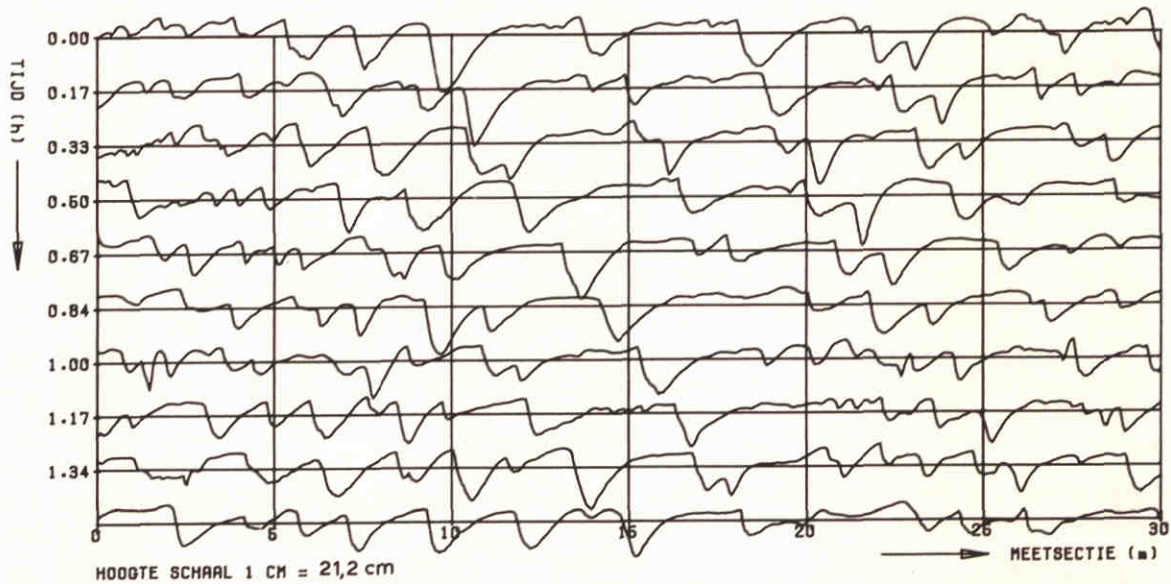
KARAKTERISTIEKEN KORRELMATERIAAL IN DE TIJD  
BODEMTRANSPORT EN ZANDVANG



STROMINGSWEERSTAND ALS FUNKTIE VAN  
DE KORRELWEERSTAND



$H = 0,081 \text{ m}$        $Q = 0,101 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $L = 1,557 \text{ m}$        $D_{50} = 415 \mu\text{m}$   
 $T = 4,8$                $D_{90} = 765 \mu\text{m}$



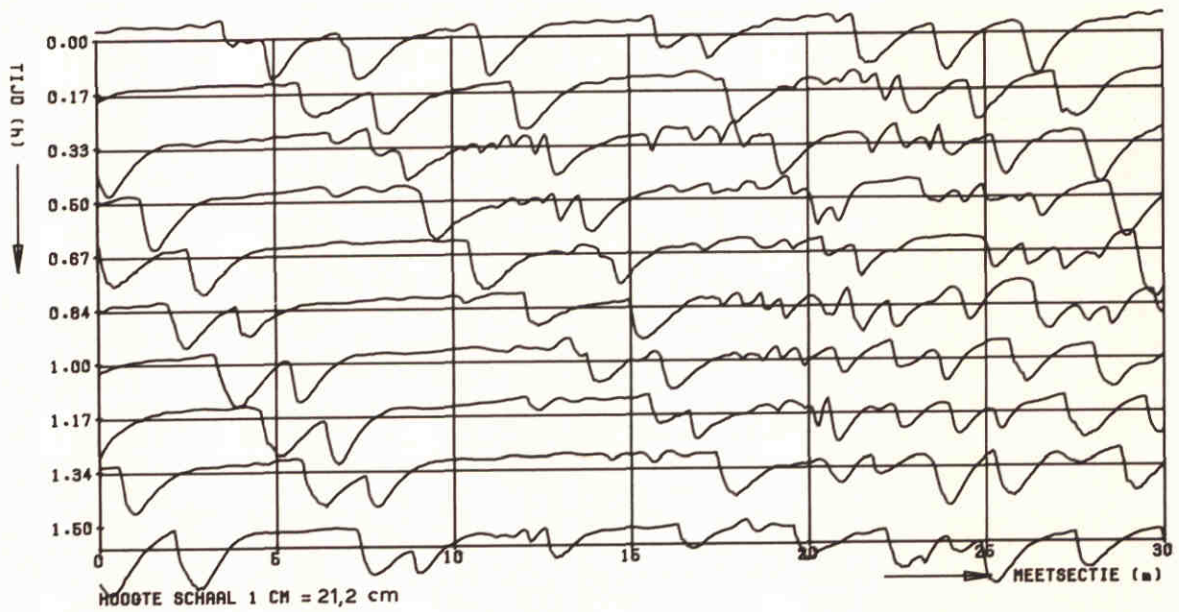
$H = 0,093 \text{ m}$        $Q = 0,173 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $L = 2,080 \text{ m}$        $D_{50} = 435 \mu\text{m}$   
 $T = 7,5$                $D_{90} = 800 \mu\text{m}$

BEDDINGVORMREGISTRATIES  
 $Q = 0,101 \text{ m}^3/\text{s}$  EN  $Q = 0,173 \text{ m}^3/\text{s}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 10 a



H = 0,103 m

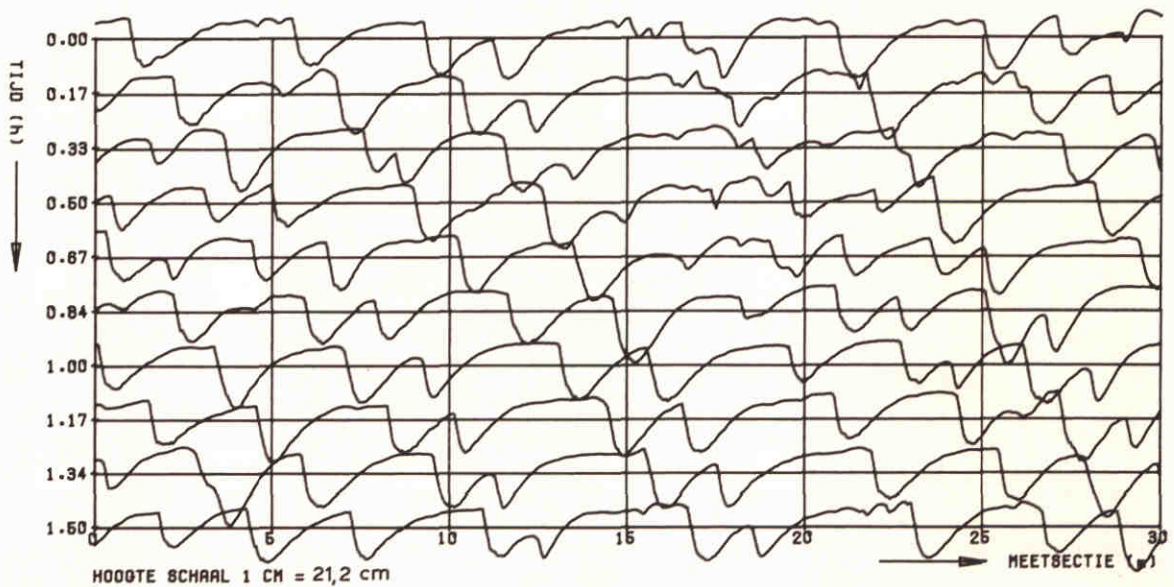
Q = 0,235 m<sup>3</sup>/s

L = 2,669 m

D<sub>50</sub> = 455 μm

T = 8,5

D<sub>90</sub> = 835 μm



H = 0,129 m

Q = 0,295 m<sup>3</sup>/s

L = 2,707 m

D<sub>50</sub> = 470 μm

T = 8,9

D<sub>90</sub> = 865 μm

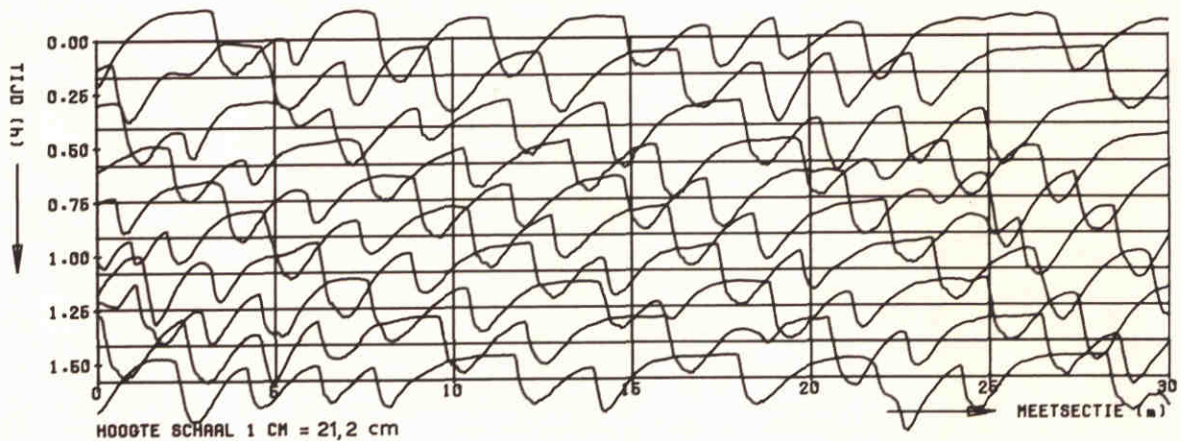
BEDDINGVORMREGISTRATIES

Q = 0,235 m<sup>3</sup>/s EN Q = 0,295 m<sup>3</sup>/s

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 10 b



H = 0,147 m

(T1 - E1)

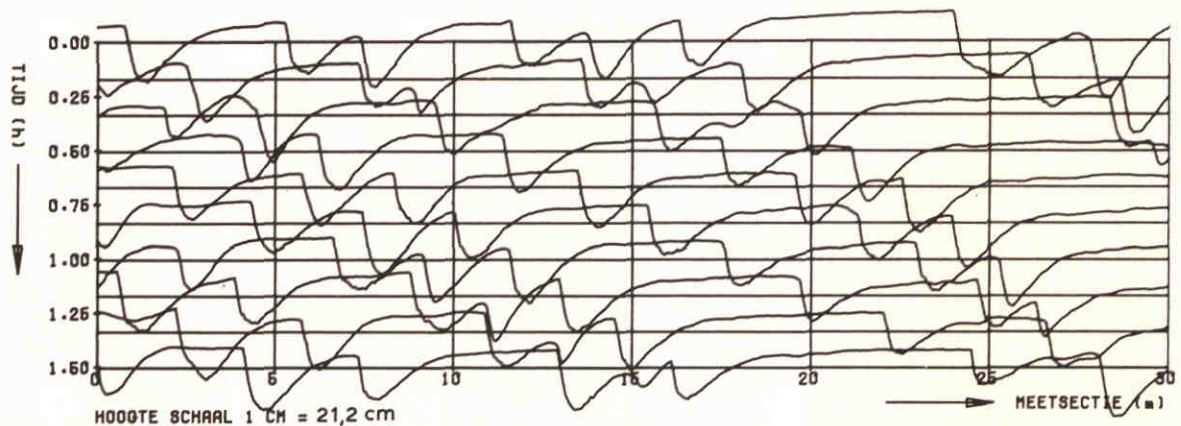
Q = 0,353 m<sup>3</sup>/s

L = 2,642 m

D<sub>50</sub> = 520 μm

T = 9,3

D<sub>90</sub> = 925 μm



H = 0,140 m

(T1 - E2)

Q = 0,353 m<sup>3</sup>/s

L = 3,823 m

D<sub>50</sub> = 495 μm

T = 11,2

D<sub>90</sub> = 875 μm

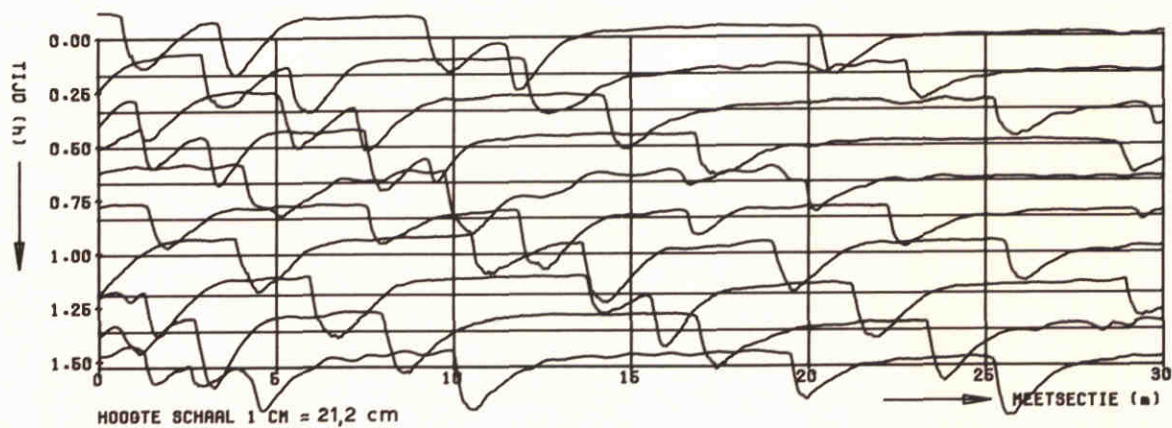
BEDDINGVORMREGISTRATIES

Q = 0,353 m<sup>3</sup>/s (T1 - E1 EN T1 - E2)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

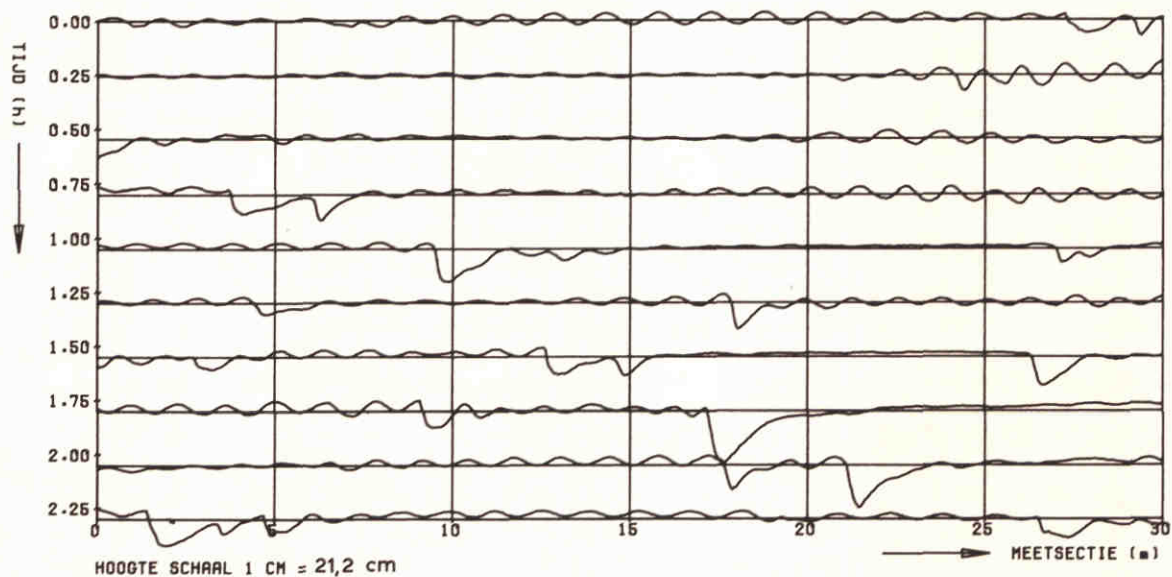
M 2130

FIG. 10 c



H = 0,130 m  
L = 4,740 m  
T = 15,3

Q = 0,392 m<sup>3</sup>/s  
D<sub>50</sub> = 485 μm  
D<sub>90</sub> = 860 μm

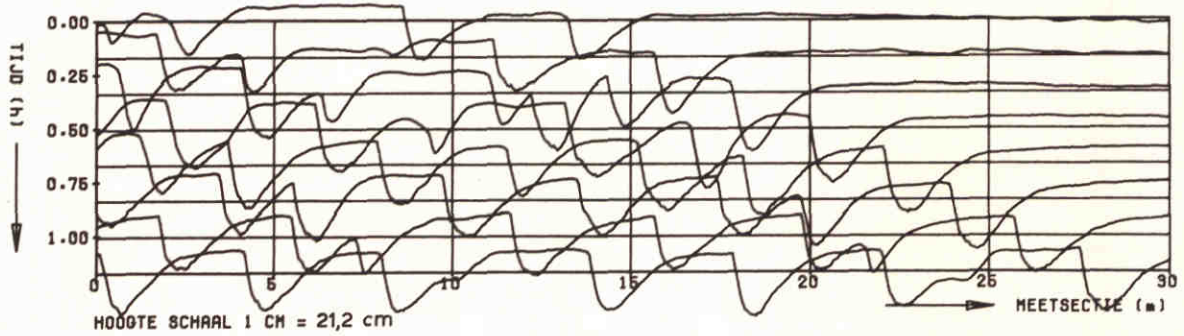


H = 0,062 m  
L = 4,757 m  
T = 24,9

Q = 0,411 m<sup>3</sup>/s  
D<sub>50</sub> = 405 μm  
D<sub>90</sub> = 725 μm

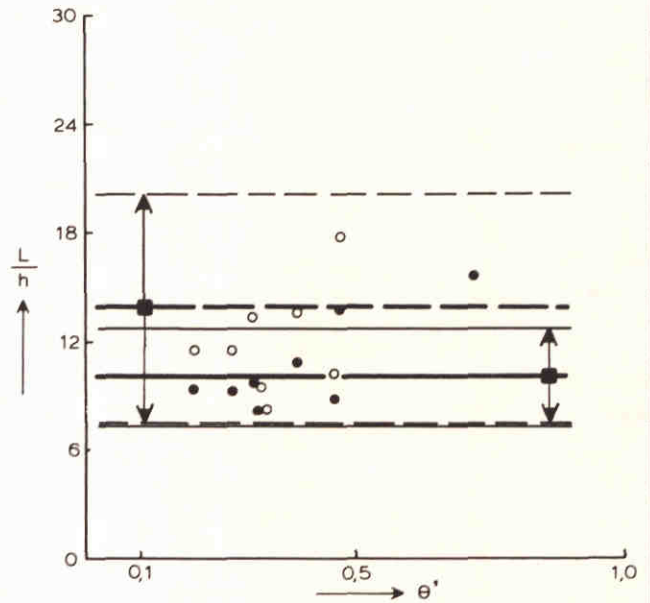
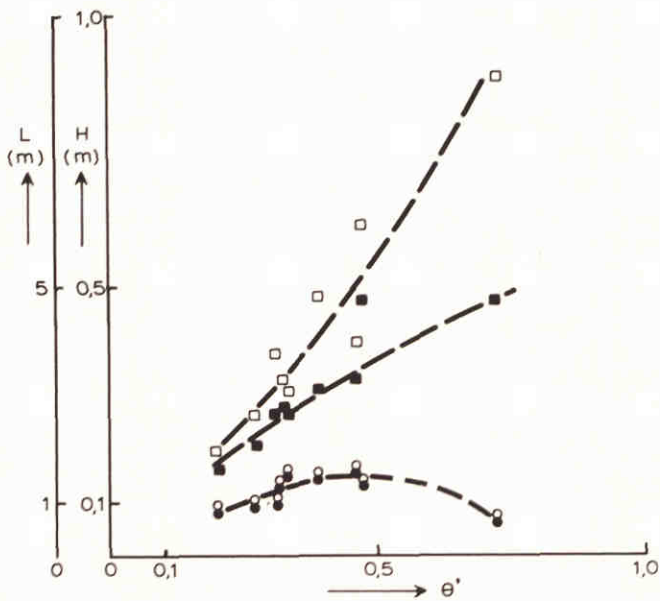
BEDDINGVORMREGISTRATIES

Q = 0,392 m<sup>3</sup>/s EN Q = 0,411 m<sup>3</sup>/s



$H = 0,151 \text{ m}$   
 $L = 3,424 \text{ m}$   
 $T = 14,4$

$Q = 0,441 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $D_{50} = 510 \text{ } \mu\text{m}$   
 $D_{90} = 900 \text{ } \mu\text{m}$

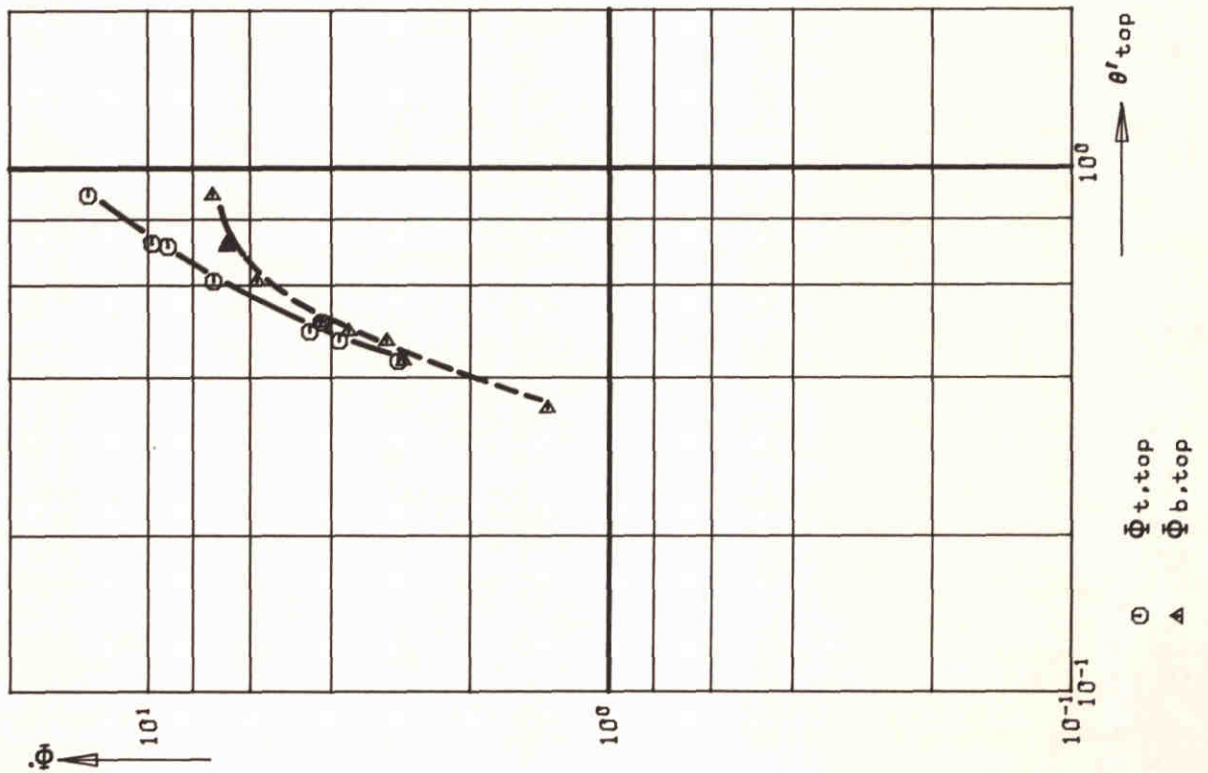
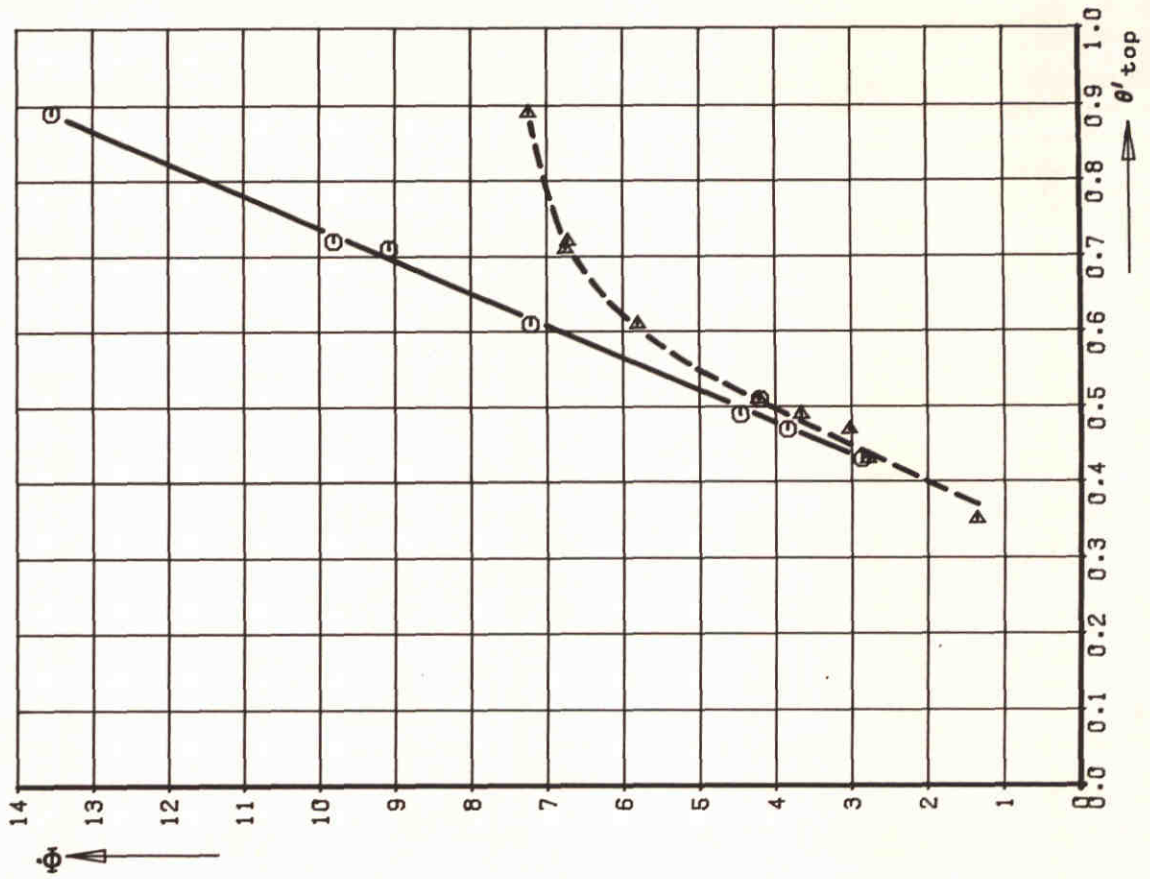


—●—  $\bar{H}$   
 —○—  $H_{dom}$   
 —■—  $\bar{L}$   
 —□—  $L_{dom}$

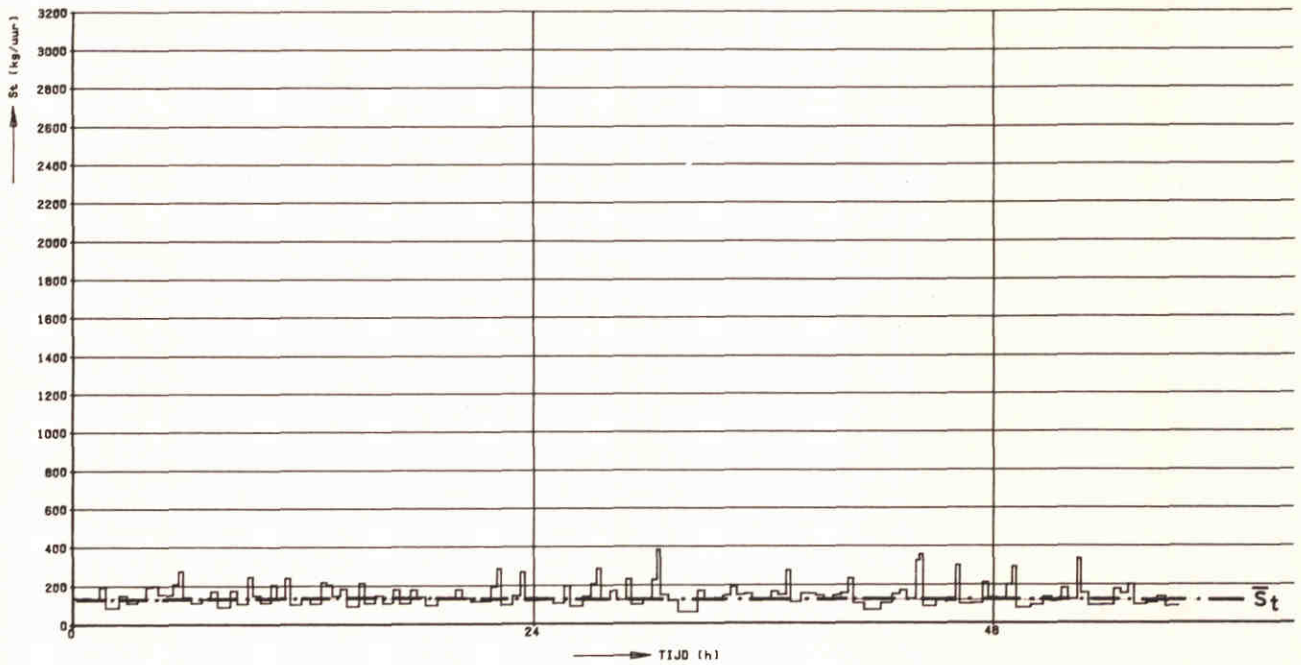
—●—  $\frac{\bar{L}}{h} = 10,1 \pm 2,8$   
 —○—  $\frac{L_{dom}}{h} = 13,9 \pm 6,3$

BEDDINGVORMREGISTRATIE  $Q = 0,441 \text{ m}^3/\text{s}$  EN  
 BEDDINGVORMAFMETINGEN ALS FUNKTIE VAN  $\theta'$

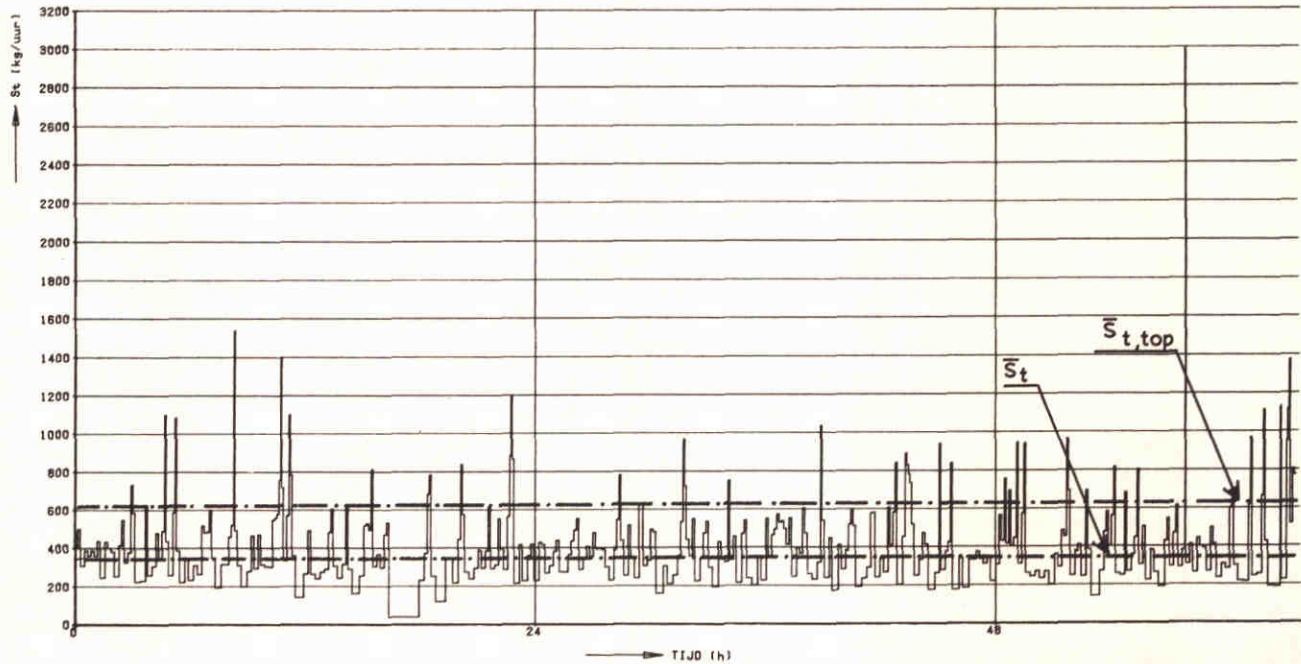




DIMENSIELOOS TOTAAL - EN BODEMTRANSPORT  
OP DE BEDDINGVORM TOP



$Q = 0,101 \text{ m}^3/\text{s}$



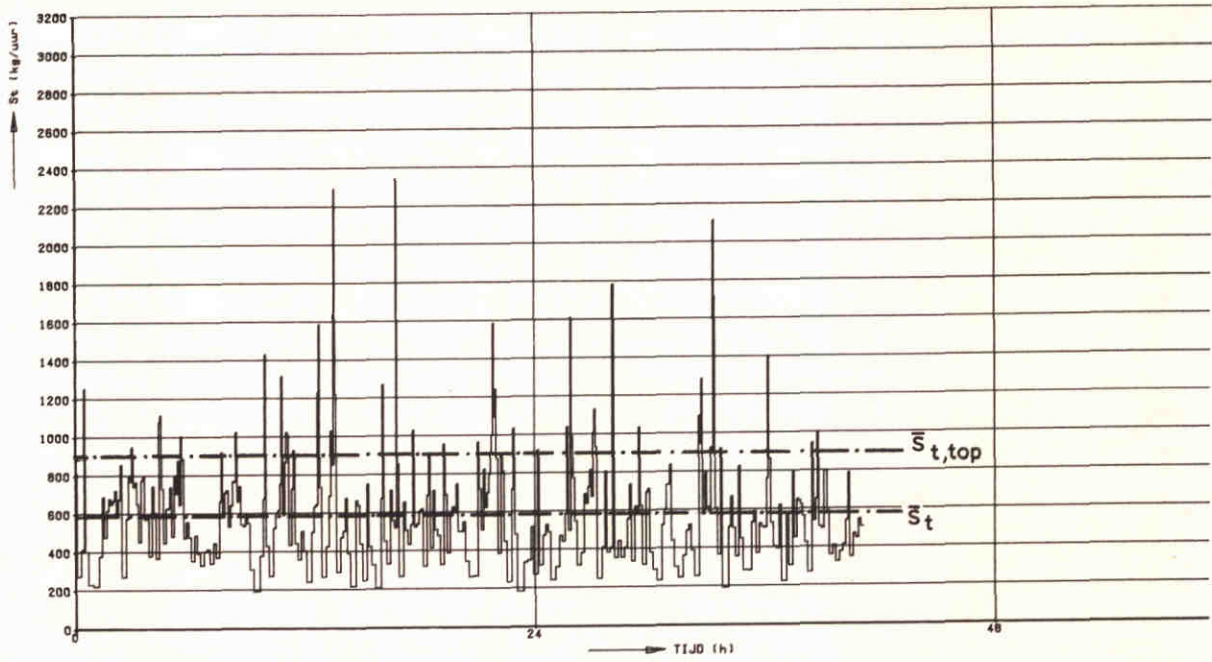
$Q = 0,173 \text{ m}^3/\text{s}$

TOTAAL SEDIMENTTRANSPORT ALS FUNKTIE VAN  
DE TIJD  $Q = 0,101 \text{ m}^3/\text{s}$  EN  $Q = 0,173 \text{ m}^3/\text{s}$

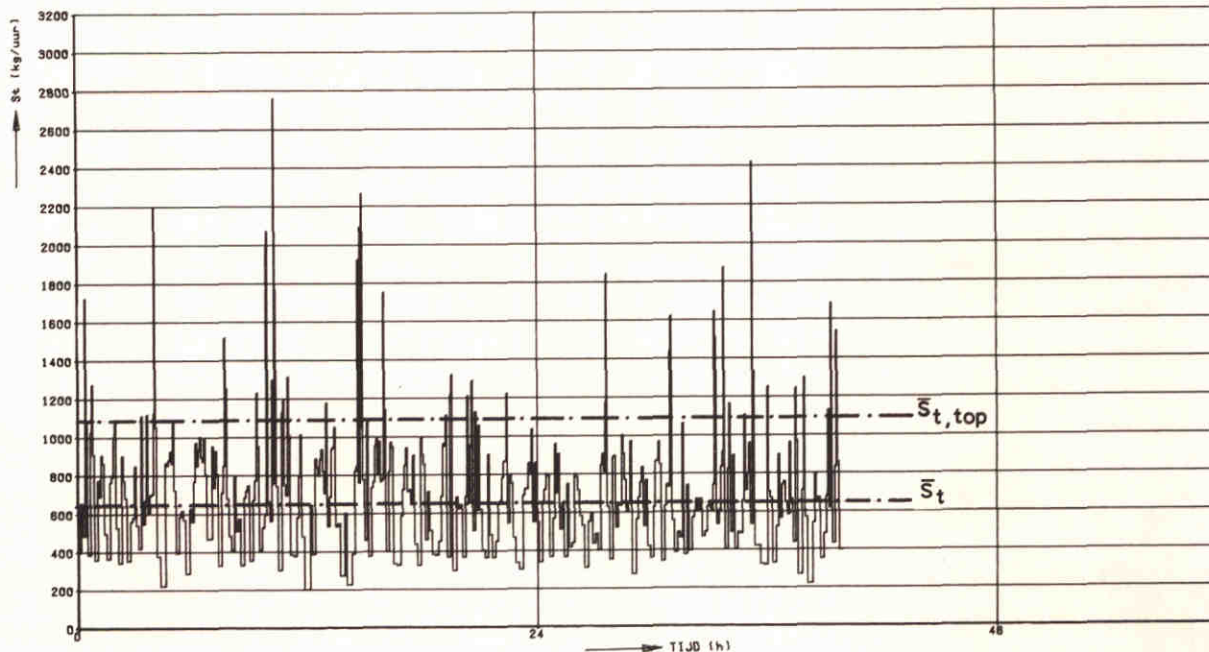
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 12 a

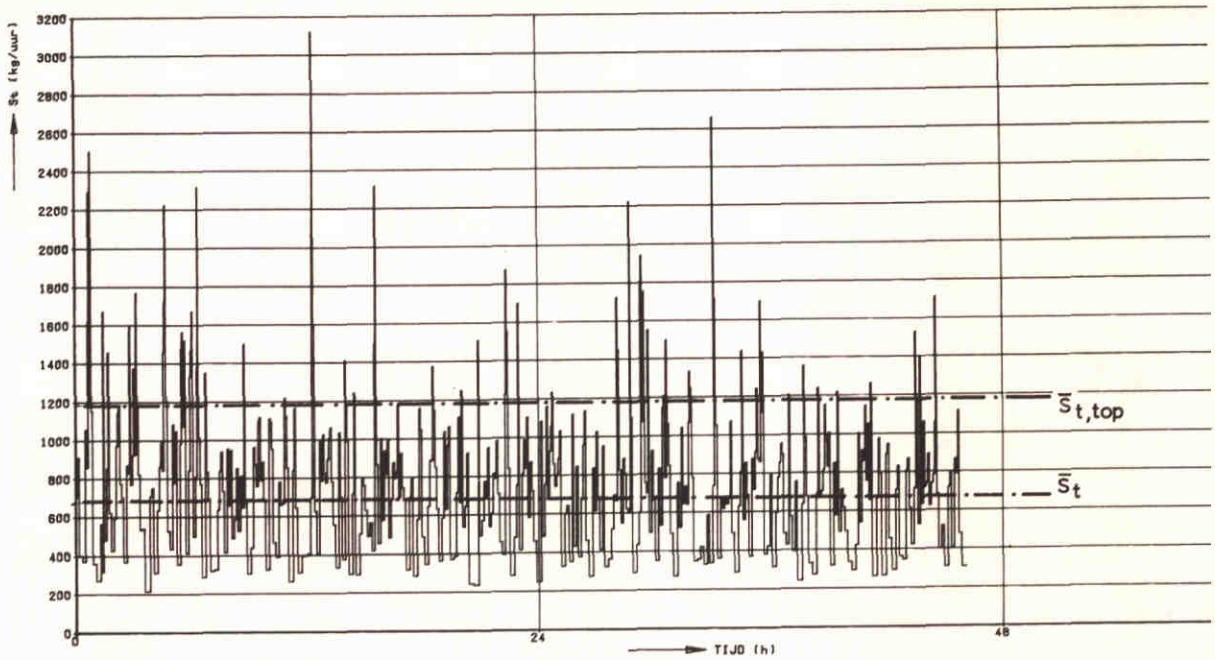


$Q = 0,235 \text{ m}^3/\text{s}$



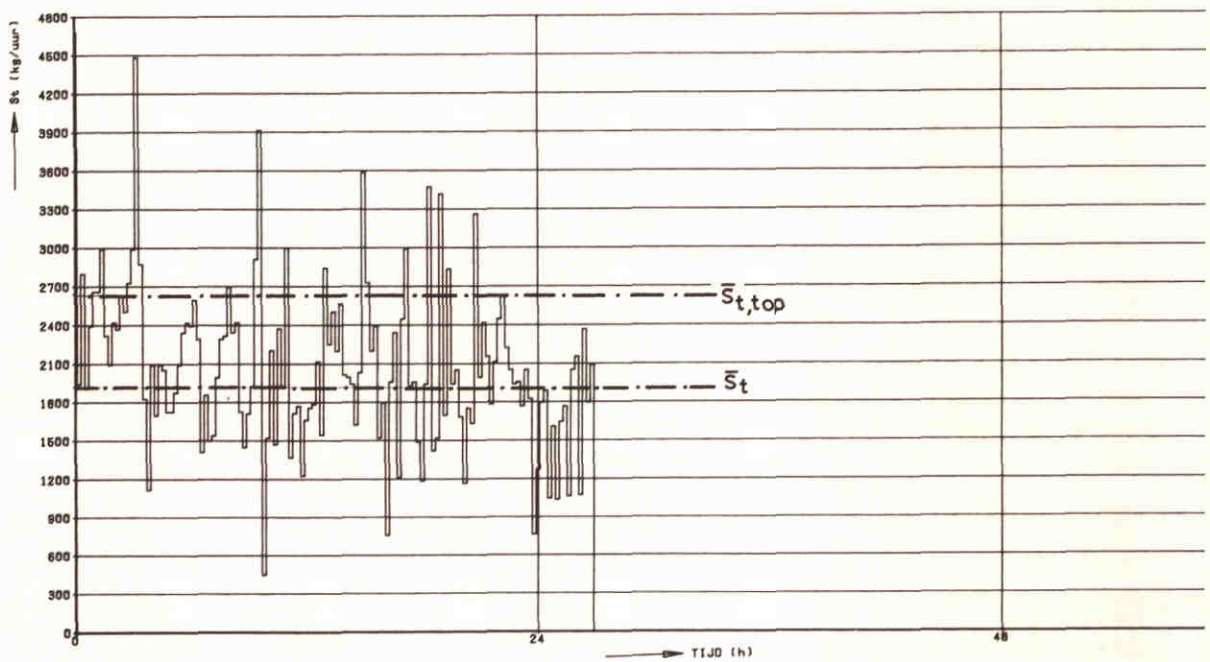
$Q = 0,295 \text{ m}^3/\text{s}$

TOTAAL SEDIMENTTRANSPORT ALS FUNKTIE VAN DE TIJD  $Q = 0,235 \text{ m}^3/\text{s}$  EN  $Q = 0,295 \text{ m}^3/\text{s}$



(T1 - E1)

$Q = 0,353 \text{ m}^3/\text{s}$



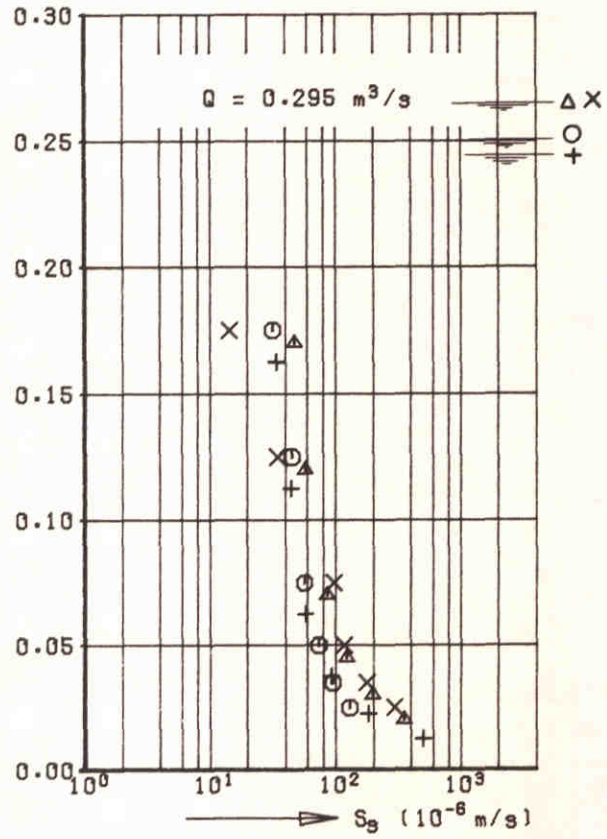
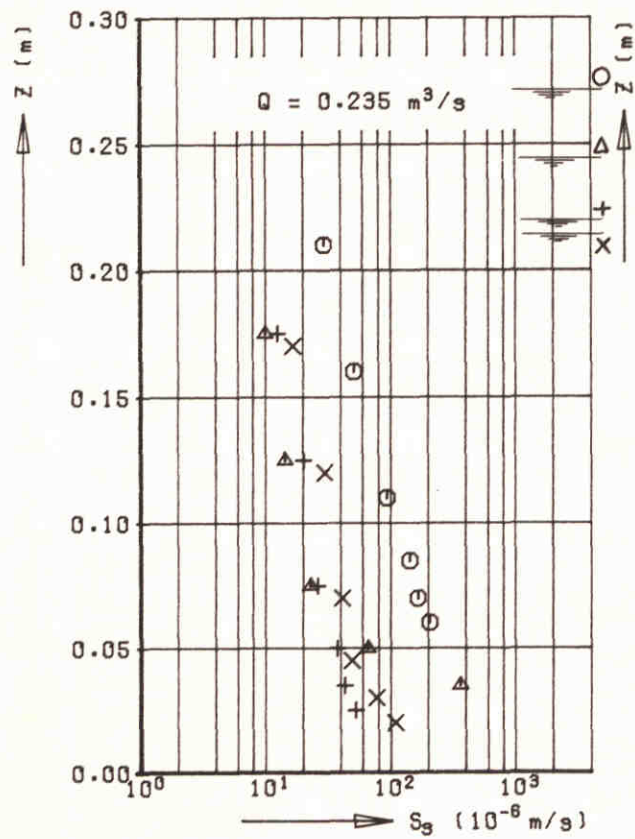
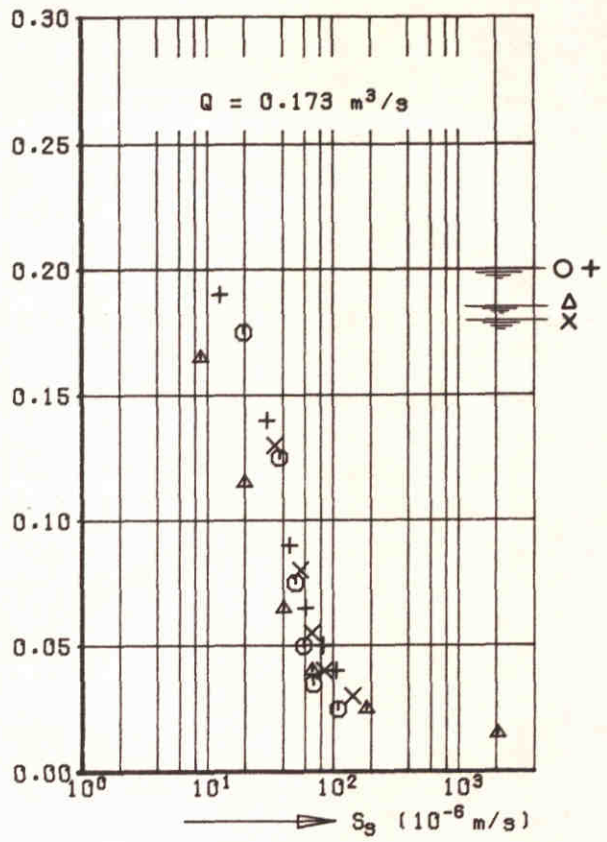
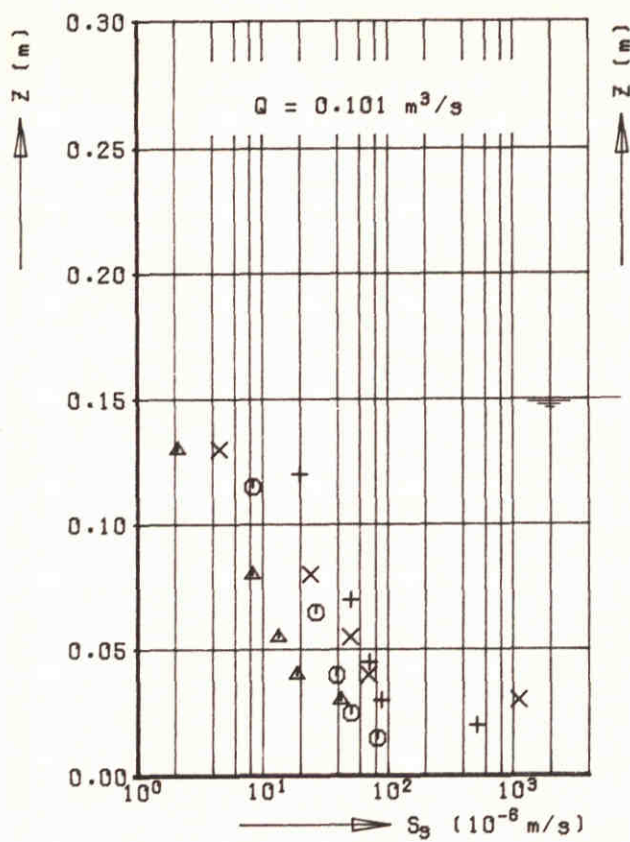
$Q = 0,411 \text{ m}^3/\text{s}$

TOTAAL SEDIMENTTRANSPORT ALS FUNKTIE VAN  
DE TIJD  $Q = 0,353 \text{ m}^3/\text{s}$  (T1-E1) EN  $Q = 0,411 \text{ m}^3/\text{s}$

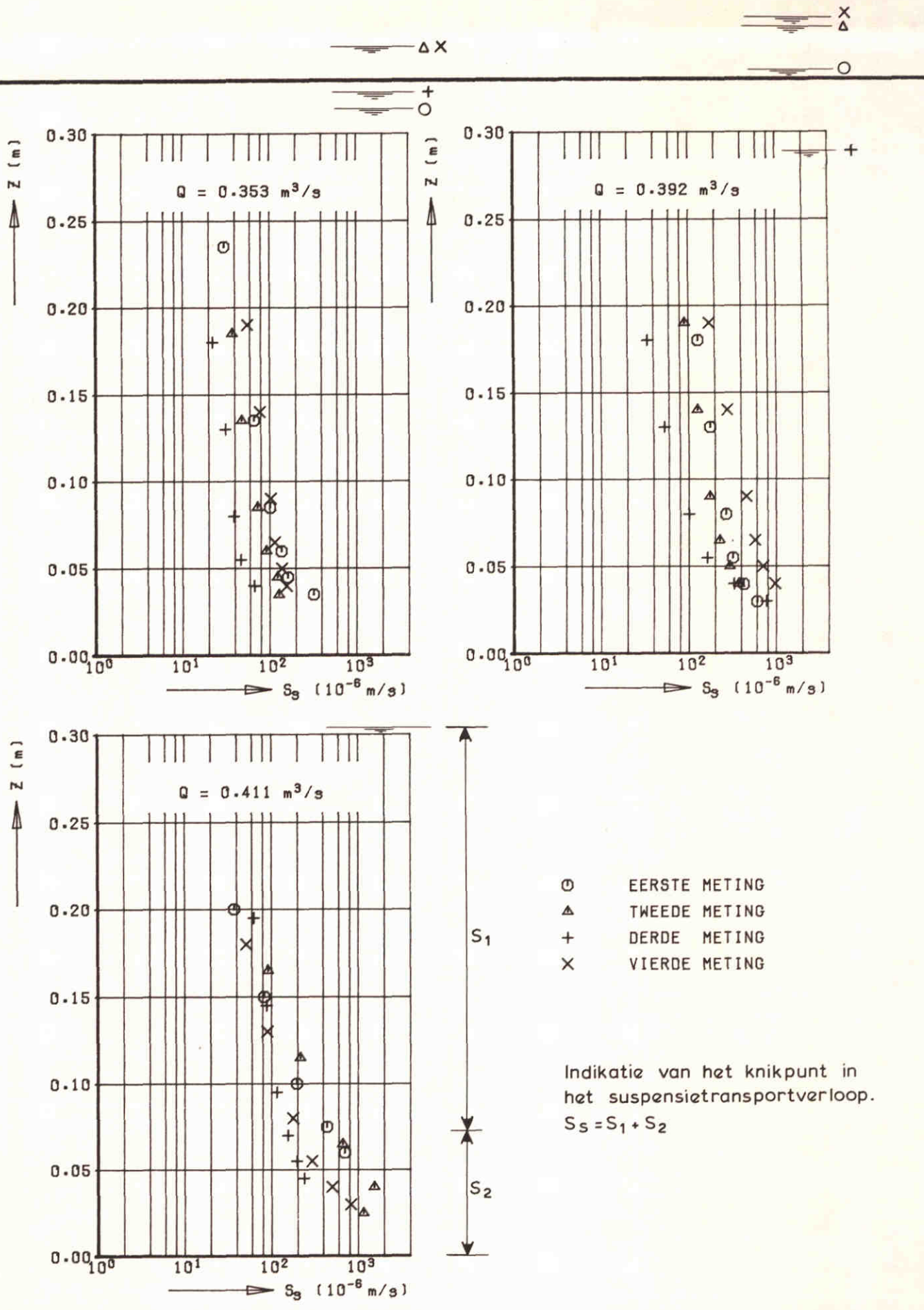
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

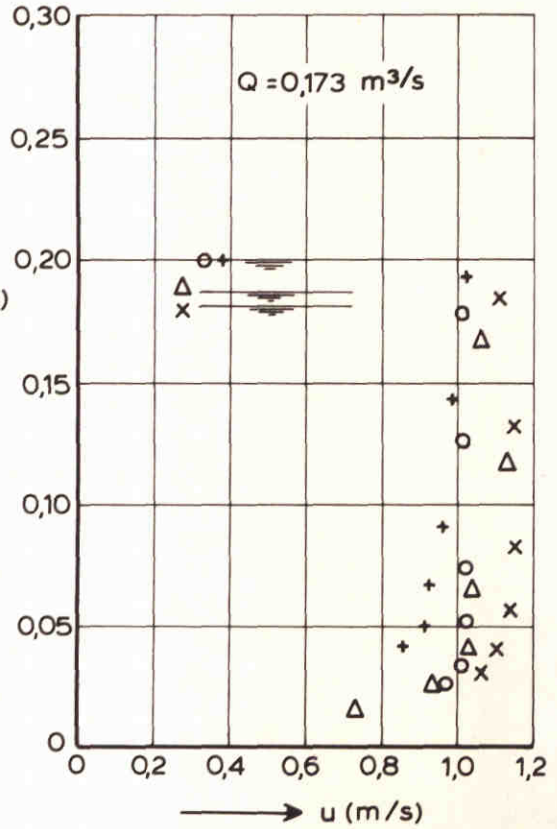
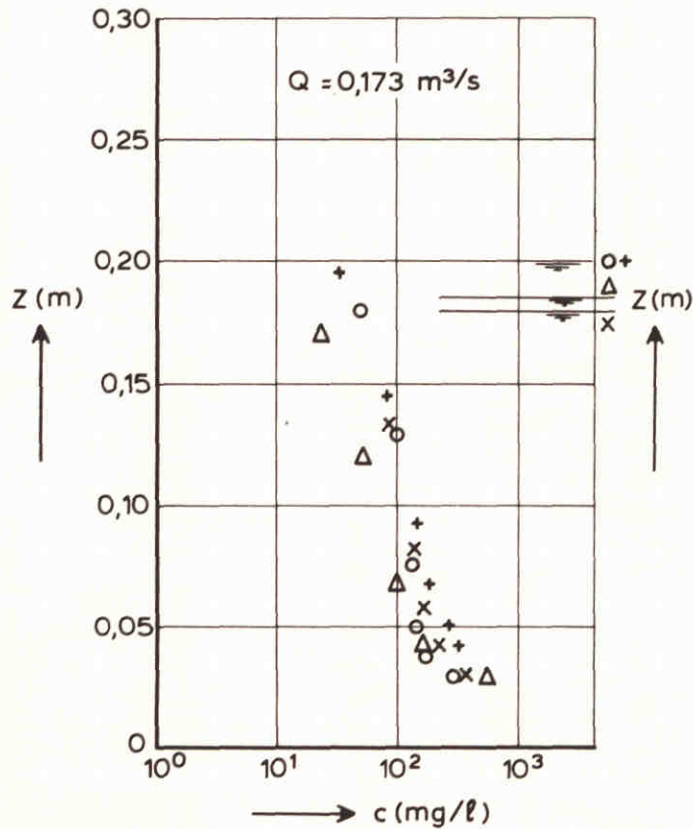
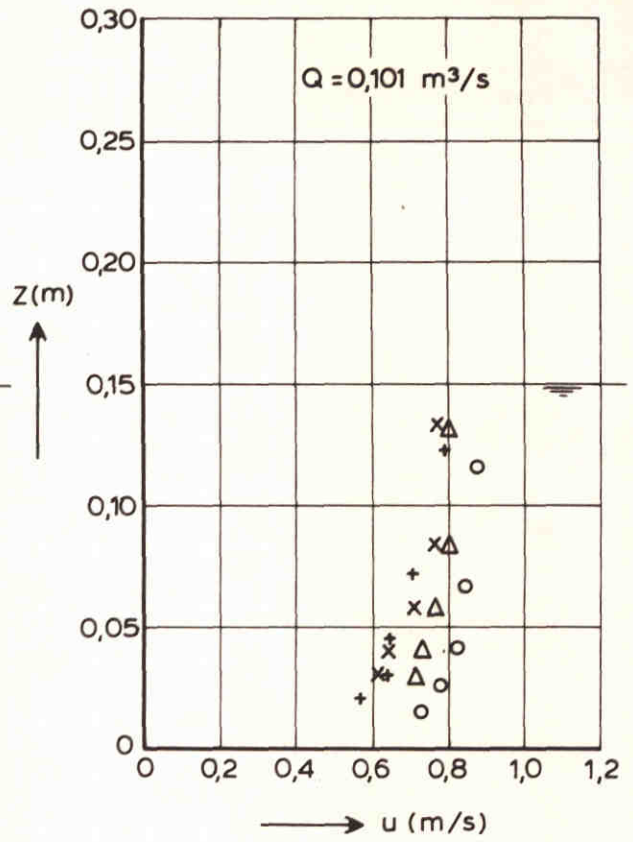
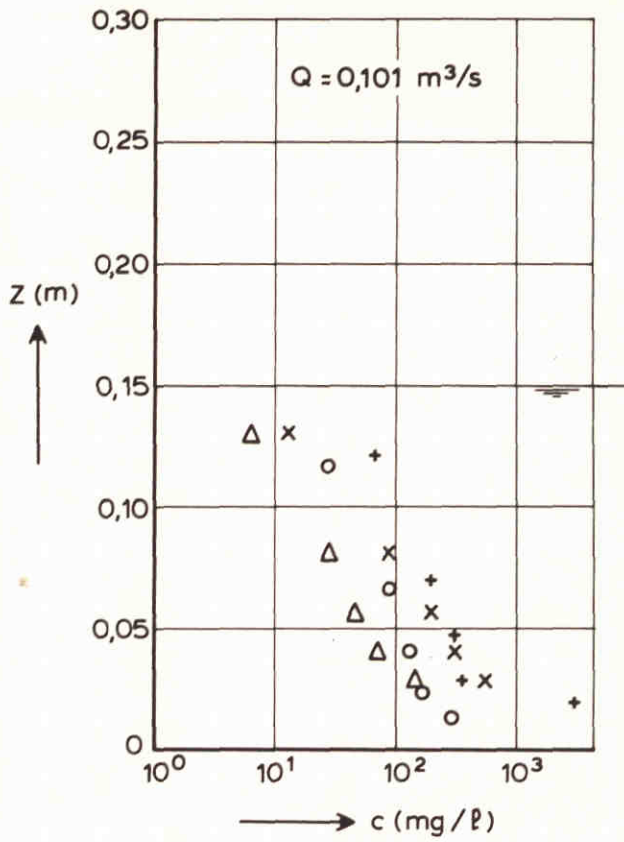
FIG. 12 c



GEMETEN SUSPENSIE TRANSPORT OP  
DE BEDDINGVORMTOP



GEMETEN SUSPENSIE TRANSPORT OP DE BEDDINGVORMTOP

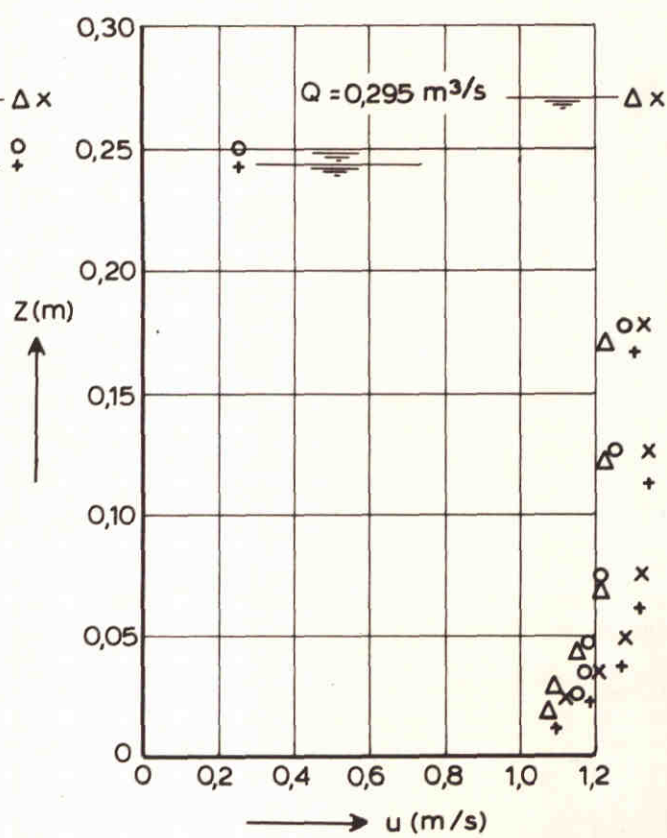
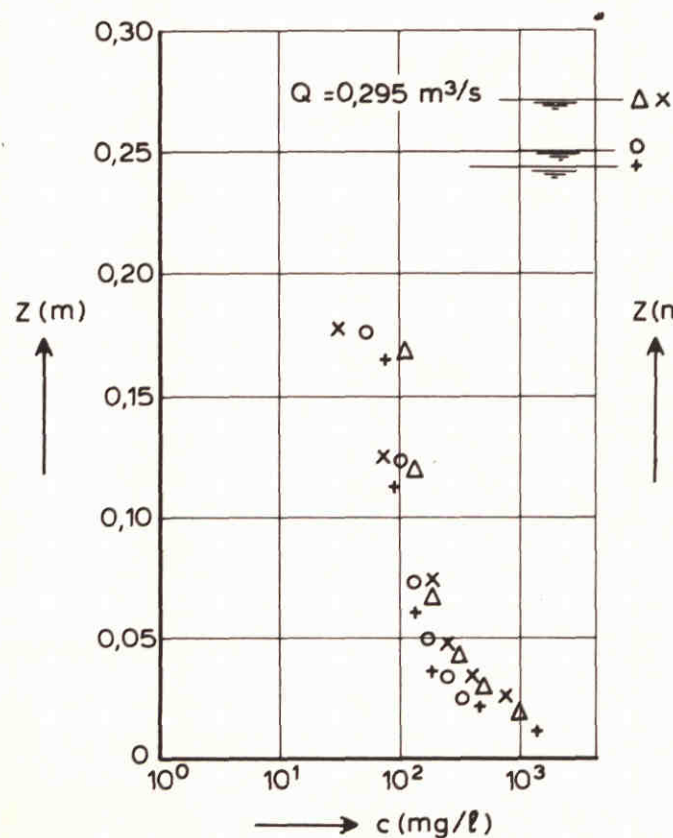
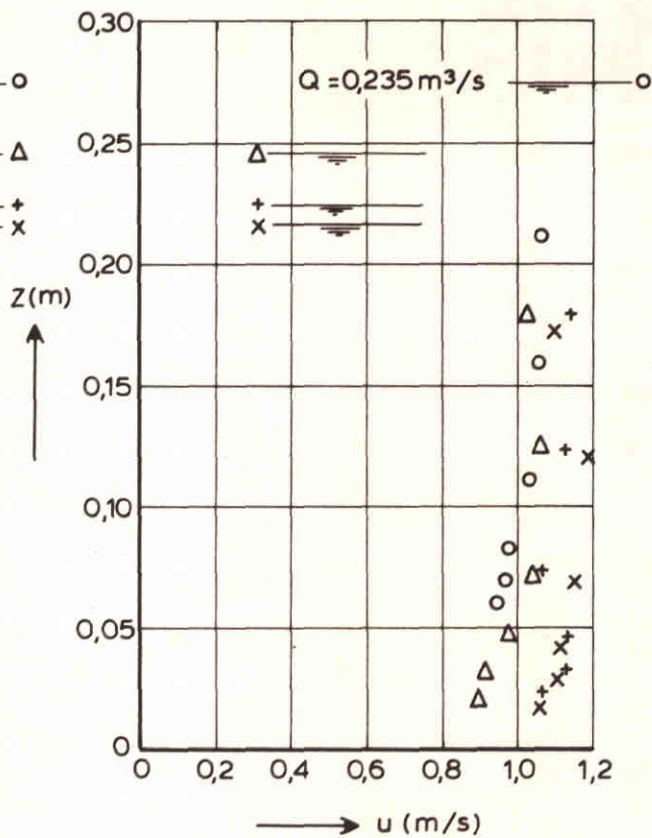
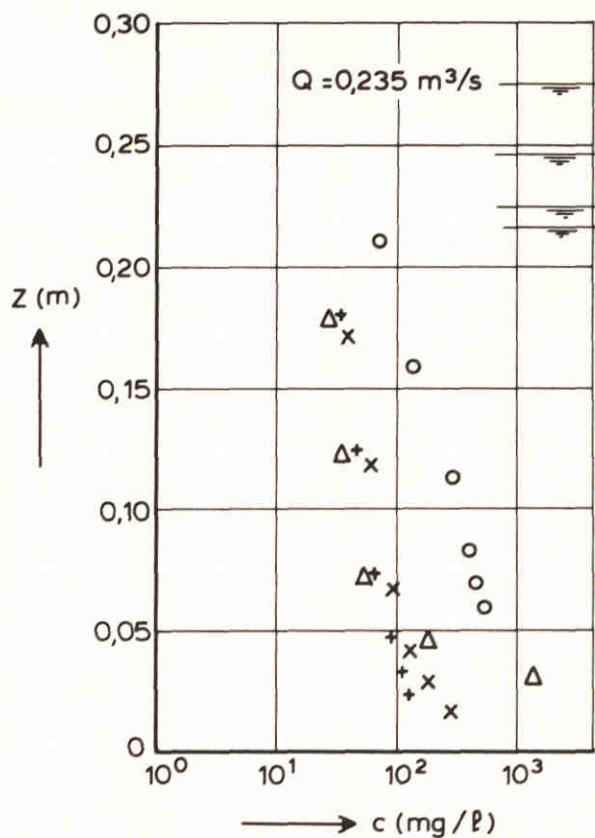


CONCENTRATIE - EN SNELHEIDSPROFIELEN  
OP DE BEDDINGVORMTOP

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

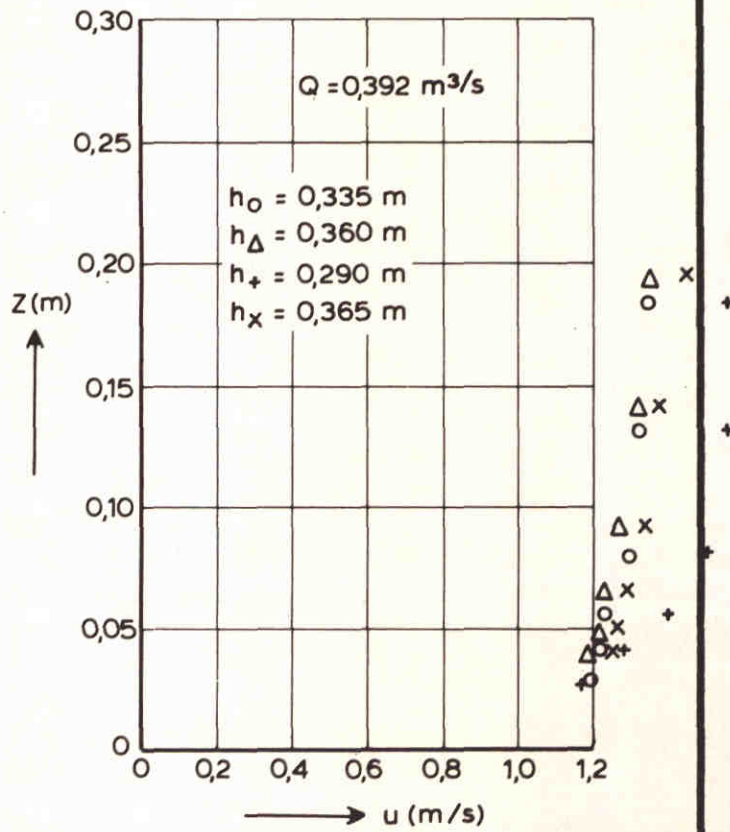
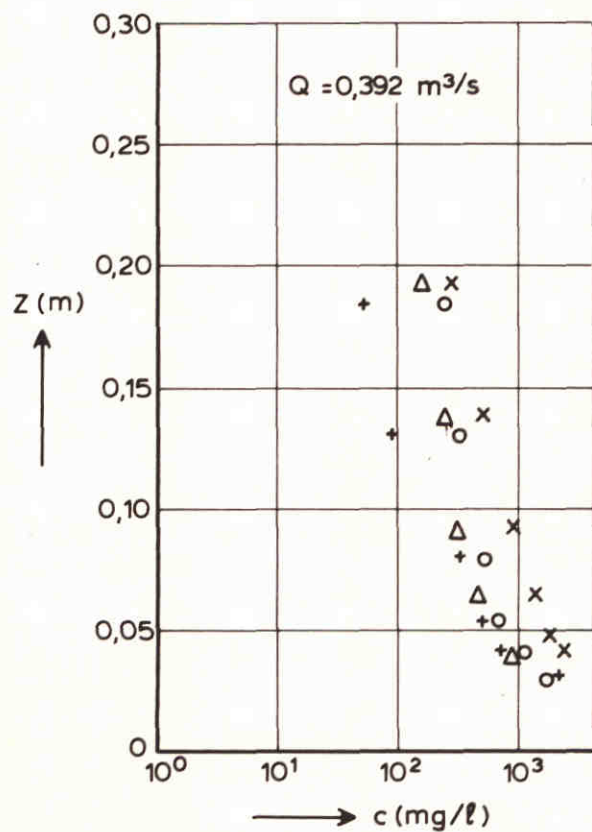
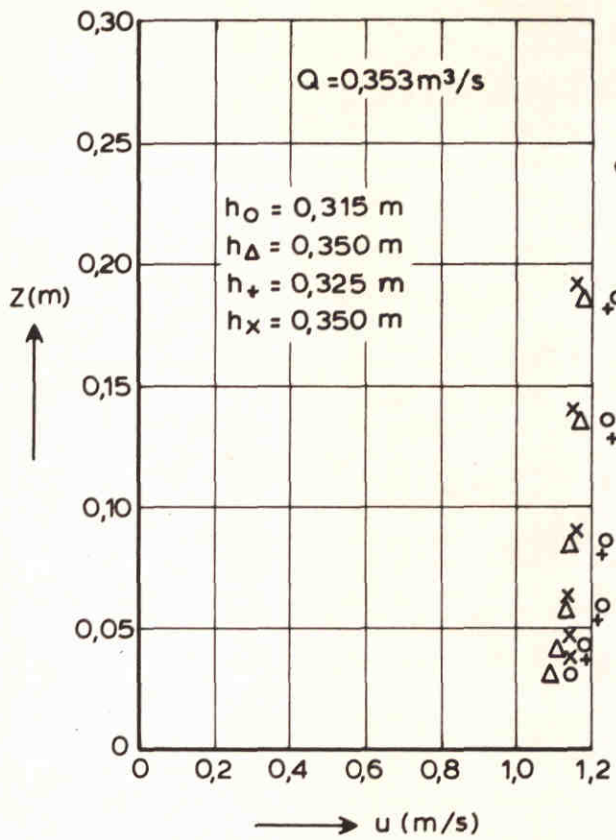
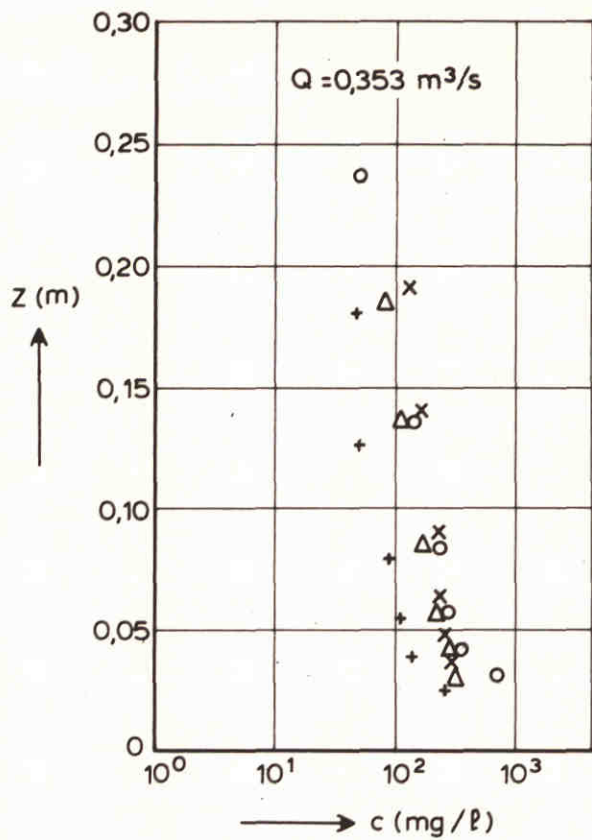
M 2130

FIG. 13-c

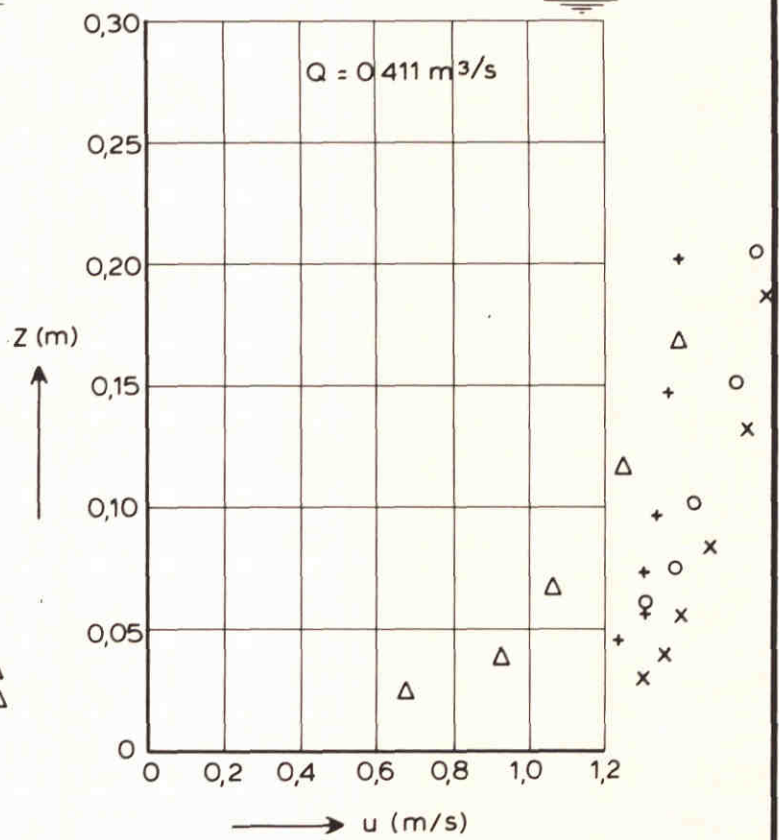
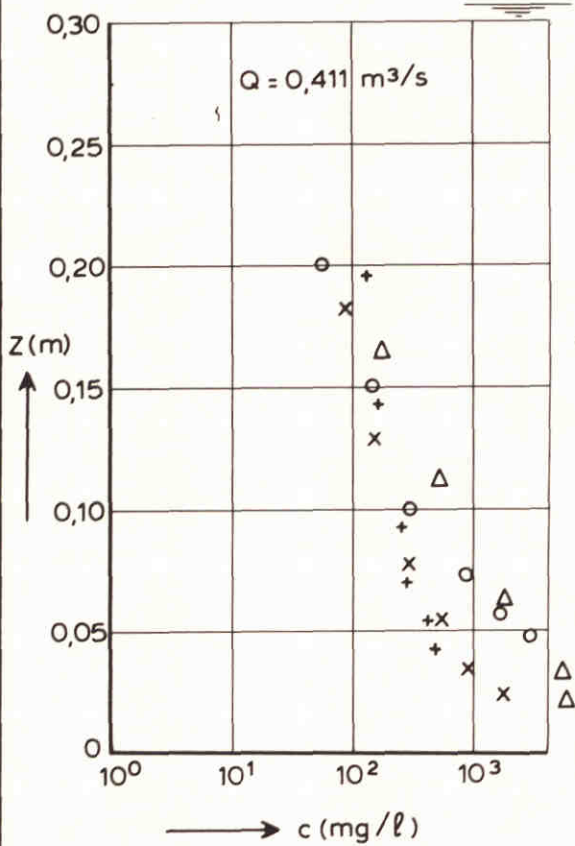


CONCENTRATIE - EN SNELHEIDSPROFIELEN  
OP DE BEDDINGVORMTOP



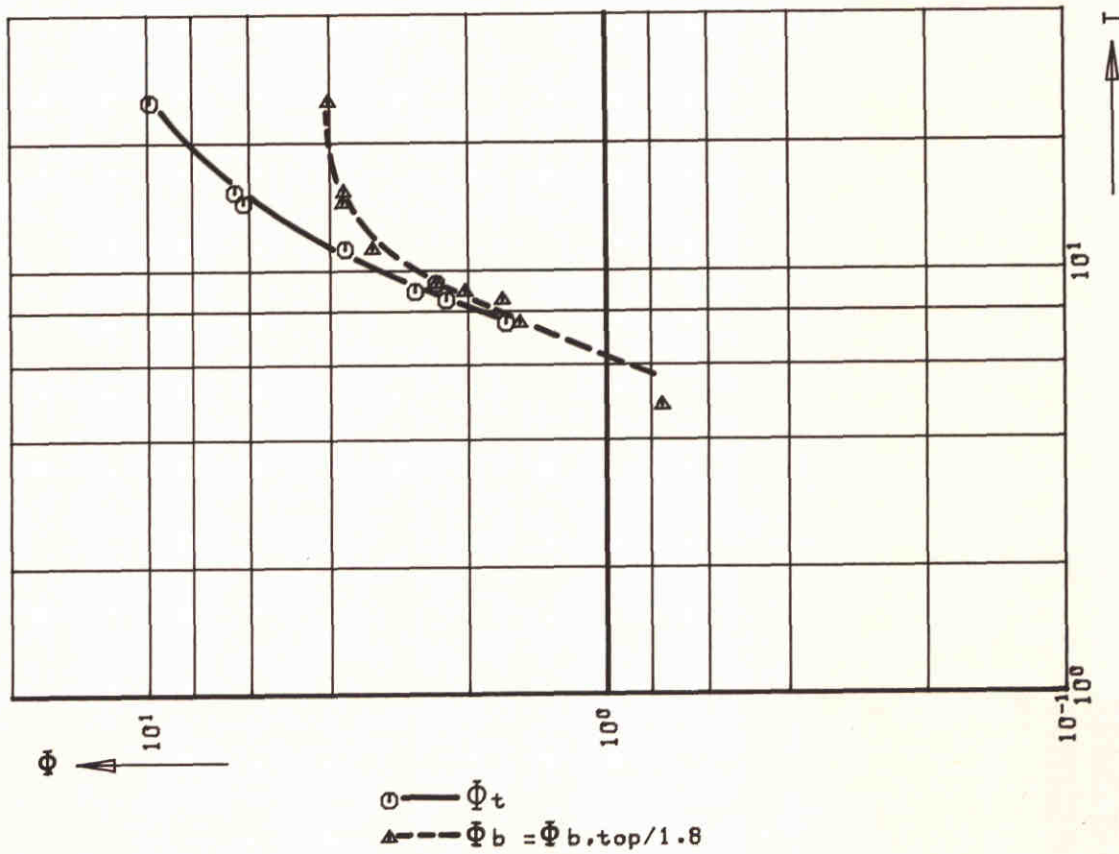
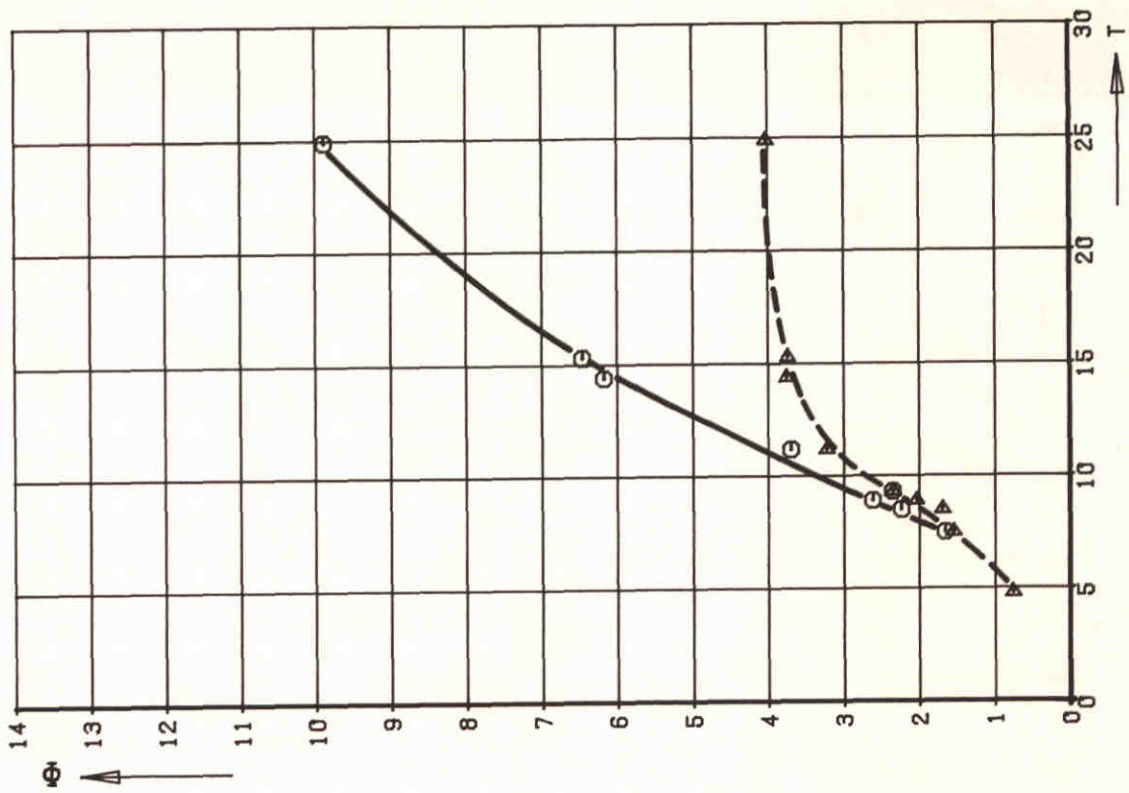


CONCENTRATIE - EN SNELHEIDSPROFIELEN  
 OP DE BEDDINGVORMTOP

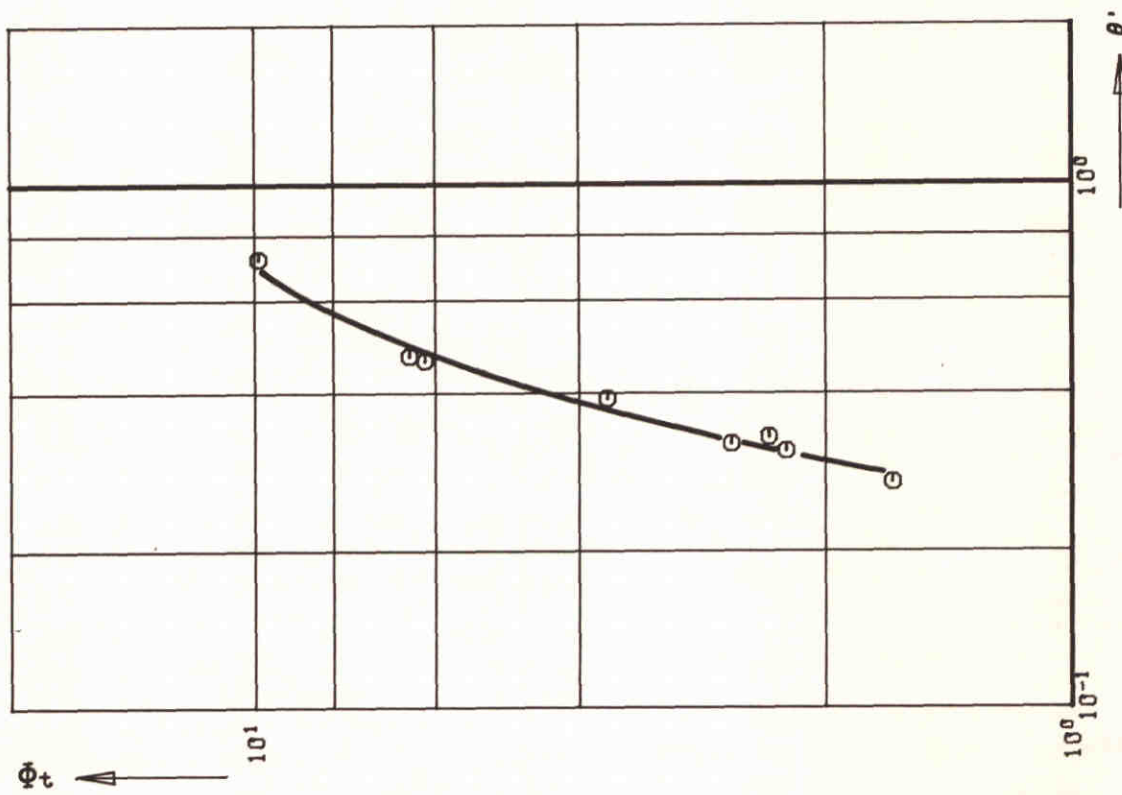
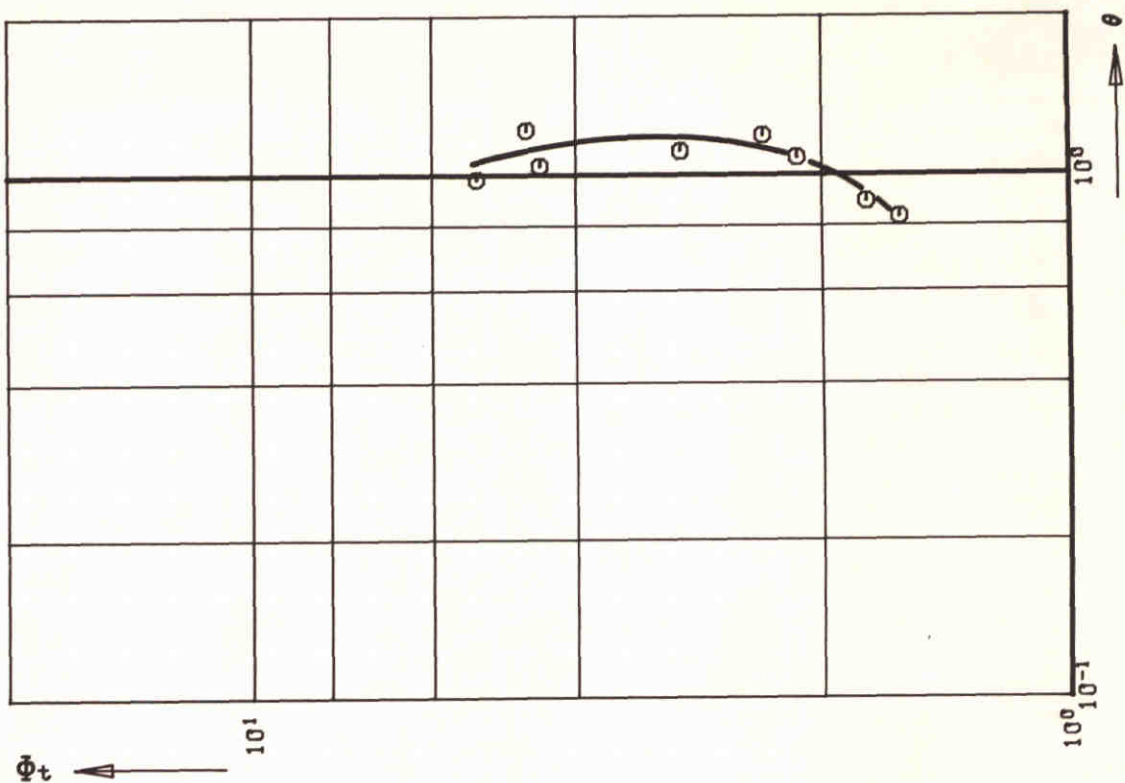


- o eerste meting
- Δ tweede meting
- + derde meting
- x vierde meting

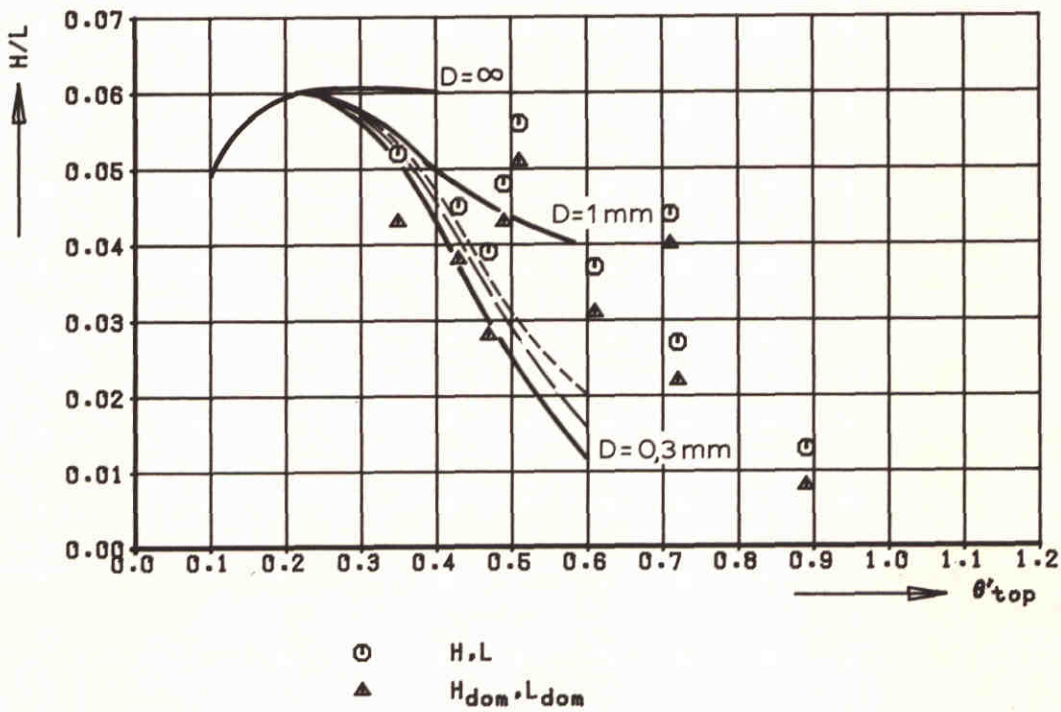
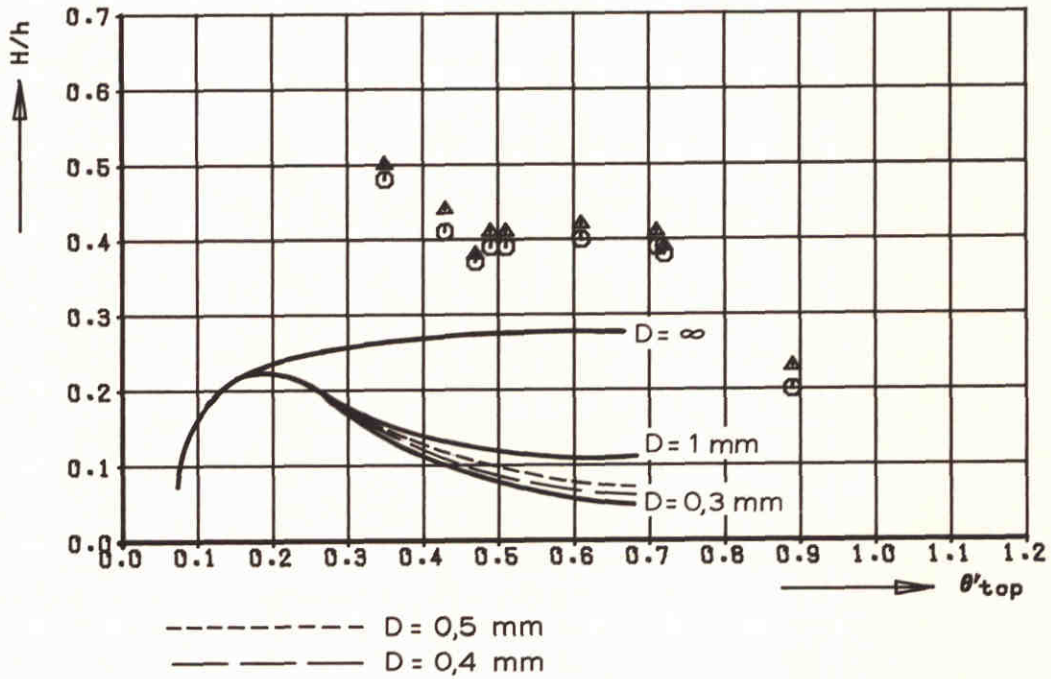
CONCENTRATIE - EN SNELHEIDSPROFIELEN  
OP DE BEDDINGVORMTOP



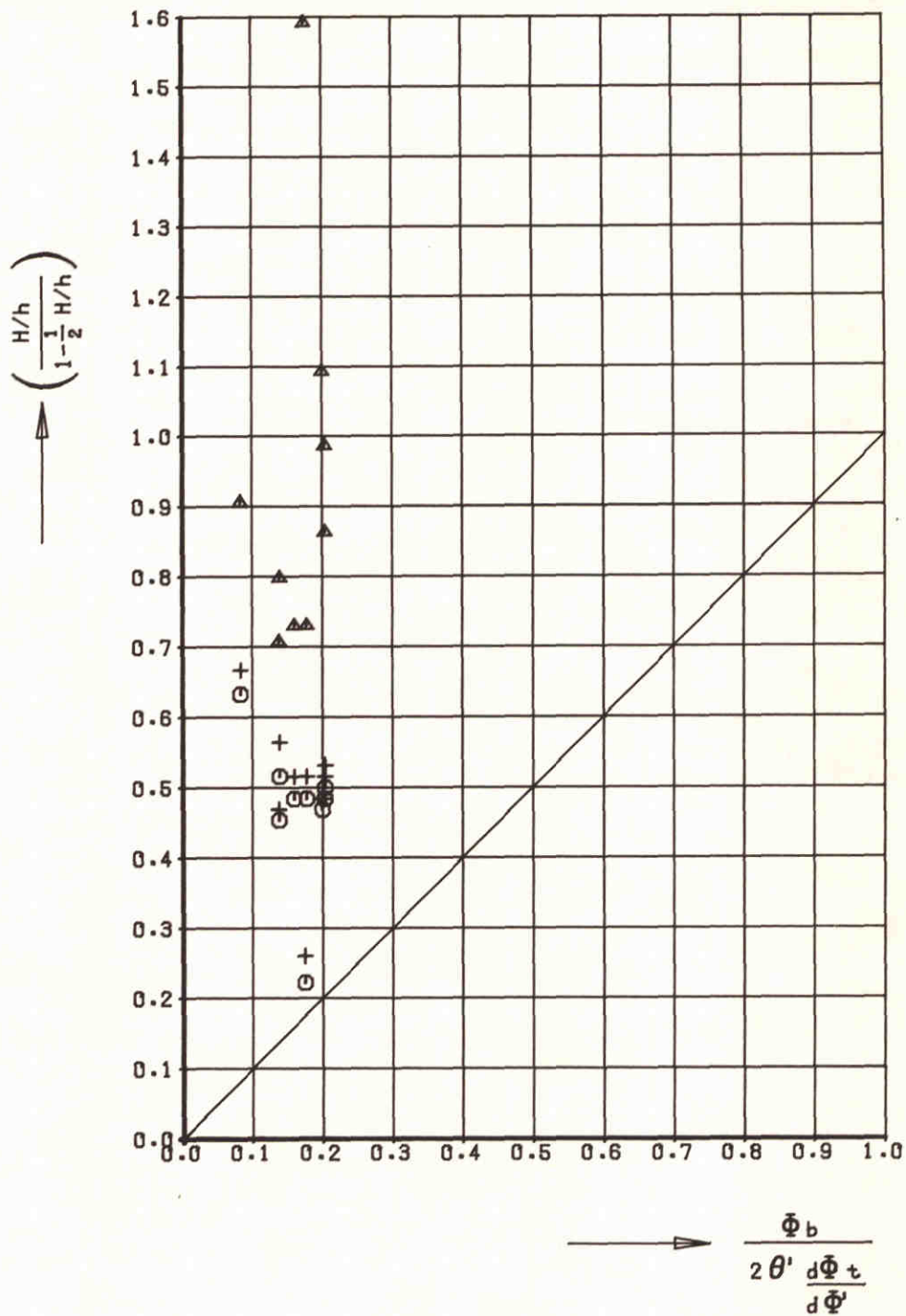
DIMENSIELOOS GEMIDDELD TOTAAL-EN BODEM  
TRANSPORT ALS FUNCTIE VAN DE T-PARAMETER



DIMENSIELOOS GEMIDDELD TOTAAL TRANSPORT  
ALS FUNCTIE VAN  $\theta$  EN  $\theta'$

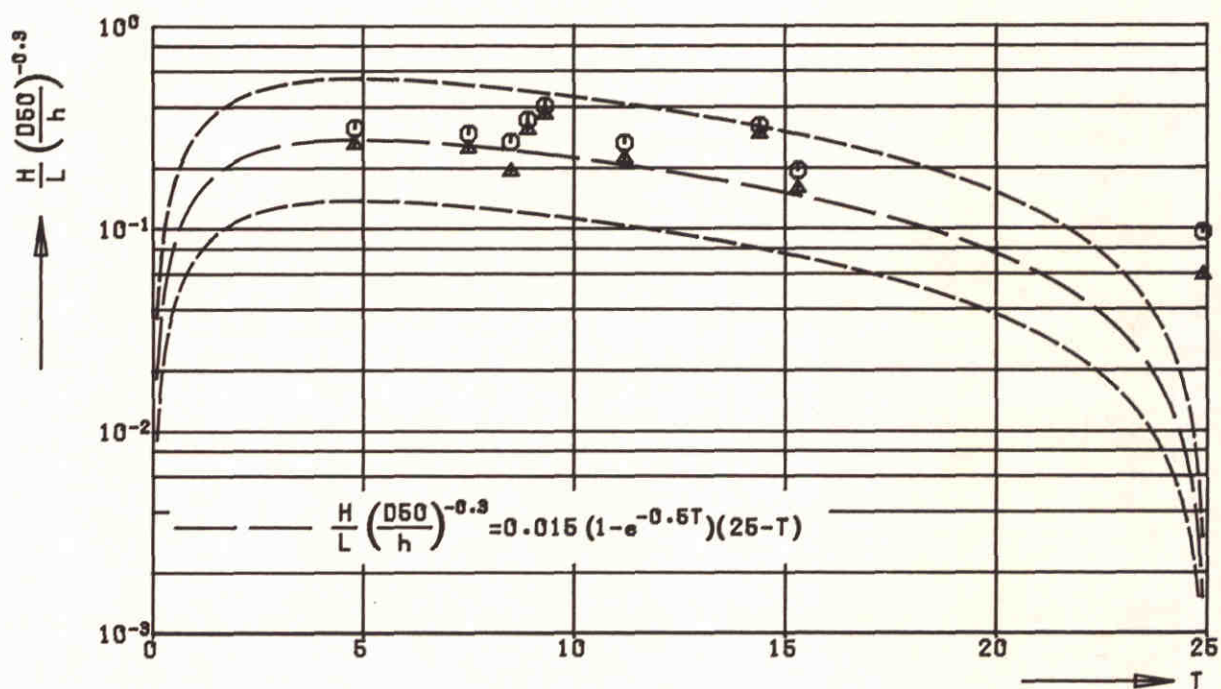
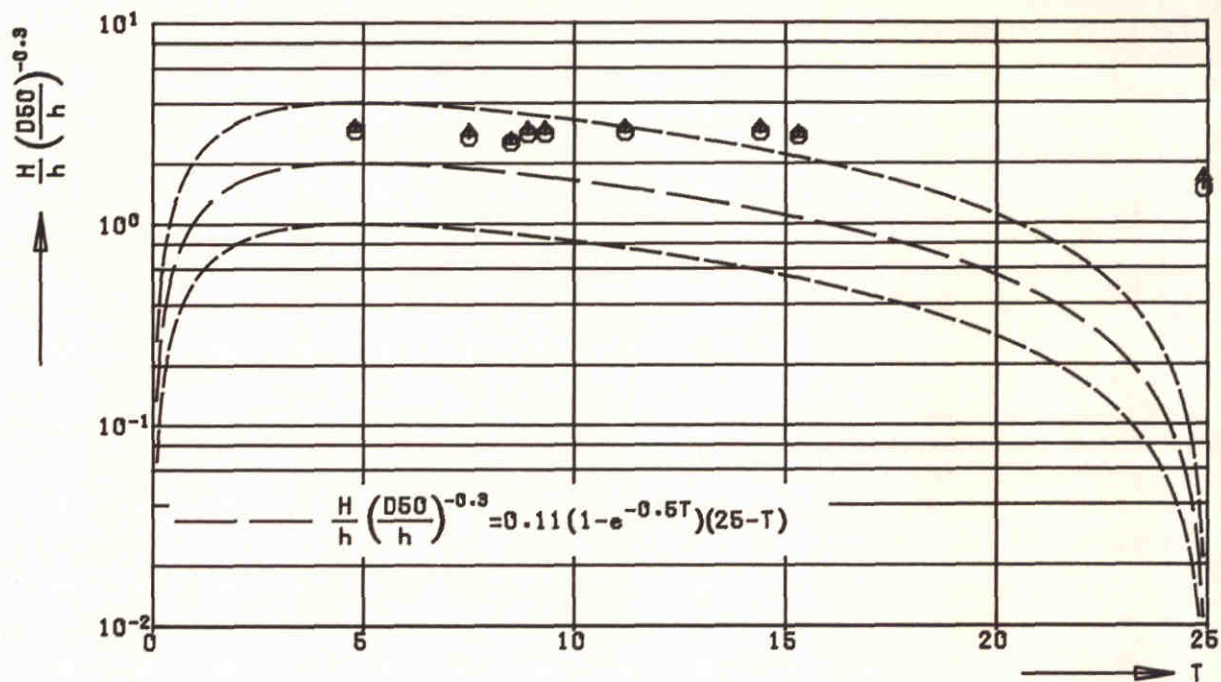


RELATIEVE BEDDINGVORMHOOGTE EN  
STEILHEID VOLGENS FREDSSØE



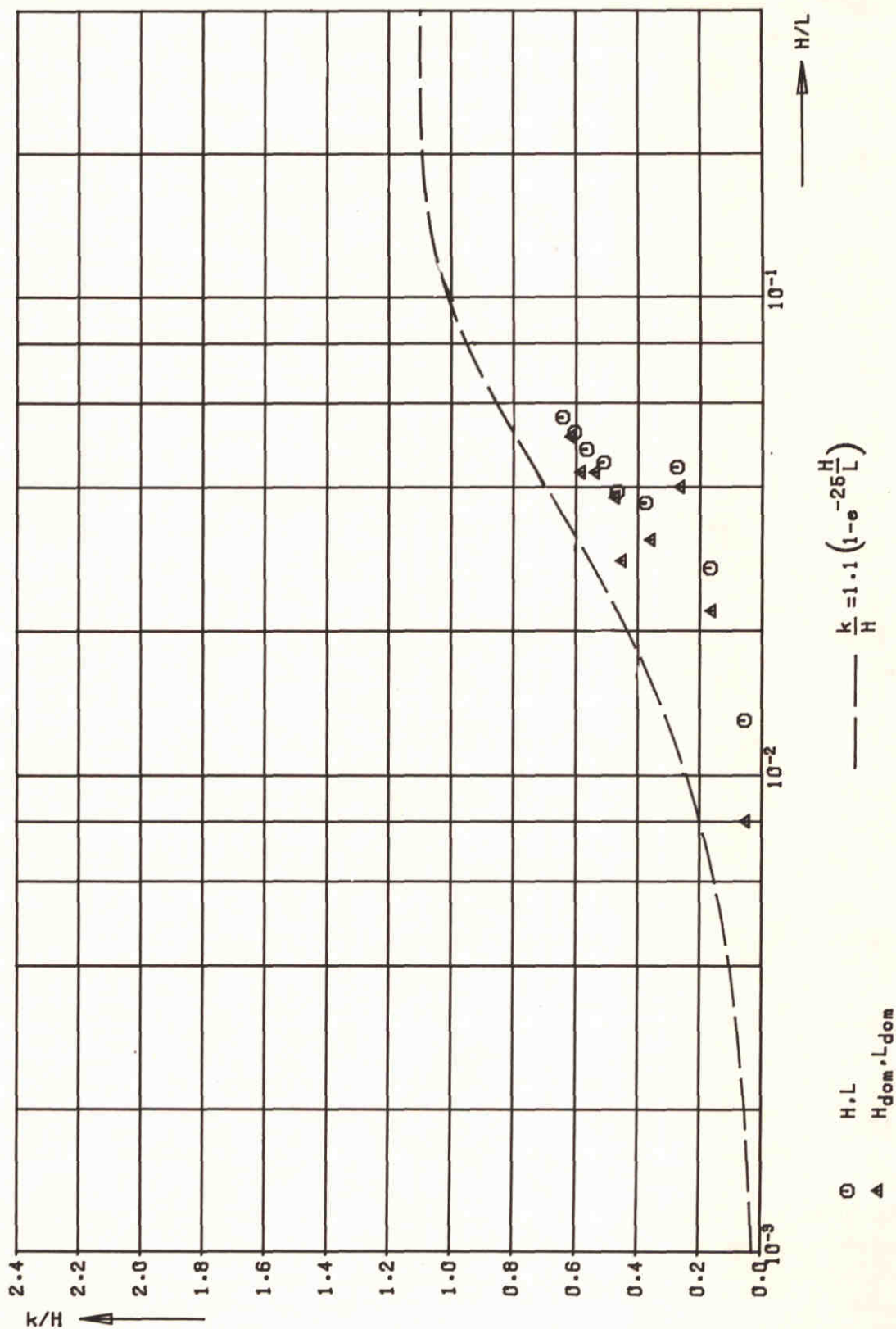
- H.L
- △ H.L en  $\frac{H/h}{1 - FR^2 - \frac{1}{2} H/h}$
- + H<sub>dom</sub>, L<sub>dom</sub>

RELATIEVE BEDDINGVORMHOOGTE VOLGENS  
 FREDSE GEMETEN GROOTHEDEN



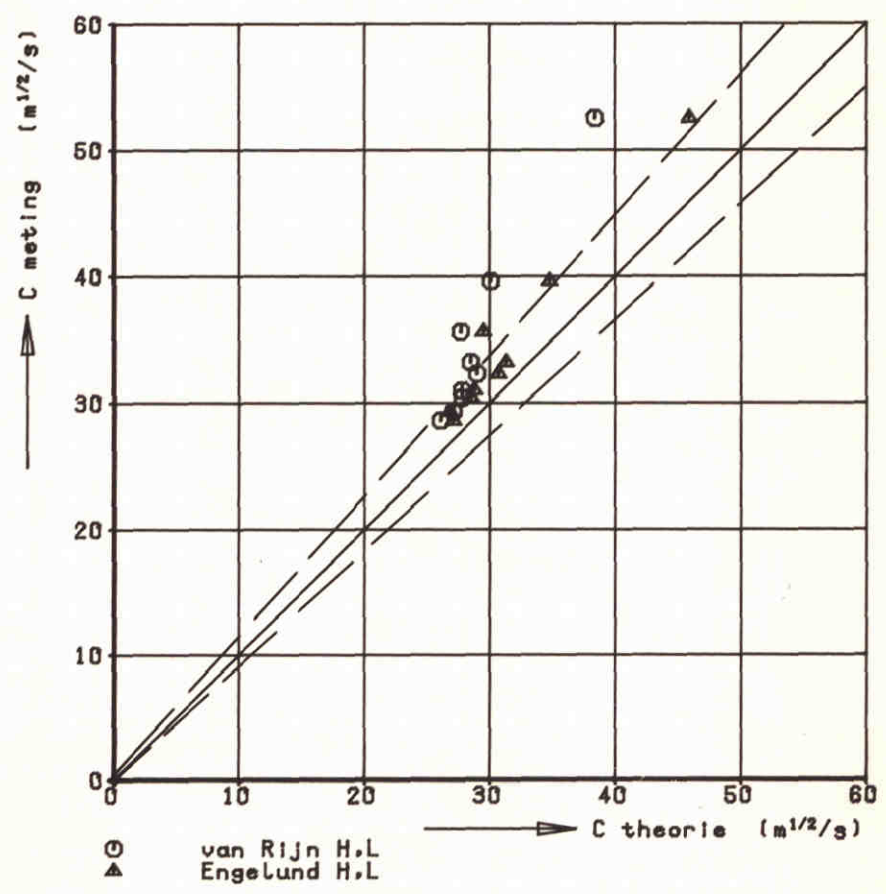
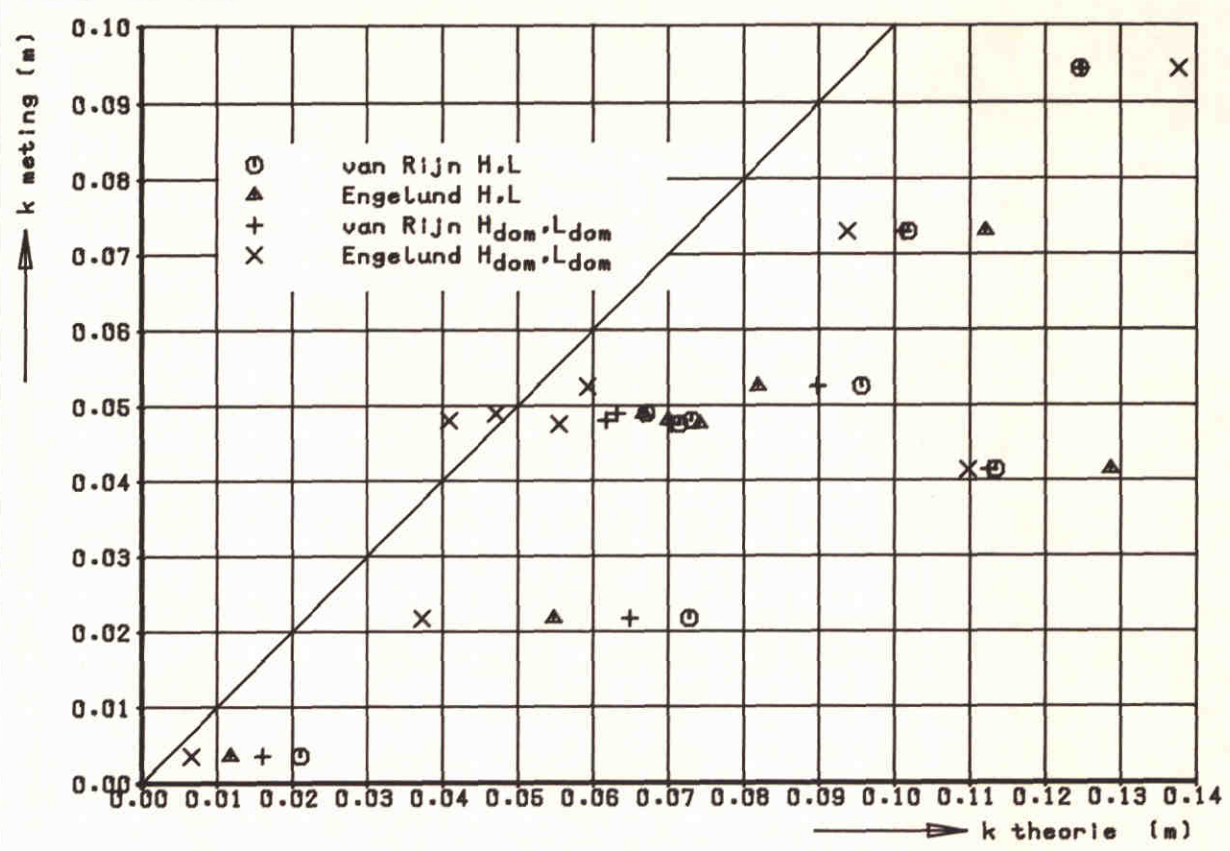
- H, L
- ▲  $H_{dom}, L_{dom}$

BEDDINGVORMHOOGTE EN - STEILHEID  
VOLGENS VAN RIJN (1982, b)

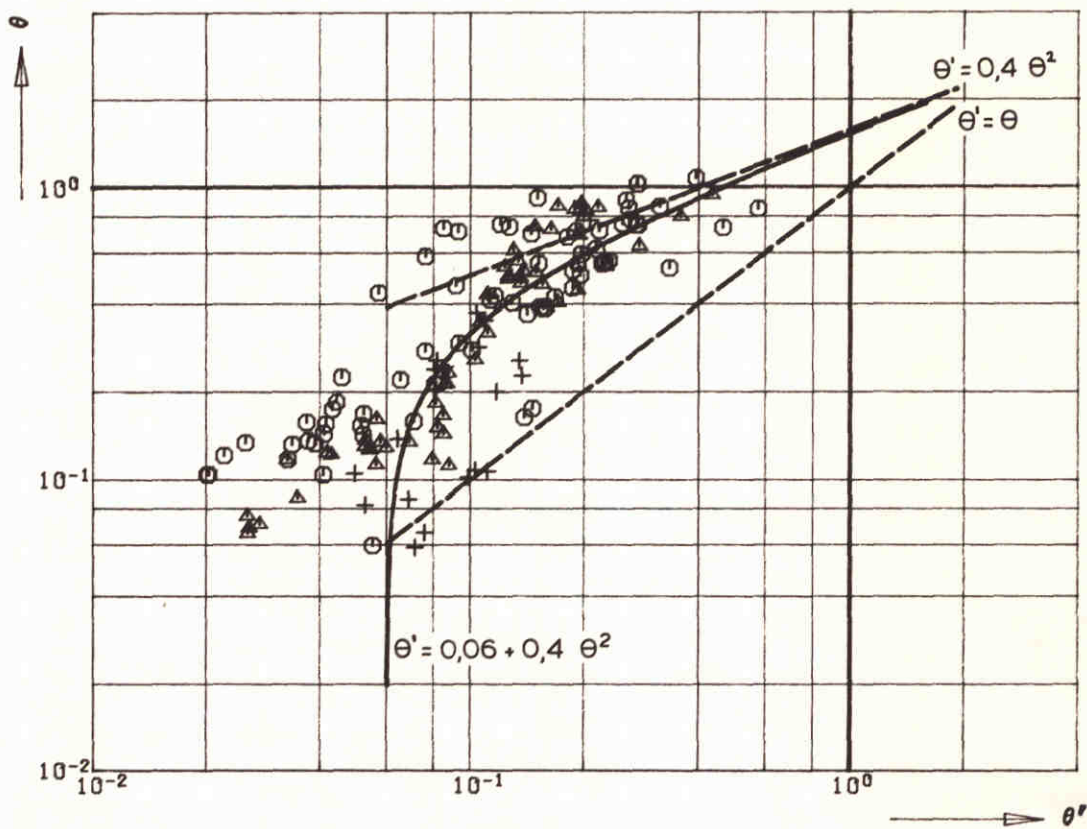
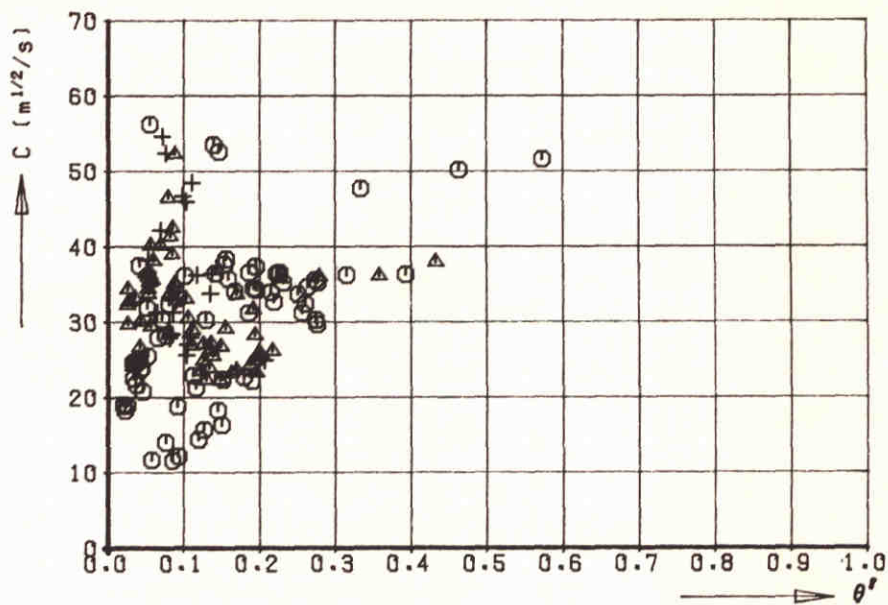


EQUIVALENTE RUWHEID ALS FUNKTIE VAN DE STEILHEID VAN BEDDINGVORMEN





RUWHEIDSHOOGTE EN CHEZY-COEFFICIENT  
 GEMETEN EN VOLGENS VAN RIJN EN ENGELUND



- $0.20 < D_{50} < 0.40$
- ▲  $0.40 < D_{50} < 0.60$
- +  $0.60 < D_{50} < 0.85$

diameters in mm

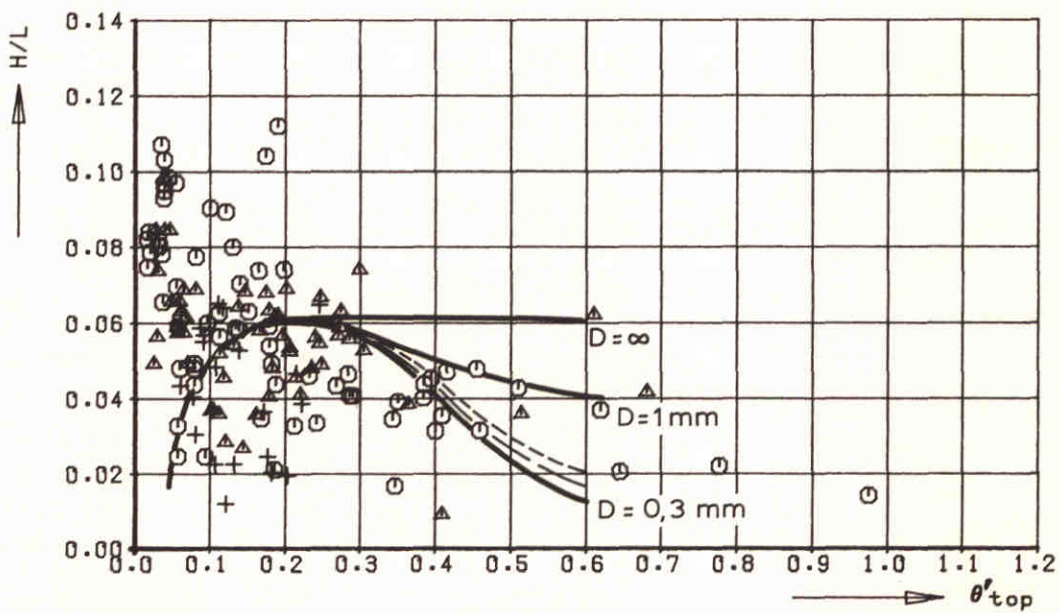
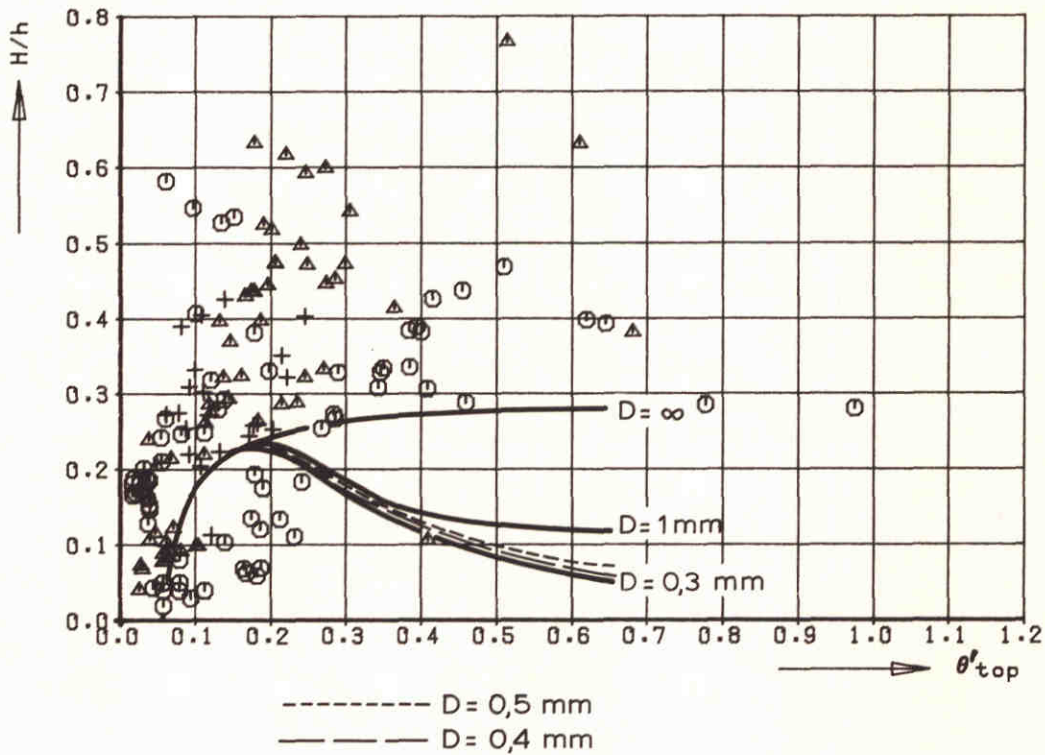
STROMINGSWEERSTAND ALS FUNKTIE VAN  
DE KORRELWEERSTAND

S6-GOTEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 21



- 0.20 < D50 < 0.40
- △ 0.40 < D50 < 0.60
- + 0.60 < D50 < 0.85

diameters in mm

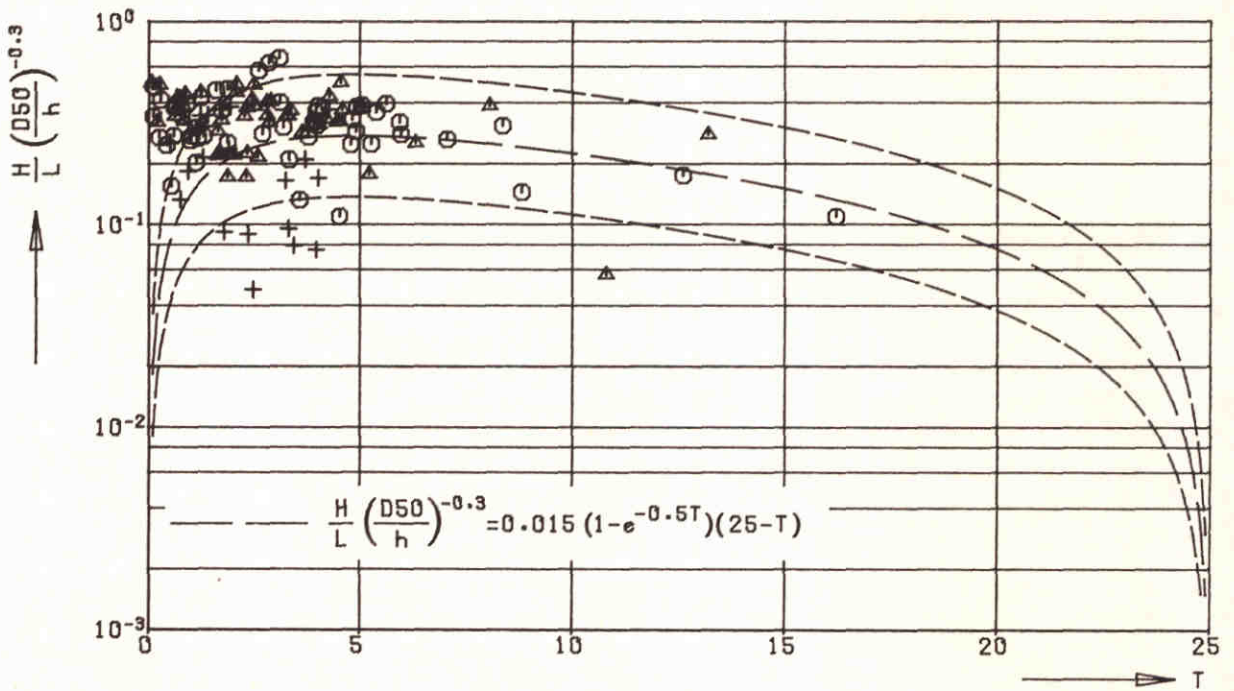
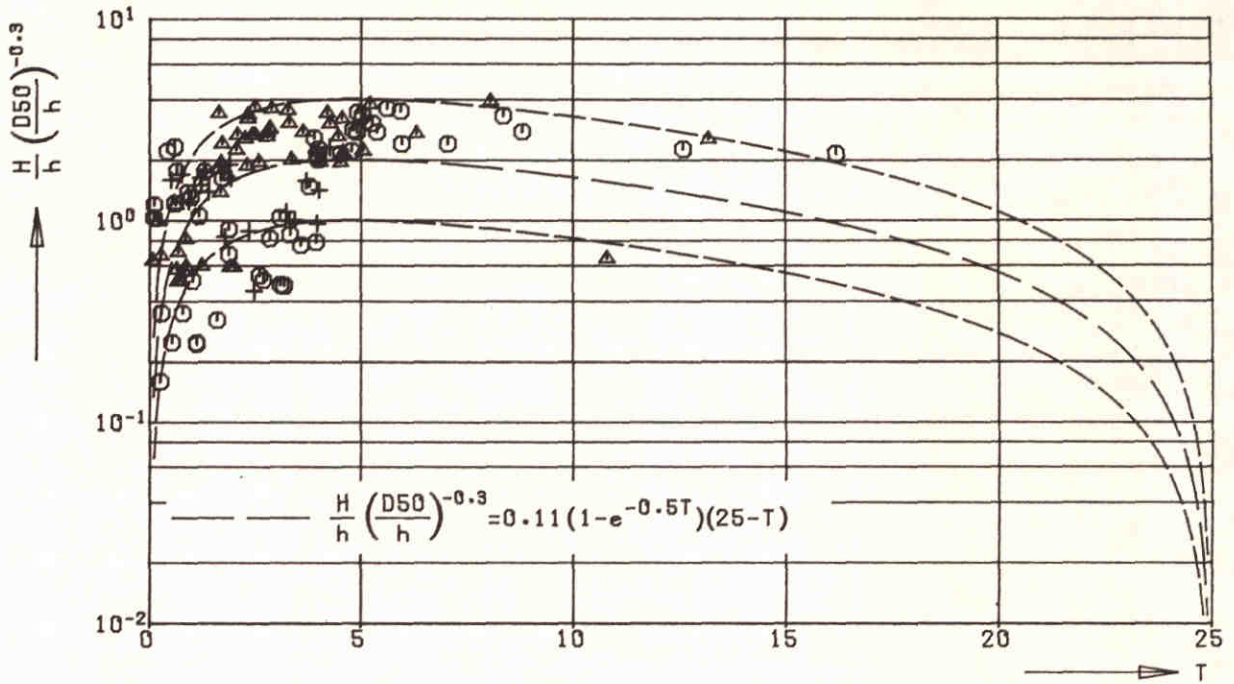
RELATIEVE BEDDINGVORMHOOGTE EN  
STEILHEID VOLGENS FREDSE

S6-GOTEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 22



- $0.20 < D50 < 0.40$
- △  $0.40 < D50 < 0.60$
- +  $0.60 < D50 < 0.85$

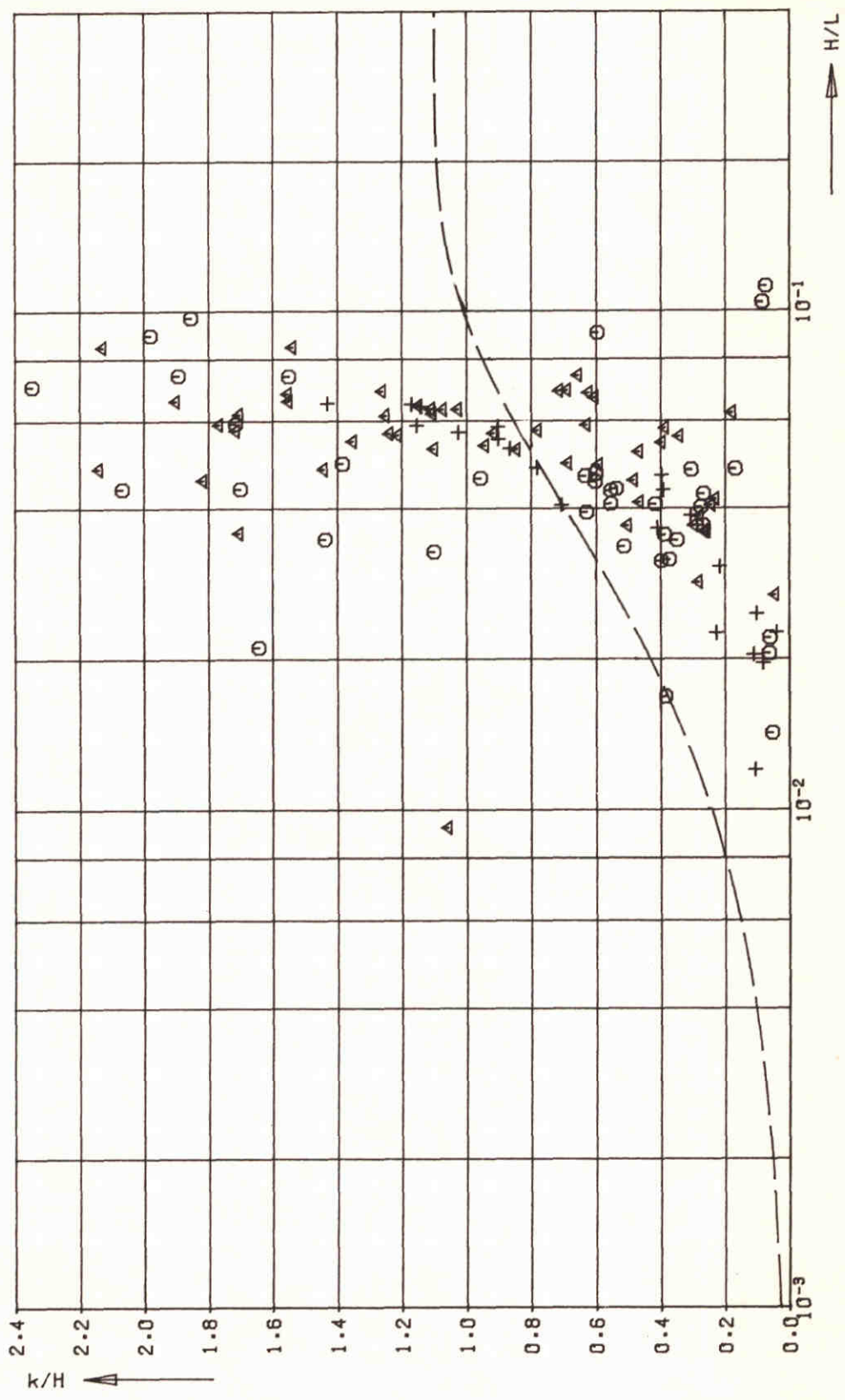
BEDDINGVORMHOOGTE EN - STEILHEID  
VOLGENS VAN RIJN (1982, b)

S6-GOTEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 23



$$k/H = 1.1 (1 - e^{-25 H/L})$$

- 0.20 < D50 < 0.40
- △ 0.40 < D50 < 0.60
- + 0.60 < D50 < 0.85

diameters in mm

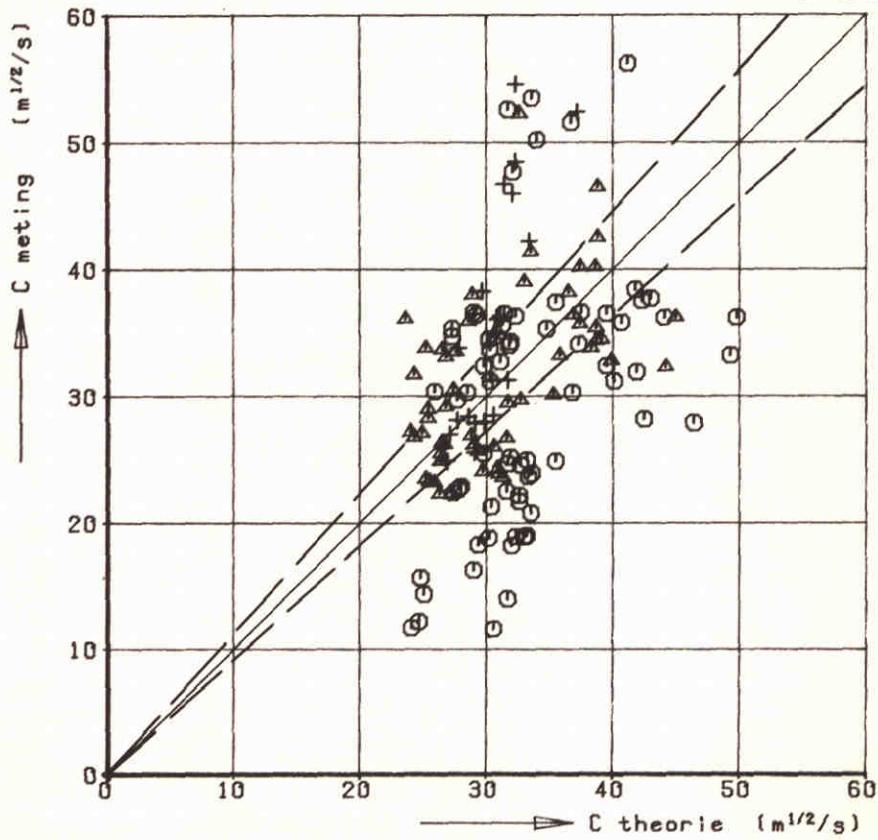
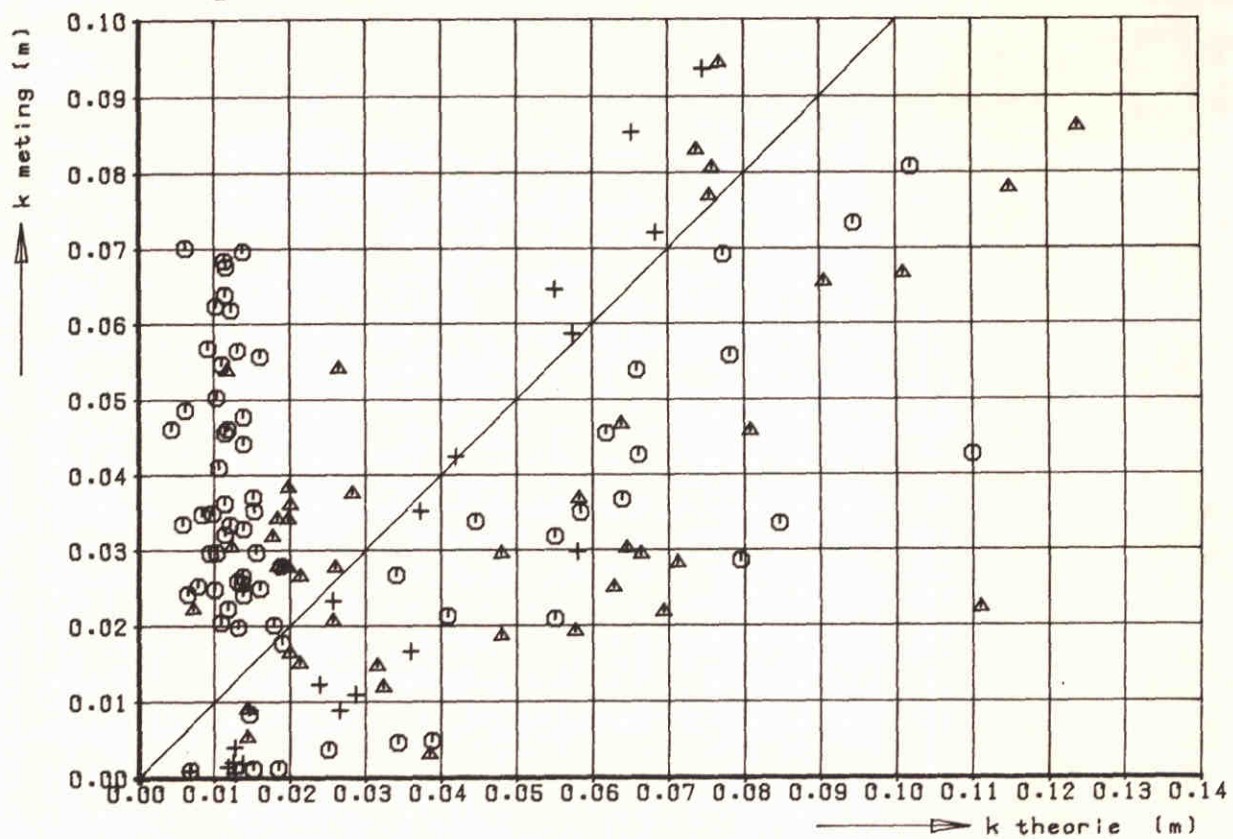
EQUIVALENTE RUWHEID ALS FUNKTIE VAN DE STEILHEID VAN BEDDINGVORMEN

S6-GOTEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 24



- 0.20 < D50 < 0.40
- △ 0.40 < D50 < 0.60
- + 0.60 < D50 < 0.85

diameters in mm

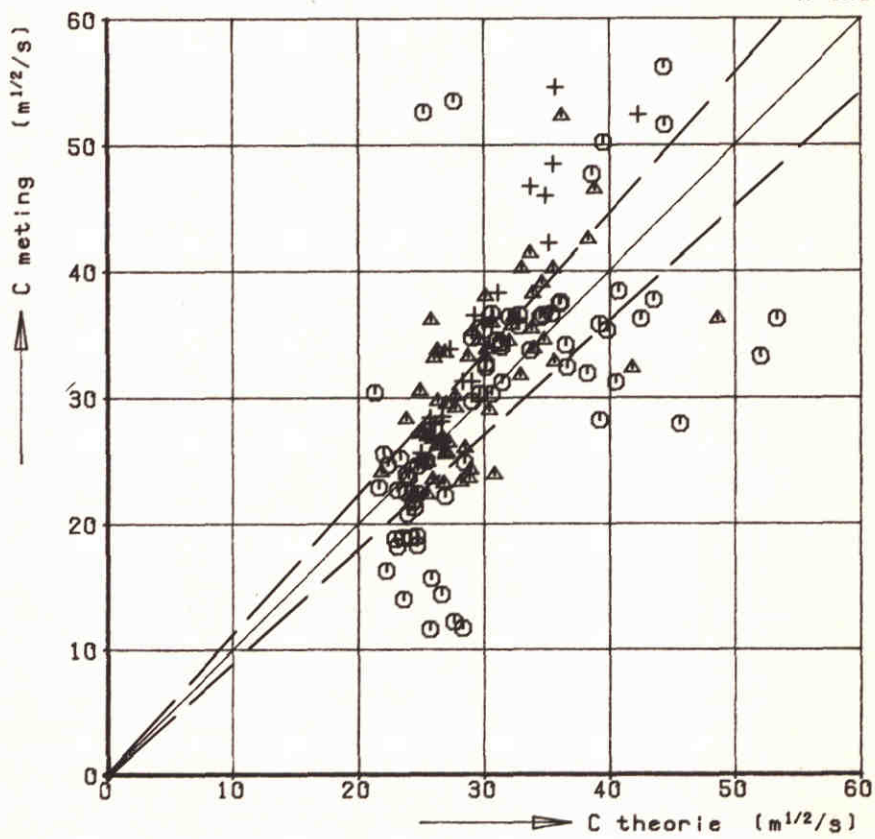
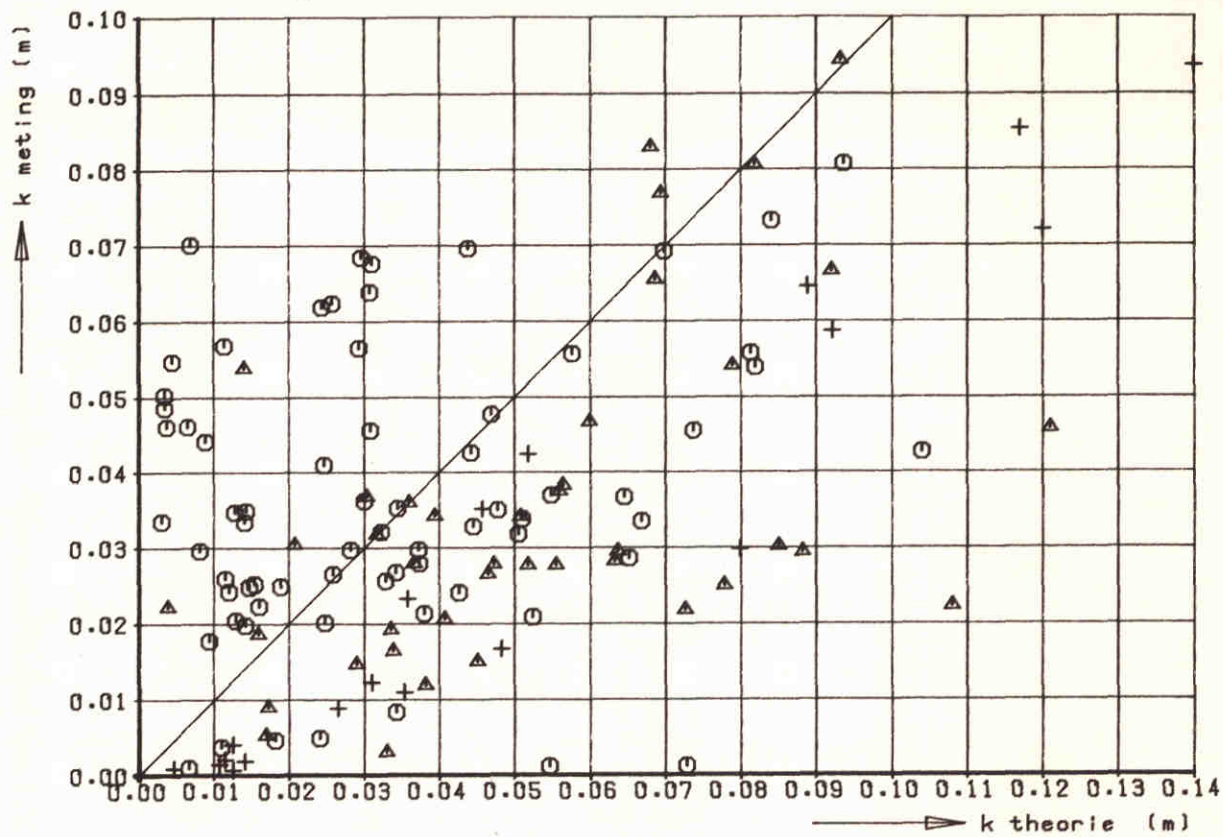
RUWHEIDSHOOGTE EN CHEZY-COEFFICIENT  
GEMETEN EN VOLGENS VAN RIJN

S6-GOTEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 25-A



○ 0.20 < D50 < 0.40  
 △ 0.40 < D50 < 0.60  
 + 0.60 < D50 < 0.85

diameters in mm

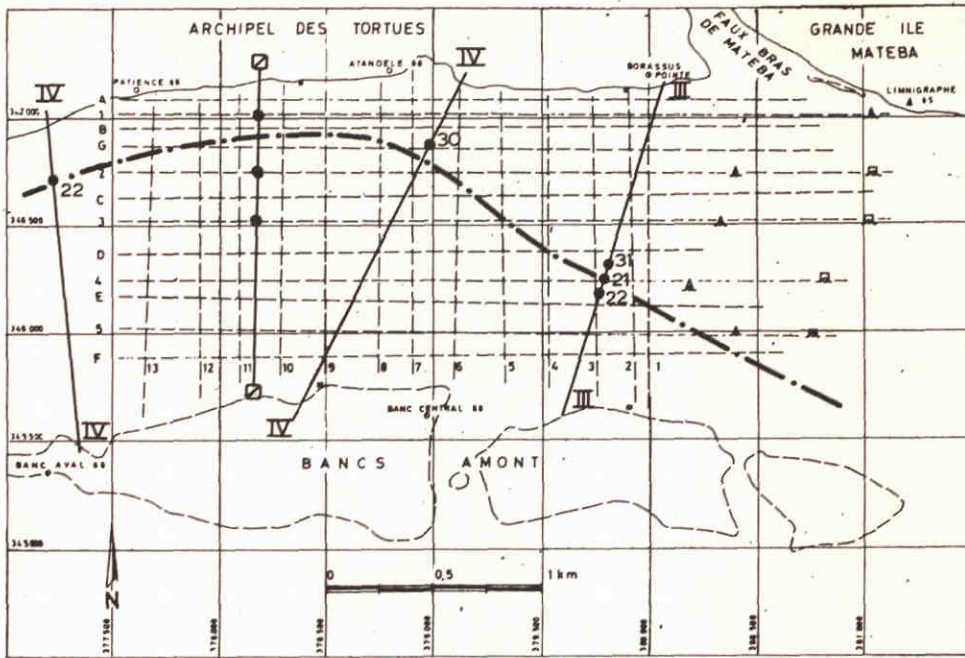
RUWHEIDSHOOGTE EN CHEZY-COEFFICIENT  
GEMETEN EN VOLGENS ENGELUND

S6-GOTEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 25-B



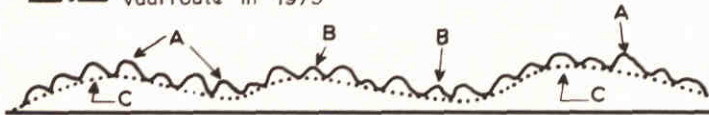
▲, □ : boeien in 1968

□ meetraai snelheden in 1968

III meetraaien snelheden in 1975

IV meetraaien snelheden in 1975

—•—•— vaarroute in 1975

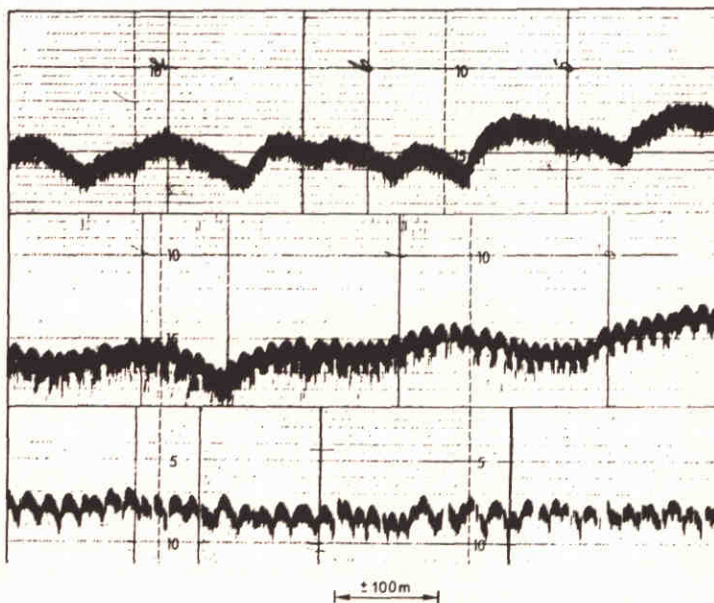


A = steile beddingvorm

B = kleine beddingvorm

C = grote beddingvorm

BEDDINGVORM TYPEN



$Q = 19.000 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q = 23.500 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q = 26.500 \text{ m}^3/\text{s}$

± 100m

uit: Peters (1978)

MEETRAAIEN MATEBA AMONT EN VOORBEELDEN  
BODEMVORMEN BIJ VERSCHILLENDE AFVOEREN

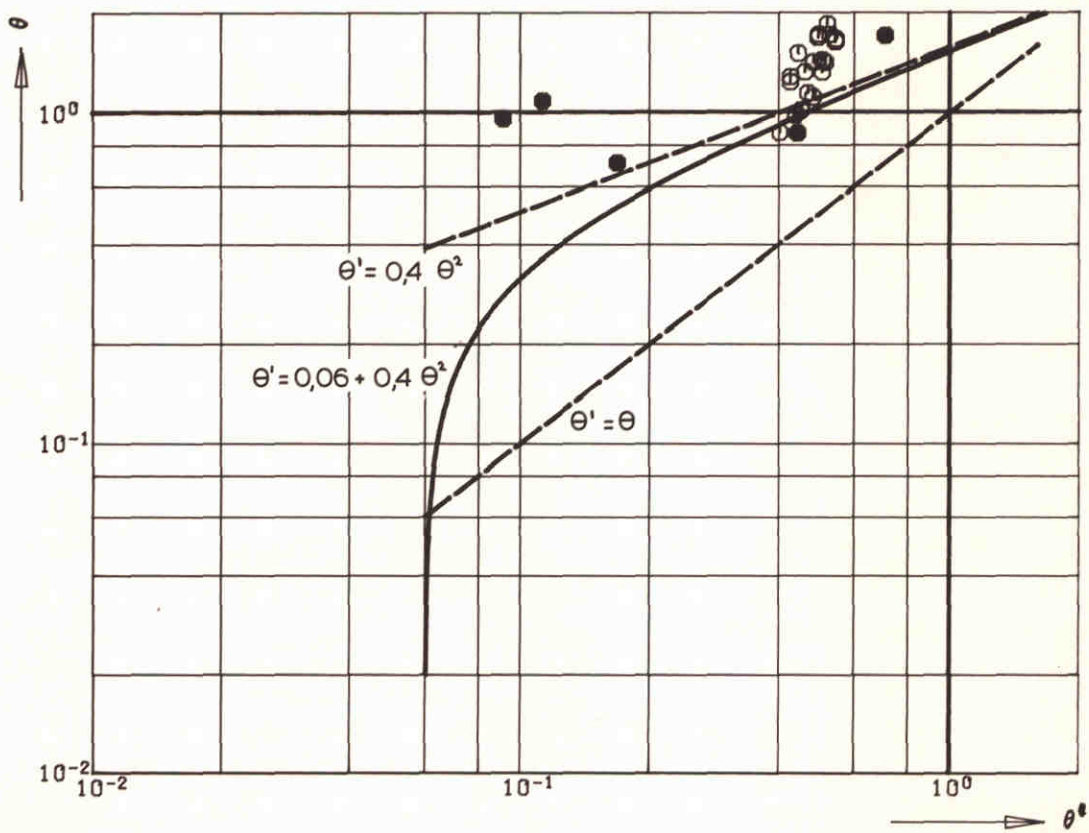
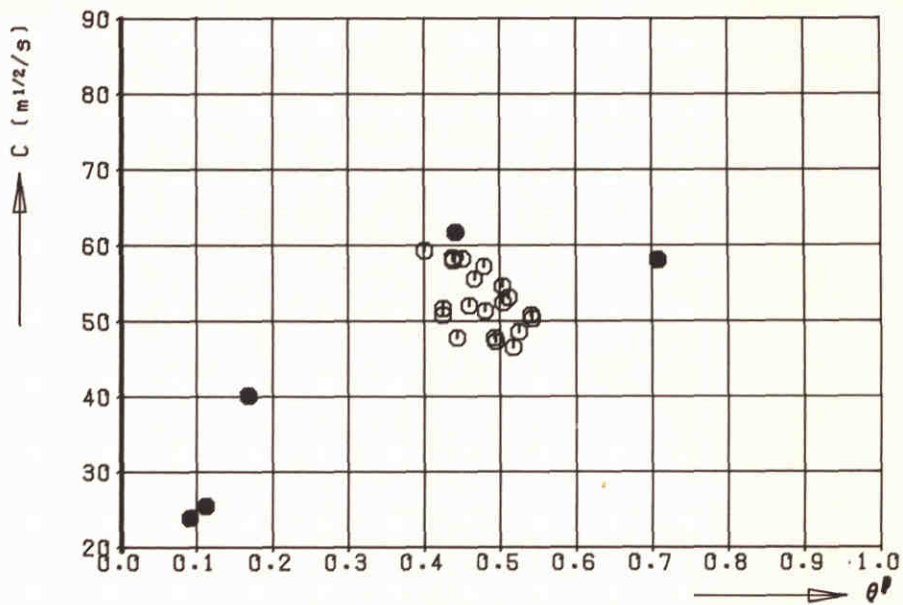
ZAÏRE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

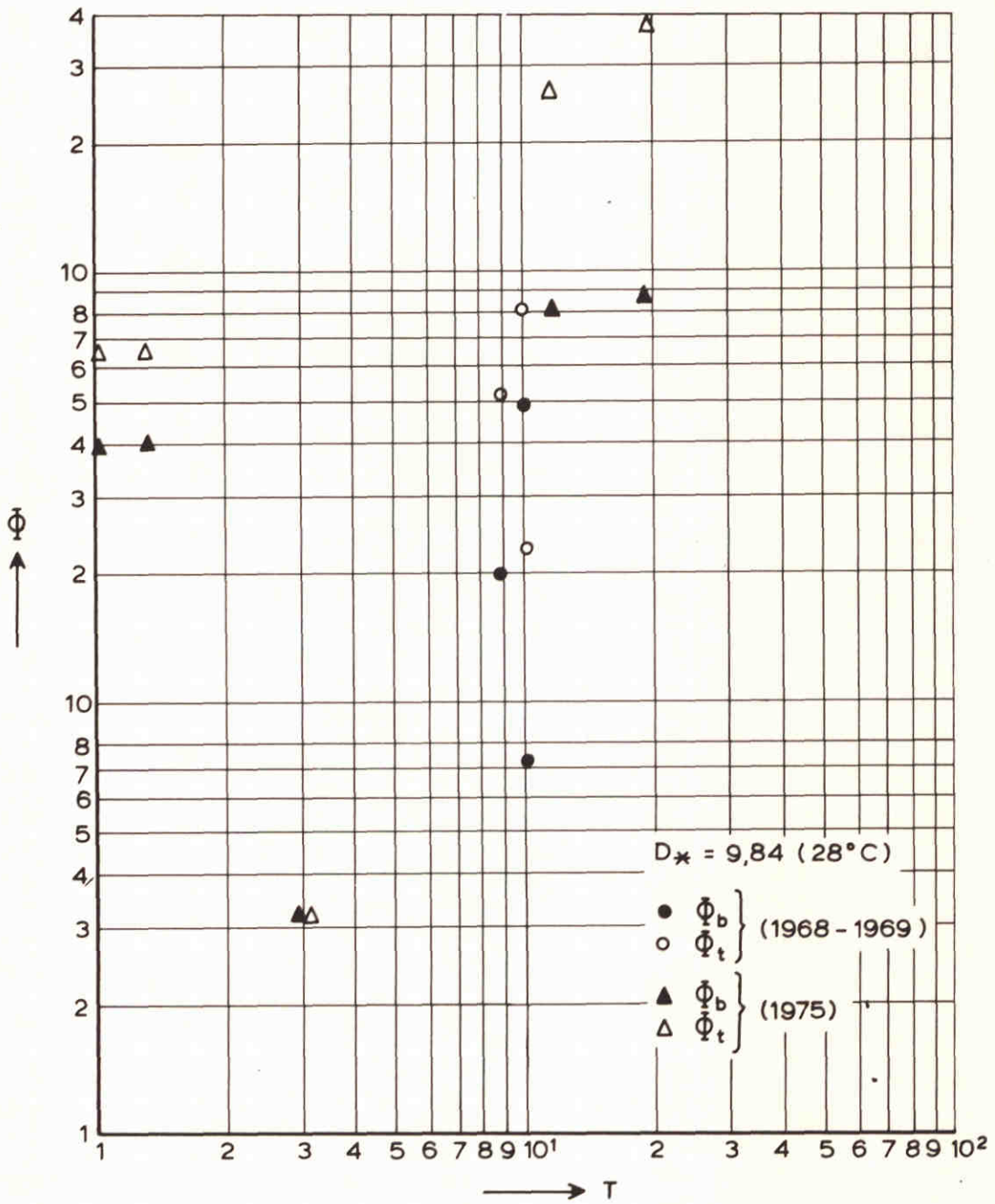
FIG. 26



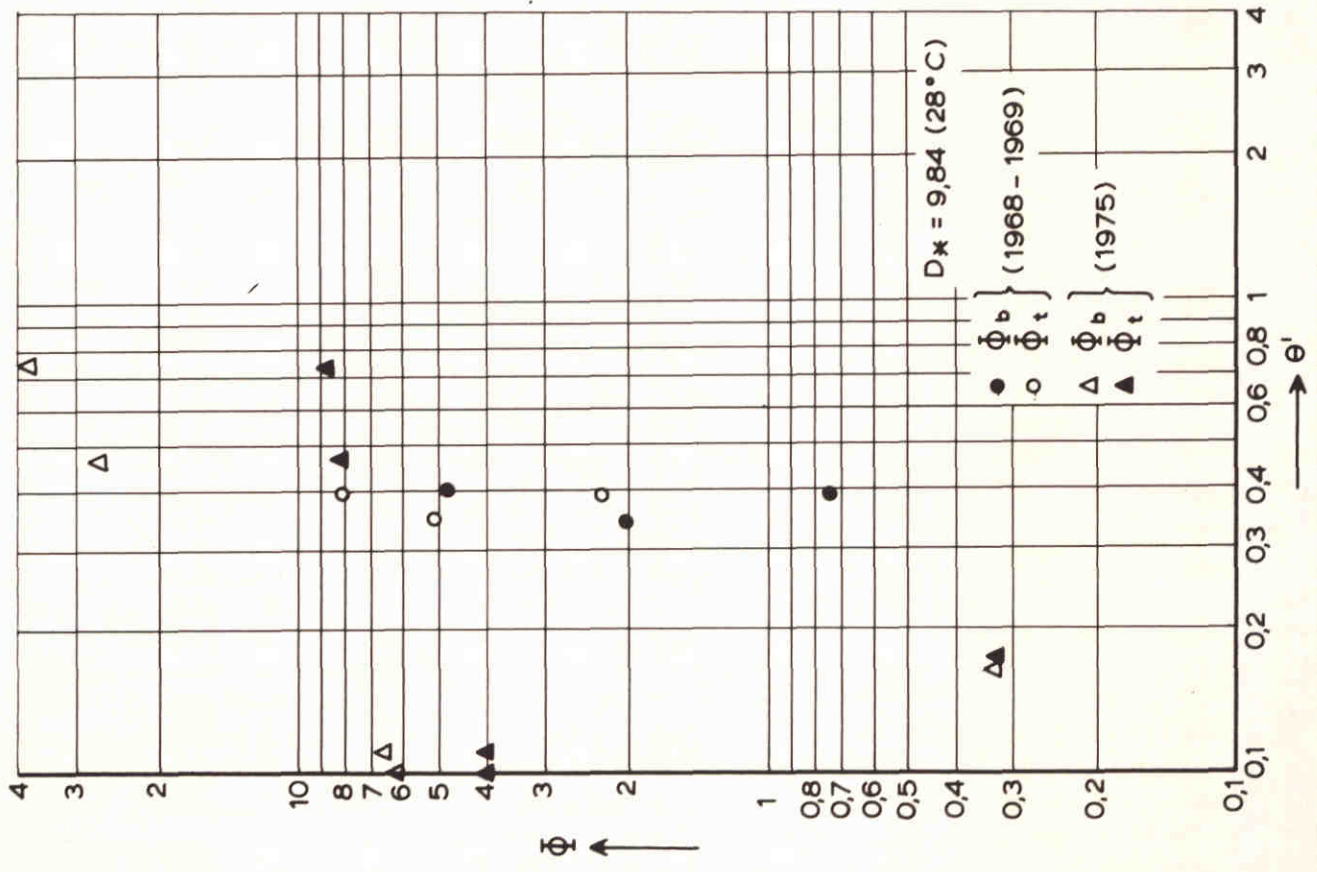
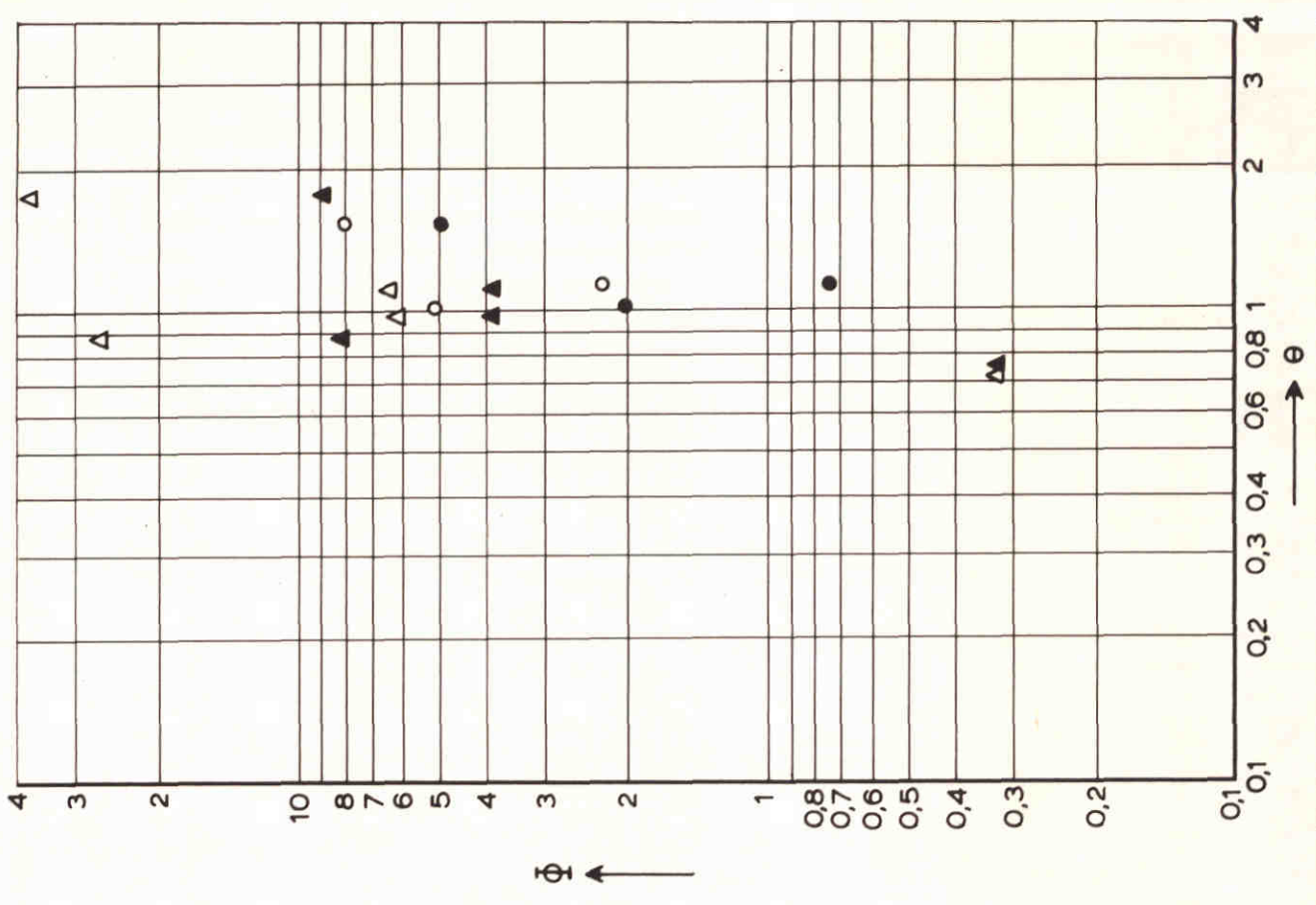


- Zaire 1968-1969
- Zaire 1975

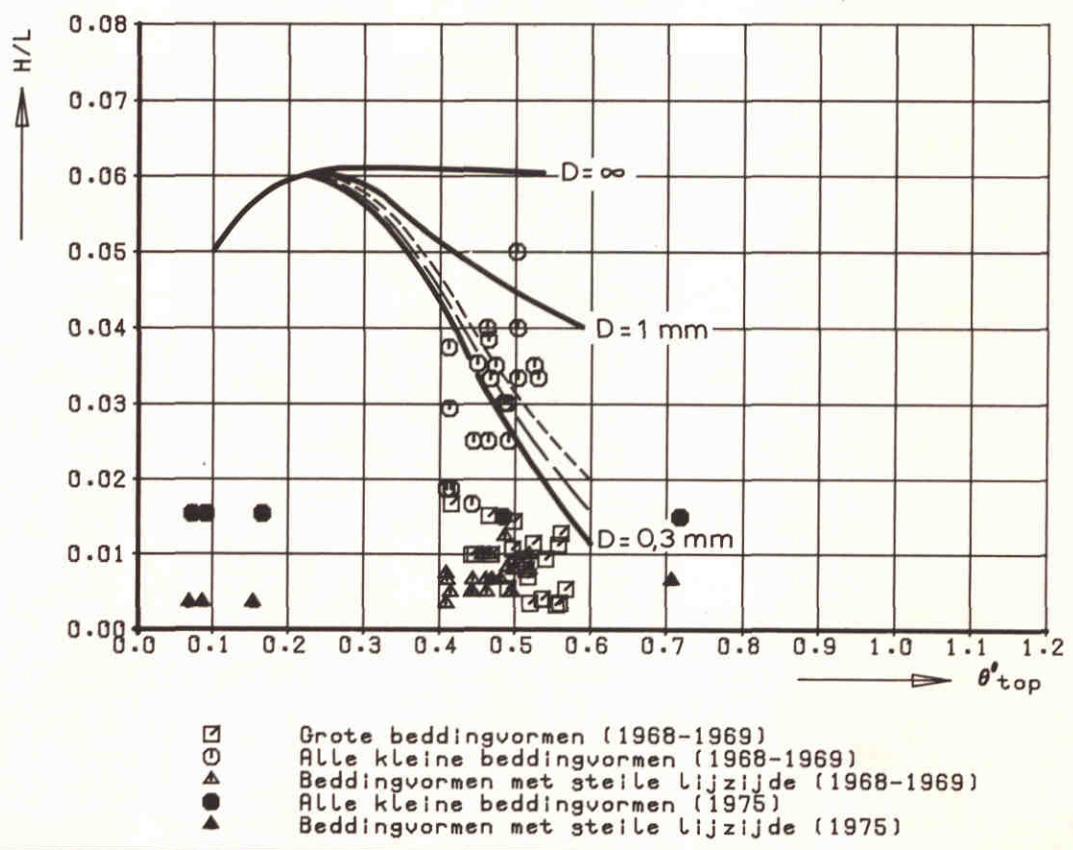
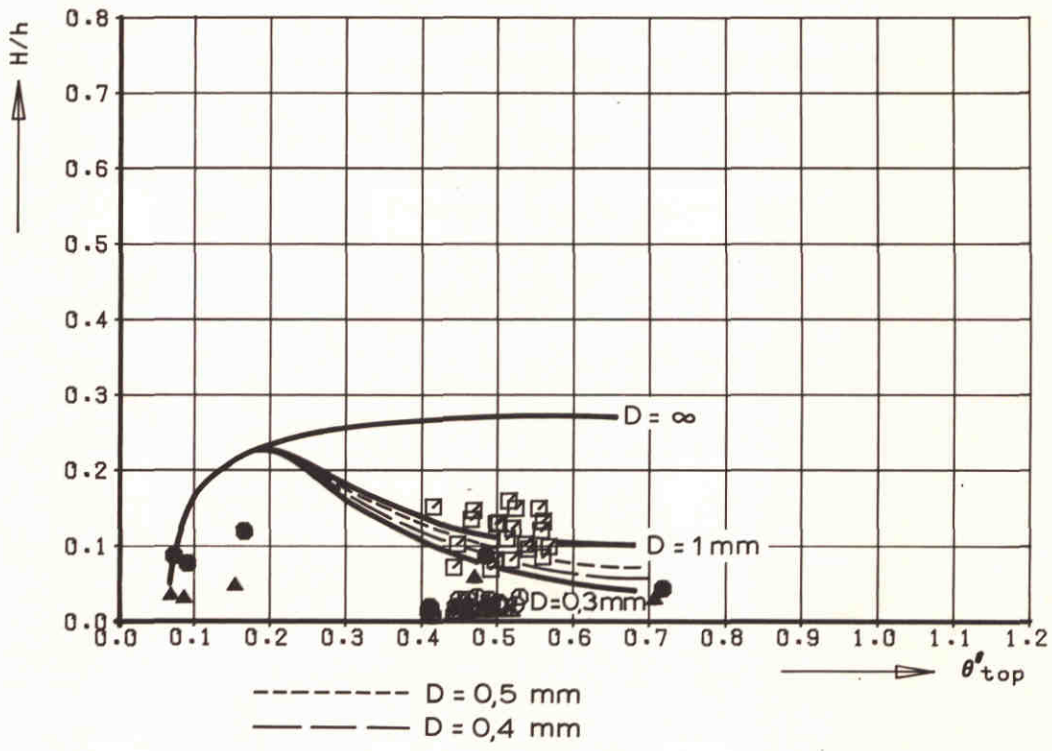
STROMINGSWEERSTAND ALS FUNKTIE VAN  
DE KORRELWEERSTAND , ZAIRE



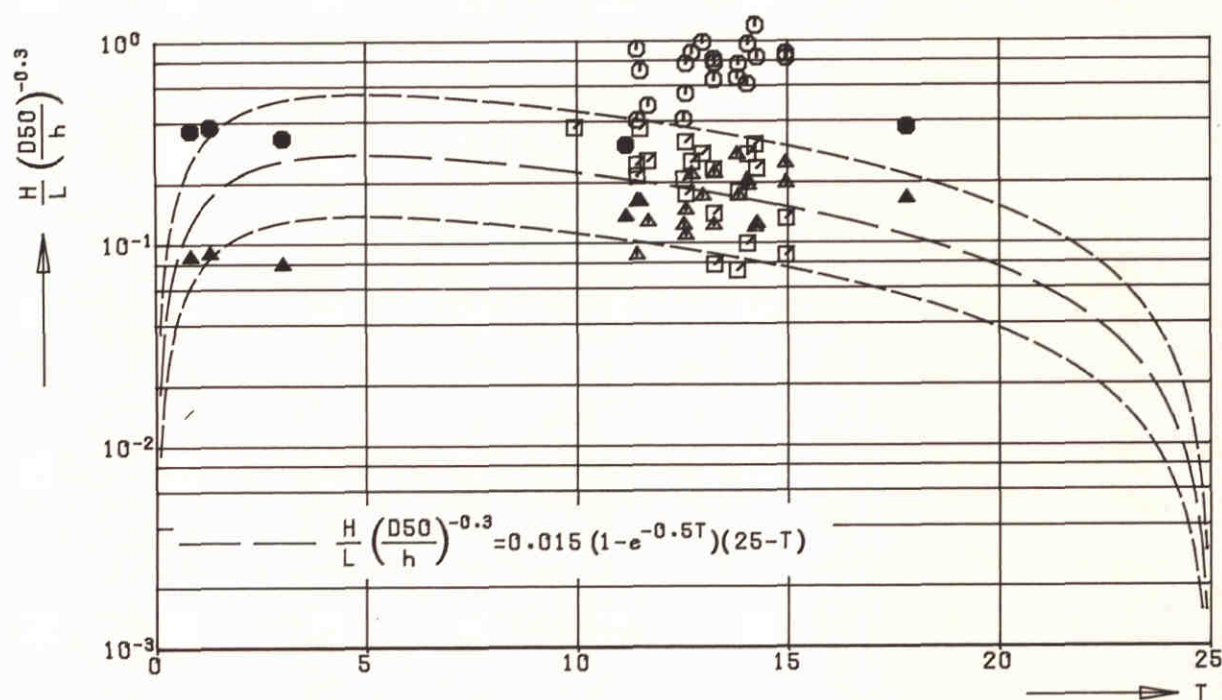
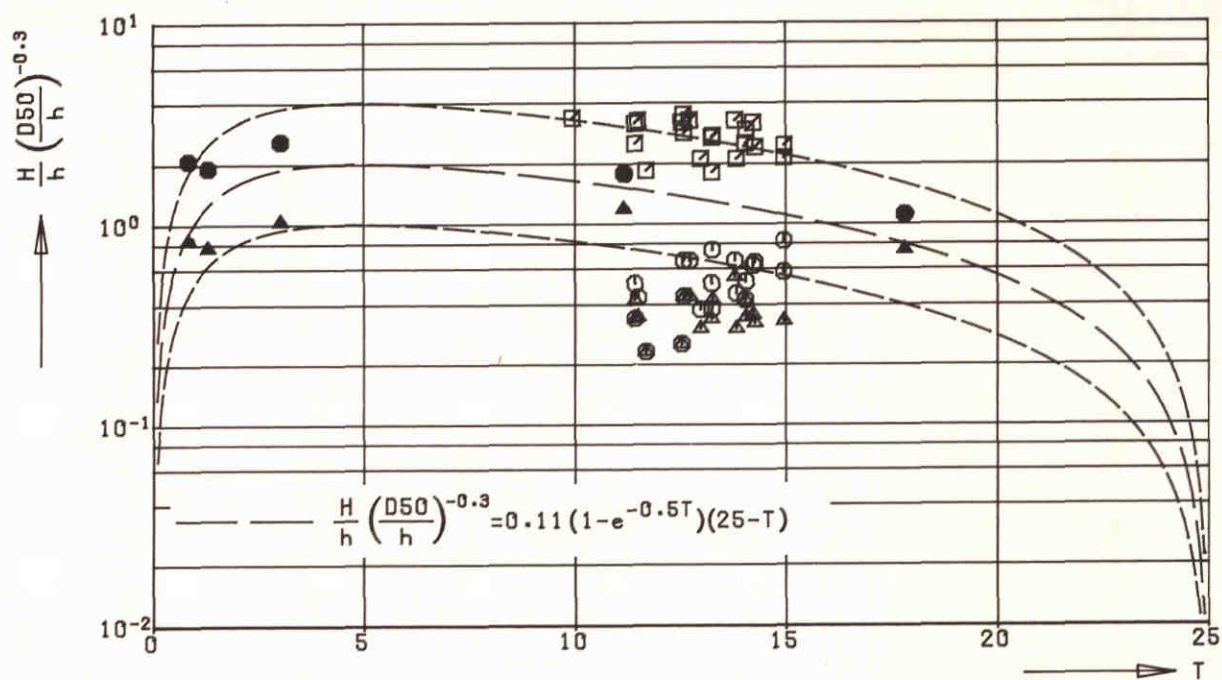
DIMENSIELOOS GEMIDDELD TOTAAL- EN BODEMTRANSPORT ALS FUNKTIE VAN DE T-PARAMETER, ZAÏRE



DIMENSIELOOS GEMIDDELD TOTAAL - EN BODEMTRANSPORT ALS FUNKTIE VAN  $\theta'$  EN  $\theta$ , ZAÏRE



RELATIEVE BEDDINGVORMHOOGTE EN  
 STEILHEID VOLGENS FREDSE, ZAIRE

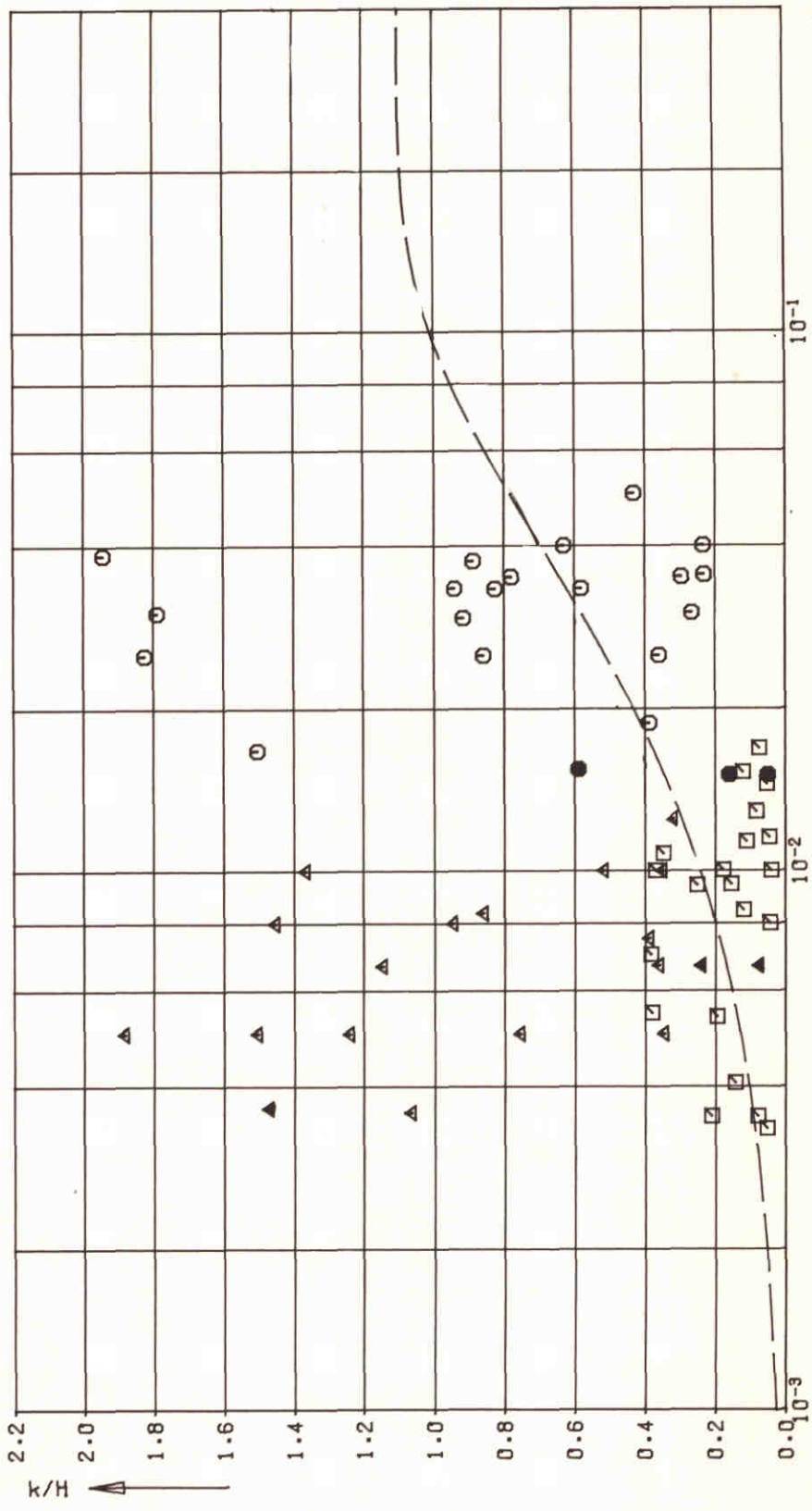


- Grote beddingvormen (1968-1969)
- Alle kleine beddingvormen (1968-1969)
- ▲ Beddingvormen met steile lijzijde (1968-1969)
- Alle kleine beddingvormen (1975)
- ▲ Beddingvormen met steile lijzijde (1975)

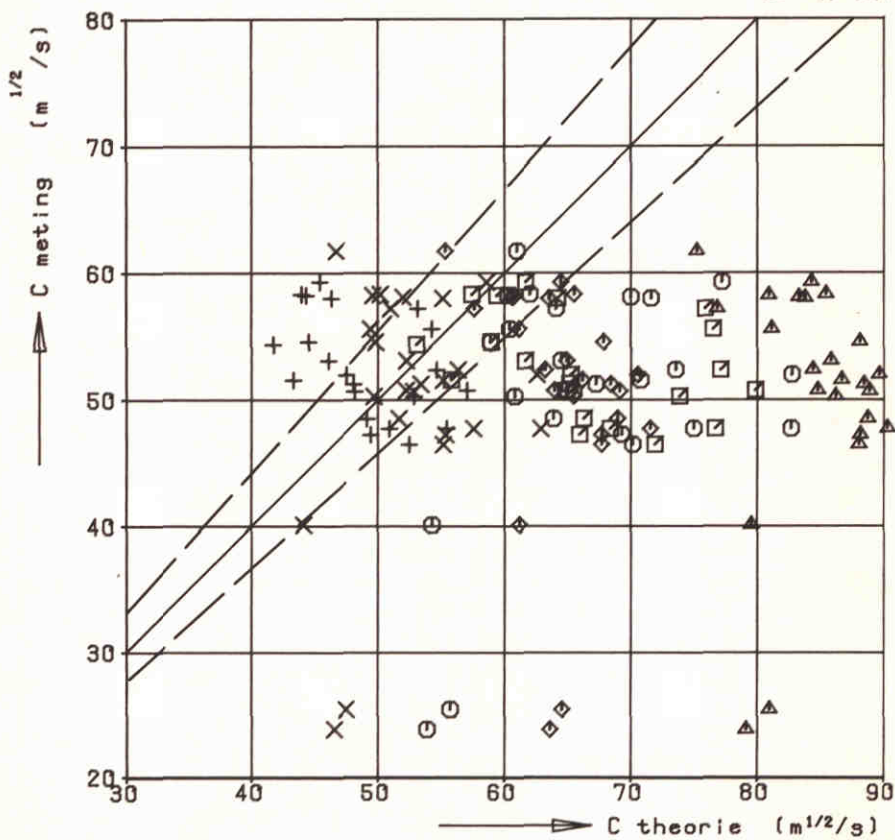
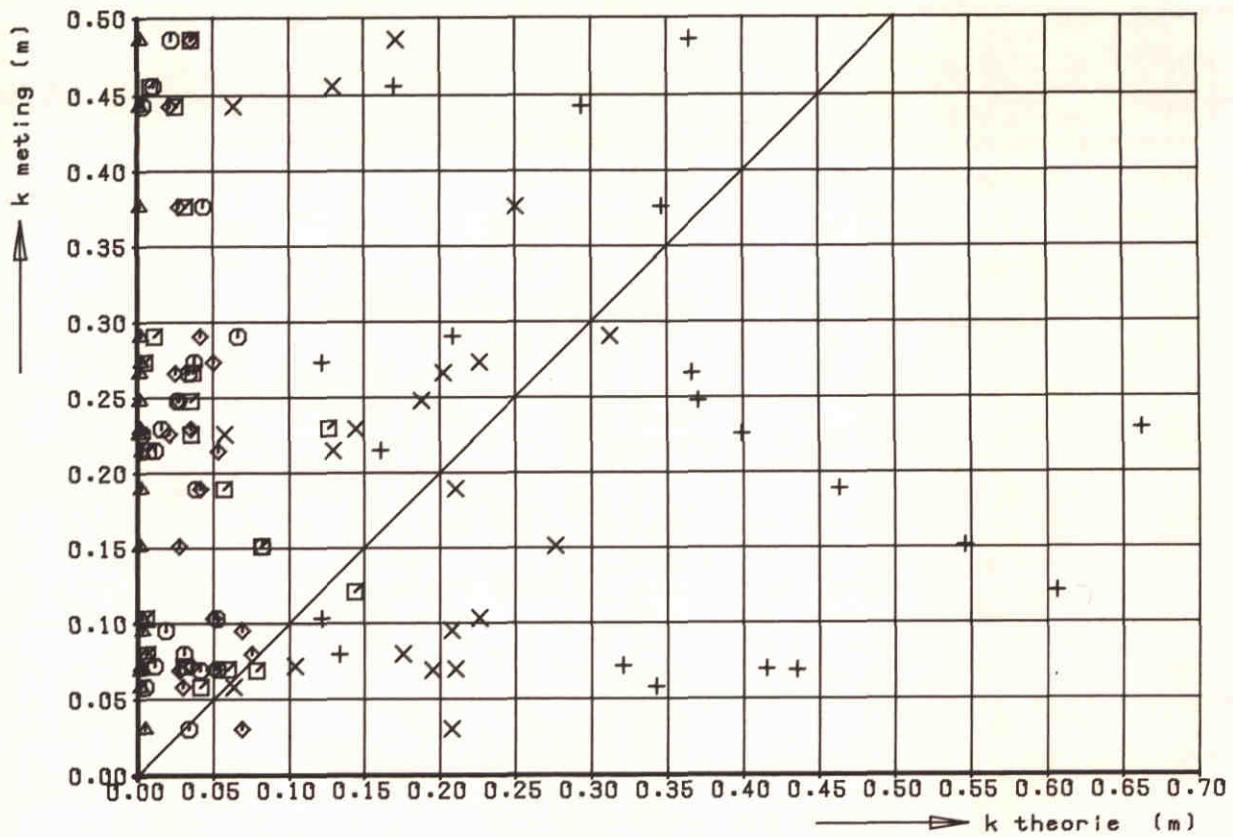
BEDDINGVORMHOOGTE EN - STEILHEID  
VOLGENS VAN RIJN (1982.b), ZAIRE

- ▲ Grote beddingvormen (1968-1969)
- Alle kleine beddingvormen (1968-1969)
- △ Beddingvormen met steile Lijzijde (1968-1969)
- Alle kleine beddingvormen (1975)
- ▲ Beddingvormen met steile Lijzijde (1975)

- 
- 
- △
- 
- ▲

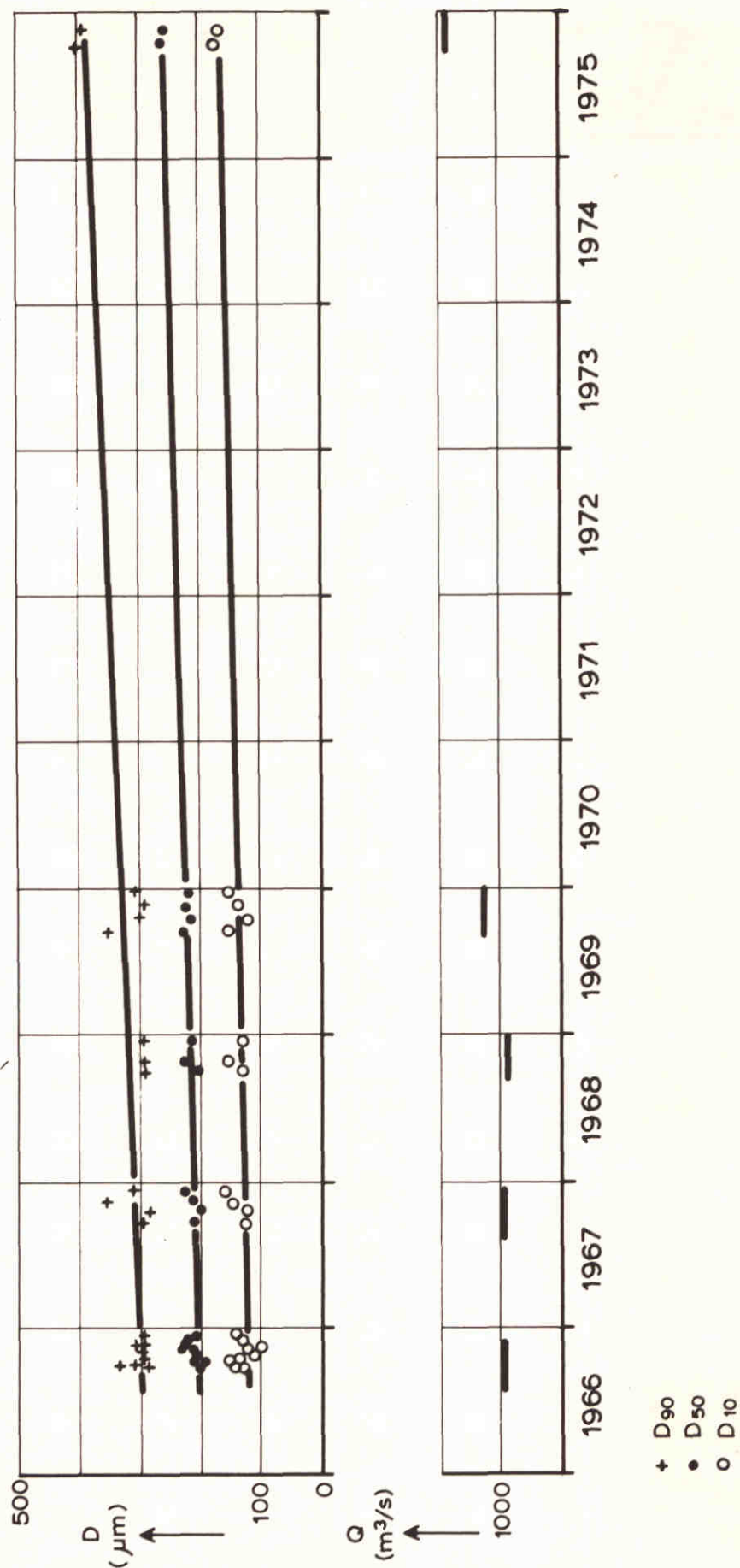


EQUIVALENTE RUWHEID ALS FUNKTIE VAN DE STEILHEID VAN BEDDINGVORMEN , ZAIRE



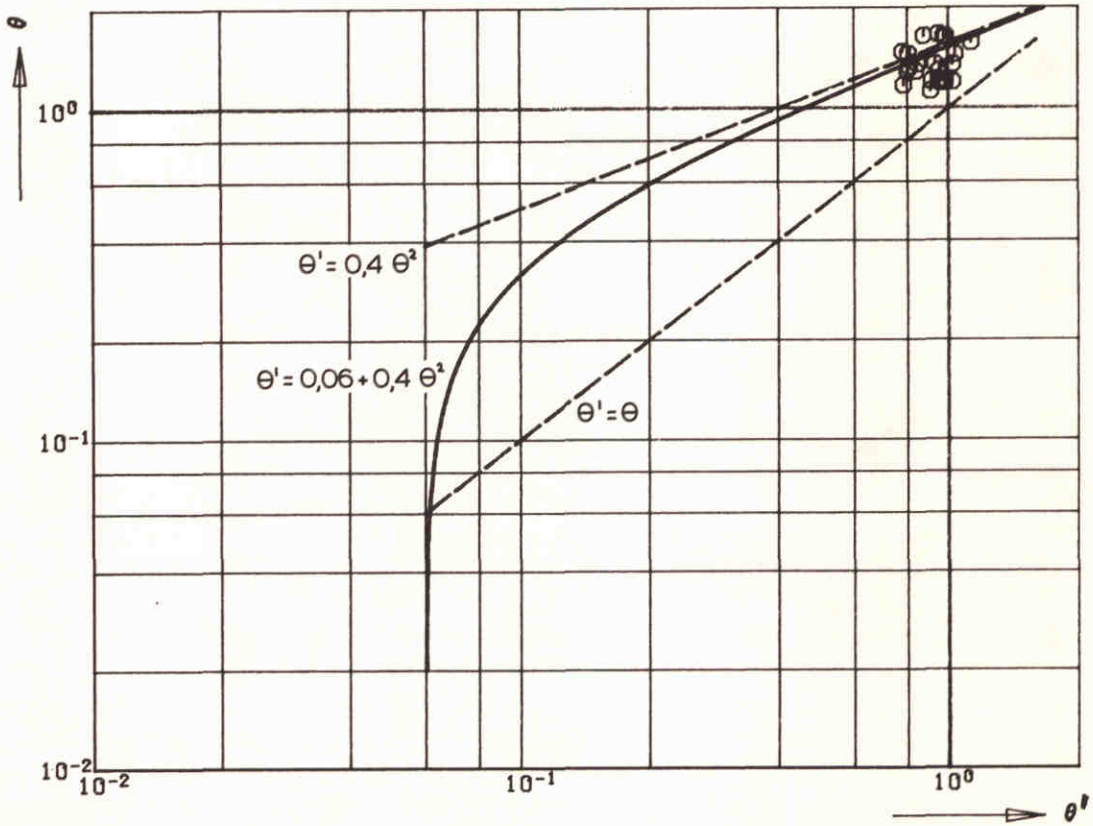
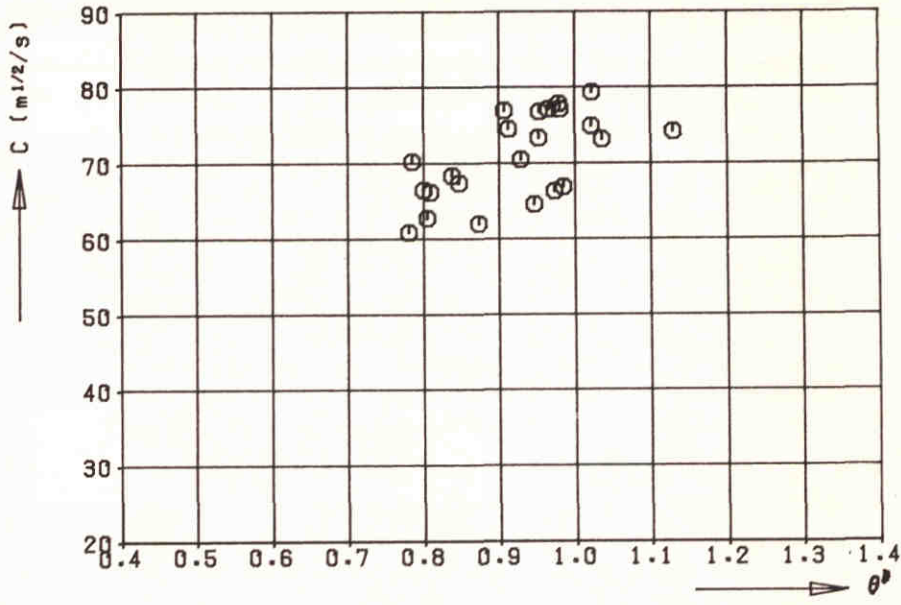
- + ,  $\square$  Grote beddingvormen (van Rijn , Englund)
- X ,  $\circ$  Alle kleine beddingvormen (van Rijn , Englund)
- $\diamond$  ,  $\triangle$  Beddingvormen met steile lijszijde (van Rijn , Englund)

RUWHEIDSHOOGTE EN CHEZY-COEFFICIENT GEMETEN  
EN VOLGENS VAN RIJN EN ENGELUND , ZAIRE

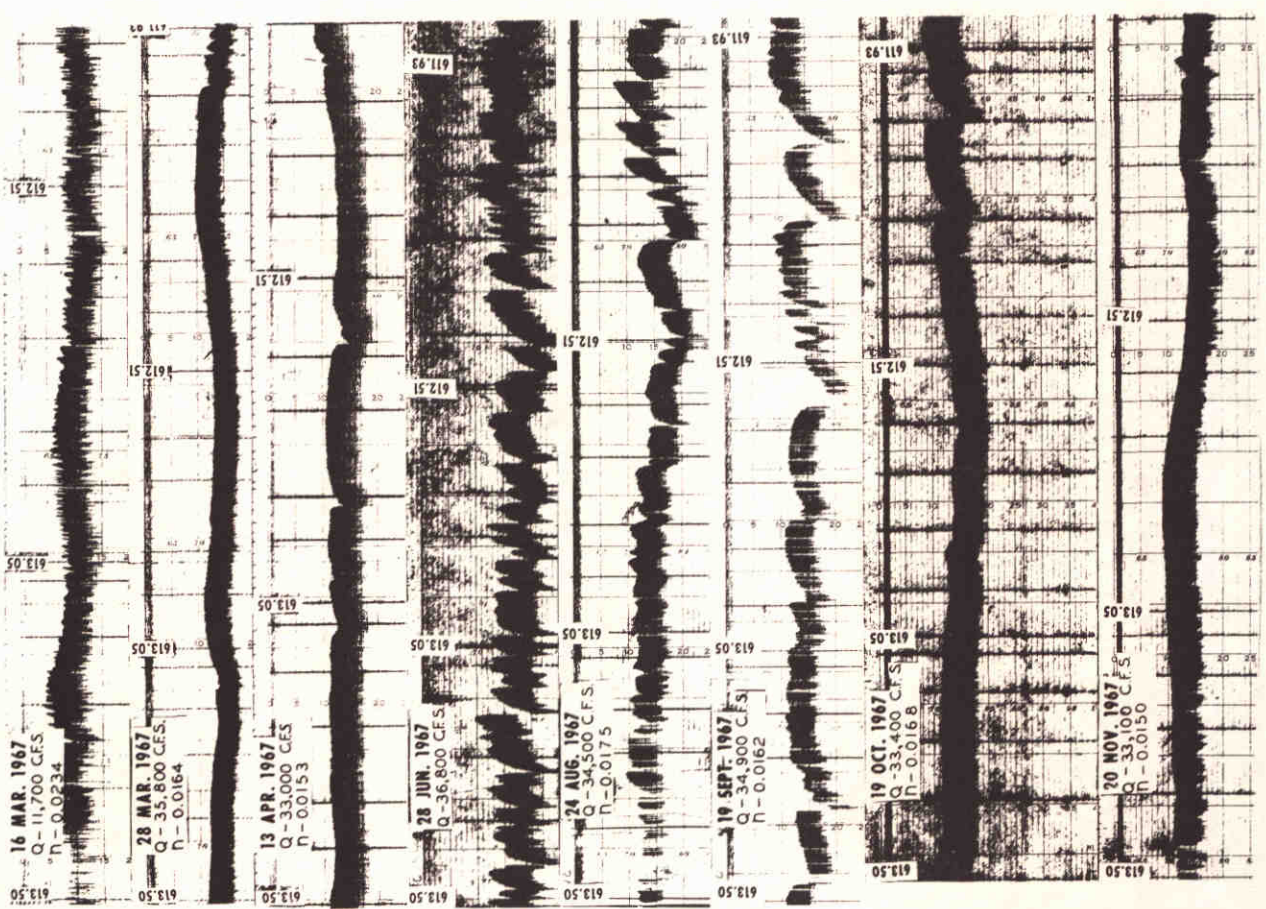
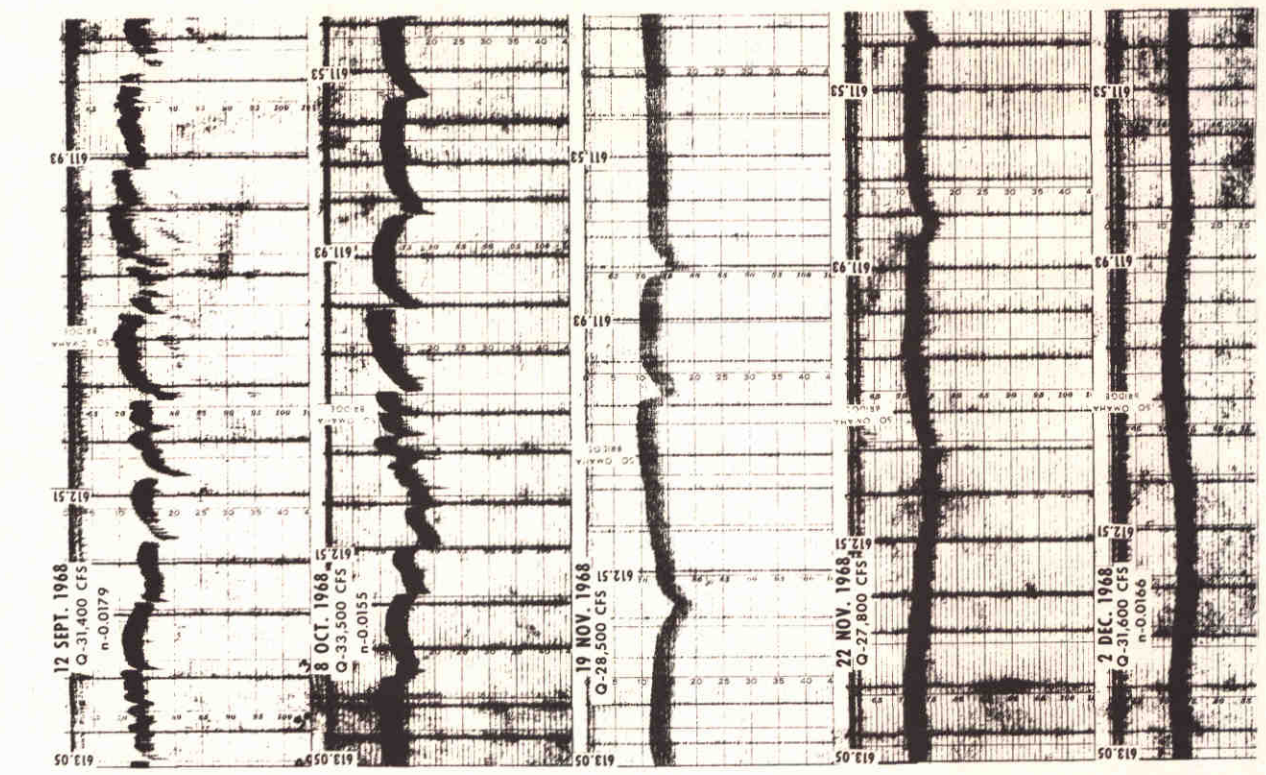


VERLOOP KORRELKARAKTERISTIEKEN IN DE TIJD  
VAN DE MISSOURI RIVIER 1966 - 1975

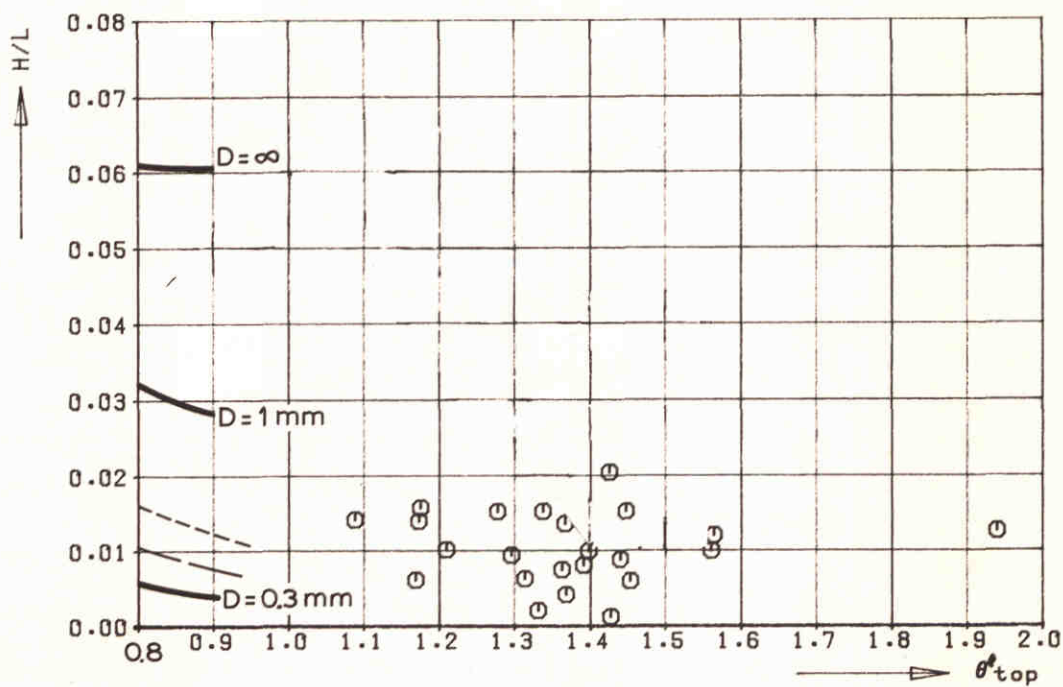
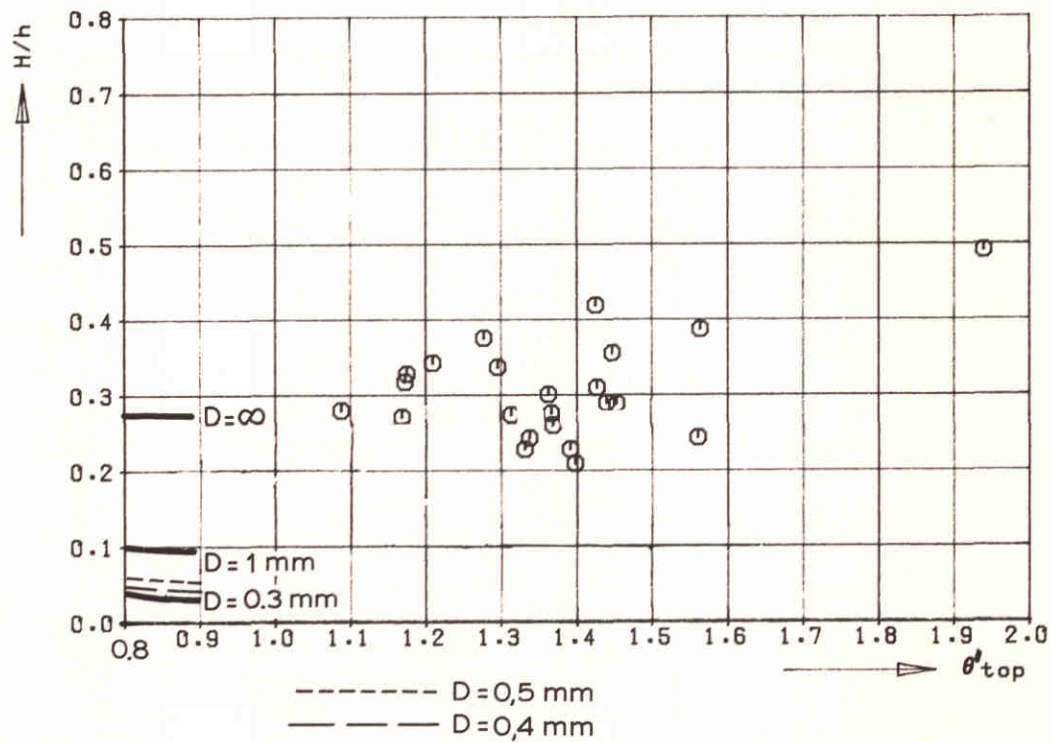




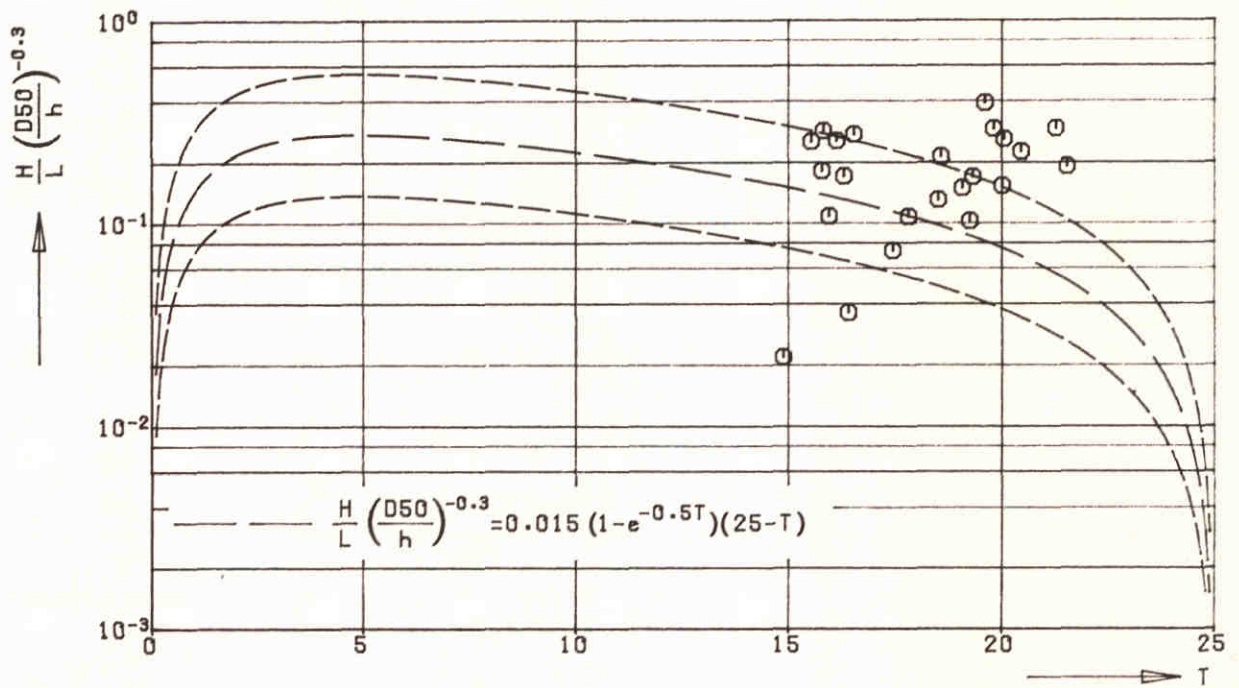
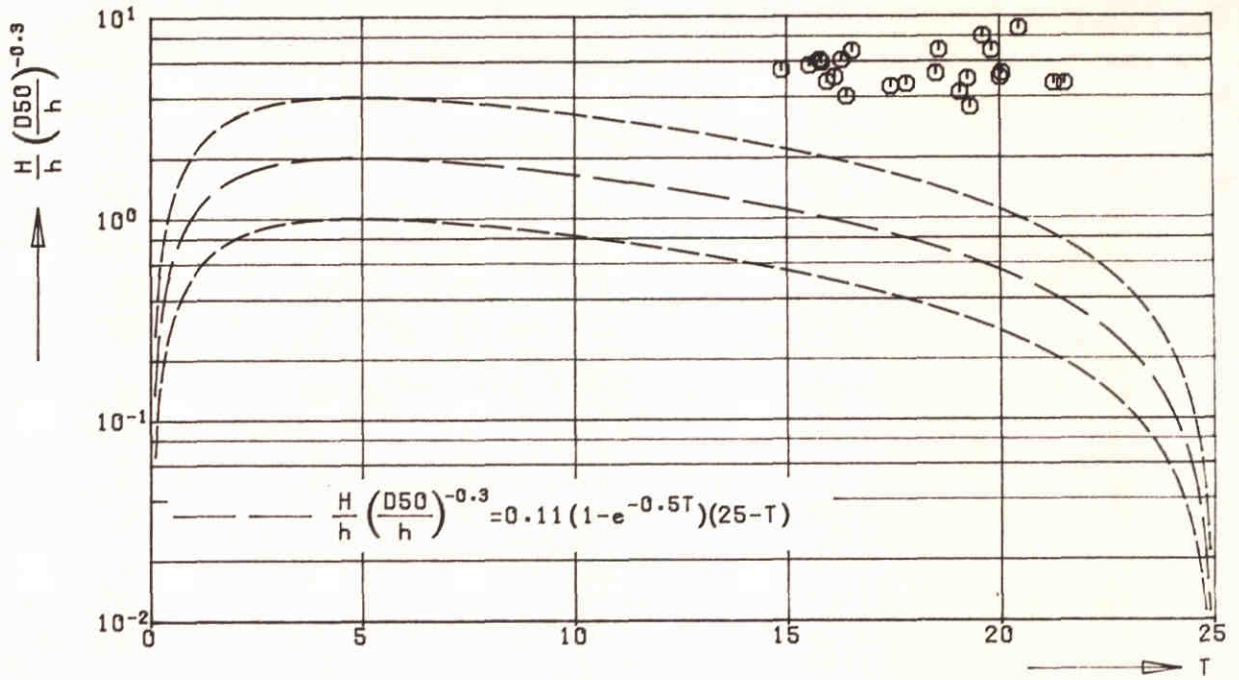
STROMINGSWEERSTAND ALS FUNKTIE VAN  
DE KORRELWEERSTAND , MISSOURI



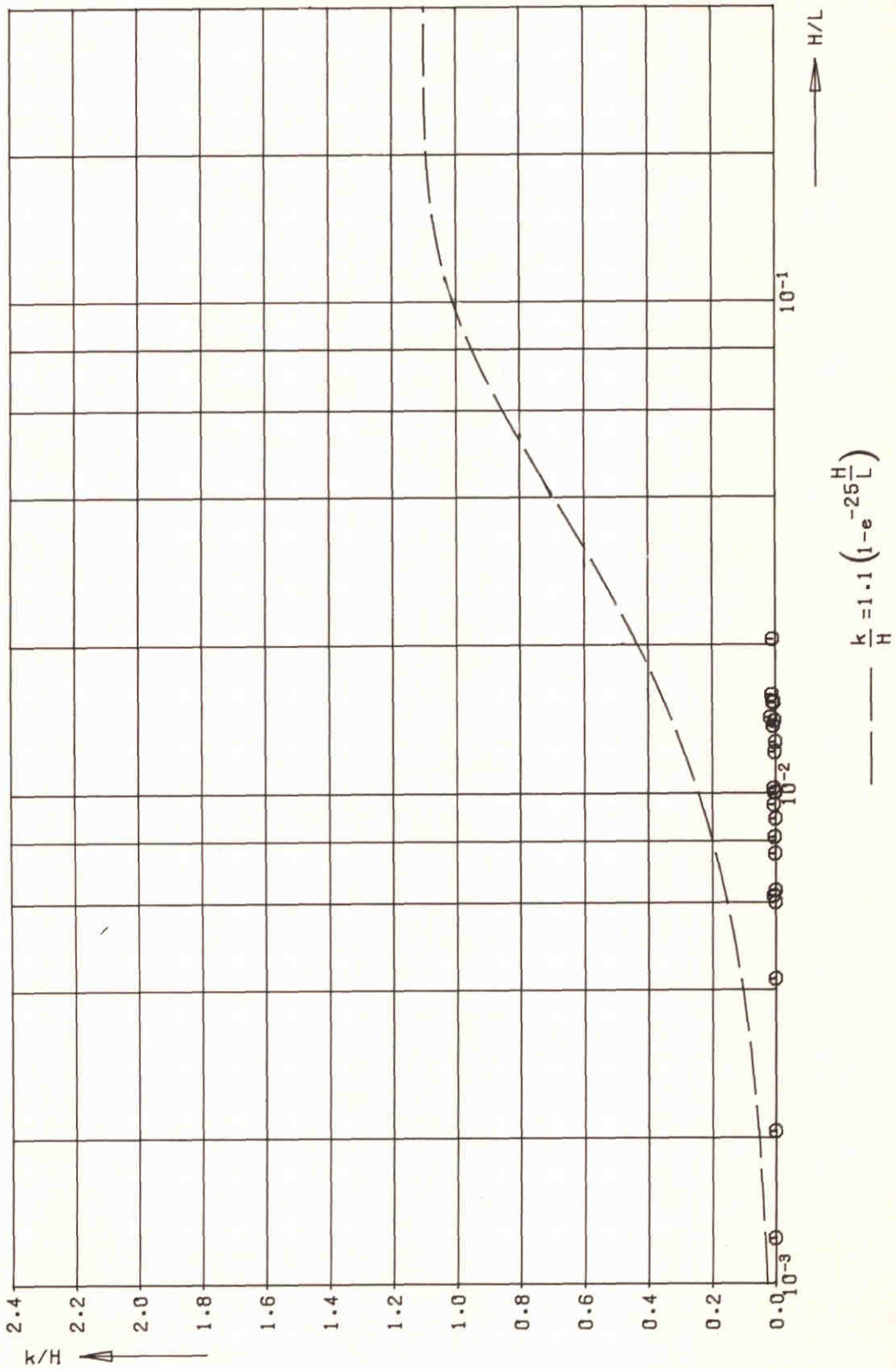
BEDDINGVORMEN MISSOURI RIVIER BIJ  
 VERSCHILLENDE AFVOEREN (USAE, 1969)



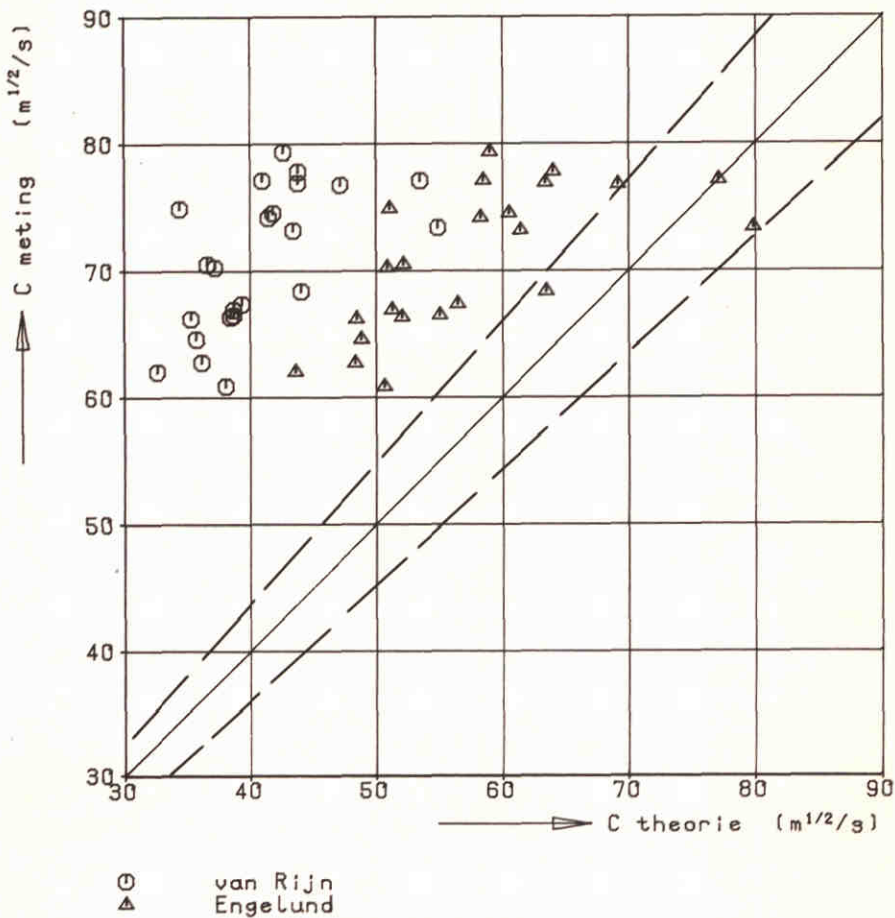
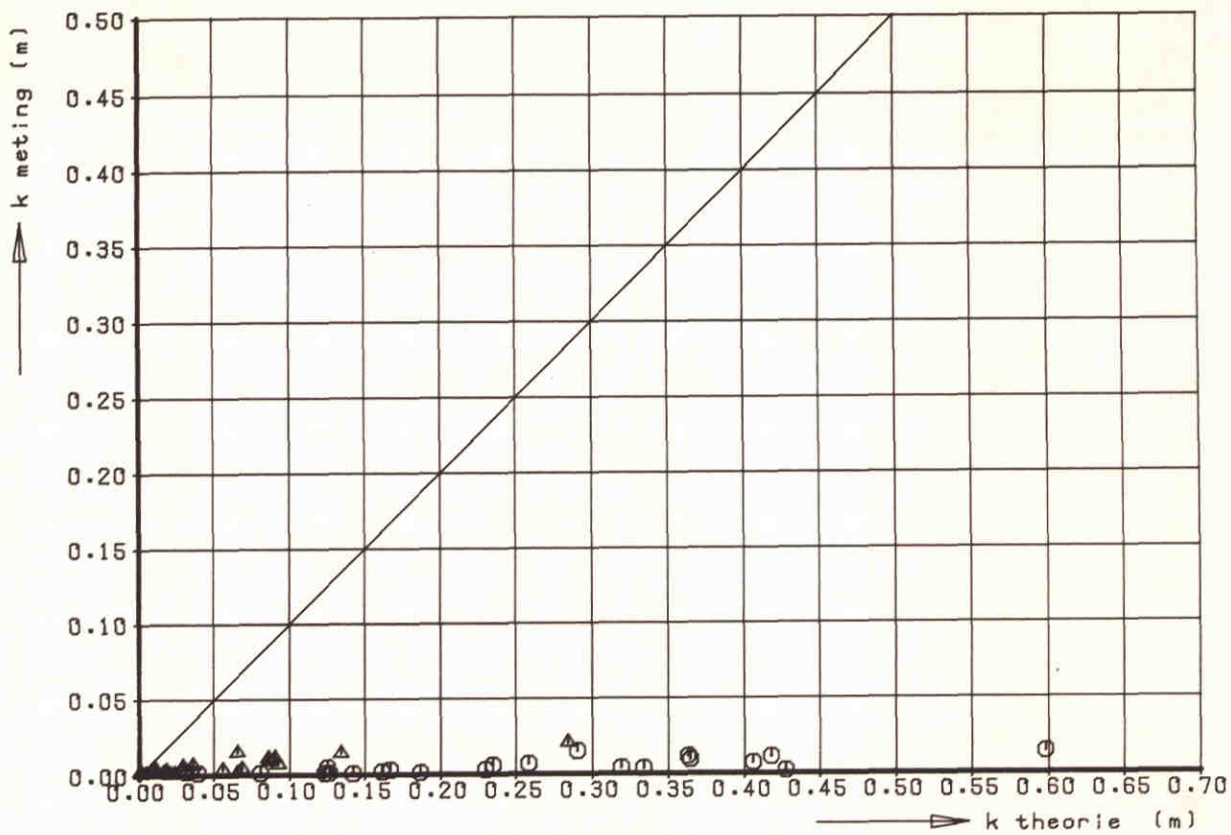
RELATIEVE BEDDINGVORMHOOGTE EN  
STEILHEID VOLGENS FREDSE, MISSOURI



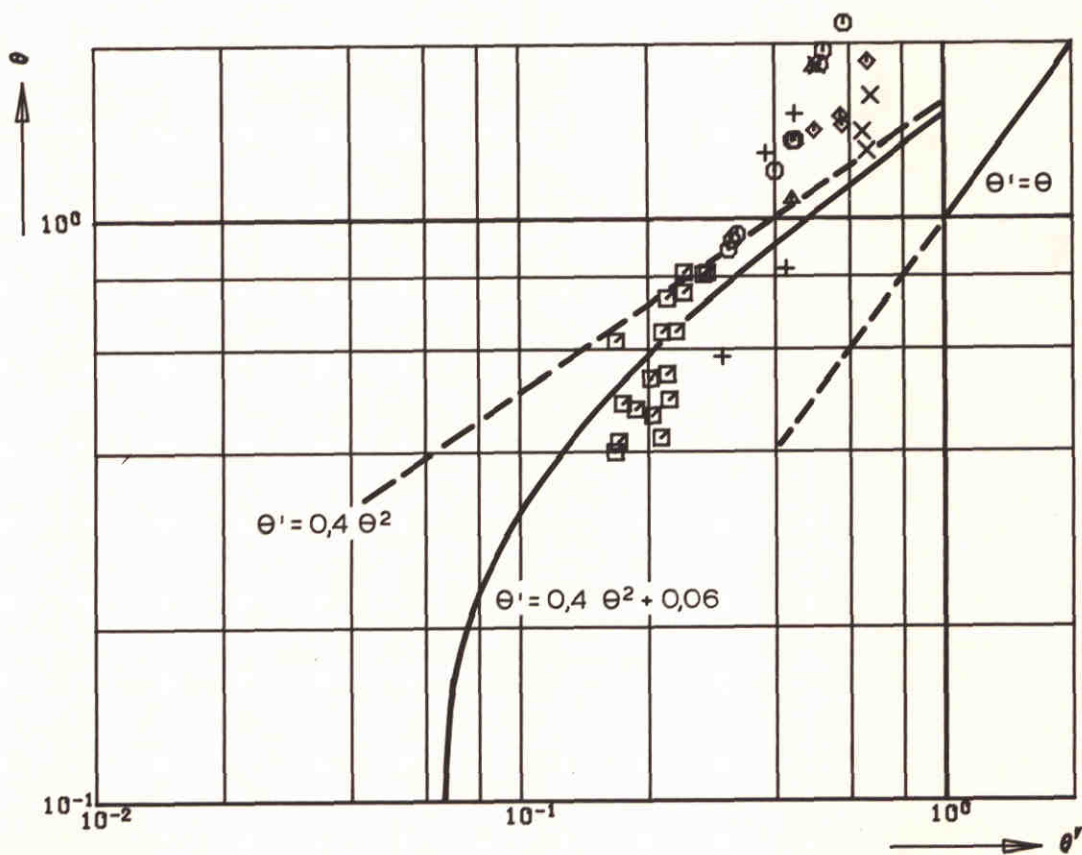
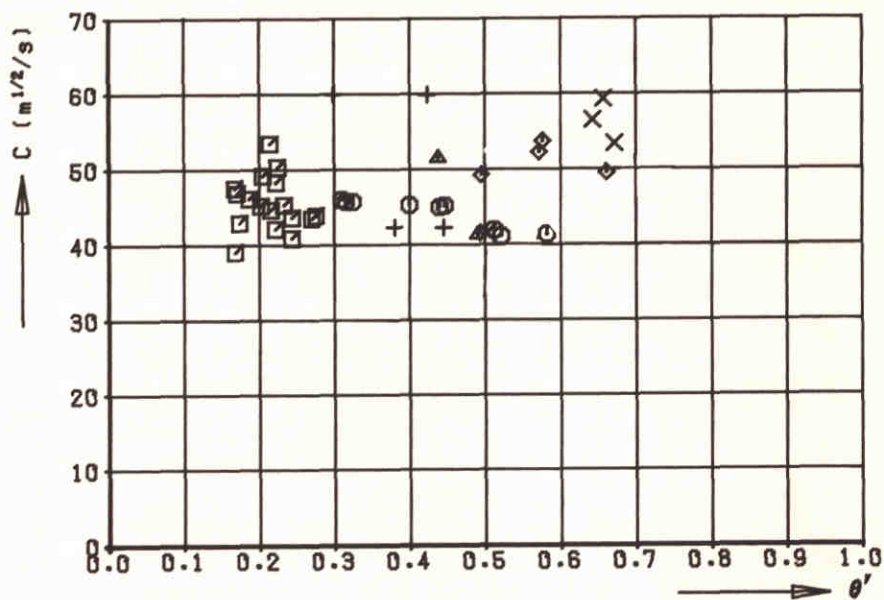
BEDDINGVORMHOOGTE EN - STEILHEID  
VOLGENS VAN RIJN (1982,b) , MISSOURI



EQUIVALENTE RUWHEID ALS FUNKTIE VAN DE STEILHEID VAN BEDDINGVORMEN , MISSOURI

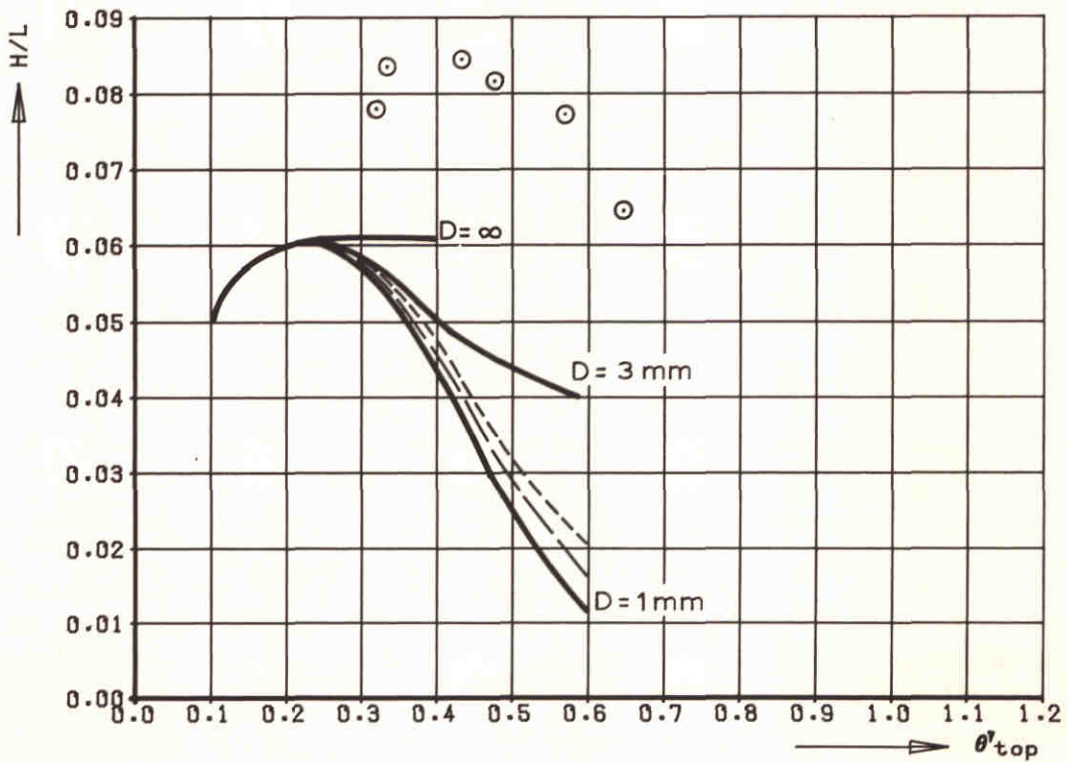
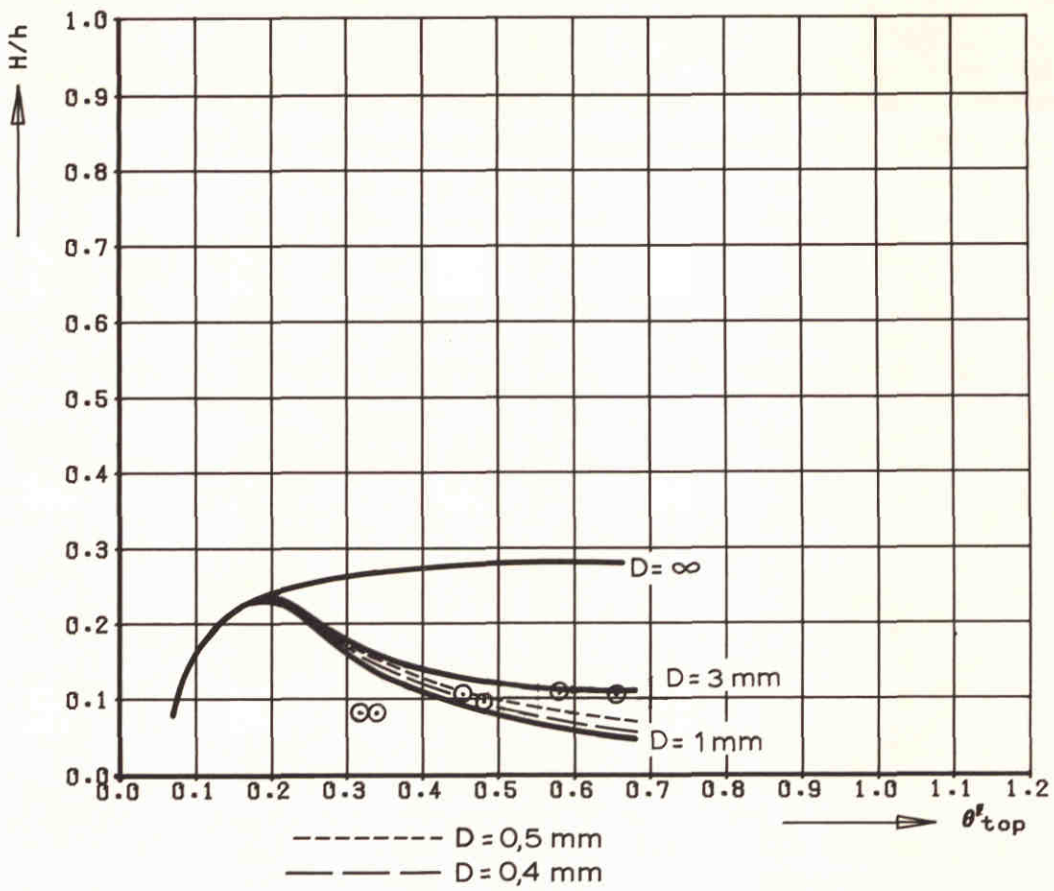


RUWHEIDSHOOGTE EN CHEZY-COEFFICIENT GEMETEN  
 EN VOLGENS VAN RIJN EN ENGELUND, MISSOURI



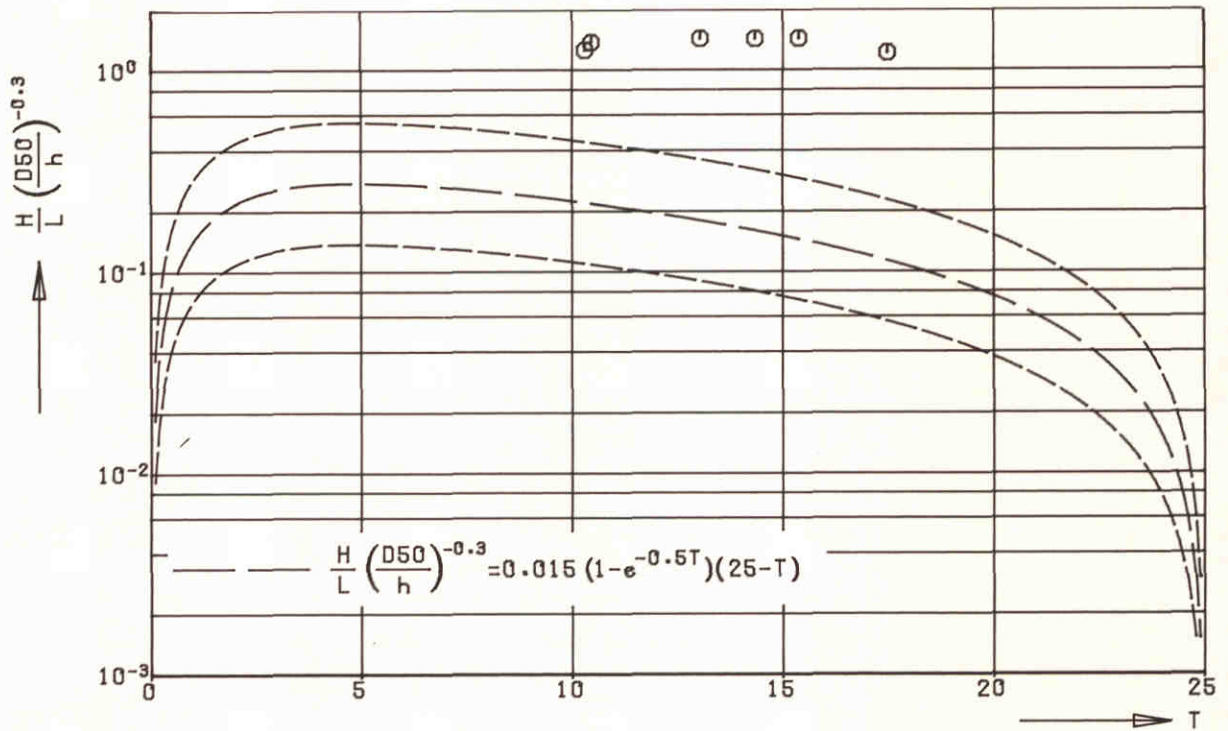
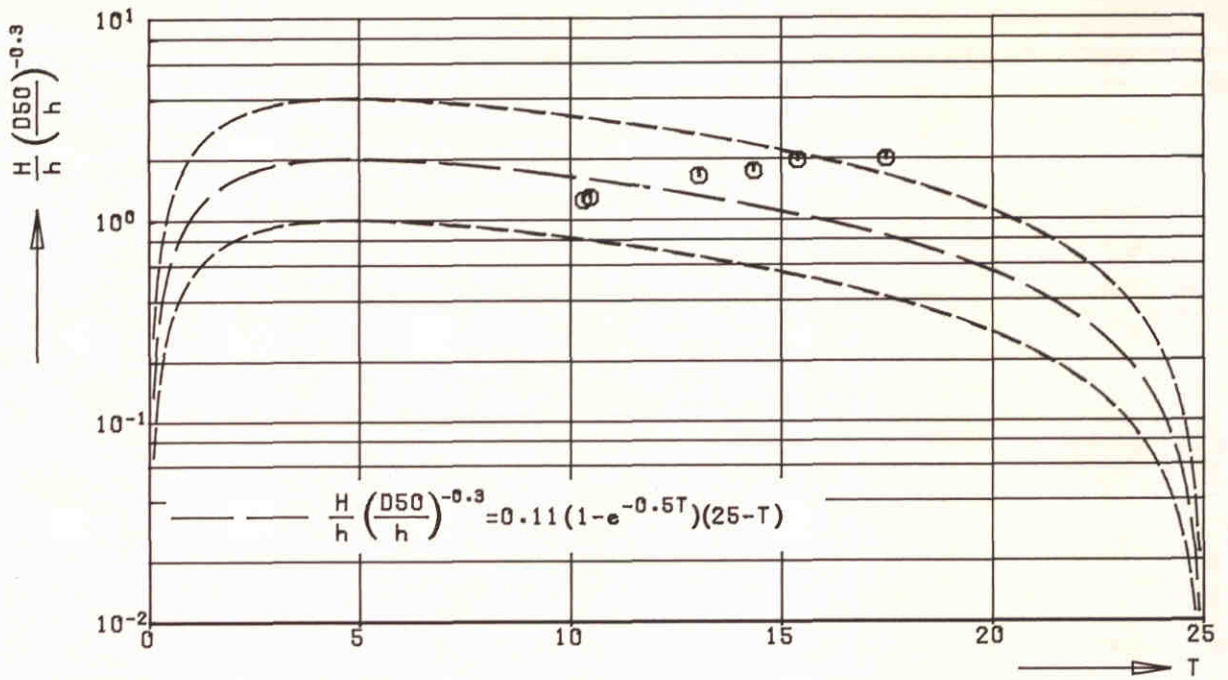
- ▣ NEDERRIJN
- WAAL
- ▲ BOVEN MERWEDE
- + BENEDEN MERWEDE
- × NIEUWE MERWEDE
- ◇ BERGSCH E MAAS

STROMINGSWEERSTAND ALS FUNKTIE VAN  
DE KORRELWEERSTAND, NED. RIJNTAKKEN EN MAAS

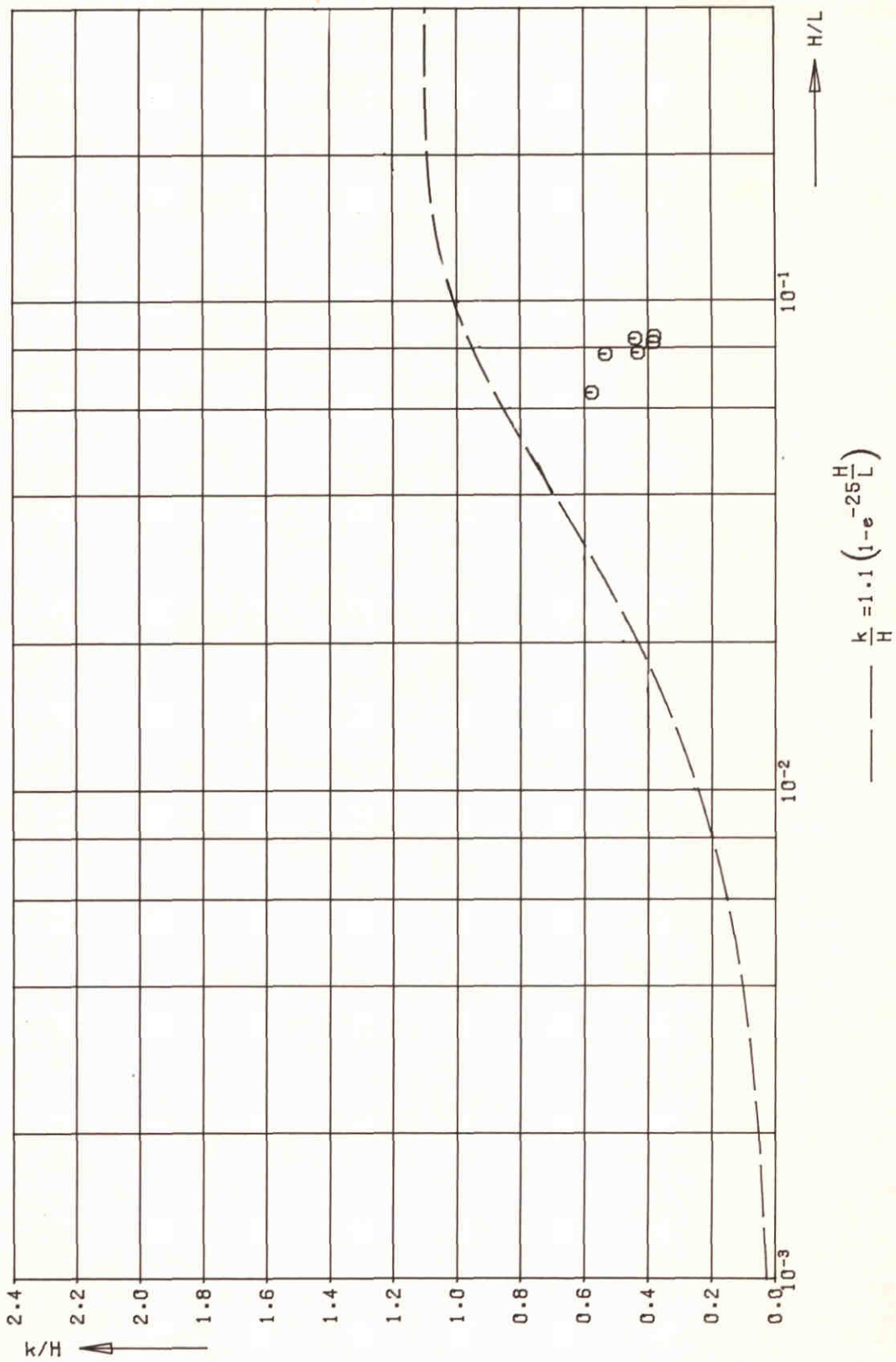


RELATIEVE BEDDINGVORMHOOGTE EN  
 STEILHEID VOLGENS FREDSEØ , WAAL

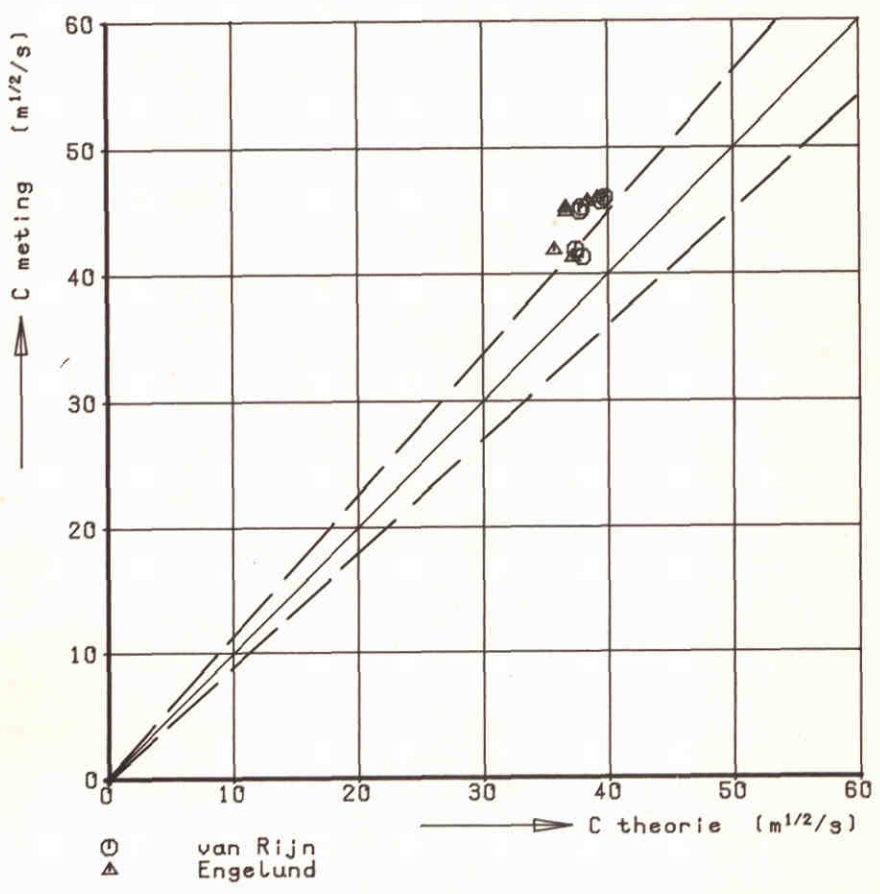
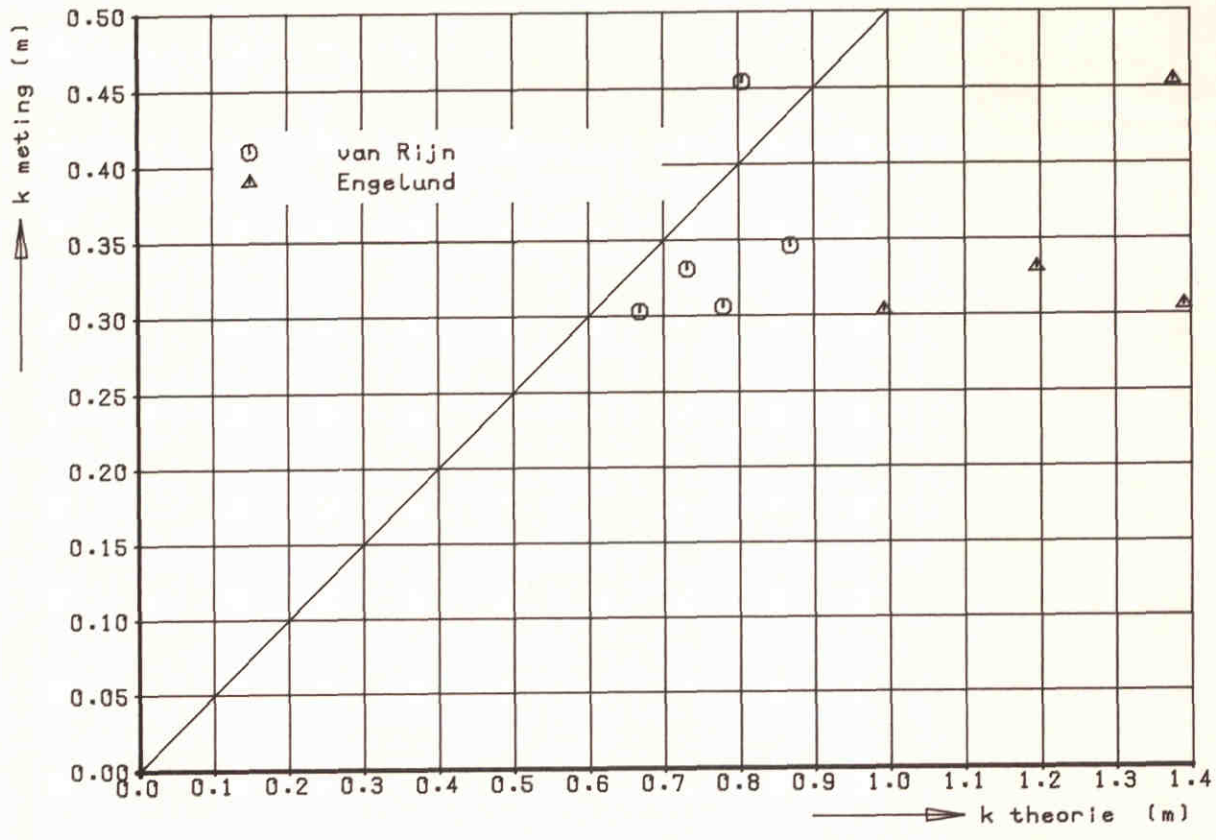




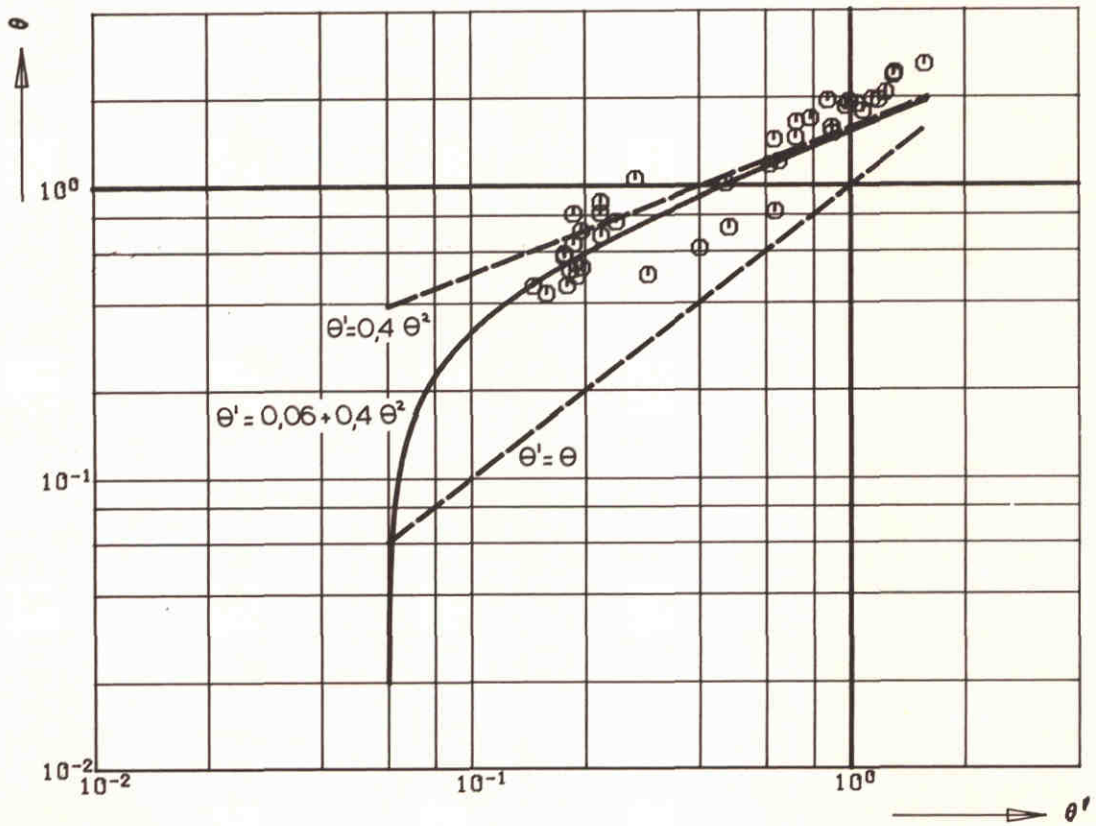
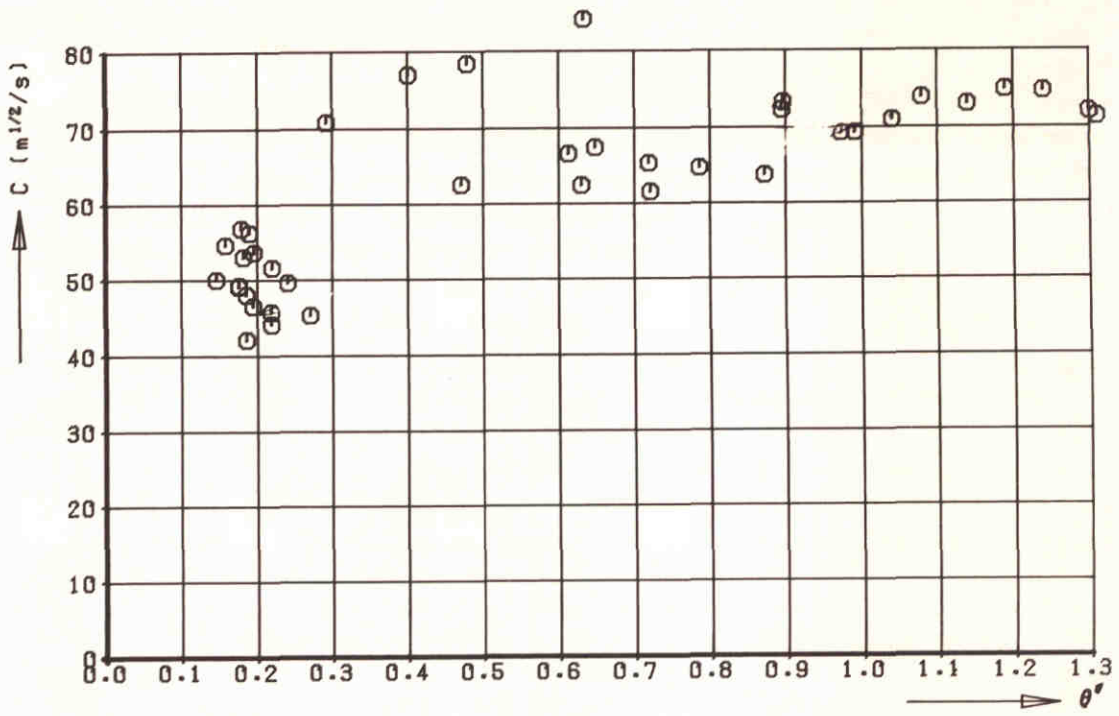
BEDDINGVORMHOOGTE EN - STEILHEID  
VOLGENS VAN RIJN (1982, b), WAAL



EQUIVALENTE RUWHEID ALS FUNKTIE VAN DE  
 STEILHEID VAN BEDDINGVORMEN , WAAL



RUWHEIDSHOOGTE EN CHEZY-COEFFICIENT GEMETEN  
EN VOLGENS VAN RIJN EN ENGELUND , WAAL



⊙ 0.15 < D50 < 0.40

diameters in mm

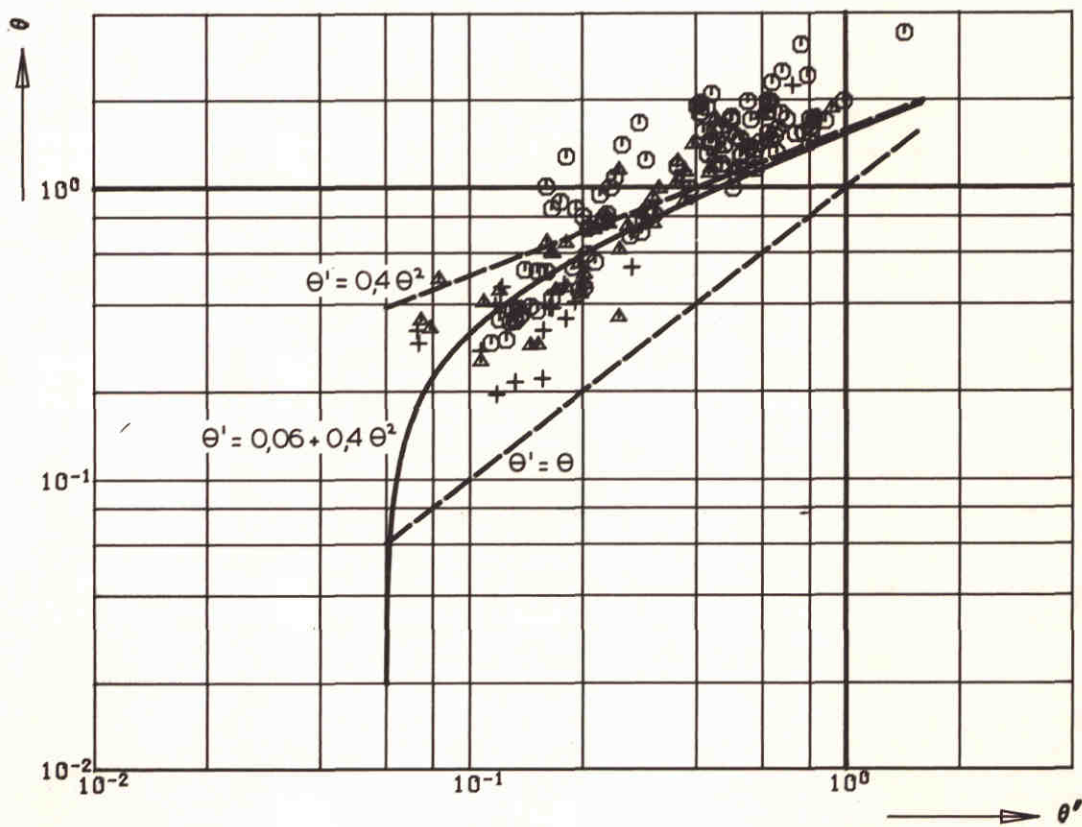
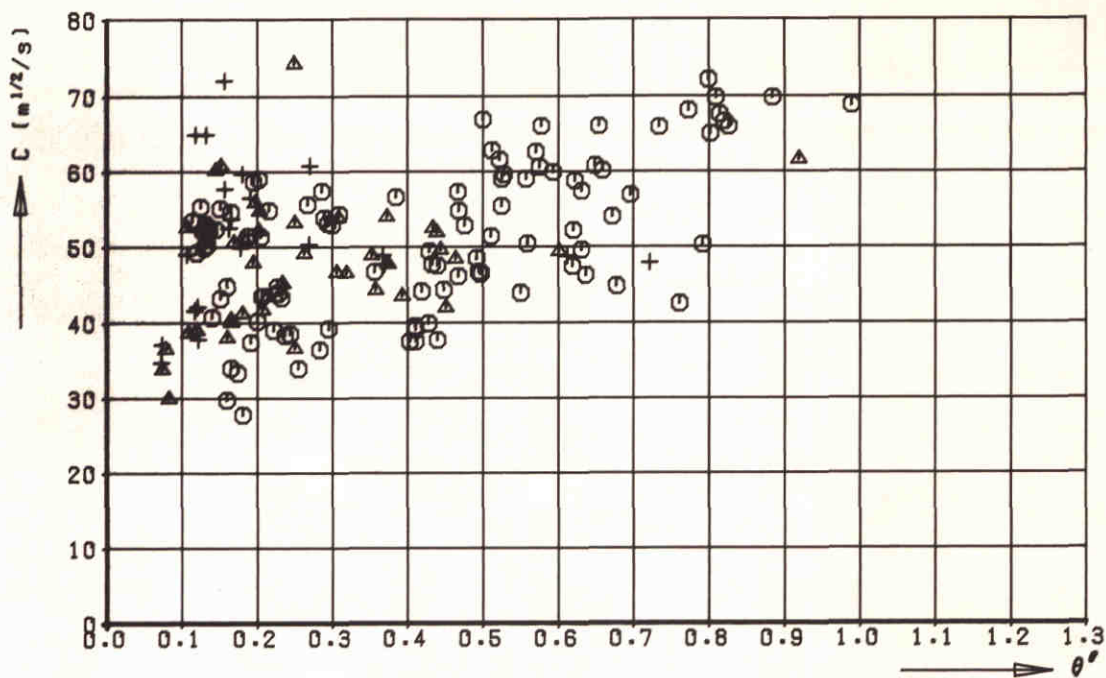
STROMINGSWEERSTAND ALS FUNKTIE VAN  
DE KORRELWEERSTAND (ATCHAFALAYA)

S6-PROTO

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 46-A



- 0.15 < D50 < 0.40
- ▲ 0.40 < D50 < 0.60
- ⊕ 0.60 < D50 < 0.85

diameters in mm

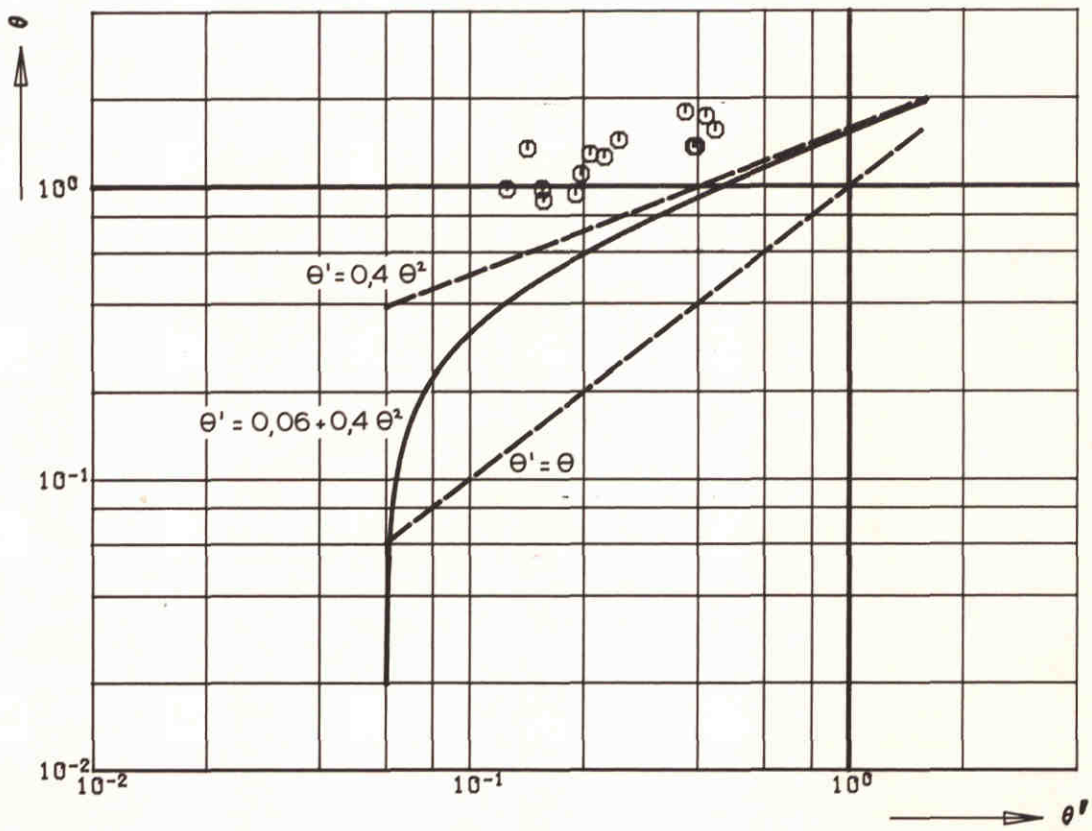
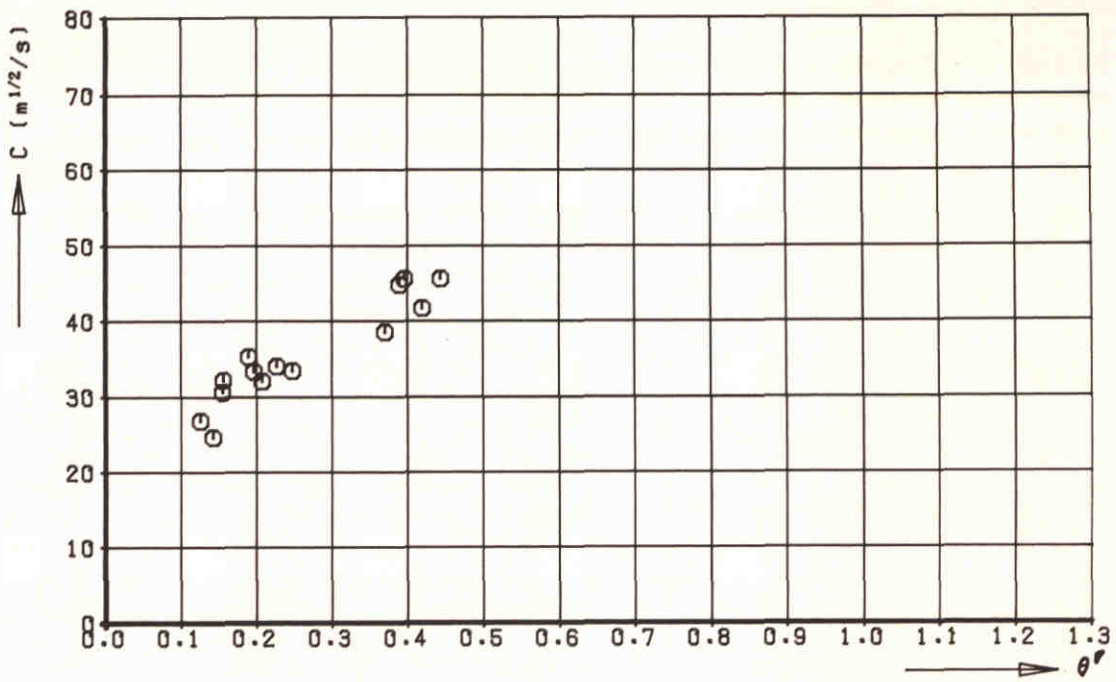
STROMINGSWEERSTAND ALS FUNKTIE VAN  
DE KORRELWEERSTAND (MISSISSIPPI)

S6-PROTO

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 46-B



⊙ 0.15 < D50 < 0.40

diameters in mm

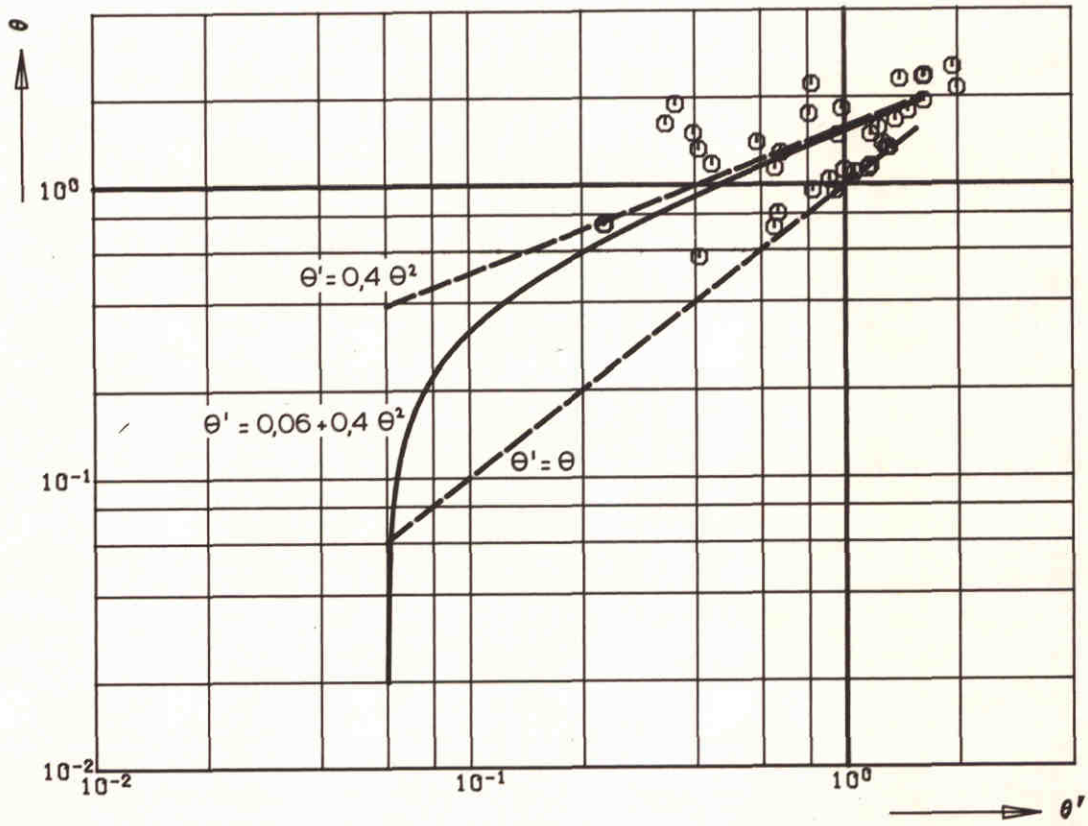
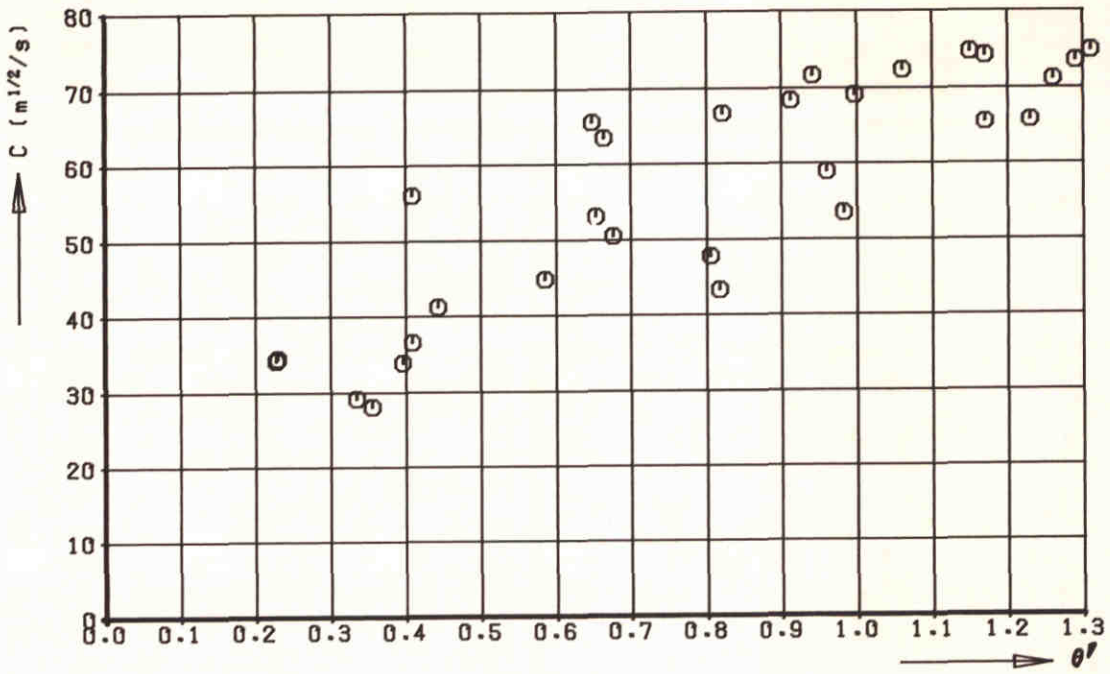
STROMINGSWEERSTAND ALS FUNKTIE VAN  
DE KORRELWEERSTAND (RED RIVER)

S6-PROTO

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 46-C



⊙  $0.15 < D_{50} < 0.40$

diameters in mm

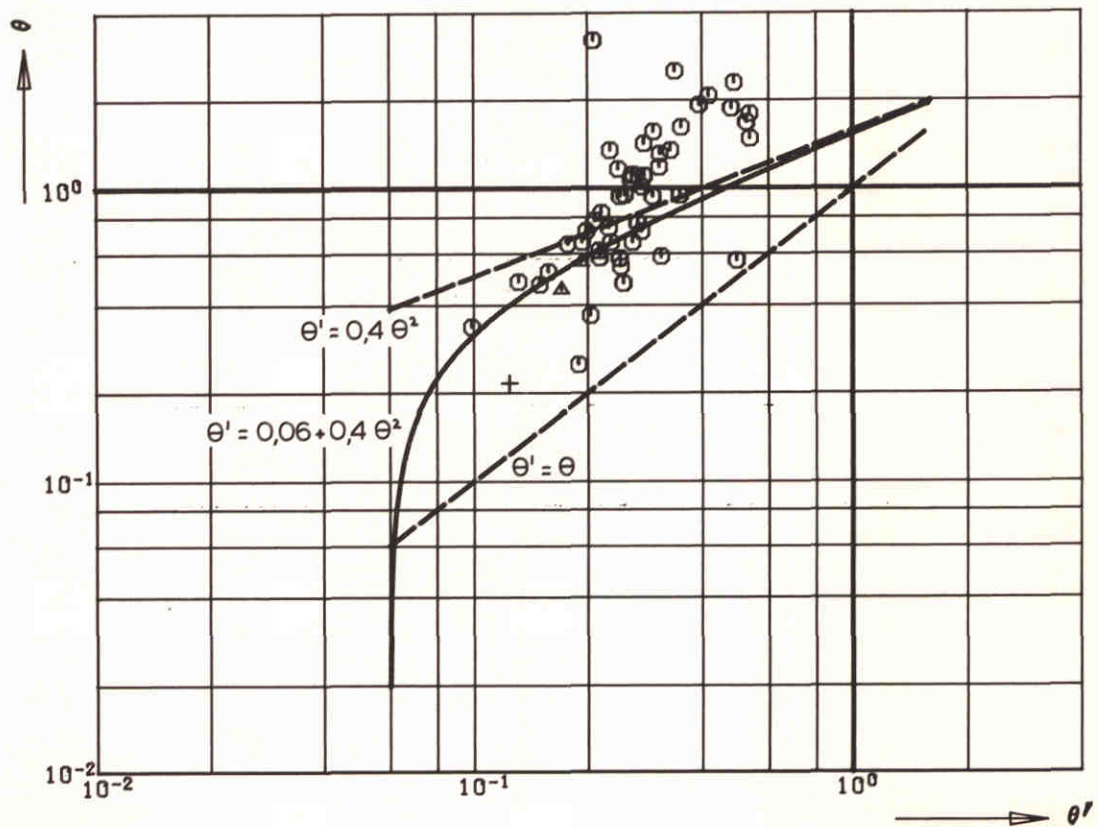
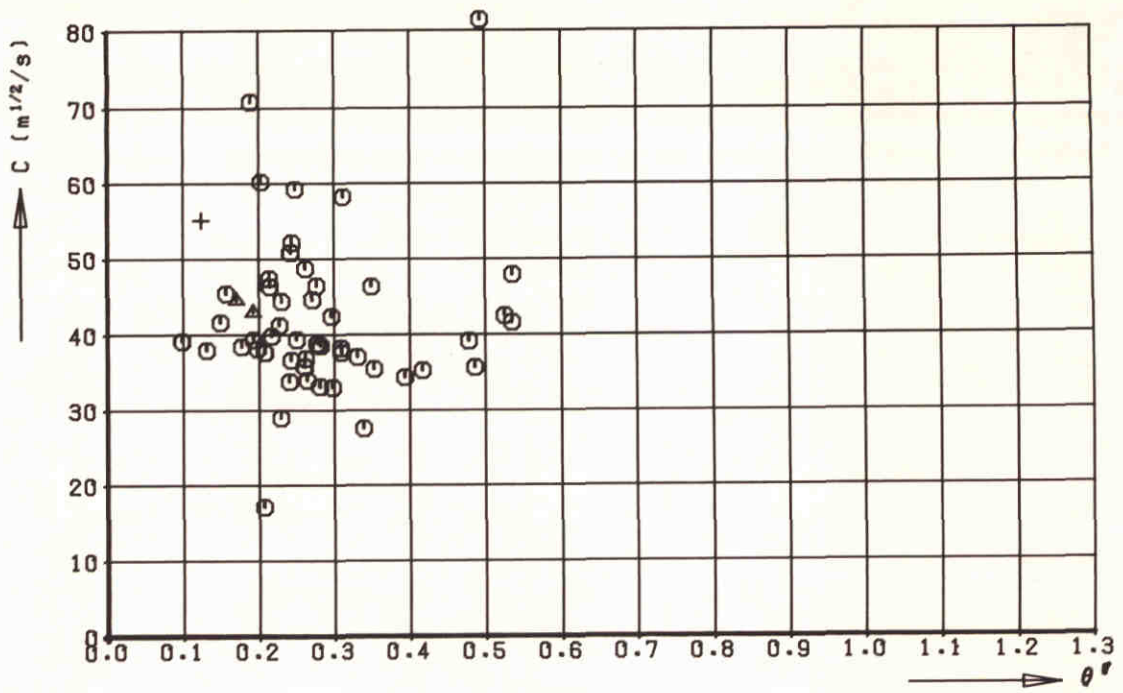
STROMINGSWEERSTAND ALS FUNKTIE VAN  
DE KORRELWEERSTAND (RIO GRANDE)

S6-PROTO

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 46-D



- 0.15 < D50 < 0.40
- ▲ 0.40 < D50 < 0.60
- + 0.60 < D50 < 0.85

diameters in mm

STROMINGSWEERSTAND ALS FUNKTIE VAN  
DE KORRELWEERSTAND (U.S. RIVERS)

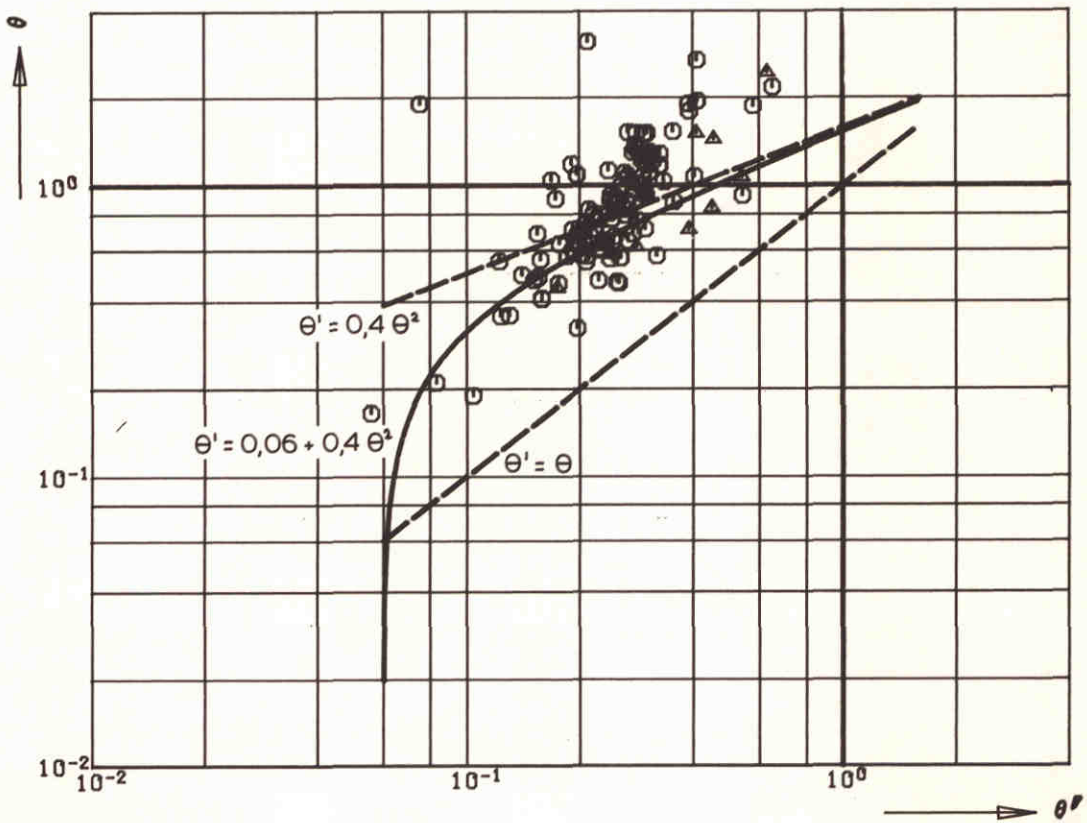
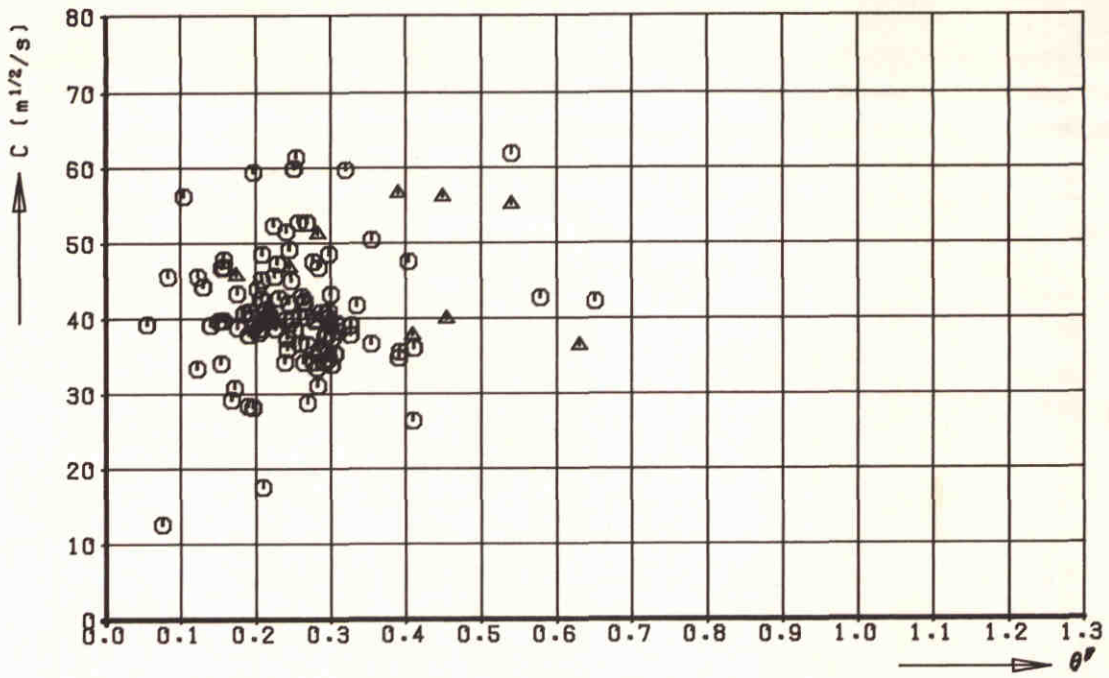
S6-PROTO

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 46-E





- $0.15 < D_{50} < 0.40$
- ▲  $0.40 < D_{50} < 0.60$

diameters in mm

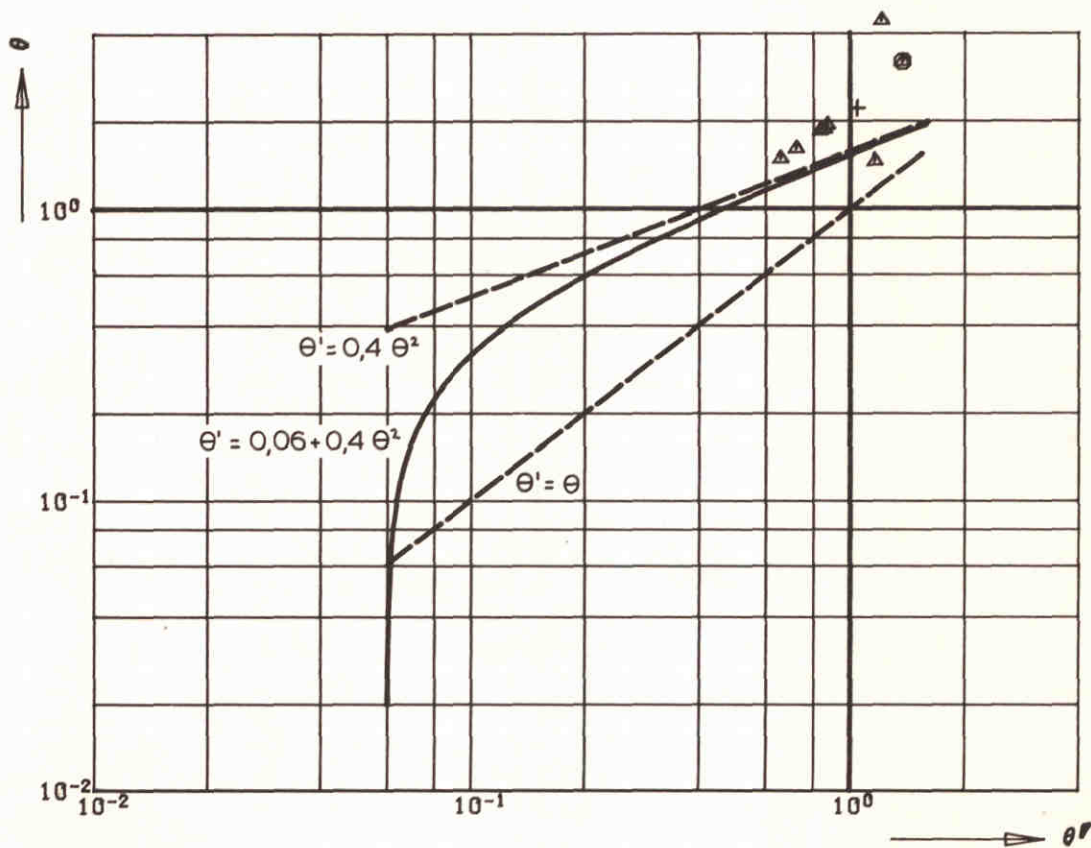
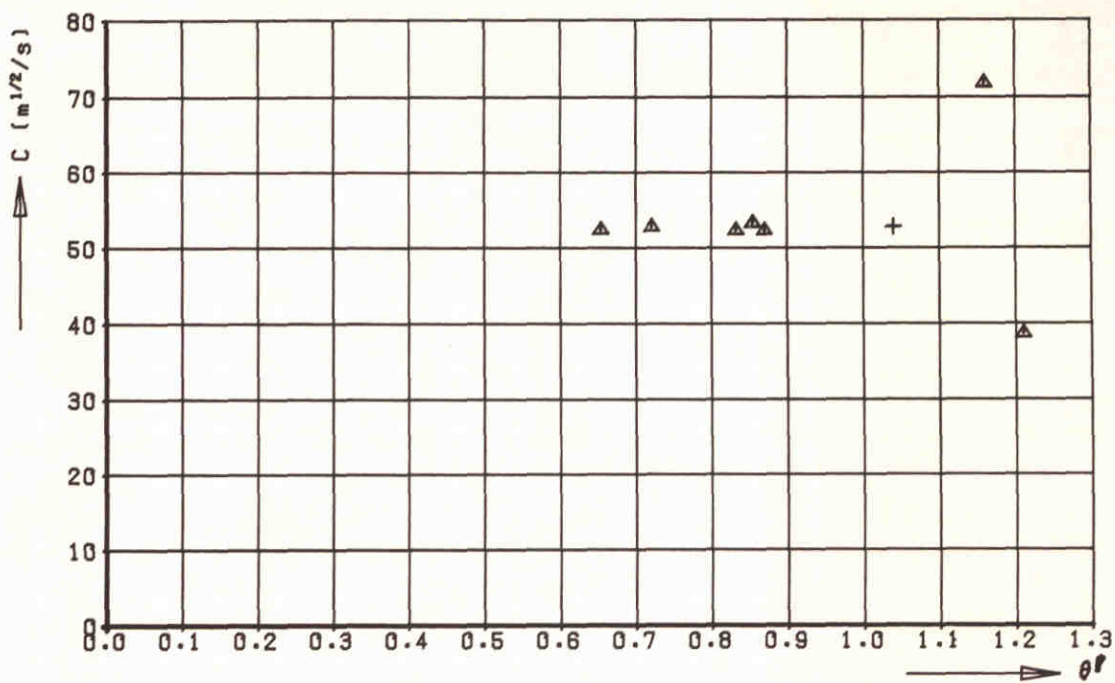
STROMINGSWEERSTAND ALS FUNKTIE VAN  
DE KORRELWEERSTAND (COLORADO)

S6-PROTO

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 46-F



- ⊙  $0.15 < D_{50} < 0.40$
- △  $0.40 < D_{50} < 0.60$
- +  $0.60 < D_{50} < 0.85$

diameters in mm

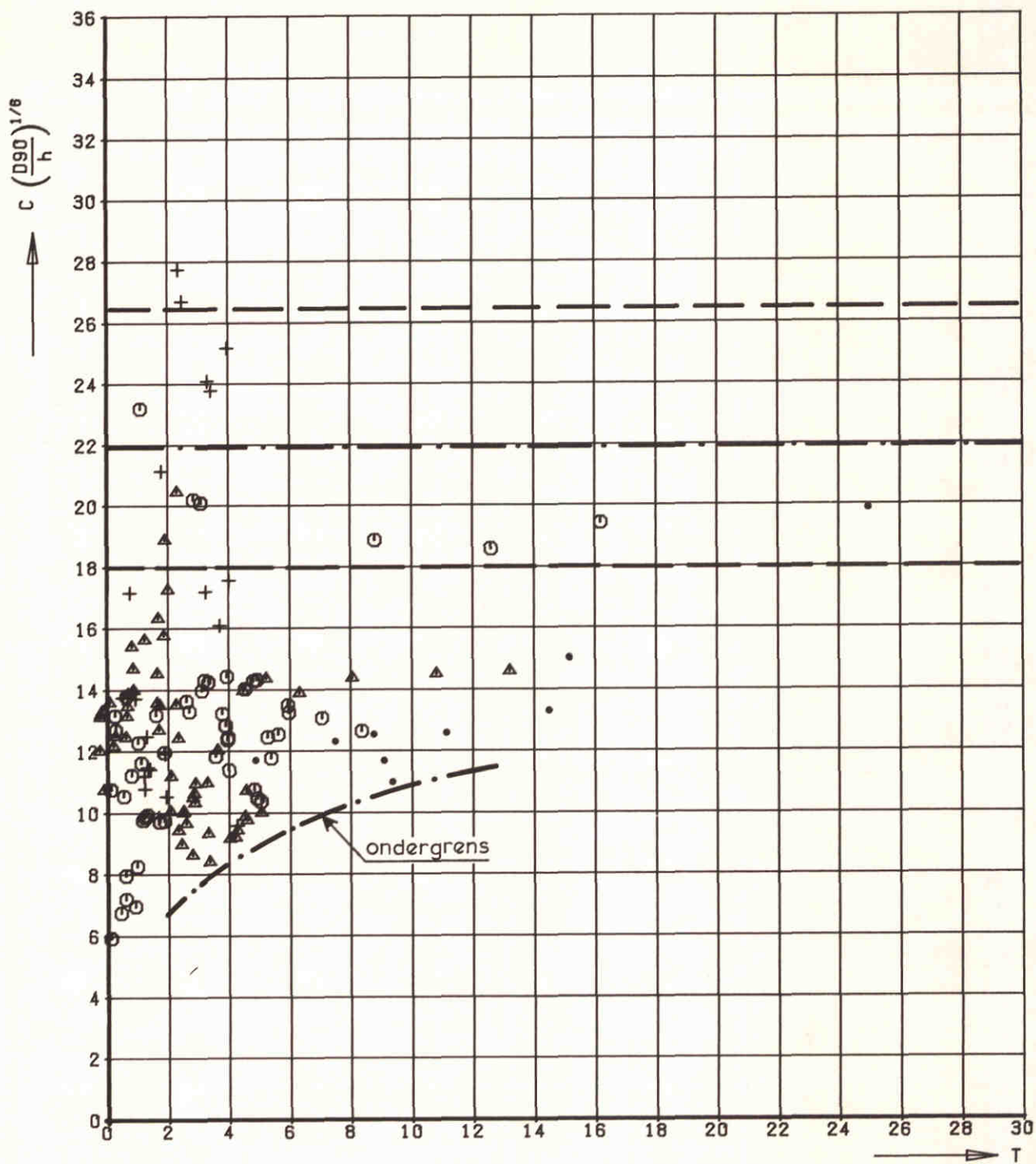
STROMINGSWEERSTAND ALS FUNKTIE VAN  
DE KORRELWEERSTAND (SNAKE RIVER)

S6-PROTO

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 46-G



- ⊙ 0.20 < D50 < 0.40
- ▲ 0.40 < D50 < 0.60
- + 0.60 < D50 < 0.85
- zandgootproeven WL

diameters in mm

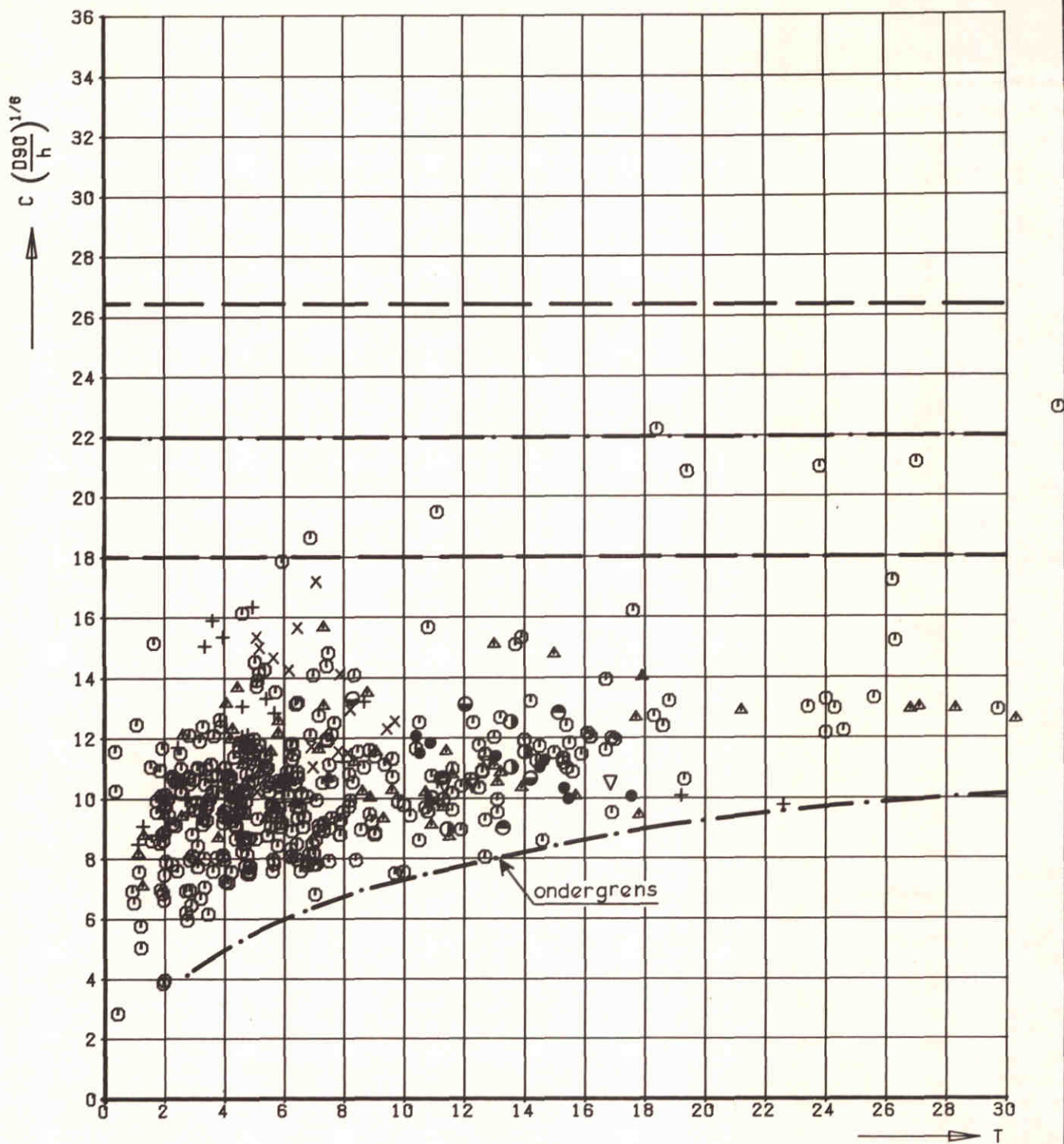
CHEZY-COEFFICIENT GEKORRIGEERD VOOR WATERDIEPTE  
ALS FUNKTIE VAN T , ALLE RESULTATEN

S6-GOTEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 47-A



- |   |                   |   |                    |   |                 |
|---|-------------------|---|--------------------|---|-----------------|
| ○ | 0.15 < D50 < 0.40 | x | Nederrijn          | ● | Boven Merwede   |
| ▲ | 0.40 < D50 < 0.60 | ● | Waal               | ◌ | Beneden Merwede |
| + | 0.60 < D50 < 0.85 | ▽ | Maas/Bergsche Maas | ◌ | Nieuwe Merwede  |

diameters in mm

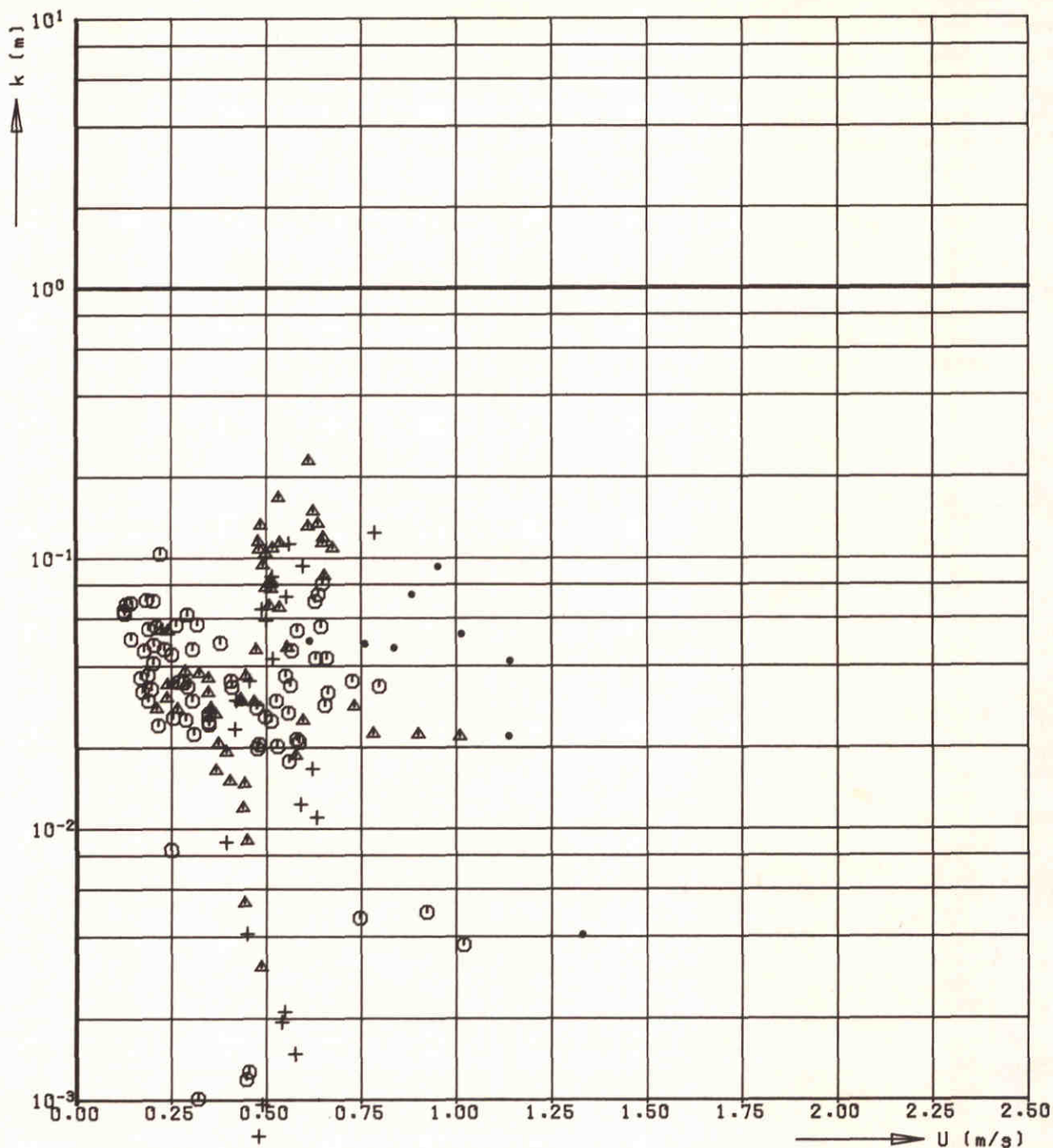
CHEZY-COEFFICIENT GEKORRIGEERD VOOR WATERDIEPTE  
ALS FUNKTIE VAN T, ALLE RESULTATEN

S6-PROTO

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 47-B



- ⊙ 0.20 < D50 < 0.40
- ▲ 0.40 < D50 < 0.60
- ⊕ 0.60 < D50 < 0.85
- zandgootproeven WL

diameters in mm

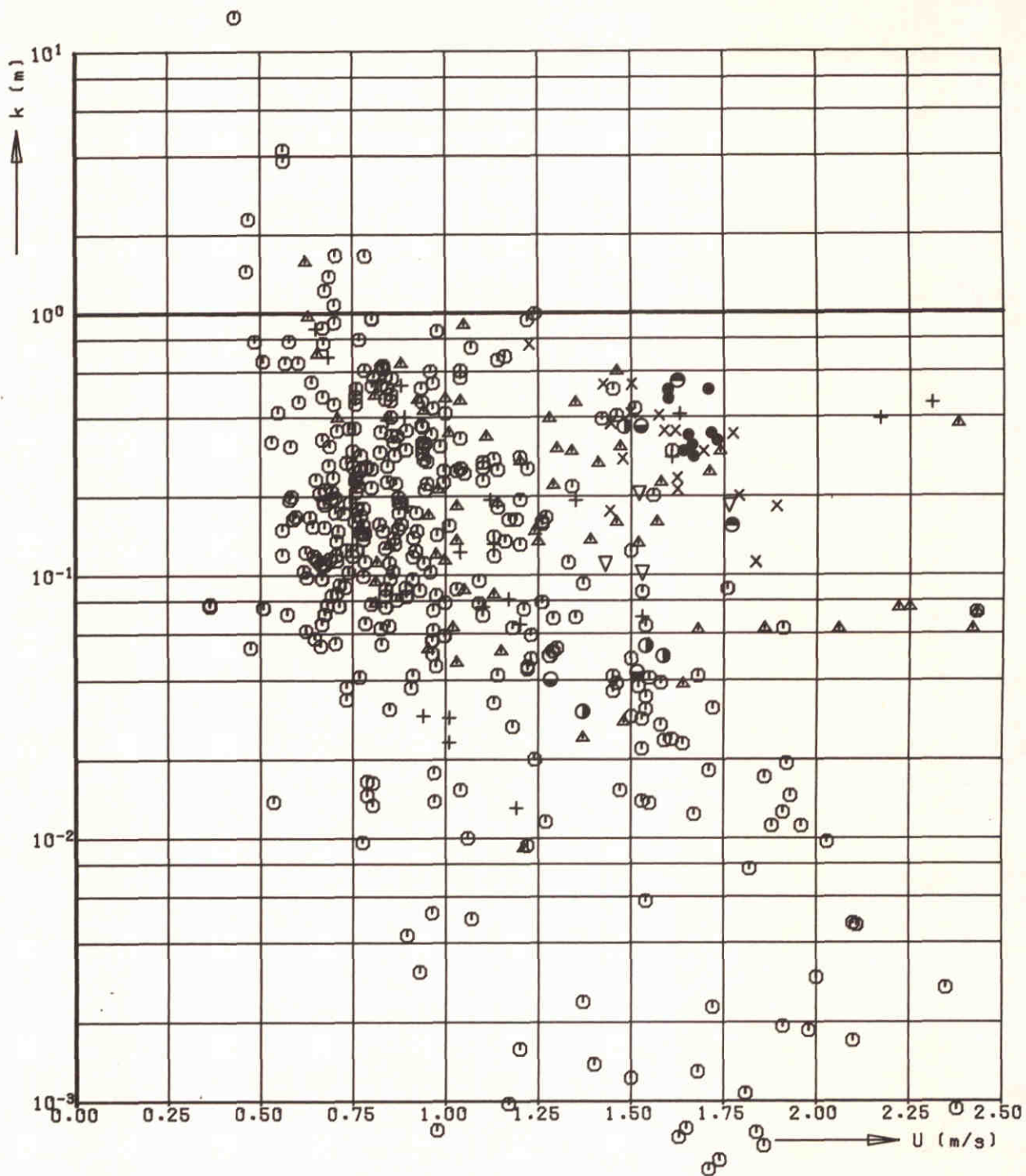
EFFECTIEVE BODEMRUWHEID ALS FUNKTIE  
VAN DE STROOMSNELHEID

S6-GOTEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 48-A



- |   |                   |   |                    |   |                 |
|---|-------------------|---|--------------------|---|-----------------|
| ○ | 0.20 < D50 < 0.40 | x | Nederrijn          | ● | Boven Merwede   |
| ▲ | 0.40 < D50 < 0.60 | ● | Waal               | ● | Beneden Merwede |
| + | 0.60 < D50 < 0.85 | ▽ | Maas/Bergsche Maas | ○ | Nieuwe Merwede  |

diameters in mm

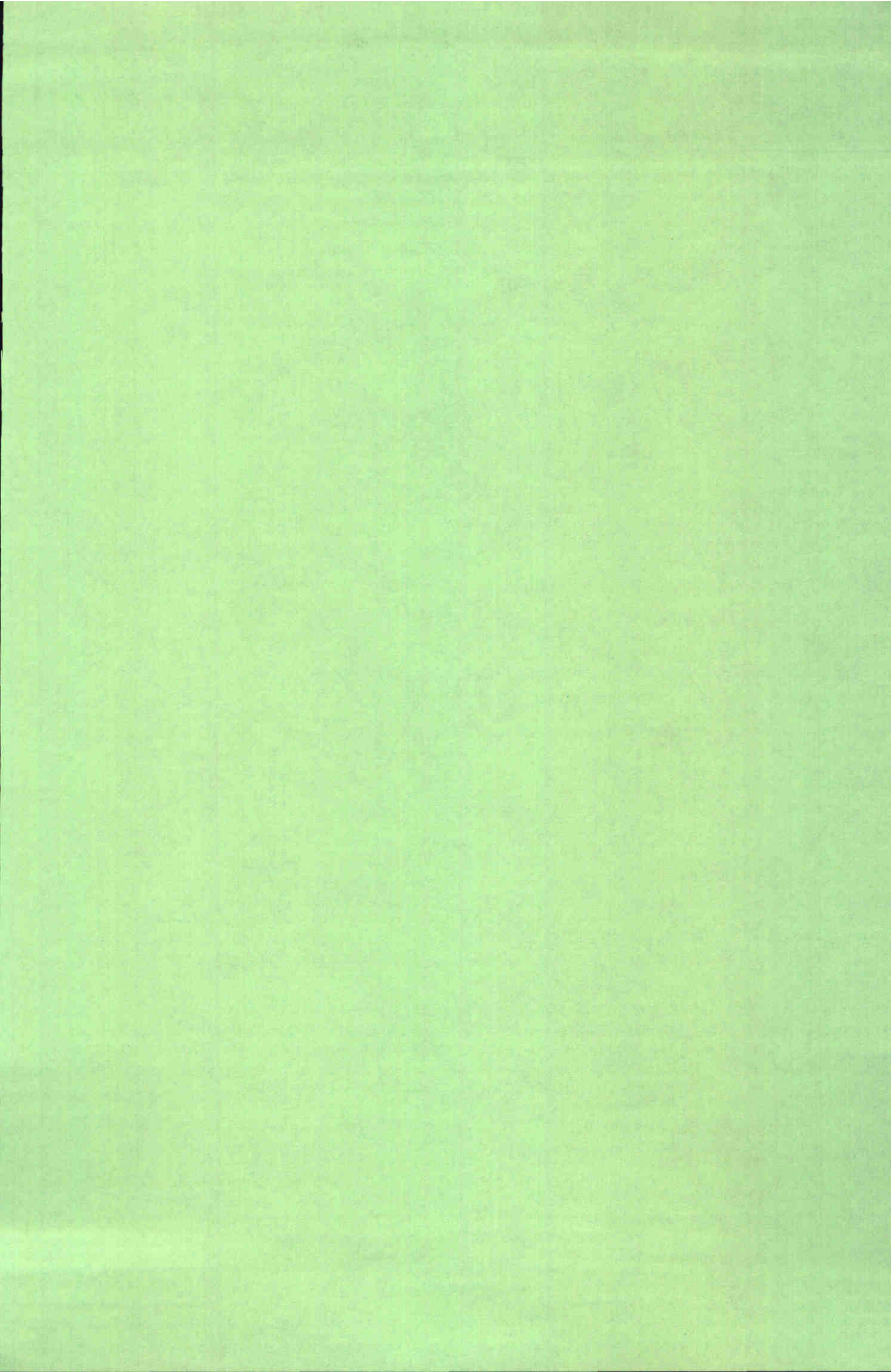
EFFECTIEVE BODEMRUWHEID ALS FUNKTIE  
VAN DE STROOMSNELHEID

S6-PROTO

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2130

FIG. 48-B



APPENDIX A: THEORIE VAN FREDSDØE (uit Ogink, 1984)

(DIMENSIES VAN BEDDINGVORMEN ONDER PERMANENTE STROMINGSOMSTANDIGHEDEN)

Voor een beschrijving van de theorie van Fredsdøe over vorm en dimensies van stationaire beddingvormen is het zinvol onderscheid te maken tussen:

1. situaties met uitsluitend bodemtransport, en
2. situaties waarbij zowel suspensie- als bodemtransport optreedt.

Kriteria voor begin van suspensie zijn gebaseerd op de verhouding van bodemschuifspanningssnelheid ( $u_*$ ) t.o.v. de valsnelheid ( $w_s$ ). De kritieke waarden die in de literatuur voor  $u_*/w_s$  gegeven worden variëren van 0,25 tot 1. Van Rijn (1982,a) hanteert op basis van laboratoriumproeven de volgende criteria voor begin van suspensie:

voor  $1 < D_* \leq 10$  :  $\frac{u_*}{w_s} = \frac{4}{D_*}$

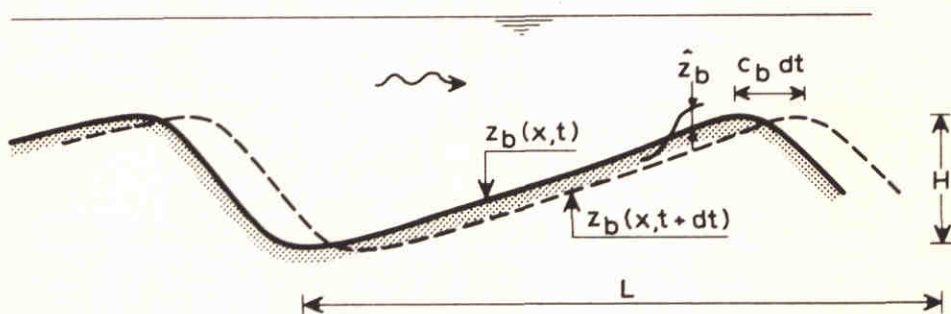
voor  $D_* > 10$  :  $\frac{u_*}{w_s} = 0,4$

Begin van suspensie is hierbij gedefinieerd als die stromingsconditie waarbij de korrels gaan springen over afstanden groter dan  $100 D$ .

Ad 1 Beddingvormen bij situaties met uitsluitend bodemtransport

a. Relatie tussen lokaal transport en bodemhoogte

Beschouwd wordt een beddingvorm die zich onvervormd voortplant met een snelheid  $c_b$ , zie onderstaande schets.



De beddingvorm wordt beschreven door  $z_b = z_b(x - c_b t)$  daar geen vormverandering wordt verondersteld, of:



$$\frac{dz_b}{dt} = 0 = \frac{\partial z_b}{\partial t} + c_b \frac{\partial z_b}{\partial x} \quad (\text{A-1})$$

De continuïteitsvergelijking voor het sediment bij alleen bodemtransport luidt:

$$\frac{\partial s_b}{\partial x} + \frac{\partial z_b}{\partial t} = 0 \quad (\text{A-2})$$

zodat uit (A-1) en (A-2) volgt:

$$\frac{\partial s_b}{\partial x} - c_b \frac{\partial z_b}{\partial x} = 0 \quad (\text{A-3})$$

Integratie van (A-3) over een beddingvorm geeft de volgende betrekking tussen het lokale bodemtransport en de lokale bodemhoogte:

$$s_b(x) = c_b \cdot z_b(x) \quad (\text{A-4})$$

met  $s_b = 0$  in het dal van de beddingvorm ( $x = 0$ ).

Vergelijking (A-4) geldt ook voor de beddingvormtop, zodat uit (A-4) volgt:

$$\frac{s_b}{s_{b,top}} = \frac{z_b}{H} \quad (\text{A-5})$$

Het profiel van de beddingvorm kan nu beschreven worden indien het lokale bodemtransport bekend is. Dat vereist kennis omtrent het verloop van de korrel-schuifspanning langs het beddingvormoppervlak.

#### b. Korrelschuifspanningsverdeling over de beddingvorm

Fredsoe baseert zich bij de bepaling van het verloop van  $\theta'$  over de beddingvorm op metingen van Bradshaw en Wong (1972), die het verloop van de schuifspanning over een vlak bed na een drempel hebben onderzocht; hierbij kan het volgende worden opgemerkt:

- Het stuwpunt is bijna  $6H$  verwijderd van de top van de drempel waartussen zich een bodemneer bevindt, zodat over deze afstand  $\theta' = 0$ .
- Na het stuwpunt neemt de schuifspanning snel toe tot een maximum op ca.  $16H$  na de top van de drempel, waarna de schuifspanning iets afneemt.

De situatie met een beddingvorm wijkt van het voorgaande iets af omdat de bodemhoogte na het stuwpunt langzaam toeneemt tot de beddingvormtop.

De variatie in de korrelschuifspanning over de beddingvorm wordt beschreven door:

$$\frac{\theta'}{\theta'_{\text{top}}} = \frac{(1 - \frac{1}{2}H/h)^2}{(1 + \frac{1}{2}H/h - z_b/h)^2} \cdot F(x/H) \quad (\text{A-6})$$

waarin:  $\theta'$  = lokale dimensieloze korrelschuifspanning

$\theta'_{\text{top}}$  = korrelschuifspanning bij de top van de beddingvorm

De functie  $F(x/H)$  beschrijft het verloop van de schuifspanning volgens Bradshaw en Wong. De eerste term van het rechterlid geeft het effect weer van de variatie in  $\theta'$  t.g.v. het verloop van de bodemhoogte.

#### c. Bepaling van de beddingvorm-vorm

Bij gegeven  $H$ ,  $h$  en  $\theta'_{\text{top}}$  kan m.b.v. (A-6), (A-5) en een bodemtransport vergelijking de variatie in  $z_b$  en dus de vorm van de beddingvorm worden bepaald. Wordt bijvoorbeeld de Meyer-Peter-Müller vergelijking voor het bodemtransport toegepast met  $s_b \sim (\theta' - \theta_{\text{cr}})^{3/2}$  dan volgt uit (A-5):

$$\left(\frac{z_b}{H}\right)^{3/2} = \frac{\theta' - \theta_{\text{cr}}}{\theta'_{\text{top}} - \theta_{\text{cr}}} \quad (\text{A-7})$$

Deze uitdrukking geeft aan dat  $z_b$  het verloop van  $\theta'$  volgt volgens (A-6) en dus maximaal is op een afstand  $16H$  van de vorige duintop, zodat  $H/L = 1/16 = 0,06$ .

#### d. Bepaling van de beddingvormhoogte

In het voorgaande is  $H$  ingevoerd om de vorm van de beddingvorm te bepalen, zodat  $H$  nog niet vaststaat. Met behulp van een analyse van verstoringen in het oppervalk kan worden aangetoond dat de berekende beddingvorm slechts stabiel is voor één waarde van  $H/h$ . Wordt deze verstoring in het oppervlak aangegeven door  $\hat{z}_b$  dan volgt voor de verandering van de beddingvormhoogte nabij de top:

$$\frac{d}{dt} (z_b + \hat{z}_b) = \frac{\partial}{\partial t} (z_b + \hat{z}_b) + c_b \frac{\partial}{\partial x} (z_b + \hat{z}_b) \quad (\text{A-8})$$

De eerste term in het rechterlid volgt uit de continuïteitsvergelijking voor het sediment (A-2):

$$\frac{\partial}{\partial t} (z_b + \hat{z}_b) = - \frac{\partial}{\partial x} (s_b + \hat{s}_b) \quad (\text{A-9})$$

waarin:  $\hat{s}_b$  = lokale verandering in  $s_b$  t.g.v. de verstoring  $\hat{z}_b$ .  
De laatste term in (A-9) kan ook worden omgewerkt tot:

$$\frac{\partial \hat{s}_b}{\partial x} = \frac{ds_b}{d\theta'} \cdot \frac{\partial \theta'}{\partial z_b} \cdot \frac{\partial \hat{z}_b}{\partial x} \quad \text{top} \quad (\text{A-10})$$

Hierin kan  $\partial \theta' / \partial z_b$  uitgedrukt worden in  $\theta'_{\text{top}}$ , H en h via vgl. (A-6), (met  $F(x/H) = 1$  daar posities nabij de top worden beschouwd).

De voortplantingssnelheid  $c_b$  in de tweede term van (A-8) van het rechterlid wordt met (A-4):

$$c_b = \frac{s_b + \hat{s}_b}{z_b + \hat{z}_b} \quad \text{top} \approx \frac{s_{b,\text{top}}}{H} \left( 1 + \frac{\hat{s}_b}{s_{b,\text{top}}} - \frac{\hat{z}_b}{H} \right) \quad (\text{A-11})$$

Substitutie van (A-9), (A-10) en (A-11) in (A-8) leidt tot:

$$\frac{d\hat{z}_b}{dt} = A_1 \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\hat{z}_b}{z_b} \right) \quad \text{met:} \quad A_1 = s_b - 2\theta' \frac{ds_b}{d\theta'} \frac{H/h}{(1 - \frac{1}{2}H/h)} \quad \text{top} \quad (\text{A-12})$$

De beddingvorm is alleen stabiel van vorm voor  $d\hat{z}_b/dt = 0$  ofwel  $A_1 = 0$ , zodat voor de relatieve beddingvormhoogte volgt met  $s_b$  vervangen door de dimensie-loze transportgrootte  $\phi_b$ :

$$\frac{H/h}{(1 - \frac{1}{2}H/h)} = \frac{\phi_b}{2\theta' \frac{d\phi_b}{d\theta'} \quad \text{top}} \quad (\text{A-13})$$

Toepassing van de bodemtransportformule van Meyer-Peter-Müller in (A-13) geeft:

$$\frac{H/h}{(1 - \frac{1}{2}H/h)} = \frac{\theta'_{\text{top}} - \theta_{\text{cr}}}{3\theta'_{\text{top}}} \quad (\text{A-14})$$

Voor  $\theta'_{\text{top}} \gg \theta_{\text{cr}}$  volgt uit (A-14)  $H/h = 0,286$ , d.w.z. een konstante waarde. Dit toont aan dat met (A-13) geen afvlakking van beddingvormen beschreven kan worden.

#### Ad 2 Beddingvormen bij situaties met bodem- en suspensietransport

Indien  $u_* / w_s$  toeneemt gaat een deel van het bodemmateriaal in suspensie. Dit houdt in dat het totale transport t.p.v. de beddingvormtop  $s_t$  bestaat uit:

- een deel  $s_b$  dat neerslaat op de lijzijde van de beddingvorm,
- een deel  $s_s$ , het suspensietransport, dat naar de volgende beddingvorm wordt getransporteerd en niet neerslaat op de lijzijde.

Ten aanzien van de analyse van verstoringen in het beddingvormoppervlak, zoals gegeven in (A-8), geldt nu:

- in de continuïteitsvergelijking (A-9) en dientengevolge ook in (A-10) wordt  $s_b$  vervangen door  $s_t = s_b + s_s$
- vergelijking (A-11) voor  $c_b$  blijft ongewijzigd, omdat deze bepaald wordt door de grootte van  $s_b$ .

Door substitutie van genoemde aanpassing in (A-8) volgt een uitdrukking analoog aan (A-12) met  $A_1$  vervangen door:

$$A_2 = s_b - 2\theta' \frac{ds_t}{d\theta'} \frac{H/h}{(1 - \frac{1}{2}H/h)} \quad \text{top} \quad (\text{A-15})$$

zodat nu voor de relatieve beddingvormhoogte wordt gevonden:

$$\frac{H/h}{(1 - \frac{1}{2}H/h)} = \frac{\phi_b}{2\theta' \frac{d\phi_t}{d\theta'} \quad \text{top}} \quad (\text{A-16})$$

met:  $\phi_t = \phi_b + \phi_s =$  dimensieloos totaaltransport  
 $\phi_s =$  dimensieloos suspensietransport

Voor de beddingvormlengte stelt Fredsøe (1984):

$$L = \frac{16 H \phi_b + (16 H + \delta) \phi_s}{\phi_t} \quad (\text{A-17})$$

waarin:  $\delta =$  afstand tussen lokatie van maximale schuifspanning en maximaal suspensietransport.

Het effect van  $\phi_s$  op  $H/h$  en  $H/L$  is duidelijk geïllustreerd in Figuur 1. In tegenstelling tot het geval met alleen bodemtransport (in de figuur weergegeven door zeer grof materiaal waarbij  $\phi_s = 0$ ) is nu duidelijk sprake van afvlakking, des te sterker naarmate het korrelmateriaal fijner is. Ook neemt de steilheid af voor grote waarden van  $\theta'$  in overeenstemming met Figuur 1.

De berekende beddingvormhoogtes op basis van vergelijking (A-13) en (A-16) zijn sterk afhankelijk van de transportformules die worden toegepast. Omtrent de absolute waarde van  $H/h$  bij gegeven  $\theta'$  geeft deze methode zonder ijking van de transportvergelijkingen dus weinig houvast. Hoogstens kan een tendentie worden aangegeven t.a.v. afvlakking van beddingvormen.

APPENDIX B: FORMULERINGEN

B.1 Korrektie wandinvloed

$$R_w = \frac{Q^2}{B^2 h^2 i [181 \log \{12 R_w / (k_w + \delta_w / 3,5)\}]^2} \quad (B-1)$$

$$\delta_w = \frac{11,6 \nu}{(g R_w i)^{\frac{1}{2}}} \quad (B-2)$$

$$k_w = 4 \cdot 10^{-7} \text{ m} \quad (\text{voor de zandgoot van het WL}) \quad (B-3)$$

$$R_b = h (1 - 2R_w / B) \quad (B-4)$$

Vergelijkingen (B-1) en (B-2) gebruiken om  $R_w$  iteratief te bepalen.

B.2 Chézy-coëfficiënt en Froude-getal

$$C = \frac{u}{(R_b i)^{\frac{1}{2}}} \quad (B-5)$$

$$u = \frac{Q}{B h} \quad (B-6)$$

$$Fr = \frac{u}{(g R_b)^{\frac{1}{2}}} \quad (B-7)$$

B.3 Dimensieloze schuifspanningen

$$\theta = \frac{R_b i}{\Delta D_{50}} \quad (B-8)$$

korrelschuifspanning volgens Einstein:

$$\theta' = \frac{(u'_*)^2}{g \Delta D_{50}} \quad (B-9)$$

$$u'_* = (g h' i)^{\frac{1}{2}} \quad (B-10)$$

$$\frac{u}{u'_*} = 6 + 2,5 \ln\left(\frac{h'}{2D_{50}}\right) \quad (B-11)$$

$$\theta'_{top} = \theta' (1 - H/2h)^{-2} \quad (B-12)$$

Met vergelijkingen (B-11) en (B-12) iteratief oplossen van  $h'$ .

Korrelschuifspanning volgens Van Rijn:

$$\theta'_R = \frac{(u'_*)^2}{g \Delta D_{50}} \quad (B-13)$$

$$u'_* = \frac{u}{C'_b} g^{\frac{1}{2}} \quad (B-14)$$

$$C'_b = 18 \log\left(\frac{12 R_b}{3 D_{90}}\right) \quad (B-15)$$

#### B.4 Stromingsparameter en valsnelheid

Stromingsparameter:

$$T = \frac{\theta' - \theta_{cr}}{\theta_{cr}} \quad (B-16)$$

$$\theta' = \theta'_R \quad (B-13) \text{ t/m } (B-15)$$

volgens Van Rijn (1982,a):

$$\theta_{cr} = 0,24 D_*^{-1} \quad \text{voor} \quad D_* \leq 4 \quad (B-17a)$$

$$\theta_{cr} = 0,14 D_*^{-0,64} \quad 4 < D_* \leq 10 \quad (B-17b)$$

$$\theta_{cr} = 0,04 D_*^{-0,1} \quad 10 < D_* \leq 20 \quad (B-17c)$$

$$\theta_{cr} = 0,013 D_*^{0,29} \quad 20 < D_* \leq 150 \quad (B-17d)$$

$$\theta_{cr} = 0,055 \quad D_* > 150 \quad (B-17e)$$

$$D_* = \left(\frac{\Delta g}{\nu^2}\right)^{1/3} D_{50} \quad (B-18)$$

Valsnelheid (volgens Valembos, 1960):

$$G = D_*^3 \quad (B-19)$$

$$G < 10 \quad R = 0,0556 G \quad (B-20a)$$

$$10 < G < 300 \quad R = 0,0784 G^{0,85} \quad (B-20b)$$

$$300 < G < 67000$$

$$R = 0,1711 G^{0,713} \quad (\text{B-20c})$$

$$67000 < G \quad R = 1,826 G^{0,5}$$

$$(\text{B-20d})$$

$$w_s = \frac{R \cdot v}{D_{50}}$$

$$(\text{B-21})$$

### B.5 Sedimenttransporten

$$s_{b,top} = (1-n) c_b H \quad (2)$$

(dune-tracking) (B-22)

$$s_{b,top} = 1.8 * S_b \quad (1)$$

(uit gemiddeld bodemtransport gemeten met de opvangbak). (B-23)

$$s_{s,top} = s_{t,top} - s_{b,top} \quad (2)$$

(uit verschil metingen) (B-24)

$$s_{s,top}$$

(uit meting van u en c) (B-25)

$$\phi_t = \frac{s_t}{(g \Delta D_{50}^3)^{\frac{1}{2}}}$$

$$(\text{B-26})$$

$$\phi_b = \frac{s_b}{(g \Delta D_{50}^3)^{\frac{1}{2}}}$$

$$(\text{B-27})$$

$$\phi_s = \frac{s_s}{(g \Delta D_{50}^3)^{\frac{1}{2}}}$$

$$(\text{B-28})$$

Met  $D_{50}$  als gemiddelde korreldiameter voor het betreffende transport.

### B.6 Ruwheidsvoorspellers

Ruwheidsvoorspeller van Van Rijn:

$$k = k' + k''$$

$$(\text{B-29})$$

$$k' = 3 D_{90}$$

$$(\text{B-30})$$

$$k'' = 1,1 H [1 - \exp(-25 H/L)]$$

$$(\text{B-31})$$

$$C = 18 \log \left\{ \frac{12 R_b}{k} \right\}$$

$$(\text{B-32})$$

Ruwheidsvoorspeller van Engelund:

$$u = Q / (B \cdot h) \quad (B-33)$$

$$\frac{u}{(g R'_b i)^{\frac{1}{2}}} = 6 + 2,5 \ln (R'_b / 2 D_{50}) \quad (B-34)$$

$$C' = 18 \log \left\{ \frac{11 R'_b}{2 D_{50}} \right\} \quad (B-35)$$

$$f' = 8g / (C')^2 \quad (B-36)$$

$$f'' = 10 \exp(-2,5 H/h) \cdot H^2 / (hL) \quad (B-37)$$

$$f = f' + f'' = 8g / C^2 \quad (B-38)$$

$$h = Q / [B C (R'_b i)^{\frac{1}{2}}] \quad (B-39)$$

$$C = 18 \log \left\{ \frac{12 R'_b}{k} \right\} \quad (B-40)$$

Eerst wordt h geschat en  $R'_b$  iteratief met (B-34) bepaald, dan wordt h volgens (B-39) vergeleken met de geschatte h. De vergelijkingen (B-33) tot en met (B-39) worden iteratief gebruikt om h en C te bepalen.



APPENDIX C: BEPALING BEDDINGVORMAFMETINGEN (uit Ogink, 1984)

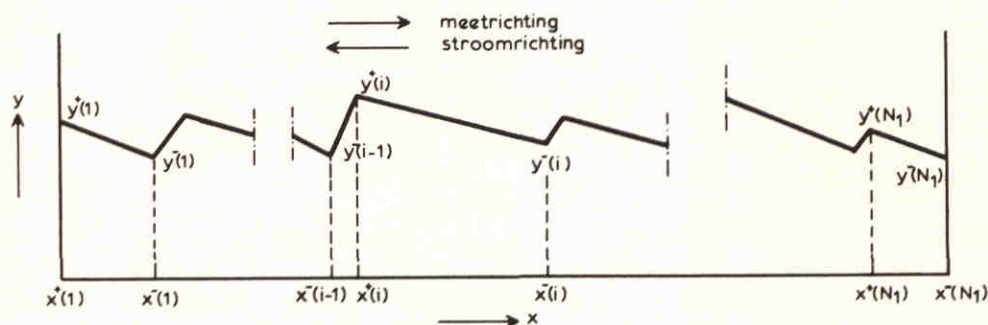
Sequentiele behandeling van de bewerkingen van beddingvormregistraties:

1. Bepaling van de gemiddelde waterdiepte over een traject:

$$\bar{h} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h(i) \quad (C-1)$$

met  $h(i)$  = lokale waterdiepte

$N$  = aantal meetpunten in de bodemregistratie



Notatie voor bodempeilingen

2. Bepaling van de lokale extrema:

$y^+(i)$  =  $i^e$  lokale maximum

$x^+(i)$  = lokatie van  $y^+(i)$  in m t.o.v. referentie

$y^-(i)$  = lokaal minimum direkt volgend op  $y^+(i)$

$x^-(i)$  = lokatie van  $y^-(i)$  t.o.v. referentie

Het eerste extremum is dus steeds een top en het laatste een dal; het aantal toppen is  $N_1$ , zie bovenstaande schets.

3. Eliminatie van meetruis door eliminatie van lokale extrema indien hun verschil kleiner is dan  $H_c$  volgens de volgende criteria:

- indien  $y^+(i) - y^-(i) < H_c$ :

indien  $y^+(i+1) < y^+(i)$  dan verwijder  $y^-(i)$  en  $y^+(i+1)$

indien  $y^+(i+1) > y^+(i)$  dan verwijder  $y^-(i)$  en  $y^+(i)$

(C.2)

- indien  $y^+(i+1) - y^-(i) < H_c$ :

indien  $y^-(i+1) < y^-(i)$  dan verwijder  $y^-(i)$  en  $y^+(i+1)$   
indien  $y^-(i+1) > y^-(i)$  dan verwijder  $y^-(i+1)$  en  $y^+(i+1)$

Opm.:  $H_c$  is ongeveer de nauwkeurigheid waarmee de bodemligging kan worden ingewonnen.

4. Bepaling van de kumulative frekwentieverdeling van de beddingvormhoogte H met:

$$H(i) = y^+(i) - y^-(i-1) \quad (C-3)$$

5. Bepaling van gemiddeld kleine beddingvorm of ribbelparameters:

$$\bar{H}_r = \frac{1}{N_1 - 1} \sum_{i=2}^{N_1} H(i)$$
$$\bar{L}_r = \frac{x^+(N_1) - x^+(1)}{N_1 - 1} \quad (C-4)$$

$$L_{r,max} = \max ( x^-(i) - x^-(i-1) )$$

Feitelijk worden hier gemiddelde beddingvormparameters bepaald, waarin alle top-dalen worden meegenomen. Daar het aantal ribbels gewoonlijk veel groter is dan het aantal beddingvormen bij samengestelde beddingvormen zijn de parameters voornamelijk bepaald door de ribbels of kleine beddingvormen.

6.  $H_{grens} = \bar{H}^2 / \sigma_H$  (C-5)

met  $\sigma_H$  = standaardafwijking van  $H(i)$ ,  $i = 2, N_1$

$H_{grens}$  gedefinieerd volgens (C-5) is een empirisch bepaalde waarde om onderscheid te maken tussen grote beddingvormen en kleine beddingvormen die op de grote beddingvormen gesuperponeerd zijn. Naast de definitie volgens (C-5) wordt ook gewerkt met een vooraf bepaalde vaste grenswaarde.

7. Bepaling van effectieve ribbelparameters, d.w.z. parameters van beddingvormen met  $H_r(i) = H(i) < H_{grens}$ ; het aantal ribbels is  $N_2$  met  $N_2 < N_1 - 1$ .  
Bepaald worden:

- de gemiddelde effectieve ribbelhoogte en -lengte:

$$\bar{H}_r^* = \frac{1}{N_2} \sum_{i=2}^{N_1} H_r(i) \quad (C-6)$$

$$\bar{L}_r^* = \frac{1}{N_2} \sum_{i=2}^{N_1} L_r(i)$$

waarin:  $L_r(i) = \bar{x}(i) - \bar{x}(i-1)$  met  $H(i) < H_{\text{grens}}$

- de dominante effectieve ribbelhoogte en -lengte:

$$H_{r,\text{dom}}^* = \frac{1}{L_{\text{tot}}^*} \sum_{i=2}^{N_1} H_r(i) \cdot L_r(i) \quad (C-7)$$

$$L_{r,\text{dom}}^* = \frac{1}{L_{\text{tot}}^*} \sum_{i=2}^{N_1} L_r^2(i)$$

$$\text{waarin: } L_{\text{tot}}^* = \sum_{i=2}^{N_1} L_r(i)$$

- lijzijde helling van de ribbels:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{N_2} \sum_{i=2}^{N_1} H_r(i) / (x^-(i-1) - x^+(i)) \quad (C-8)$$

$$\alpha_{\text{max}} = \max [H_r(i) / (x^-(i-1) - x^+(i))]$$

- de koëfficiënt  $\beta_{2a}''$  in vgl. 2.28 in (Ogink, 1984)

$$\beta_{2a}'' = \frac{1}{L_{\text{tot}}^*} \sum_{i=2}^{N_1} L_r(i) \left( \frac{\bar{h}}{h^*(i)} \right)^2 \quad (C-9)$$

$$\beta_{2b}'' = \frac{1}{N_1 - 1} \sum_{i=2}^{N_1} \left( \frac{\bar{h}}{h^*(i)} \right)^2$$

$$\text{waarin: } L_{\text{tot}} = x^-(N_1) - x^-(1)$$

$$h(i) = \frac{1}{2} [h(x^+(i)) - h(x^-(i-1))]$$

8. Bepaling van weerstandsfactoren  $f$  van ribbels volgens Van Rijn, Vanoni en Hwang en Engelund, (zie Ogink 1984) op basis van:

- a. gemiddelde beddingvormparameters
- b. gemiddelde effectieve ribbelvormparameters
- c. dominante effectieve ribbelvormparameters
- d. individuele ribbels door 'sommatie' van  $f$ -waarden;

bij de gevallen b, c en d wordt de berekende waarde gekorrigeerd voor de beperkte ribbellengte t.o.v. de trajektlengte door vermenigvuldiging met  $L_{tot}^*/L_{tot}$ .

9. Eliminatie van ribbels door eliminatie van lokale extrema indien hun verschil kleiner is dan  $H_{grens}$ , analoog aan de procedure onder 3.

10. Bepaling van gemiddelde en dominante beddingvormparameters

$$\bar{H}_d = \frac{1}{N_3 - 2} \sum_{i=2}^{N_3 - 1} (y^+(i) - y^-(i-1)) - \bar{H}_r \quad (C-10)$$

$$\bar{L}_d = x^-(N_3) - x^-(1) / (N_3 - 1)$$

waarin:  $N_3$  = aantal beddingvormtoppen

$$H_{d,dom} = \frac{1}{L_{d,tot}} \cdot \sum_{i=2}^{N_3} H_d(i) \cdot L_d(i) - \bar{H}_r \quad (C-11)$$

$$L_{d,dom} = \frac{1}{L_{d,tot}} \cdot \sum_{i=2}^{N_3} L_d^2(i)$$

waarin:  $L_{d,tot} = x^+(N_3) - x^+(1)$

$$\alpha_d(i) = H_d(i) / (x^-(i-1) - x^+(i)) \quad (C-12)$$

$$\bar{\alpha}_d = \frac{1}{N_3 - 1} \sum_{i=2}^{N_3} \alpha_d(i)$$

11. Bepaling van gemiddelde en dominante effectieve beddingvormparameters analoog aan 10 na eliminatie van alle beddingvormen met een beddingvormlengte  $> 12 \bar{h}$ .

12. Bepaling van weerstandsfactoren  $f$  van beddingvormen analoog aan 8 op basis van parameters gedefinieerd onder 10 en 11 en uit de individuele beddingvormen door sommatie van  $f$ -waarden, volgens (C-9) en  $\beta_1''$  als functie van  $\alpha_d(i)$  in Figuur 2.8 in Ogink (1984).

$$f_s = \beta_2'' f_2'' (\bar{H}_r, \bar{L}_r) + \frac{1}{L_{tot}} \cdot \sum_{i=2}^{N_3} L_d(i) \cdot \beta_1''(i) (f_1''(i) - f'(i)) \quad (C-13)$$

APPENDIX D: KORRELATIES BEDDINGVORMEN, VOORTPLANTINGSSNELHEID (uit Bakker, 1978)

D.1 Inleiding

Om een indruk te krijgen van de problematiek kan men zich in eerste instantie voorstellen, dat de beddingvormen in de zandgoot beschreven kunnen worden door een aantal sinussen met gelijke perioden en amplituden. In deze gedachtengang wordt elke beddingvorm door een sinus weergegeven. De voortplantingssnelheid van de beddingvormen kan worden bepaald door uit twee metingen, die uitgevoerd zijn op verschillende tijdstippen, de grootte van de verschuiving van de serie sinussen ten opzichte van elkaar te bepalen. Uit de verschuiving en het tijdsverschil tussen de metingen volgt de voortplantingssnelheid. Een voorwaarde hierbij is, dat de verschuiving kleiner is dan één periode van een sinus.

De werkelijk in de zandgoot aanwezige beddingvorm verschilt op een aantal punten van de hiervoor beschreven geïdealiseerde situatie. Een beddingvorm kan niet beschreven worden met een sinus; een betere benadering kan wellicht worden verkregen door uit te gaan van een niet-gelijkbenige driehoek. Uitgaande van driehoeken moet echter rekening gehouden worden met een per beddingvorm verschillende hoogte en basis. Voorts geldt, dat bij de beddingvormen in de zandgoot geen sprake is van onvervormde voortplanting. In relatief korte tijd kan een beddingvorm volledig afvlakken of groeit een ribbel uit tot een gepro-  
nonceerde beddingvorm.

Een methode waarmee toch de verschuiving tussen twee metingen uit de zich vormende en verplaatsende beddingvorm kan worden bepaald is de methode, waarbij door verschuiven van de ene registratie ten opzichte van de andere de grootst mogelijke overeenkomst tussen twee metingen wordt bepaald. Deze grootst mogelijke overeenkomst tussen twee metingen wordt bereikt indien de korrelatiecoëfficiënt maximaal is. De theoretische achtergrond van deze aanpak van het probleem wordt in de volgende paragraaf nader beschreven.

## D.2 Theoretische achtergrond

De korrelatiecoëfficiënt is gedefiniëerd als:

$$\rho(\underline{x}, \underline{y}) = \text{kov}(\underline{x}, \underline{y}) / \sqrt{\text{var } \underline{x} \text{ var } \underline{y}}, \text{ var } \underline{x} > 0 \text{ en } \text{var } \underline{y} > 0$$

waarin  $\rho(\underline{x}, \underline{y})$  = de korrelatiecoëfficiënt van  $\underline{x}$  en  $\underline{y}$

$\text{kov}(\underline{x}, \underline{y})$  = de kovariantie van  $\underline{x}$  en  $\underline{y}$

$\text{var } \underline{x}$  = de variantie van  $\underline{x}$

$\text{var } \underline{y}$  = de variantie van  $\underline{y}$

De kovariantie en de variantie zijn respectievelijk gedefiniëerd als:

$$\text{kov}(\underline{x}, \underline{y}) = E[(\underline{x} - E\underline{x})(\underline{y} - E\underline{y})] = E(\underline{x}, \underline{y}) - E\underline{x} E\underline{y}$$

$$\text{var } \underline{x} = E\underline{x}^2 - (E\underline{x})^2 = E(\underline{x} - E\underline{x})^2$$

Hierin is E de verwachtingswaarde van de stochastische variabelen.

In plaats van gebruik te maken van de theoretische verwachtingswaarden wordt gebruik gemaakt van schattingen. Voor de verwachtingswaarde wordt als schatter ingevoerd:

$$\underline{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \underline{x}_i$$

Als schatter van  $\text{var } \underline{x}$  wordt genomen de steekproefvariantie:

$$\underline{s}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\underline{x}_i - \underline{m})^2$$

Na invoering van de schatters zijn de kovariantie en korrelatiecoëfficiënt respectievelijk als volgt gedefiniëerd:

$$\text{kov}(\underline{x}, \underline{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(\underline{x}_i - \underline{m}_x)(\underline{y}_i - \underline{m}_y)]$$

$$\rho(\underline{x}, \underline{y}) = \text{kov}(\underline{x}, \underline{y}) / \sqrt{\underline{s}_x^2 \underline{s}_y^2}$$

De kruiskorrelatiecoëfficiënt, die bepaald wordt uit twee metingen, die over een afstand k ten opzichte van elkaar zijn verschoven is nu gedefiniëerd als:

$$\text{kruiskorrelatiekoëfficiënt} = \frac{C_{xy}(k)}{\sqrt{\sigma_x^2 \sigma_y^2}}$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{N-k} \sum_{r=1}^{N-k} \hat{x}_r \hat{y}_{r+k} \quad (k = 1, \dots, m)$$

$$\hat{x}_r = x_r - \bar{x} \quad r = 1, \dots, N$$

$$\hat{y}_r = y_r - \bar{y} \quad r = 1, \dots, N$$

Op grond van het voorgaande kan worden bewezen, dat de waarden van de korrelatiekoëfficiënt liggen in het interval  $(-1, +1)$ . Tevens kan worden bewezen, dat de korrelatiekoëfficiënt maximaal is bij de grootst mogelijke overeenkomst tussen twee opeenvolgende metingen. Elke meting bestaat in het beschouwde geval uit 3001 registraties van de bodemhoogte. De bepaling van de maximale kruiskorrelatie en de daarbij behorende waarde voor de verschuiving geschiedt als volgt. Van een meting wordt het gemiddelde bepaald, van iedere diskrete waarde wordt dit gemiddelde afgetrokken. Dezelfde procedure wordt gevolgd voor de tweede meting.

De eerste berekening wordt uitgevoerd over twee series meetpunten, die  $k_0$  ten opzichte van elkaar zijn verschoven. Het gemiddelde van de produkten levert de eerste waarde van de kovarianties. Vervolgens wordt dit procedé herhaald met twee series meetpunten, die nu  $k_1$  ten opzichte van elkaar zijn verschoven, etc. Iedere berekende kovariantie wordt gedeeld door het kwadratisch gemiddelde van de varianties van beide meetseries. Bij elke waarde van  $k$  wordt een waarde voor de kruiskorrelatie gevonden. De kruiskorrelatiekoëfficiënt kan, als functie van  $k$  uitgezet, meerdere maxima vertonen. Die waarde van  $k$ , die behoort bij het eerste maximum, dat qua waarde groter is dan het volgende maximum, wordt beschouwd als de verplaatsing van de beddingvormen in de tijdsduur die ligt tussen de twee beschouwde metingen.

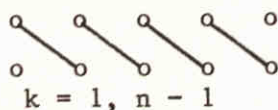
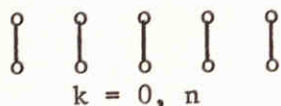
Aangezien de kovariantie bepaald is

$$\text{als: } \text{kov}(\underline{x}, \underline{y}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\underline{x}_i - \bar{x})(\underline{y}_i - \bar{y})$$

wordt de verlopende kovariantie:

$$\text{kov}(\underline{x}, \underline{y}) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} (\underline{x}_i - \bar{x})(\underline{y}_i - \bar{y}) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} (\underline{x}_i - \bar{x})(\underline{x}_{i+k} - \bar{x}),$$

waarbij dus aangenomen is, dat de duinen niet vervormen in de tijd. Schematisch kan dit als volgt worden weergegeven:



De hoogten van de beddingvormen zijn gerelateerd aan een horizontaal referentievlak. In termen van de zandgoot komt dit referentievlak overeen met de stalen gootbodem, de hoogte van de gootbodem is per definitie 0. Omdat de absolute hoogte van de beddingvormen in stroomafwaartse richting van de zandgoot afneemt, loopt de lijn, die met de methode der kleinste kwadraten wordt bepaald, niet evenwijdig met de stalen gootbodem. Dit heeft tot gevolg, dat het gemiddelde en de variantie afhankelijk zijn van de plaats en lengte van de sectie waarover de kruiskorrelatie berekend moet worden. Aangezien de kovariantie evenredig vergroot wordt, is de invloed hiervan nihil.

Wel is het hierdoor onmogelijk een vergelijking te maken tussen twee meetsecties, die niet hetzelfde begin- en eindpunt hebben. Hiervoor zou het noodzakelijk zijn met behulp van bovengenoemde lijn de punten zodanig interpolerend te reduceren, dat deze lijn evenwijdig aan het horizontale vlak komt te liggen. Theoretisch is dit geoorloofd, want met behulp van bekende stellingen uit de statistiek:

$$\text{var} (a\underline{x} + b) = a^2 \text{var} \underline{x}$$

$$\text{kov} (a\underline{x} + b, c\underline{y} + d) = ac \text{kov} (\underline{x}, \underline{y})$$

volgt direkt:

$$\rho (\underline{x}, \underline{y}) = \text{kov} (a\underline{x} + b, c\underline{y} + d) / \sqrt{\text{var} (a\underline{x} + b) \text{var} (c\underline{y} + d)}$$

$$= ac \text{kov} (\underline{x}, \underline{y}) / \sqrt{a^2 \text{var} \underline{x} c^2 \text{var} \underline{y}}$$

$$= \text{kov} (\underline{x}, \underline{y}) / \sqrt{\text{var} \underline{x} \text{var} \underline{y}}$$

Om de kruiskorrelatie van de beddingvorm enkel afhankelijk te laten zijn van de vorm van de beddingvormen en niet meer van de bodemhelling en de plaats in de onderzoekgoot, is besloten de meetpunten te reduceren met behulp van de lijn, die is bepaald uitgaande van de methode der kleinste kwadraten.



p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands