

Ontgrondingen rond pijpleidingen op slibhoudend zand

April 1993

Ir. E.T.J.M. van der Velden



Stichting voor de Technische Wetenschappen



Technische Universiteit Delft

Faculteit der Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde
Sectie Waterbouwkunde

**ONTGRONDINGEN ROND PIJPLEIDINGEN
OP SLIBHOUDEND ZAND**

Ir. E.T.J.M. van der Velden

**Stichting voor de Technische Wetenschappen
Utrecht**

**Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde**

April 1993

Samenvatting

Het transport en de erosie van mengsels van zand met 10 tot 30% slib is onderzocht. Zowel het transport in de algemene zin als de erosie rond pijpleidingen is in beschouwing genomen.

De transport karakteristieken van zand waar zich slib in bevindt verschillen van die van zuiver zand. De kritische bodemschuifspanning neemt toe voor een toenemend percentage slib. Het transport vormt niet een evenwicht zoals dat bij zuiver zand gebeurt maar neemt langzaam toe in de tijd.

De erosie karakteristieken rond pijpleidingen op een zand-slibbed wijken eveneens af van die op een zuiver zand-bed. Als gevolg van de verhoogde kritische bodemschuifspanning vindt pas erosie plaats bij hogere stroomsnelheden. De erosie is zeer plaatselijk. Afhankelijk van het soort slib in het zand vindt een geringe, zeer plaatselijke, korrelsgewijze erosie plaats (kunstmatig kaoliniet-zandmengsel) of een broksgewijze, onregelmatige erosie (natuurlijk zand-slibmengsel afkomstig van de Oestergronden op de Noordzee).

De aanwezigheid van een spoiler op de pijp stimuleert de erosie rond pijpleidingen op een zuiver zandbed. Ditzelfde geldt voor pijpleidingen op een zand-slibbed; de erosie vindt bij enigszins lagere stroomsnelheden plaats en de uiteindelijke erosiekuil is breder. De stroomsnelheden onder en achter de pijp worden niet extra versterkt door de vin in een andere stand dan de gebruikelijke recht omhoog staande stand te plaatsen.

INHOUD

1.	Inleiding	1
2.	Sedimenttransport	4
2.1	Algemeen	4
2.2	Sedimenttransport niet-cohesief materiaal	4
2.2.1	Principe	4
2.2.2	Sedimenttransportformules voor niet-cohesief materiaal	5
2.2.3	Critische bodemschuifspanning	6
2.3	Sedimenttransport cohesief materiaal	6
2.3.1	Principe	6
2.3.2	Erosieformules cohesief materiaal	9
2.3.3	Critische bodemschuifspanning	10
2.4	Sedimenttransport niet-cohesief materiaal gemengd met cohesief materiaal (slibrijk zand)	13
3.	Proeven sediment transport	19
3.1	Inleiding	19
3.2	Experimentele opzet	19
3.3	Instrumentatie	24
3.3.1	Snelheden	24
3.3.2	Concentraties	25
3.3.3	Verhang	26
3.3.4	Saliniteit	26
3.4	Analyse afgetapte sediment-water monsters	27
3.5	Eigenschappen van het gebruikte bodemmateriaal	27
3.5.1	Mineralogische samenstelling	27
3.5.2	Granulometrie	29
3.5.3	Consolidatie	30
3.6	Meetprocedure	34
3.7	Beschrijving en verwerking meetresultaten	37
3.7.1	Stroomgoot A	37
3.7.2	Stroomgoot B	47
3.8	Conclusies omtrent sedimenttransport van zand-slibmengsels	50
4.	Zelfingravingsproces pijpleidingen op zee	52
4.1	Algemeen	52
4.2	Zelfingravingsproces in niet-cohesief materiaal	52
4.3	Uitschuring rond pijpleidingen op een niet-cohesieve bodem	53
4.3.1	Begin van uitschuring rond pijpleidingen	53
4.3.2	Uitschuring rond pijpleidingen	55

4.3.3	Berekening uitschuring rond pijpleidingen	57
4.4	Effect van een spoiler	59
4.5	Uitschuring rond pijpleidingen op een cohesieve bodem	60
5.	Proeven zelfingraving pijpleidingen	61
5.1	Inleiding	61
5.2	Experimentele opzet	61
5.3	Instrumentatie	62
5.3.1	Snelheden	62
5.3.2	Bodemprofielen	63
5.3.3	Saliniteit	64
5.4	Eigenschappen gebruikte bodemmaterialen en granulometrie	64
5.5	Eigenschappen gebruikte modelpijpjes	64
5.6	Meetprocedure	65
5.7	Analyse bodemprofielen	66
5.8	Beschrijving resultaten	67
5.8.1	Resultaten ontgrondingsproeven zuiver zand	67
5.8.2	Resultaten ontgrondingsproeven zand-kaolinetbed	68
5.8.3	Resultaten ontgrondingsproeven zand-Oesterslibbed	73
5.9	Van model naar prototype	78
5.9.1	Stroming	78
5.9.2	Stroming en golven	84
5.9.3	Scheef aanstromenen	87
5.9.4	Pijpruwheid	87
5.9.5	Schaaleffecten	88
5.9.6	Stroom- en golfgegevens van de Oestergronden op de Noordzee	91
5.10	Conclusies omtrent de uitschuring rond pijpleidingen op slibrijk zand	93
6.	Stroming rond pijpleidingen	95
6.1	Algemeen	95
6.2	Stroombeeld rond een pijp	95
6.2.1	Stroombeeld rond een pijp ver van de wand	95
6.2.2	Stroombeeld rond een ruwe pijp ver van de wand	98
6.2.3	Invloed van een wand op het stroombeeld rond een pijp	99
6.3	Stroombeeld rond een pijp met een spoiler vlak boven een bed	102
7.	Experimenten stroming rond pijpleidingen op of vlak boven de bodem	103
7.1	Inleiding	103
7.2	Experimentele opzet	104
7.3	Instrumentatie	104
7.3.1	Snelheden	104
7.4	Analyse snelheidsmetingen	105

7.5	Beschrijving meetresultaten	106
7.5.1	Snelheidsprofielen	106
7.5.2	Stroomsnelheden vlak boven het bed	106
7.5.3	Invloed van een loodrecht omhoog gerichte vin	112
7.5.4	Invloed van de stand van de vin	116
7.5.5	Scheidingsvlak ten opzichte van de pijp	119
7.6	Conclusies omtrent de stroming rond pijpleidingen op of vlak boven de bodem in een modelopstelling	125
8.	Samenvating en conclusies	127
	Literatuur	131
	Bijlagen	
A.	Eigenschappen van slib	
B.	Concentratieingen stroomgoot A	
C.	Concentratieingen stroomgoot B	
D.	Bodemprofielmetingen stroomgoot B	
E.	Metingen stroombeeld rond pijp	
F.	Zeefkromme zand-slibmengsel Oestergronden	

1. Inleiding

Pijpleidingen worden veelal gebruikt als vervoermiddel van vloeistoffen of gassen. Op de Noordzeebodem bevinden zich tal van pijpleidingen die het vervoer van gas en diverse vloeibare olieproducten van en naar de diverse olieboorplatforms verzorgen. Om te voorkomen dat deze pijpleidingen beschadigen is het soms noodzakelijk dat ze in de bodem begraven zijn met een minimale dekking van enkele tientallen centimeters. Het ingraven van pijpleidingen is een tijdrovende en dure aangelegenheid. Uit onderzoekingen en waarnemingen is echter gebleken dat er een natuurlijk ingravingsproces bestaat waarbij de pijpleidingen naar verloop van tijd (enkele maanden) zonder tussenkomst van menselijk handelen onder de grond verdwenen zijn.

De eerste tijd na het leggen van de pijpleidingen op de zeebodem wordt gecontroleerd of het ingravingsproces daadwerkelijk plaatsvindt. In een bepaald gebied op de Noordzee, de Oestergronden genaamd (figuur 1.1) (ongeveer 50 km noordwestelijk van de Nederlandse Waddeneilanden, de vakken K7-K8-K9 en L4-L7 van het Nederlands Continentaal Plat), vindt weliswaar een ingravingsproces plaats, echter het ingravingsproces is van een geheel andere aard dan in de overige gebieden van de Noordzee. Bovendien is het uiteindelijke resultaat slechts een gedeeltelijke ingraving (1/2 tot 2/3 maal de pijpdiameter beneden het oorspronkelijke vlakbedniveau).

Analyse van grondmonsters van het desbetreffende gebied tonen aan dat er slibpercentages tot 30% aanwezig zijn.

[Boorkernen afkomstig van de Oestergronden wijzen erop dat het in het desbetreffende gebied gaat om een ongeveer 1.8 m dikke slibhoudende laag van recente ouderdom (minder dan 100 jaar oud) (Behre et al [1984]). De zuidkant van de Oestergronden is ongeveer gelegen op de 30 m dieptelijn (figuur 1.2). De maximale getijstroom-snelheid tijdens een gemiddeld springtij is hier 1 à 1.5 kn (0.5 à 0.75 m/s) (figuur 1.2). Slib wat meegevoerd wordt vanuit het zuiden van de Noordzee krijgt hier de kans om neer te slaan; de getijstroomsnelheid neemt af en de diepgang neemt toe waardoor de golven minder invloed op de bodem hebben. Deze beide factoren dragen er hoogstwaarschijnlijk toe bij dat dit slibrijke gebied bestaat.]

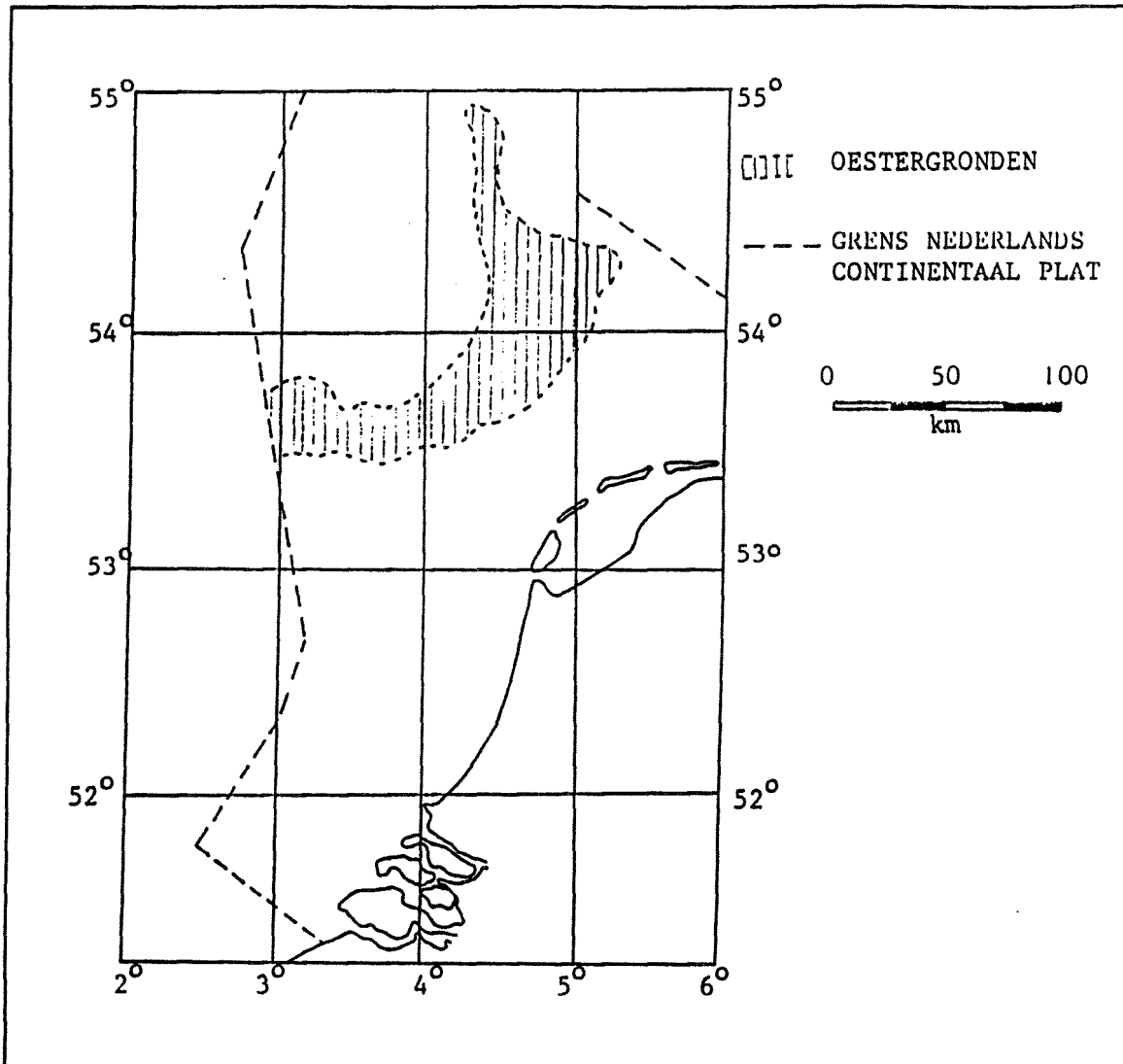
De kans dat dit relatief hoge slibpercentage de oorzaak is van de gedeeltelijke ingraving is groot, echter de precieze invloed van de aanwezigheid van het slib is niet duidelijk.

In samenwerking met de Stichting voor de Technische Wetenschappen is het hier beschreven onderzoek naar de erosie-eigenschappen van slibhoudend zand in het algemeen en in het bijzonder rond pijpleidingen uitgevoerd. Onder slibhoudend zand worden zand-slibmengsels verstaan met slibpercentages (percentage van het droge stof gewicht) van 5 tot 30%.

Het onderzoek is gesplitst in twee delen:

- het transport van slibhoudend zand in het algemeen,
- de erosie rond pijpleidingen op een slibhoudende zandbodem.

Als aanvulling op dit laatste gedeelte is globaal naar het stroombeeld rond pijpleidingen gekeken.

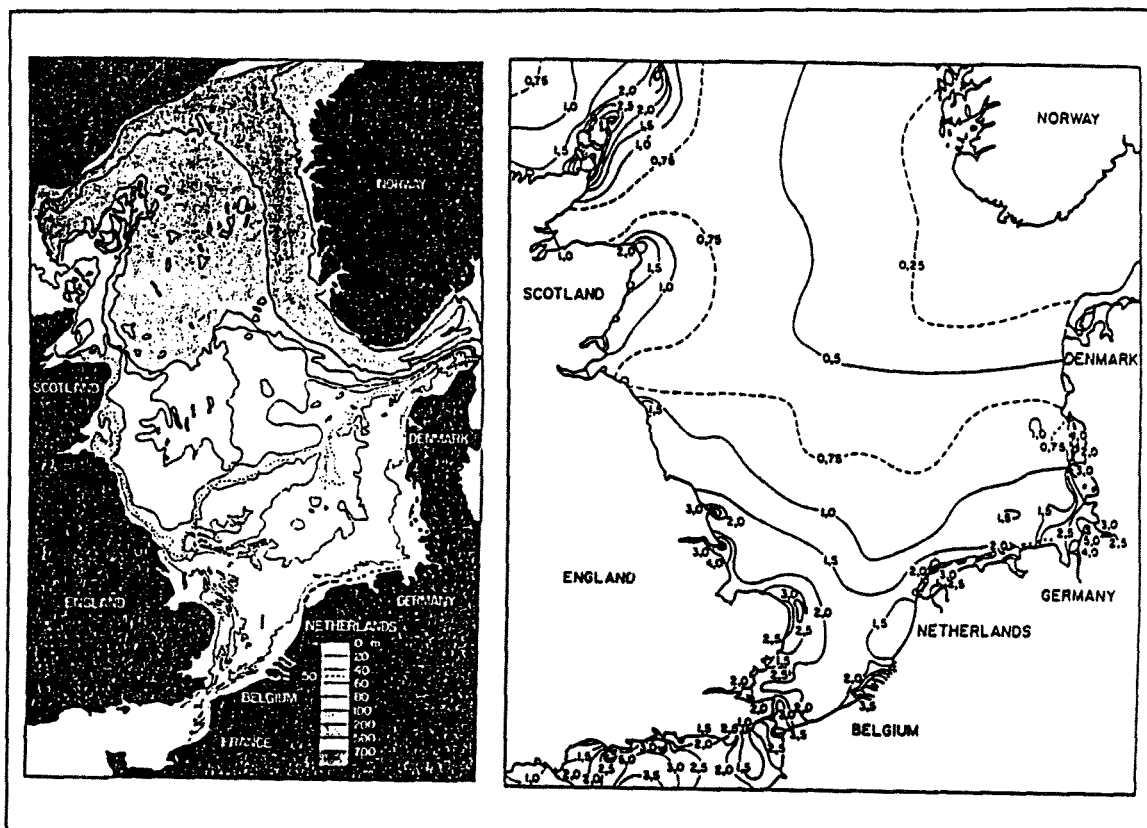


Figuur 1.1 Oestergronden

Het rapport is opgebouwd uit drie gedeelten, ieder bestaande uit 2 hoofdstukken.

In hoofdstuk 2 en 3 worden de transporteigenschappen van sediment behandeld. In hoofdstuk 2 is een overzicht gegeven van de transporteigenschappen van zand, van slib en van zand-slibmengsels. De proeven omtrent de transporteigenschappen van zand-slibmengsels zijn in hoofdstuk 3 beschreven en uitgewerkt.

In hoofdstuk 4 en 5 wordt de erosie rond pijpleidingen behandeld. In hoofdstuk 4 is een literatuuroverzicht gegeven van de erosie rond pijpleidingen, eventueel voorzien van een spoiler, op zuiver zand. De proeven omtrent de erosie rond een modelpijp, eventueel voorzien van een spoiler, op een zand-slibbodem zijn in hoofdstuk 5 beschreven en uitgewerkt.



Figuur 1.2 Dieptelijnen (links) en maximale getijstroom-snelheid (in knopen) gedurende een gemiddeld springtij (rechts).

Tot slot is het stroombeeld rond de pijp behandeld in hoofdstuk 6 en 7. In hoofdstuk 6 is een literatuuroverzicht gegeven van de stroming rond pijpleidingen, zowel ver van, als dichtbij de bodem. In hoofdstuk 7 worden de proeven beschreven waarin de stroomsnelheden rond de pijp gemeten zijn.

2. Sedimenttransport

2.1 Algemeen

Sedimenttransport is een veel besproken onderwerp. Sedimenttransport is afhankelijk van zeer veel factoren; hydraulische omstandigheden maar ook eigenschappen van het sediment zelf. Om de hoeveelheid van invloedsfactoren enigszins binnen de perken te houden wordt in proeven omtrent dit sedimenttransport over het algemeen gewerkt met zuiver niet-cohesief materiaal, ook wel met zand aangeduid. Naast kennis over dit zuiver niet-cohesieve sediment bestaat er redelijk wat kennis over het transport van cohesief materiaal. Omdat zand volkomen anders reageert dan cohesief materiaal worden beide materialen over het algemeen apart van elkaar onderzocht.

Een combinatie van beide materialen komt niet veelvuldig voor. Over dergelijke mengsels is vrijwel niets bekend. In sommige gevallen is kennis over de eigenschappen van dergelijke mengsels echter zeer gewenst. In een enkel onderzoek wordt, vaak zijdelings, gekeken naar de invloed van een, vaak relatief kleine, hoeveelheid niet-cohesief materiaal toegevoegd aan cohesief materiaal. Mengsels met een relatief klein percentage cohesief materiaal zijn zo mogelijk nog minder onderzocht.

2.2 Sedimenttransport niet-cohesief materiaal

2.2.1 Principe

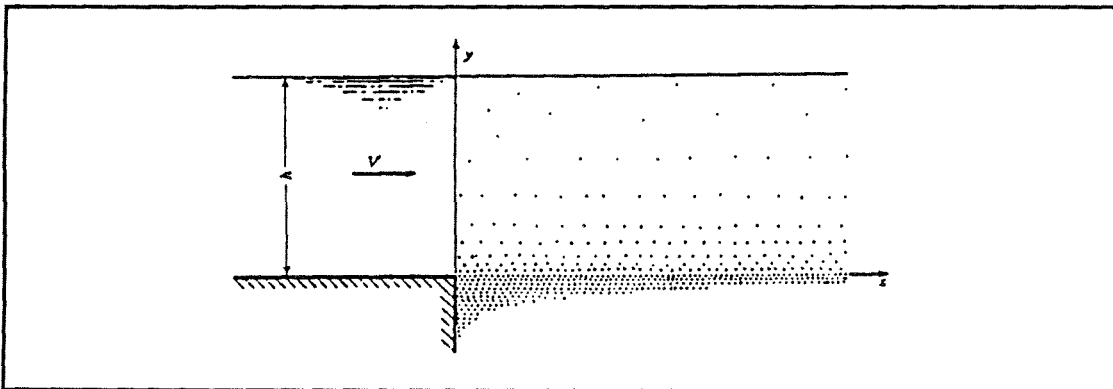
Wanneer men spreekt over sedimenttransport dan spreekt men over het algemeen over het evenwichtssedimenttransport behorende bij bepaalde hydraulische omstandigheden. Dit evenwichtssedimenttransport is gebaseerd op het feit dat de capaciteit van een stroming om sediment te transporteren maximaal benut wordt. Bij bepaalde hydraulische omstandigheden hoort een evenwichtsconcentratieverticaal die, vermenigvuldigd met de snelheidsverticaal, het transport oplevert. De zwaartekracht zorgt ervoor dat de individuele deeltjes zich omlaag bewegen (met een valsnelheid w en een plaatselijke concentratie c levert dit een verticaal transport van $w \times c$). De turbulente diffusie zorgt ervoor dat er ook sedimentdeeltjes omhoog bewegen (een diffusiecoëfficiënt ϵ_s levert een verticaal transport van $\epsilon_s \times dc/dz$, waarin c de concentratie is en z de hoogte boven het bed). Beide mechanismen te samen zorgen (uitgaande van een stationaire uniforme stroming) voor het desbetreffende evenwicht in de verticaal:

$$w \times c(z) + \epsilon_s(z) \times \frac{d c(z)}{dz} = 0 \quad (2.1)$$

Dit wil dus zeggen dat er in ieder punt van de verticaal evenveel sediment omhoog

als omlaag beweegt. Dit geldt tot aan de bodem. Bij de bodem zal er sediment opgepakt worden (om als bodemtransport of als zwevend transport vervoerd te worden). Er zal echter evenveel sediment afgezet worden zodat ook hier een evenwichtssituatie heerst.

Hoewel men over het algemeen over evenwichtssedimenttransport spreekt, is dit lang niet altijd aanwezig. Wanneer er plotseling veranderingen optreden in de hydraulische omstandigheden of in het bodemmateriaal zal het sediment-transport enige tijd (ofwel afstand) nodig hebben om zich aan te passen aan de nieuwe omstandigheden. Als voorbeeld nemen we een horizontale betonnen plaat die overgaat in een horizontaal zandbed (figuur 2.1).



Figuur 2.1 Strömung over een bodem die van een betonnen plaat (links) overgaat in een zandbed (rechts).

Op een zekere afstand vanaf het begin van het zandbed zal het evenwichtstransport bereikt zijn (Hjelmfelt and Lenau [1970]). Voor de aanpassingslengte van het transport wordt vaak als vuistregel een afstand van ongeveer 20 maal de waterdiepte gebruikt. Vanaf dat punt zal er geen erosie of aanzanding meer plaatsvinden.

2.2.2 Sedimenttransportformules voor niet-cohesief materiaal

De bestaande sedimenttransportformules voor niet-cohesief materiaal gaan uit van een evenwichtssituatie. Deze sedimenttransportformules kunnen verdeeld worden in twee categorieën:

- sedimenttransportformules die gebruik maken van een kritische bodemschuifspanning (ofwel kritische snelheid). Beneden deze kritische bodemschuifspanning zal geen transport plaatsvinden. Voorbeeld: Meyer-Peter-Muller [1948], Ackers-White [1973], Van Rijn [1984], Bagnold [1963].
- sedimenttransportformules die ervan uitgaan dat er altijd (hoe klein dan ook) transport plaatsvindt. Voorbeeld: Kalinske [1942], Bijker [1971], Engelund-Hansen [1967].

De belangrijkste parameters die gebruikt worden zijn:

- een karakteristieke korreldiameter
- de bodemruwheid
- een karakteristieke snelheid

Verder wordt gebruik gemaakt van algemene parameters als de versnelling van de zwaartekracht (g) en de dichtheid van water (ρ) en van sediment (ρ_s).

2.2.3 Critische bodemschuifspanning

De kritische bodemschuifspanning voor zand is voornamelijk afhankelijk van de korrelvorm en korrelgrootte. Shields bepaalde op empirische wijze voor zand de kritische bodemschuifspanning. Hij betrok hierbij de op de deeltjes werkende krachten (sleepkracht, liftkracht en zwaartekracht). Voor zandkorrels met een D_{50} van $100 \mu\text{m}$ geldt een kritische bodemschuifspanning van ongeveer 0.1 N/m^2 .

2.3 Sedimenttransport cohesief materiaal

2.3.1 Principe

Slib wordt vaak gezien als cohesief materiaal. Slib is echter gedefinieerd als materiaal met een diameter kleiner dan $53 \mu\text{m}$. Van dit materiaal is slechts de fractie met een diameter kleiner dan $2 \mu\text{m}$ verantwoordelijk voor het cohesieve karakter van slib. Niet alleen kleimineralen maar ook organisch materiaal kan cohesieve eigenschappen vertonen.

De erosie ofwel het wel of niet loskomen van slibdeeltjes uit de bodem is direct afhankelijk van de cohesieve krachten van het materiaal. Door de geringe afmetingen van de deeltjes speelt de zwaartekracht een verwaarloosbare rol. Deeltjes zullen slechts dan uit het bed loskomen wanneer de (door de cohesie veroorzaakte) verbindingen tussen de verschillende deeltjes verbroken worden. Wanneer deeltjes eenmaal uit het bed losgekomen zijn, zullen ze door de vloeistof meegevoerd worden en slechts zeer langzaam bezinken. Dit bezinken gebeurt alleen wanneer de stroomsnelheid beneden een bepaalde kritische waarde voor bezinken komt of wanneer het materiaal samenklontert en als grotere vlokken bezinkt. Ook in het laatste geval geldt er een kritische snelheid waarboven geen neerslag plaatsvindt.

De cohesieve krachten zijn afhankelijk van zeer veel factoren. Niet alleen het soort materiaal (soort kleimineraal, soort organisch materiaal) maar ook de eigenschappen

De cohesieve krachten zijn afhankelijk van zeer veel factoren. Niet alleen het soort materiaal (soort kleimineraal, soort organisch materiaal) maar ook de eigenschappen van de omringende vloeistof zijn belangrijk (zoutgehalte, soort en hoeveelheid cationen en anionen, pH, temperatuur). Meer informatie omtrent de eigenschappen van slib wordt gegeven in Bijlage A. Naast de materiële eigenschappen van het bodemmateriaal en de vloeistof is ook de dichtheid van het bed (de mate van consolidatie) een belangrijke factor.

De dichtheid van het bed en andere, in dit rapport gebruikte, parameters zijn als volgt gedefinieerd:

$$\text{dichtheid} \rightarrow \frac{V_w \rho_w + V_{sed} \rho_{sed}}{V_w + V_{sed}} \quad (2.2)$$

$$\text{porositeit} \rightarrow \frac{V_w}{V_w + V_{sed}} \quad (2.3)$$

$$\text{concentratie} \rightarrow \frac{V_{sed} \rho_{sed}}{V_w + V_{sed}} \quad (2.4)$$

$$\text{slibconcentratie} \rightarrow \frac{V_{slib} \rho_{sed}}{V_w + V_{sed}} \quad (2.5)$$

$$\text{zandconcentratie} \rightarrow \frac{V_{zand} \rho_{sed}}{V_w + V_{sed}} \quad (2.6)$$

$$\text{slibpercentage} \rightarrow \frac{V_{slib}}{V_{sed}} \quad (2.7)$$

$$\text{zandpercentage} \rightarrow \frac{V_{zand}}{V_{sed}} \quad (2.8)$$

waarin	V_w	:	volume water
	V_{sed}	:	volume sediment (= slib + zand)
	V_{slib}	:	volume slib
	V_{zand}	:	volume zand
	ρ_w	:	dichtheid van water
	ρ_{sed}	:	dichtheid van sediment (slib en/of zand)

Voor cohesieve bodems is het niet mogelijk om over een evenwichtstransport te spreken. Dit is als volgt te verklaren. Uitgaande van het evenwicht van formule (2.1) ($w \times c + \epsilon_s \times dc/dz = 0$) en in acht nemend dat de valsnelheid w zeer klein is, geldt:

$$\epsilon_s \times \frac{d c(z)}{dz} \approx 0 \quad (2.9)$$

Dit houdt in dat de concentratie over de hoogte constant is. In het geval van een evenwichtstransport zal deze formule echter ook bij de bodem geldig moeten zijn. Dit kan alleen als daar geldt:

$$\frac{d(c)}{dz} \approx 0 \quad (2.10)$$

Ofwel, de concentratie in het bed moet gelijk zijn aan de concentratie in de stroming. Dit is dus alleen mogelijk bij een soort van fluid mud stroming over de volle hoogte.

Geconcludeerd kan worden dat vanwege de discontinuïteit in de concentratieverticaal bij de bodem er dus geen sprake kan zijn van een evenwichtssituatie.

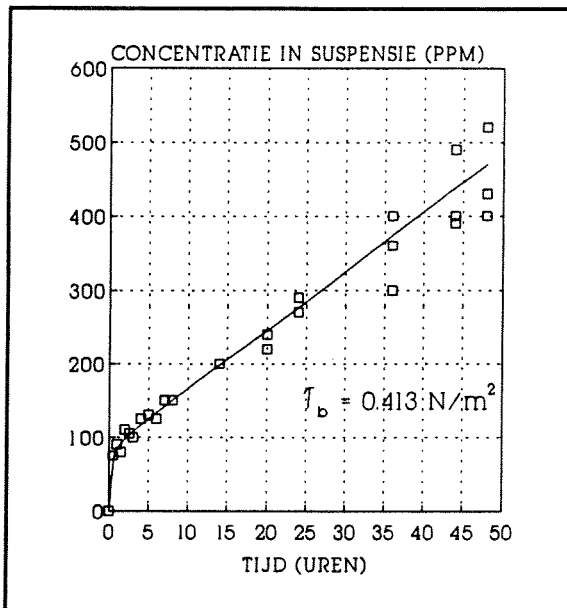
Omdat er bij slibbodems geen sprake kan zijn van een evenwichtssituatie voor het transport wordt er ook niet gewerkt met (evenwichts)transportformules. In dergelijke gevallen is de mate van toename van de concentratie in de tijd essentieel. Er wordt dan ook met erosieformules gewerkt:

$$E = \frac{dc}{dt} \times \frac{I}{O} \quad (2.11)$$

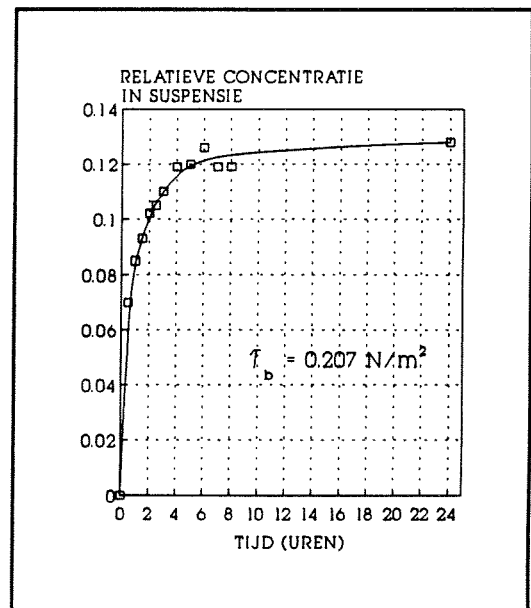
met	E	:	erosiesnelheid
	c	:	concentratie
	t	:	tijd
	I	:	inhoud stroomcircuit
	O	:	oppervlak sedimentbed

Een bodem met een over de hoogte gelijke dichtheid geeft hierbij een constante erosiesnelheid E te zien in de tijd (figuur 2.2) (Mehta en Partheniades [1979], Kelly en Gularte [1981]). Wanneer het bed een gelaagde structuur heeft, (een toenemende dichtheid voor toenemende diepte) dan zal de erosiesnelheid E afnemen in de tijd

(figuur 2.3) (Mehta en Partheniades [1979], Kusuda et al [1982]). Deze afnemende erosiesnelheid is dan niet een gevolg van het verzadigd raken van de stroming maar van een toenemende dichtheid van het bodemmateriaal.



Figuur 2.2 Concentratie sediment in suspensie als functie van de tijd voor een uniform verdeeld kaoliniet bed (Mehta en Partheniades [1979])



Figuur 2.3 Concentratie sediment in suspensie als functie van de tijd voor een kaoliniet bed met een toenemende dichtheid (Mehta en Partheniades [1979])

2.3.2 Erosieformules cohesief materiaal

De hoeveelheid aan factoren die invloed hebben op het transportmechanisme van slib maakt het onmogelijk om een eenduidige erosieformule te presenteren. De huidige erosieformules voor slib kunnen evenals bij zand verdeeld worden in formules die wel, en formules die geen gebruik maken van een kritische bodemschuifspanning (waaronder geen transport plaatsvindt). De desbetreffende formules zijn vrijwel allemaal van een van de volgende vormen:

$$\frac{E}{E_f} = \exp[A(\tau - \tau_c)^B] \quad (2.12)$$

$$E = A \left[\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^B \quad (2.13)$$

$$E = A(\tau - \tau_c)^B \quad (2.14)$$

en:

$$E = A \tau^B \quad (2.15)$$

De gebruikte parameters zijn:

- E : erosiesnelheid
- E_f : referentiewaarde voor erosiesnelheid
- τ : bodemschuifspanning
- τ_c : kritische bodemschuifspanning
- A, B : empirisch te bepalen coëfficiënten

De coëfficiënten A en B alsmede de kritische bodemschuifspanning variëren sterk en worden per situatie bepaald. Enkele voorbeelden worden gegeven in tabel 2.1.

2.3.3 Kritische bodemschuifspanning

Voor het vaststellen van de kritische bodemschuifspanning is het nodig te definiëren wat men onder de kritische bodemschuifspanning voor slib verstaat. Bij een slibbed zal het vrijwel altijd zo zijn dat het bovenste laagje van het bed nauwelijks geconsolideerd is. Al bij zeer lage stroomsnelheden zal dit laagje eroderen. Dit houdt in dat er bij deze lage snelheden transport plaatsvindt. Echter daadwerkelijke (voortdurende) erosie vindt niet plaats bij dergelijke lage snelheden. Wanneer de erosiesnelheid E als functie van de stroomsnelheid bekeken wordt (figuur 2.4) dan blijkt dat boven een bepaalde stroomsnelheid een plotselinge toename van de erosiesnelheid plaatsvindt. In de grafiek waar de erosiesnelheid uitgezet wordt tegen de stroomsnelheid kan de kritische stroomsnelheid bepaald worden door een lijn te trekken door de punten met de hogere erosiesnelheden en deze lijn te snijden met de stroomsnelheidsas (figuur 2.4). Beneden de op deze wijze bepaalde kritische snelheid vindt dus wel transport plaats, echter geen wezenlijke erosie. De kritische bodemschuifspanning kan direct uit de kritische snelheid bepaald worden ($\tau = \rho g V^2 / C^2$ met τ = bodemschuifspanning, ρ = dichtheid van water, V = stroomsnelheid en C = Chezy coëfficiënt voor de bodemruwheid).

Evenals de erosieformules is de kritische bodemschuifspanning afhankelijk van diverse (al eerder genoemde) factoren:

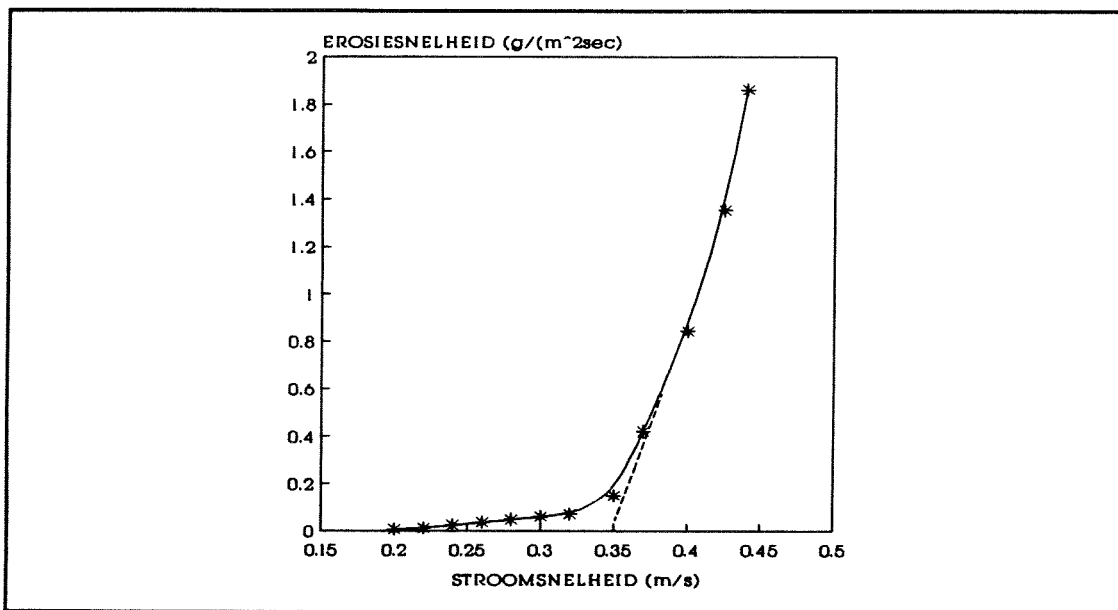
- mineralogische samenstelling,
- percentage en soort organisch materiaal,
- chemische samenstelling poriënvloeistof en eroderende vloeistof,
- mate van consolidatie,
- temperatuur.

Tabel 2.1 Empirisch bepaalde parameters uit erosieformules voor slib (erosiesnelheid in g/(m²min)) met bijbehorende kritische bodemschuifspanning (N/m²).

	A	B	τ_c
formule (2.12)			
Parchure en Mehta [1985] soft mud	1.0	0.5	0.04-0.17
formule (2.13)			
Ariathurai en Arulanandan [1978] natuurlijk slib	50-150	1.0	1.2-2.6
Cormault [1968] Gironde estuarium	12	1.0	0.1-0.9
Kusuda et al [1982] natuurlijk kaoliniet	120	1.8	0.08-0.1
Umita et al [1986] monding Chikugo rivier	55	1.9	0.19
formule (2.14)			
Migniot [1989] Loire mud	19800	1.5	0.04-1.6
equatorial mud	9600	1.5	0.04-3.6
Amos en Mosher [1985] Windsor, Bay of Fundy	34.3	1.0	8.0
formule (2.15)			
Lavelle et al [1984] Lake Erie	130-37800	1.2-5.0	-
Thames river	1140	1.6	-
San Francisco Bay	10-60	1.7-2.0	-

Enkele waarden van kritische bodemschuifspanningen van slib staan vermeld in tabel 2.2.

Voor natuurlijke zachte slib dat op de bodem van estuaria, meren, kanalen en zeeën ligt (met een zeer laag percentage zand) worden kritische bodemschuifspanningen gevonden van 0.03 à 1.2 N/m². Voor zeer vaste slib of klei kan de kritische bodemschuifspanning oplopen tot 18 N/m².



Figuur 2.4 Erosiesnelheid als functie van de stroomsnelheid (Gularte et al [1980])

Tabel 2.2 Critische bodemschuifspanning (in N/m²) diverse slibsoorten.

	aanduiding/ afkomst slib	τ_c (N/m ²)
Abdel Rahman [1962]		0.7-4.3
Amos en Mosher [1985]	Windsor (por. =38%)	8.0
Ariathurai en Arulanandan [1978]	natuurlijk	1.2-2.6
Cormault [1968]	Gironde (por.80-95%)	0.1-0.9
Huang [1987]	Chinese slib	0.2-1.2
Kamphuis en Hall [1983]	Mackinzie (por. \approx 31%)	8.6-18.4
Kelly en Gularte [1981]	grundiet (por.50-80%)	0.03-0.28
Kusuda et al [1982]	natuurlijk, slap	0.08-0.1
Migniot [1989]	slap (por.min.70%)	0.04-3.6
Montague [1984]	compacte kaoliniet	2.73
Otsubo en Muruoka[1988]	slap	0.1-1.0
Parchure en Metha [1985]	natuurlijk, slap	0.08-0.17
	kaoliniet, slap	0.04-0.1
Partheniades [1965]	San Francisco Bay	0.47-1.31
Rijkswaterstaat [1987]	slap	0.2-0.4
	compact	3.3-5.3
Smerdon en Beasley [1959]		0.4-2.4
Umita et al [1986]	Chikugo riviermonding	0.19

2.4 Sedimenttransport niet-cohesief materiaal gemengd met cohesief materiaal (slibrijk zand)

Een mengsel van cohesief en niet-cohesief materiaal, ofwel slibrijk zand, is op zich een ruim begrip. Zand met slibpercentages van 0 tot 100% slib kunnen hiermee aangeduid worden.

Onderzoek naar zand-slibmengsels in de meest ruime zin van het woord is tot nu toe slechts sporadisch uitgevoerd.

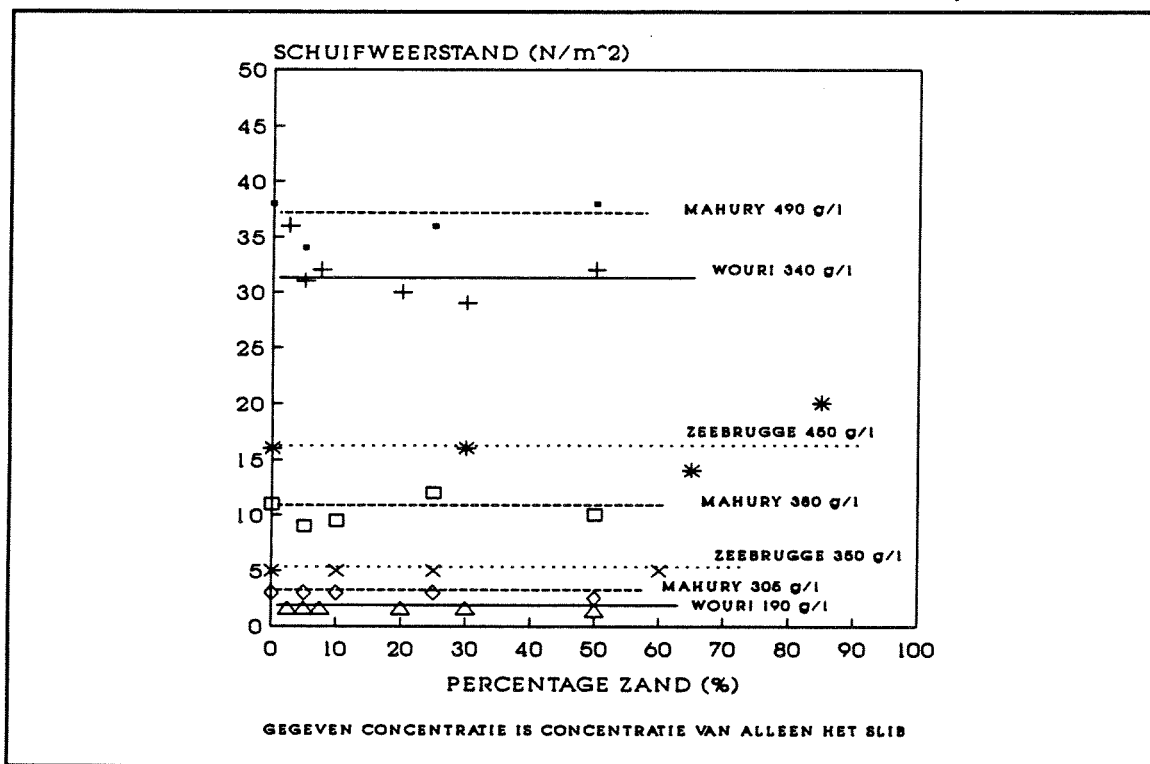
Migniot [1963] en [1989] en Nalluri Alvarez [1976] onderzochten beiden de invloed van zand op slibeigenschappen.

Migniot [1963] gebruikte hiervoor een breed assortiment aan slibsoorten welke gemengd werden (of waren) met zand. Migniot werkte voornamelijk met slib met een hoge porositeit (slap slib). Van rivierslib afkomstig uit de Fodda gemengd met verschillende hoeveelheden zand werd de kritische bodemschuifspanning bepaald (tabel 2.3). De slibconcentratie in het mengsel werd min of meer constant gehouden. Migniot concludeerde uit de resultaten dat zandpercentages kleiner dan 30% nagenoeg geen invloed opleveren voor de τ_c . Bij hogere percentages zand neemt de τ_c af.

Tabel 2.3 Critische bodemschuifspanning van rivierslib (Fodda) gemengd met diverse percentages zand (Migniot [1963])

concentratie slib (g/l)	percentage zand (%)	τ_c (N/m ²)
470	0.0	0.44
465	13.6	0.53
475	22.5	0.63
470	39.5	0.58
471	52.5	0.42
470	66.0	0.36
	100.0	0.18

In een later werk van Migniot [1989] wordt de kritische bodemschuifspanning lineair afhankelijk geacht van de schuifweerstand van het mengsel. Bij sedimentconcentraties van 200 à 800 g/l vond Migniot bij een toenemend percentage zand (5 tot 30%) een duidelijke afname van de schuifweerstand (50% tot 85%). Migniot weet de verminderde schuifweerstand gedeeltelijk aan het feit dat de zandkorrels door hun compacte vorm een relatief klein oppervlak beslaan waardoor de doorlatendheid van een zand-slibmengsel groter is dan die van een zuiver slibmengsel met eenzelfde concentratie. Hij maakte dit duidelijk door te laten zien dat de schuifweerstand nagenoeg constant blijft wanneer de concentratie van het aanwezige slib constant blijft terwijl het zandpercentage toeneemt (figuur 2.5).



Figuur 2.5 Schuifweerstand als functie van het percentage zand bij constante slibconcentratie (Migniot [1989])

Nalluri Alvarez [1976] gebruikte een zand-slibmengsel waarbij kaoliniet (kunstmatig bewerkte kleisoort) als slib gebruikt werd. In de zeer globale proeven vond er door toevoeging van 30% zand een toename van de τ_c plaats (tabel 2.4). De porositeit nam tegelijkertijd af.

Tabel 2.4 Critische bodemschuifspanning van kaoliniet-zandmengsels als functie van de porositeit en het percentage slib (Nalluri Alvarez [1976]).

percentage zand %	porositeit %	τ_c N/m^2
0	35 à 65	0.1 à 0.2
30	20 à 35	0.2 à 0.3

Zuiver natuurlijke zand-slibmengsels zijn onderzocht door Terwindt et al [1966] en Amos en Mosher [1985].

Terwindt et al [1966] hebben het erosiegedrag van goed geconsolideerde zand-kleilaminaten ($19\% < 2\mu m$, $D_{50} = 38 \mu m$) in het Haringvliet bekeken. Terwindt et al vonden een τ_c ($= 1.1 N/m^2$) die dezelfde orde van grootte had als τ_c van alleen cohesief materiaal en koppelden daarmee ook het erosiegedrag van zand-kleilaminaten aan dat van cohesief materiaal. In een langdurige stroomproef bleek de erosie in de tijd af te nemen en na enkele uren een soort evenwichtstoestand te bereiken waarbij

geen verdere erosie optrad. Het bodempatroon was na afloop zeer onregelmatig. Dit onregelmatige oppervlak leek erop te duiden dat de erosie niet het gevolg was van een gelijkmatige slijtage maar veeleer het gevolg was van het losraken van 'brokken' slib. Terwindt et al suggereerden dat de erosie werd veroorzaakt door drukfluctuaties als gevolg van turbulentie van de stroming. Volgens metingen van Bull en Willis [1961] kunnen bij een gladde wand de drukfluctuaties schuifspanningen opleveren die bij de wand ongeveer negen maal de horizontale schuifspanning zijn. Bij een ruwe wand zouden de drukfluctuaties nog enige malen groter zijn.

Amos en Mosher [1985] hebben een natuurlijk zand-slibmengsel afkomstig van Evangeline Beach in de Bay of Fundy in Canada onderzocht. Het zandpercentage van dit mengsel was 44%. Uit ditzelfde gebied, echter een andere locatie, Windsor mudflat, werd een slibmonster onderzocht met slechts 4.4% zand. Het is zeer waarschijnlijk dat de mineralogische samenstelling van het slib in beide gevallen nagenoeg gelijk is. Terwijl in beide gevallen het materiaal als zeer slap is aangeduid, werd toch een vrij hoge τ_c gevonden. Het erosie gedrag voor beide gevallen werd zonder twijfel aangenomen als dat van zuiver cohesief materiaal. In vergelijking met het meer zandige mengsel was de τ_c voor het vrijwel pure slib hoger en de erosiesnelheid lager (tabel 2.5). De dimensionering van de parameters in de door Amos en Mosher gegeven relaties is helaas niet duidelijk. Amos en Mosher vonden evenals Terwindt et al dat de erosie afnam in de loop van de tijd om uiteindelijk een evenwicht te bereiken. Pas bij zeer hoge bodemschuifspanningen werd een lineaire erosie in de tijd gevonden.

Tabel 2.5 Erosiesnelheid en kritische bodemschuifspanning voor natuurlijke zand-slibmengsels afkomstig uit de Bay of Fundy (Amos en Mosher [1985]).

percentage zand %	porositeit %	τ_c N/m ²	erosie snelheid g/(m ² min)
4.4	60	8.0	34.3*($\tau - \tau_c$)
44	50	3.6	$e^{[1.15 \times (\tau - \tau_c)]}$

De invloed van het toevoegen van slib aan zand is bekeken door Murray [1977]. Murray vond bij een toevoeging van 10% respectievelijk 18% slib aan schoon, vrij grof zand ($D_{50} = 800\mu\text{m}$) een afname van het transport met een factor ≈ 4 respectievelijk ≈ 38 . Murray voerde proeven uit bij een waterdiepte van 0.03 à 0.04 m met snelheden in de range van 0.26 tot 0.36 m/s. Na 10 à 20 minuten werd het totaal geërodeerde materiaal bepaald. De hiermee berekende transporten variëren van 10^{-6} tot 10^{-3} kg/ms. Door de kleine range van snelheden en de grote range van gevonden transporten is de nauwkeurigheid echter moeilijk in te schatten.

Een hele range van zand-slibcombinaties is onderzocht door Kamphuis en Hall [1983], Kuti en Yen [1976] en Van Rijn [1985].

Kamphuis en Hall [1983] gebruikten hiervoor natuurlijk slib afkomstig uit de Mackenzie River in Canada wat gemengd werd met zand ($D_{50} = 105 \mu\text{m}$). Kamphuis en Hall bepaalden alleen de kritische bodemschuifspanning voor begin van beweging. De geteste monsters werden vooraf kunstmatig geconsolideerd onder drukken van 48 tot 200 kN/m². In dit geval kan men spreken van zeer vaste slib. Ten opzichte van de pure slibmonsters werd een lagere τ_c gevonden naarmate er meer zand aanwezig was (tabel 2.6). Andersom gezegd betekent dit dat hoe hoger het slibpercentage is hoe hoger ook de τ_c is. Kamphuis en Hall wezen erop dat wanneer er meer zand in het slibmengsel aanwezig is de erosie optreedt met grotere 'brokken' dan wanneer er minder zand aanwezig is.

Tabel 2.6 Critische bodemschuifspanning als functie van het percentage slib (Kamphuis en Hall [1983])

percentage slib (%)	τ_c (N/m ²)
100	8.6 - 18.4
83	4.0 - 8.9
71	1.0 - 5.4
50	1.5 - 1.8
0	0.2

Kuti en Yen [1976] onderzochten de invloed van de aanwezigheid van slib op de erosie achter een betonnen drempel. In dit geval werd wederom gebruik gemaakt van het kunstmatig bewerkte kleimineraal kaoliniet dat gemengd werd met vrij grof zand ($D_{50} = 900 \mu\text{m}$). Een verhoging van 20% naar 80% slib gaf een reductie van 80% van het totale geërodeerde volume (sediment met poriën). Kuti en Yen vonden bij een hoger percentage slib niet alleen een afname van het totaal geërodeerde materiaal, maar ook duurde het langer voordat het evenwicht bereikt werd. Naast het percentage slib bleek de porositeit van het mengsel een belangrijke factor te zijn.

Van Rijn [1985] onderzocht de invloed van zand op de erosie van een slibbed. In tegenstelling tot alle hiervoor genoemde onderzoeksprojecten is gewerkt met golven in plaats van stroom. Van Rijn gebruikte het kunstmatig bewerkte kaoliniet dat hij mengde met respectievelijk 0%, 25%, 75% zand ($D_{50} = 95 \mu\text{m}$). Daarnaast is ook de erosie van een zuiver zandbed bekeken. Bij toevoeging van 25% zand werd geen significante invloed op de erosie gevonden. Bij het bed met 75% zand werd in vergelijking met het zuivere slibbed een aanzienlijke reductie van het slibtransport gevonden. In vergelijking met de proeven met het zuivere zandbed werd eveneens een aanzienlijke reductie op het zandtransport gevonden (tabel 2.7). Van Rijn weet het lage sediment-transport bij het bed met 75% zand aan het feit dat het kaoliniet als bindmiddel optreedt en daarmee de vorming van ribbels verhindert. Door afwezigheid van grote ribbels zijn er ook geen grootschalige wervels aanwezig om materiaal over de verticaal te verdelen.

Tabel 2.7 Gemeten concentraties (mg/l) boven een kaoliniet-zandbed tijdens golven (golfhoogte 0.07 m, periode 1.5 s, waterdiepte 0.25 m, Van Rijn [1985]).

perc. zand	kaolinietconcentratie (mg/l)			zandconcentratie (mg/l)		
	hoogte boven bed (m)			hoogte boven bed (m)		
%	0.01	0.05	0.10	0.01	0.05	0.10
0	100000	7000	6000	-	-	-
25	200000	6000	5000	0	0	0
75	120	110	110	0	0	0
100	-	-	-	3000	150	20

Samenvattend kan het volgende gezegd worden. Het erosiegedrag van zand-slibmengsels met een relatief hoog percentage slib (> 50%) vertoont hetzelfde gedrag als dat van puur slib in die zin dat er een constante erosie in de tijd is die afhankelijk is van vele factoren waaronder de dichtheid ofwel de porositeit van het bed (Amos en Mosher [1985], Terwindt et al [1966]). Het verschil met erosie van puur slib is dat de erosie met brokken tegelijk gebeurt in plaats van een gelijkmatige slijtage van het oppervlak (Terwindt et al [1966], Kamphuis en Hall [1983])

Het toevoegen van zand aan slap slib (met een hoge porositeit) heeft een duidelijke invloed op de dichtheid. Deze invloed op de dichtheid heeft invloed op de schuifweerstand en daarmee op de τ_c van de grond. In het geval van slap slib is de τ_c sterk afhankelijk van de dichtheid.

Voor slap slib (hoge porositeit) geldt:

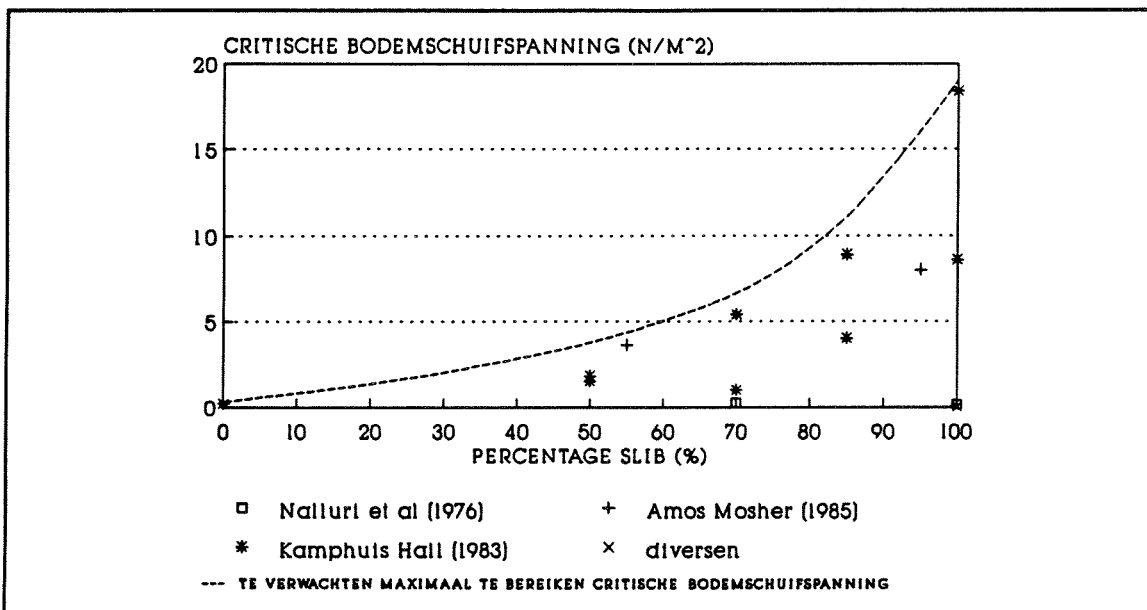
- bij een constante dichtheid (constante sediment-concentratie) neemt de schuifweerstand af bij toenemend percentage zand (Migniot [1989]),
- bij een constante slibconcentratie blijft de schuifweerstand nagenoeg constant bij een toenemend percentage zand (Migniot [1989]), de dichtheid van het mengsel neemt hier dus toe als gevolg van de toenemende concentratie totaal sediment (= zand en slib),
- bij een natuurlijk meevariërende dichtheid neemt de τ_c toe bij toenemend percentage zand (Nalluri Alvarez [1976]), de dichtheid neemt hier over het algemeen toe als gevolg van een afnemend totaal volume.

Voor compact slib (lage porositeit) geldt:

- de τ_c neemt af voor toenemend percentage zand (Kamphuis en Hall [1983])

Voor zand-slibmengsels met slibpercentages groter dan 50% kan globaal gezegd worden dat het toevoegen van zand als resultaat heeft dat de range van gevonden kritische bodemschuifspanningen kleiner wordt en dat de maximaal mogelijke

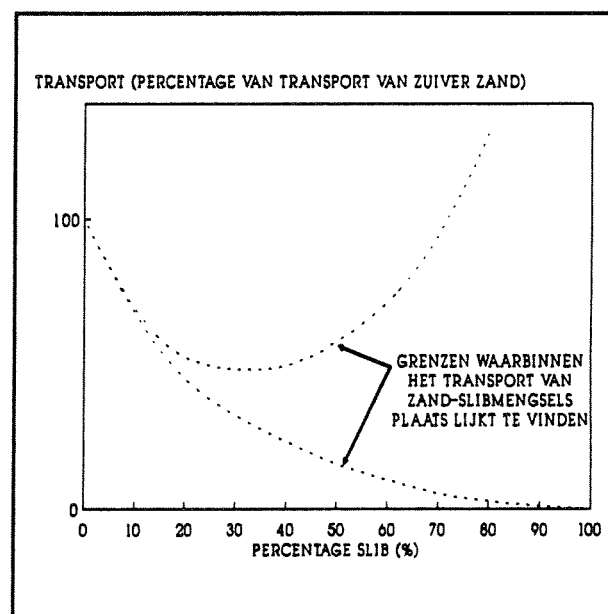
critische bodemschuifspanning eveneens kleiner wordt (figuur 2.6). In dit gebied is de τ_c sterk afhankelijk van de porositeit (ofwel de dichtheid) van het mengsel. Voor zand-slibmengsels met een slibpercentage kleiner dan 50% is geen onderzoek gedaan naar de kritische bodemschuifspanning.



Figuur 2.6 Kritische bodemschuifspanning als functie van het percentage slib

Voor wat betreft het transport lijkt het erop dat ook hier geldt dat voor zand-slibmengsels met een hoog percentage slib (>50%) het transport sterk kan variëren (Van Rijn [1985], Kuti en Yen [1976]). In dit gebied is het transport sterk afhankelijk van de porositeit (ofwel de dichtheid). Voor wat betreft zand-slibmengsels met een laag slibpercentage (<50%) geldt dat het transport lijkt toe te nemen bij afnemend percentage slib (figuur 2.7) (Murray [1977], Van Rijn [1985], Kuti en Yen [1976]). In figuur 2.7 staan de grenzen aangegeven waarbinnen het transport van zand-slibmengsels lijkt plaats te kunnen vinden.

Voor zand-slibmengsels met een relatief laag percentage slib is echter zeer weinig bekend over zowel de kritische bodemschuifspanning als het erosiegedrag.



Figuur 2.7 Grenzen waarbinnen het transport lijkt plaats te kunnen vinden als functie van het percentage slib

3. Proeven sediment transport

3.1 Inleiding

Erosie eigenschappen van zand-slib mengsels met een relatief laag percentage slib, ook wel slibrijk zand genoemd, zijn vrijwel onbekend. Het doel van dit deel van het onderzoek is een beter inzicht te krijgen in zowel de kritische bodemschuifspanning voor begin van beweging als de erosie/het transport zelf van slibrijk zand.

Wanneer er (in dit rapport) gesproken wordt over slibrijk zand of van zand-slib mengsels dan is er sprake van zand met slibpercentages van 5 tot 30% slib. Hierbij wordt slib gedefinieerd als materiaal kleiner dan $53 \mu\text{m}$.

Omdat er tot nu toe vrijwel niets bekend is over het transport van dergelijke mengsels is in eerste instantie een serie proeven uitgevoerd in een kleine stroomgoot (eigenlijk stroomtunnel), verder stroomgoot A genoemd. In deze goot is slechts een kleine hoeveelheid materiaal nodig (0.00725 m^3) die bovendien gemakkelijk verwisseld kan worden. Het sedimentoppervlak beslaat $1.0 \times 0.145 \text{ m}^2$. In deze goot zijn stroomproeven uitgevoerd met bodemmateriaal dat bestaat uit zand gemengd met verschillende percentages en verschillende soorten slib. Op deze manier is op betrekkelijk eenvoudige wijze enig inzicht verkregen in de algemene erosie eigenschappen van slibrijk zand en in de invloed van het soort en het percentage slib.

Een tweede serie proeven is uitgevoerd in een grotere open stroomgoot, verder stroomgoot B genoemd. In deze goot is telkens 0.35 m^3 (later 0.175 m^3) bodemmateriaal nodig. Het sedimentbed heeft een oppervlak van $7.0 \times 0.5 \text{ m}^2$ (later $7.0 \times 0.25 \text{ m}^2$). Ook in deze goot zijn stroomproeven uitgevoerd.

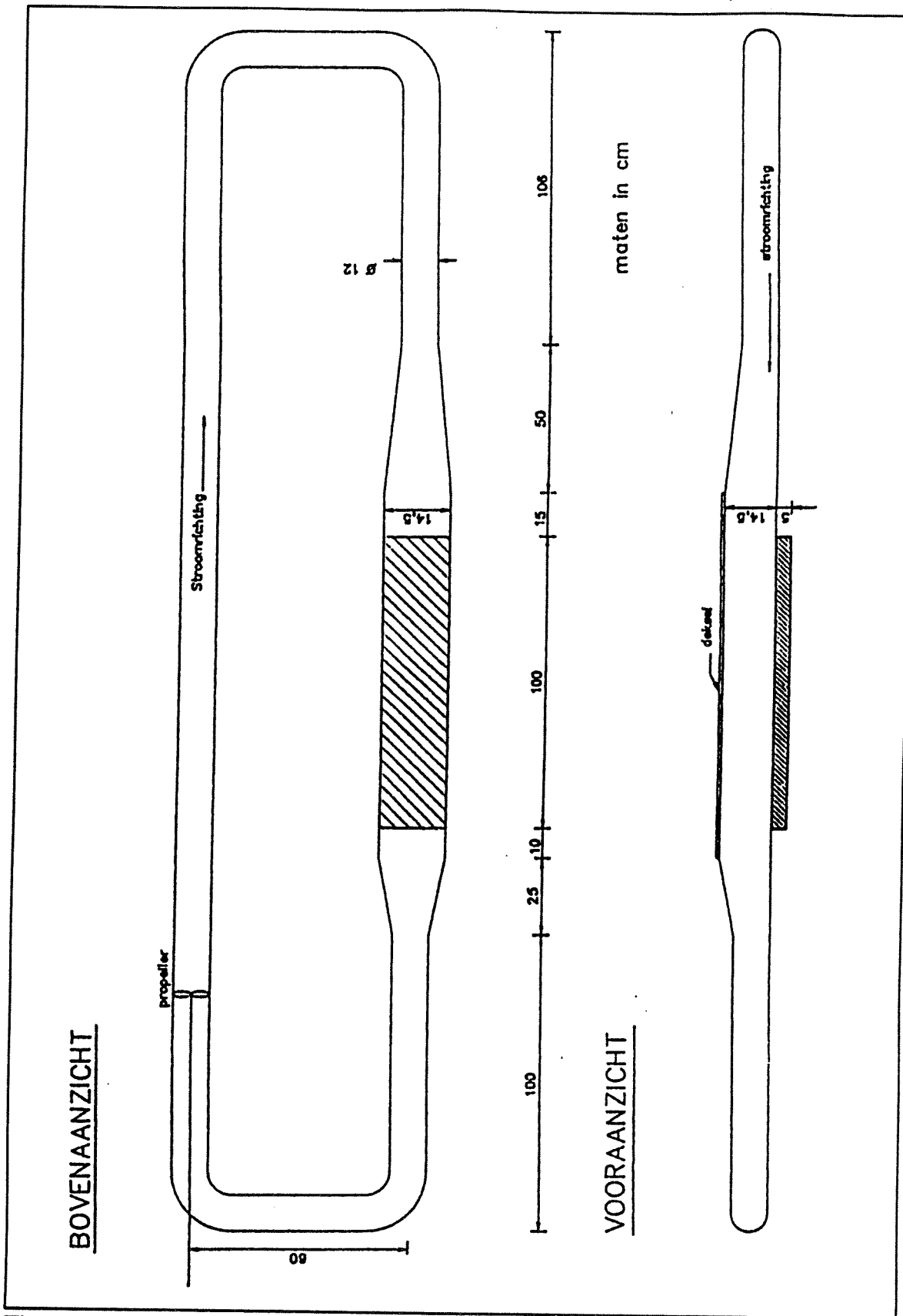
In zowel de kleine als de grote goot zijn telkens bij een constante stroomsnelheid concentraties gemeten in de loop van de tijd. Op die manier kon de wijze van erosie bepaald worden.

3.2 Experimentele opzet

De proeven zijn uitgevoerd in twee stroomgoten, beide aanwezig in het Laboratorium voor Vloeistof Mechanica van de TU Delft.

Stroomgoot A:

Deze goot is eigenlijk geen stroomgoot maar een recirculerende stroomtunnel. Het water in de tunnel wordt via een retour-leiding rondgepompt. De indeling en de afmetingen van het gehele systeem zijn weergegeven in figuur 3.1.



Figuur 3.1 Opstelling stroomgoot A

De stroom wordt aangedreven door een propeller in de retourbuis. Met de propeller kunnen in de testsectie stroomsnelheden tot 0.5 m/s bereikt worden.

De retourbuis heeft een doorstroomoppervlak van 0.011 m². Vlak voor de testsectie wordt de circulatiebuis verwijd tot een oppervlak van 0.145 × 0.145 m². De testsectie heeft een lengte van 1.25 m. Hierin is een uitsparing in de bodem aangebracht van 1 m lang, 0.05 m diep en 0.145 m breed. In deze uitsparing wordt het bodemmateriaal geplaatst.

De retourbuis heeft een duidelijk kleiner doorstroomoppervlak dan de testsectie. Hierdoor wordt voorkomen dat sediment in de retourbuis neerslaat.

Om de draaiing van de stroom, veroorzaakt door de propeller, teniet te doen zijn in een gedeelte van de retourbuis een aantal kleinere buizen aangebracht.

De testsectie is aan de bovenkant afgesloten met een deksel. In de deksel is over de volle lengte van het sedimentbed een gleuf aangebracht. Door deze gleuf kan meetapparatuur in de testsectie aangebracht worden. Op deze manier kan wel over de lengte van het bed maar niet over de breedte van het bed gemeten worden.

De in stroomgoot A geteste zand-slibmengsels staan vermeld in tabel 3.1. Het percentage slib geeft aan welk gedeelte van het totale droge sedimentgewicht (= zand + slib) uit slib bestaat (vergelijking 2.7).

Tabel 3.1 Samenstelling verschillende uitgeteste zand-slib mengsels uit stroomgoot A.

slibpercentage %	afkomst slib
0	(zuiver zand, $D_{50} = 105 \mu\text{m}$)
17 30	kaoliniet, kunstmatig bewerkt slib
9.5 12 14	Haaften, natuurlijk rivierslib
6.5 7.5 10 18	Eems Dollard, natuurlijk zoutwater slib
5 7.5 10 15 20	Oestergronden Noordzee, natuurlijk zoutwater slib

De resultaten van proeven in deze goot zijn bedoeld om op snelle wijze verschillende percentages en verschillende soorten slib te vergelijken. Er zijn echter een aantal nadelen aan deze kleine goot verbonden waardoor de proeven slechts als oriënterend gezien moeten worden.

- De overgangssectie van de retourbuis naar de testsectie is relatief kort waardoor de stroom hoogstwaarschijnlijk niet gelijkmatig verdeeld de testsectie binnenstroomt.
- De testsectie is slechts 1 m lang zodat er geen sprake is van een goed ontwikkeld snelheidsprofiel.
- Door de korte testsectie en het niet ontwikkelde snelheidsprofiel is het moeilijk om de bodemschuifspanning te bepalen.
- Door de werking van de propeller heeft de stroming de neiging te torderen. In de retourbuis zijn een aantal kleinere stroomgeleidende buisjes aangebracht waardoor zoveel mogelijk geprobeerd is de draaiing uit de stroming te halen. Door middel van het injecteren van kleurstof is gecontroleerd of de stroming in de testsectie tordeert. Op het oog lijkt er in de testsectie geen sprake te zijn van een torderende stroming. Het is echter niet onwaarschijnlijk dat er in sommige gevallen toch sprake is van een enigszins draaiende stroming.
- Door de korte lengte van de gehele goot en de vier redelijk scherpe bochten is het mogelijk dat de stroom in de testsectie als gevolg van deze bochten gaat slingeren. Het feit dat het bed in sommige gevallen asymmetrisch om de lengteas erodeert zou hierop kunnen wijzen.

Stroomgoot B:

De opstelling en de afmetingen van stroomgoot B staan vermeld in figuur 3.2.

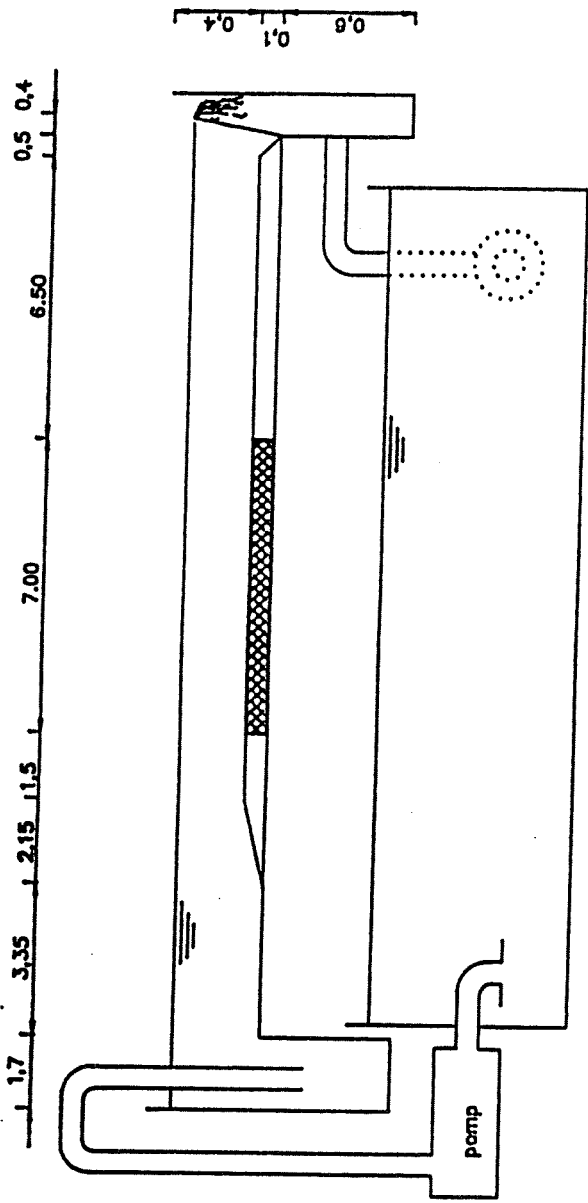
Evenals stroomgoot A is deze stroomgoot voorzien van een retoursysteem waardoor het water rondgepompt wordt. In dit geval wordt het circulatiesysteem gevormd door een bak die bijna net zo lang is als de stroomgoot zelf maar een duidelijk groter doorstroomprofiel heeft ($1 * 1 \text{ m}^2$). In deze bak is het de bedoeling dat het sediment dat in de stroomgoot zelf geërodeerd is, neerslaat. Voor de slibfractie is dit niet mogelijk door de zeer lage valsnelheid van het materiaal. Voor de kleinere zandfracties is dit helaas ook niet altijd mogelijk.

De stroomgoot zelf is 23 m lang, 0.5 m breed en 0.5 m hoog. In een gedeelte van de goot is de bodem 0.1 m verhoogd. In het overgebleven diepere gedeelte wordt het bodemmateriaal geplaatst. Hierdoor ontstaat een sedimentbed met een lengte van 7 m en een breedte van 0.5 m.

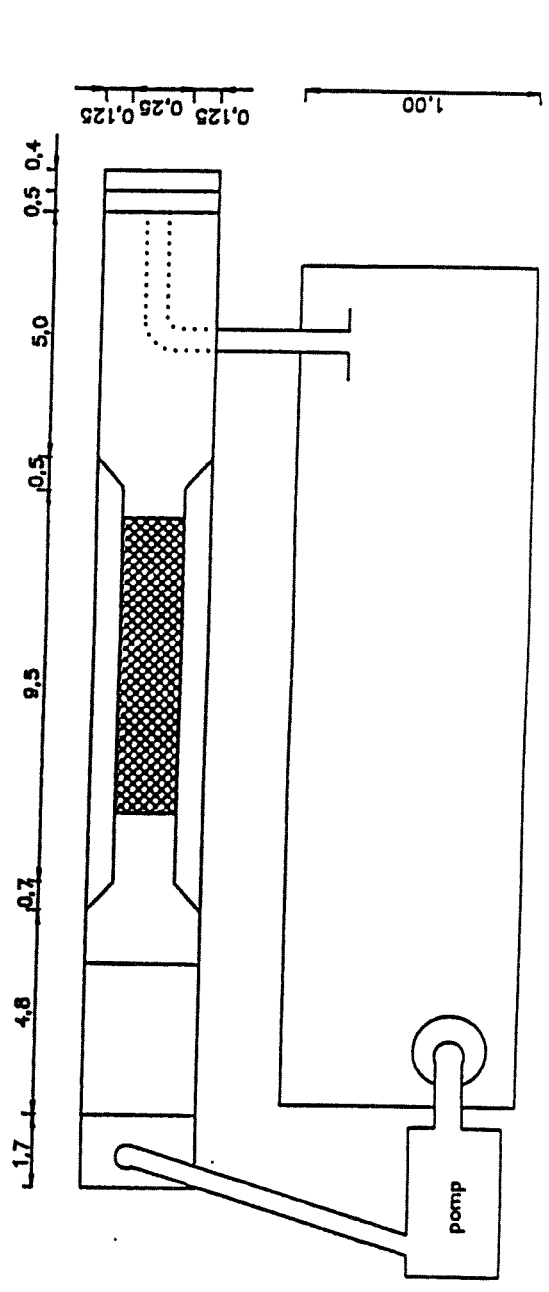
Omdat de maximaal te bereiken snelheden in de testsectie niet hoog genoeg waren, is de testsectie halverwege de proeven versmald tot een breedte van 0.25 m. De versmalling is symmetrisch in de breedte aangebracht (figuur 3.2).

De in stroomgoot B geteste zand-slib mengsels staan vermeld in tabel 3.2.

VOORAANZICHT



BOVENAANZICHT



Figuur 3.2 Opstelling stroomgoot B (met versmalling)

Tabel 3.2 Samenstelling verschillende uitgeteste zand-slibmengsels stroomgoot B.

slibpercentage %	afkomst slib
0	(zuiver zand, $D_{50} = 90 \mu\text{m}$)
20	Oestergronden Noordzee, natuurlijk zoutwater slib (eerste lading)
5 10 15 20	Oestergronden Noordzee, natuurlijk zoutwater slib (tweede lading)

3.3 Instrumententatie

3.3.1 Snelheden

In stroomgoot A zijn de snelheden gemeten met een micro-propeller. Tijdgemiddelde (30 s) waarden zijn verkregen door middel van een integrator.

Door de kleine lengte van de testsectie zijn geen evenwichts snelheidsprofielen ontwikkeld. Na het meten van enkele snelheidsprofielen bleek dat aan het eind van de testsectie de snelheid constant was vanaf 1.5 cm van de bodem tot 1.5 cm van de deksel. Binnen 1.5 cm van de bodem en de deksel was het niet meer mogelijk om de snelheid te meten met de micro-propeller.

Om dichterbij de bodem snelheden te meten zouden andere meetinstrumenten gebruikt moeten worden. Echter deze methoden leveren andere onoverkomelijke problemen op;

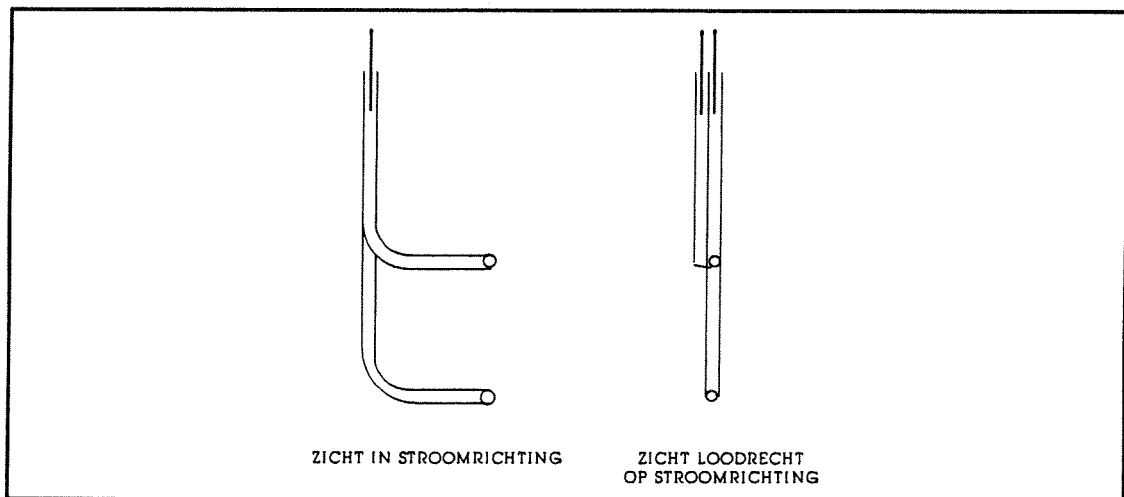
- met een Laser Doppler kan in principe tot zeer dicht bij de bodem gemeten worden. De Laser Doppler kan echter alleen in vrijwel helder water meten, in dit geval is het water door de aanwezigheid van het slib te troebel.
- met een electromagnetische snelheidsmeter is het mogelijk om redelijk dicht bij het bed snelheden te meten. Een electromagnetische snelheidsmeter mag echter niet dichterbij de zijwanden gebruikt worden dan drie maal zijn eigen diameter (diameter is 3 cm) omdat anders het magnetische veld te sterk verstoord wordt. In dit geval is de totale breedte van de testsectie slechts 14.5 cm en de zijwanden verstoren zodoende het meetsignaal te sterk.

Gedurende de metingen is aan het eind van het bed op een hoogte van 7 cm vanaf de bodem de tijdgemiddelde snelheid bepaald (gemiddeld over 30 s). Aangenomen is dat deze snelheid aanwezig is in het gehele doorstroomprofiel tot 1.5 cm vanaf de wanden en de bodem.

In stroomgoot B zijn de snelheden met een electromagnetische snelheidsmeter gemeten. Deze kan in principe snelheden tot zeer dicht bij de bodem meten. Wanneer te dicht bij het bed gemeten wordt zijn de metingen echter niet meer betrouwbaar; de stroming wordt onder de electromagnetische snelheidsmeter samengedrukt waardoor een te hoge snelheid gemeten wordt, bovendien vindt een verhoogde erosie onder de electro-magnetische snelheidsmeter plaats. Tot op 0.01 m van de bodem is het toch redelijk goed mogelijk om snelheden te meten.

3.3.2 Concentraties

De sediment concentraties zijn zowel in stroomgoot A als in stroomgoot B bepaald door het dwars afzuigen van water met daarin sediment (Bosman et al [1987]). Door buisjes met een interne diameter van 0.004 m is het water loodrecht op de stroomrichting uit de goot getapt (Fig.3.3).



Figuur 3.3 Aftaphark gebruikt voor het aftappen van water-sediment monsters

Dwars afzuigen heeft het voordeel dat de aftapsnelheid niet gelijk hoeft te zijn aan de stroomsnelheid zoals dat bij isokynetisch afzuigen het geval is. Het is alleen noodzakelijk om een aftapsnelheid te gebruiken die meer dan drie keer de stroomsnelheid is (Bosman et al [1987]). De aftapsnelheid kan geregeld worden door de hoogte van de uitstroomopening van de aftapbuisen ten opzichte van het wateroppervlak in de goot te variëren.

In stroomgoot A is door de kleine afmeting van de goot slechts 100 ml per aftappunt afgetapt.

Het afzuigen vond plaats onder een natuurlijk verhang. De afzuigsnelheid in de buizen was circa 1.5 m/s. Aangezien de maximale stroomsnelheid in de goot niet verder opliep dan circa 0.5 m/s is voldaan aan de eis voor de afzuigsnelheid in het geval van dwars afzuigen (afzuigsnelheid groter dan drie maal de stroomsnelheid) (Bosman et al [1987]).

In stroomgoot B is per aftappunt telkens 1 liter afgetapt.

Het afzuigen vond hier wederom plaats onder natuurlijk verhang. Door de grotere weerstand van de afzuigbuizen (grotere lengte) werd in dit geval slechts een aftap-snelheid bereikt van 0.9 m/s. De stroomsnelheid in de stroomgoot liep op tot circa 1.4 m/s. De afzuigsnelheid was hier dus niet groot genoeg om te voldoen aan de door Bosman et al [1987] gestelde eis voor de afzuigsnelheid (groter dan drie maal de stroomsnelheid). Deze eis voor de afzuigsnelheid wordt gesteld om te voorkomen dat de relatief zware zanddeeltjes voorbij de afzuigbuizen schieten in plaats van er in gezogen te worden. Wanneer niet aan de eis voldaan wordt kan vooral de hoeveelheid afgetapt zand beïnvloed worden. Bij de interpretatie van de gemeten zandconcentraties in deze stroomgoot moet hiermee rekening gehouden worden.

Voor het afgetapte slib zal de te lage afzuigsnelheid vrijwel geen invloed hebben. De relatief lichte slibdeeltjes zullen direct met de vloeistof in de afzuigbuizen gezogen worden.

3.3.3 Verhang

In stroomgoot A wordt van enkele proeven het verhang in de testsectie bepaald. Dit verhang wordt gemeten met het oog op de bepaling van de bodemschuifspanning. Omdat de testsectie slechts 1 m lang is zullen de vervallen klein zijn en zal zeer nauwkeurig gemeten moeten worden. Door middel van pitotbuizen en een differentieel-manometer is het in principe mogelijk om vervallen te meten van 0.05 mm.

Uit de metingen bleek echter dat de differentieel-manometer gemakkelijk verstoord wordt door de aanwezigheid van slib in het systeem.

3.3.4 Saliniteit

Proeven met natuurlijk slib afkomstig uit een zout milieu zijn uitgevoerd met zout water. Er is gebruik gemaakt van diverse soorten zout water:

- het slib afkomstig uit de Eems Dollard is getest met natuurlijk zout water eveneens afkomstig uit de Eems Dollard.
- het slib afkomstig van de Oestergronden op de Noordzee is getest met kunstmatig zout water samengesteld uit verschillende zouten in ongeveer dezelfde

verhoudingen als die in een natuurlijk zout milieu voorkomen (Mitchell [1976]) (tabel 3.3)

Tabel 3.3 Aanwezigheid zouten in het model en in een natuurlijk zout milieu (Mitchell [1976])

	model (%)	natuurlijk zout milieu (%)
Na ⁺	28.3	30.7
Mg ²⁺	5.6	3.3
K ⁺	0.9	1.7
Ca ²⁺	0.9	1.1
Cl ⁻	57.1	53.2
SO ₄ ²⁻	7.2	10.0

Wanneer de dichtheid (piknomete) en de temperatuur van het water bekend zijn kan de salinitet bepaald worden (Fischer et al [1979]).

3.4 Analyse afgetapte sediment-water monsters

Van de door middel van het dwars afzuigen verkregen monsters is eerst het zandge-deelte afgescheiden door middel van een 53 μm zeef (nat zeven). Van het resterende slib-watermengsel is het slibgehalte (sediment kleiner dan 53 μm) door middel van filtreren, drogen en wegen bepaald. Hiervoor is hooguit 100 ml van het afgetapte slib-watermengsel gebruikt omdat anders dichtslibbing van de filters optreedt. De inhoud van de zeef (zand) is vervolgens eveneens gefiltreerd, gedroogd en gewogen. Op deze manier is de concentratie zand en de concentratie slib per monster apart bepaald.

3.5 Eigenschappen van het gebruikte bodemmateriaal

3.5.1 Mineralogische samenstelling

Kaoliniet

Mineralogische samenstelling zoals die door de fabrikant gegeven is:

Quartz	0.0%
Feldspar	10.5%
Ferric Oxide	0.8%
Lime	0.0%
Magnesium	0.1%
Klei	88.4%
Overig	0.2%

Slib afkomstig van de oevers van de rivier de Waal nabij Haften (Haftense klei)

De globale mineralogische samenstelling van dit slib is:

Quartz	15%
Klei:	
Illiet	40%
Kaoliniet	25%
Chloriet	10%
Smectiet	5%
Overig	5%

Slib afkomstig van de Eems Dollard

De mineralogische samenstelling van dit slib is niet onderzocht.

Zand-slib mengsel afkomstig van de Oestergronden

Mineralogische samenstelling zoals die is bepaald door Grondmechanica Delft:

Quartz	70%
Feldspar	8%
Calciet	4%
Dolomiet	1%
Klei:	
Illiet	10%
Chloriet	5%
Kaoliniet	2%

In verband met de verwerkbaarheid van het materiaal is eveneens de vervuiling van het materiaal bepaald. De aanwezigheid van verschillende stoffen is bepaald;

- Zware metalen (Cadmium en Kwik)
- Polychloorbifenylen (PCB)
- Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen (PAK)

De aanwezigheid van de stoffen wordt uitgedrukt in gewicht stof per gewicht droog bodemmateriaal. De resultaten zoals die door TAUW Infra Consults BV bepaald zijn, staan vermeld in tabel 3.4.

Uit de huidig geldende toetsingsnormen (tabel 3.5) kan geconcludeerd worden dat het materiaal nagenoeg niet vervuild is.

Tabel 3.4 Aanwezigheid verontreinigde stoffen (mg/kg droge stof)

		mg/kg d.s.
zware metalen	Cadmium (Cd)	< 1
	Kwik (Mg)	< 0.1
PCB	totaal	< 0.07
PAK	totaal	0.4

Tabel 3.5 Toetsingstabel voor de beoordeling van de concentratieniveaus (mg/kg droge stof) van verontreinigende stoffen in de bodem

		mogelijke ver- vuiling mg/kg d.s.	zekere vervuiling mg/kg d.s.
Zware metalen	Cadmium (Cd)	5	20
	Kwik (Mg)	2	10
PCB	totaal	1	10
PAK	totaal	20	200

3.5.2 Granulometrie

Kaoliniet

Zeefanalyse zoals die gegeven is door de fabrikant:

45% < 2 μm

85% < 10 μm

Slib afkomstig van de oevers van de rivier de Waal nabij Haften (Haftense klei)

Zeefanalyse zoals die bepaald is in de eigen analysekamer:

46% < 2 μm

93% < 53 μm

Slib afkomstig van de Eems Dollard

Zeefanalyse zoals die gegeven is door het Waterloopkundig Laboratorium Delft:

90% < 10 μm

100% < 99.5 μm

$D_{50} = 3.5 \mu\text{m}$

Zand-slib mengsel afkomstig van de Oestergronden

Zeefanalyse zoals die bepaald is door Grondmechanica Delft (Bijlage F):

$$12\% < 2 \mu\text{m}$$

$$16\% < 10 \mu\text{m}$$

$$22\% < 53 \mu\text{m}$$

$$D_{50} = 95 \mu\text{m}$$

$$D_{90} = 165 \mu\text{m}$$

Zand gebruikt voor het vervaardigen van zand-slib mengsels

Zand gebruikt in stroomgoot A.

Zeefanalyse zoals die bepaald is in de eigen analysekamer:

$$D_{10} = 70 \mu\text{m}$$

$$D_{50} = 105 \mu\text{m}$$

$$D_{90} = 150 \mu\text{m}$$

Zand gebruikt in stroomgoot B.

Zeefanalyse zoals die bepaald is in de eigen analysekamer:

$$D_{10} = 10 \mu\text{m}$$

$$D_{50} = 90 \mu\text{m}$$

$$D_{90} = 135 \mu\text{m}$$

3.5.3 Consolidatie

Door het uitvoeren van consolidatieproeven is enig inzicht verkregen in de doorlatendheid en in de cohesiviteit van het materiaal.

Bij de consolidatie proeven is in een meetglas (diameter 7 cm) een uniform verdeelde suspensie aangebracht. De consolidatiesnelheid is bepaald door de hoogte van het sliboppervlak in de loop van de tijd te meten.

De consolidatie kan geschematiseerd worden in drie delen:

- een relatief langzaam gedeelte, het slib bevindt zich in een toestand van bezinken terwijl de slibdeeltjes elkaar hinderen, in dit gedeelte kan het slib nog aangeduid worden als slib in suspensie,
- een relatief snel middengedeelte, de slibdeeltjes of slibvlokken bezinken relatief snel, het tussenliggende water kan relatief makkelijk vrijkomen door de nog relatief grote doorlatendheid,
- een wederom langzame lineaire eindconsolidatie, het poriewater kan slechts moeilijk vrijkomen, de doorlatendheid is sterk verminderd, slib in deze toestand wordt vaak als plastisch slib aangeduid.

Migniot [1989] voerde bezinkingsproeven uit met slib afkomstig van plaatsen over de

hele wereld. Van hetzelfde materiaal bepaalde hij eveneens de schuifweerstand, de viscositeit en de cohesiviteit. Uit de resultaten blijkt dat deze parameters afhankelijk zijn van de dichtheid van het materiaal en van de toestand van de consolidatie zoals die hierboven beschreven is.

De cohesiviteit van het materiaal is af te lezen uit de mate van consolidatie in de loop van de tijd. Wanneer het materiaal al bij een lage dichtheid overgaat op de uiteindelijk langzame eindconsolidatie zal de doorlatendheid van het materiaal klein zijn. Het contact tussen de verschillende slibdeeltjes en de aanwezigheid van gebonden watermoleculen aan de oppervlakken van de slibdeeltjes (eigenlijk kleideeltjes) verhindert het water om het slib-watermengsel te verlaten. Dit zijn duidelijk eigenschappen van cohesief materiaal (zie ook Appendix A).

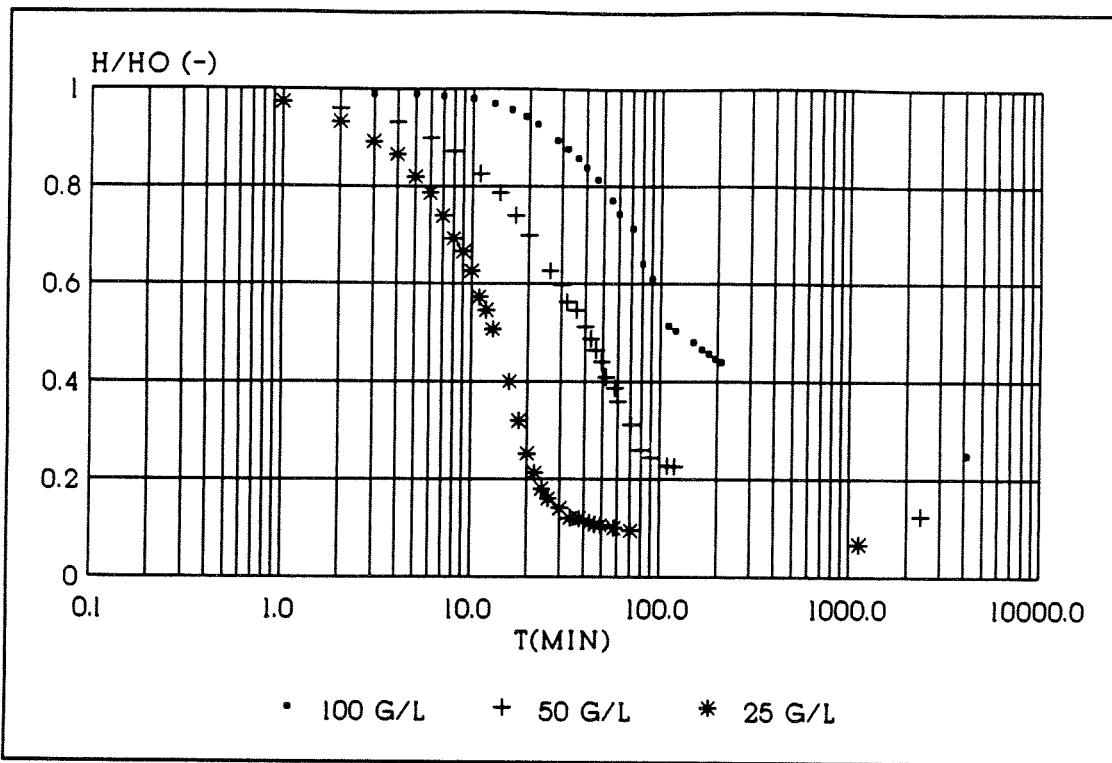
Een ander belangrijk kenmerk van cohesief materiaal is het verschil in consolidatiesnelheid in zout en in zoet water. Zout water heeft een dubbel effect op slib. Enerzijds vertoont het zoute water een groter geleidend vermogen waardoor de geladen slibdeeltjes (kleideeltjes) elkaar beter kunnen aantrekken. Anderzijds zal de dubbellaag van de kleideeltjes (zie Appendix A) door de zoutmoleculen ingedrukt worden zodat de kleideeltjes elkaar dichter kunnen naderen en eventueel een binding kunnen aangaan. Wanneer het materiaal in zout water veel sneller uitzakt dan in zoet water dan betekent dat dat door het zoute water verschillende slibdeeltjes gemakkelijk aan elkaar klonteren en op die manier een zodanig groot gewicht krijgen dat ze relatief snel kunnen bezinken (uitvlokken). Hoe sterker dit uitvlokken plaats vindt, hoe groter ook de cohesiviteit van het slib zal zijn.

Van het kaoliniet en van het natuurlijk slib afkomstig van de Oestergronden zijn consolidatie snelheden bepaald bij verschillende beginconcentraties. In beide gevallen zijn de proeven zowel met zoet (gedestilleerd) als met zout water (saliniteit 3.1%, NaCl) uitgevoerd.

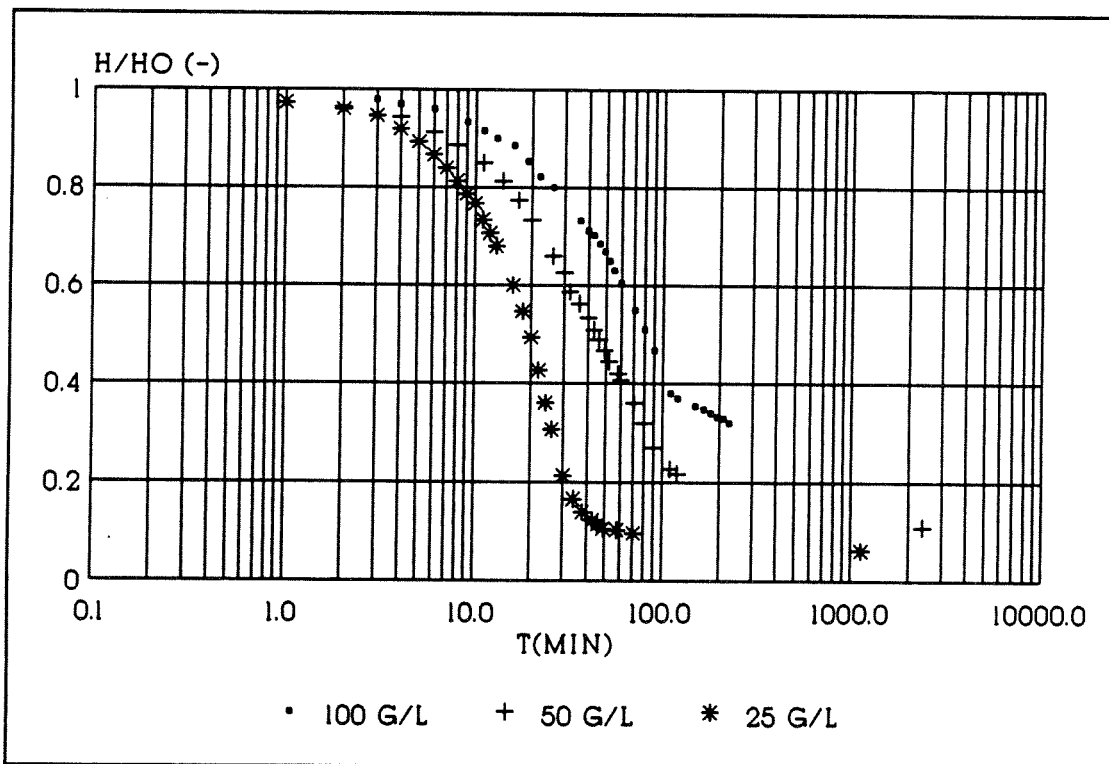
Het natuurlijke slib (Oesterslib) in zoet water (gedestilleerd) vertoonde geen enkele consolidatie gedurende de eerste 6 uur. Na enkele dagen ontstond er weliswaar een soort bezinkingslaag echter de gehele kolom bleef troebel. Dit duidt erop dat de allerfijnste deeltjes nog steeds in suspensie zijn terwijl de grotere slibdeeltjes neerslaan.

De resultaten van de proeven met het kaoliniet met zoet en met zout water alsmede de resultaten van de proeven van het natuurlijke slib met zout water zijn gegeven in figuur 3.4, 3.5 en 3.6. De resultaten van de consolidatie van het natuurlijke materiaal met zoet water zijn vanwege het niet optreden van de consolidatie niet in een figuur weergegeven.

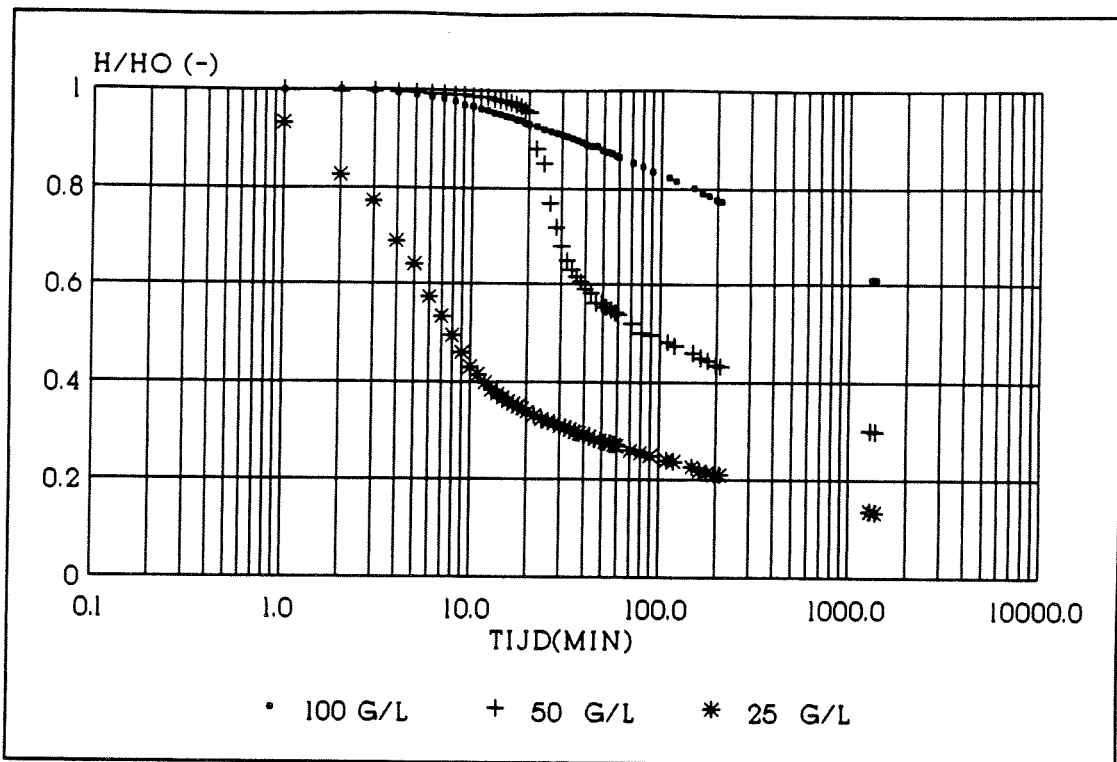
Wanneer het overgangspunt van het relatief snelle middengedeelte van de consolidatie en de langzame lineaire eindconsolidatie als representatief voor de dichtheid aangenomen wordt dan worden de verschillen tussen het kaoliniet en het natuurlijke slib duidelijk (tabel 3.6). Het natuurlijke slib heeft een lagere dichtheid dan bulkdichtheid. De doorlatendheid is dus ook veel kleiner voor het natuurlijke materiaal.



Figuur 3.4 Consolidatie kaoliniet in gedestilleerd water



Figuur 3.5 Consolidatie kaoliniet in zout water (saliniteit 3.1% NaCl)



Figuur 3.6 Consolidatie slib afkomstig van de Oestergronden in kunstmatig zout water (saliniteit 2.3%, combinatie van zouten)

Het verschil in cohesiviteit tussen de beide materialen wordt duidelijk uit de verschillen in consolidatiegedrag in zoet en in zout water. Bij het kaoliniet is er nagenoeg geen verschil tussen de proeven met zoet en met zout water. Het aanwezige, kleine, verschil wordt gedeeltelijk veroorzaakt door de grotere dichtheid van het zoute water. De aanwezigheid van het zout heeft blijkbaar geen invloed op eventueel samenklonteren van het materiaal. Het materiaal bezit een zeer lage cohesiviteit.

De consolidatie van het natuurlijke slib afkomstig van de Oestergronden heeft daarentegen een zeer duidelijk verschillend karakter in zoet en in zout water. Het materiaal zakt in zoet water nagenoeg niet uit. De lading aan het oppervlak van de deeltjes zorgt er in dit geval voor dat de deeltjes elkaar onderling afstoten. De afzonderlijke deeltjes zijn zodanig klein dat ze door middel van Brownse beweging in suspensie gehouden worden. Wanneer er echter zouten aanwezig zijn in de omringende vloeistof wordt het mogelijk dat de verschillende deeltjes elkaar aantrekken en samenklonteren (zie ook Bijlage A). De samengeklonterde deeltjes zakken door hun gewicht uit. De gevoeligheid voor de aanwezigheid van het zoute water geeft aan dat het materiaal cohesief is.

Tabel 3.6 Concentratie en dichtheid van de bodemlaag in het knikpunt van de consolidatiecurve.

	relatieve hoogte knikpunt	sediment conc. bodemlaag (g/l)	dichtheid bodemlaag (kg/m ³)
kaoliniet gedestilleerd water (1000 kg/m ³)			
begin conc. 100 g/l	.50	200	1125
begin conc. 50 g/l	.22	227	1142
begin conc. 25 g/l	.12	208	1130
kaoliniet zoutwater (1030 kg/m ³)			
begin conc. 100 g/l	.38	263	1190
begin conc. 50 g/l	.22	227	1169
begin conc. 25 g/l	.10	250	1183
slib Oestergronden zoutwater (1017 kg/m ³)			
begin conc. 100 g/l	1.00	100	1079
begin conc. 50 g/l	.60	83	1068
begin conc. 25 g/l	.35	71	1061

3.6 Meetprocedure

Snelheidsmetingen

In stroomgoot A zijn voorafgaand aan de concentratieproeven een aantal snelheidsmetingen uitgevoerd. Tijdens deze proeven is er een vaste bodem in de goot geplaatst met een kunstmatige ruwheid van 105 μm . In de lengte van het bed zijn verschillende snelheidsprofielen over de hoogte gemeten.

Vorbereiding bodemmateriaal

Zand-kaolinietbed:

Het kaoliniet is in droge vorm aangeleverd. In eerste instantie is het droge kaoliniet aangelengd met water waardoor een yoghurt-achtige vloeistof ontstaat. Deze vloeistof heeft ongeveer een week gestaan onder af en toe roeren. Deze periode is noodzakelijk om het kaoliniet de kans te geven het water aan zich te binden. Na deze week is er onder constant roeren zand toegevoegd totdat het gewenste slib percentage bereikt was. Wanneer het mengsel tijdens het mengen te droog werd, is water toegevoegd om klontervorming te voorkomen.

Zand-Eems Dollardslibbed:

Het slib afkomstig uit de Eems Dollard is als zuiver vloeibaar slib aangeleverd. Evenals bij het kaoliniet is dit slib onder constant roeren gemengd met zand tot de gewenste samenstelling bereikt was.

Zand-Oesterslibbed:

Het slib afkomstig van de Oestergronden is als zand-slibmengsel aangevoerd met daarin nog eventueel schelpdieren of stenen. Allereerst zijn de grovere delen zoals schelpen en stenen verwijderd. Vervolgens is het overgebleven mengsel geroerd om een homogene samenstelling te krijgen. Dit mengsel is eerst zonder toevoeging van zand uitgetest. In verdere proeven is extra zand toegevoegd om zodoende het slibpercentage te verlagen.

Voorbereiding in de goot

Het gehomogeniseerde bodemmateriaal is in de goot geplaatst en direct onder water gezet. Vervolgens is de goot enkele dagen met rust gelaten. Het materiaal krijgt hierdoor de kans te consolideren. Zowel in stroomgoot A als in stroomgoot B trad echter nauwelijks consolidatie op; het hoge gehalte aan zand vormt blijkbaar een skelet dat consolidatie verhindert.

Erosieproeven

Zowel in stroomgoot A als in stroomgoot B zijn tijdens een constante stroomsnelheid gedurende enkele uren (4 tot 7 uur) de concentraties gemeten. Vervolgens is de snelheid opgevoerd en zijn de concentraties wederom gedurende enkele uren gemeten. De snelheid is net zolang stapsgewijs opgevoerd tot er duidelijk een toename van de concentratie gevonden werd (ofwel totdat de aan de goot gekoppelde maximale snelheid bereikt werd).

Stroomgoot A:

Op één punt in de goot halverwege het bed is de concentratie op 2 hoogtes (0.02 en 0.06 m boven het bed) gemeten (figuur 3.7). Aangezien het materiaal in suspensie volledig gemengd is over de hoogte (door de aanwezigheid van de propeller) was het in principe voldoende om op één hoogte de concentratie te meten. Om echter inzicht te hebben in mogelijke verstoppingen of meetprocedurefouten is op twee hoogtes simultaan gemeten. De beide gevonden concentraties zijn vervolgens gemiddeld.

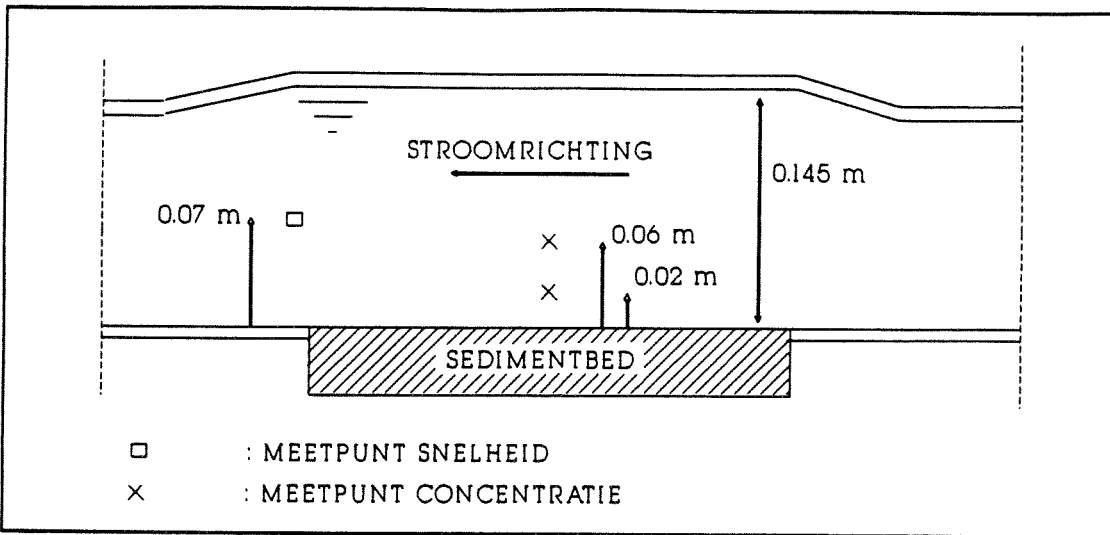
Door aan te nemen dat de gemeten concentratie in het gehele systeem aanwezig was kan direct bepaald worden hoeveel materiaal er in totaal geërodeerd is.

Tijdens de concentratiemetingen is op één plaats in de goot aan het eind van de meetsectie op 0.07 m boven het bed (figuur 3.7) de gemiddelde snelheid (over 30 s gemiddeld) gemeten.

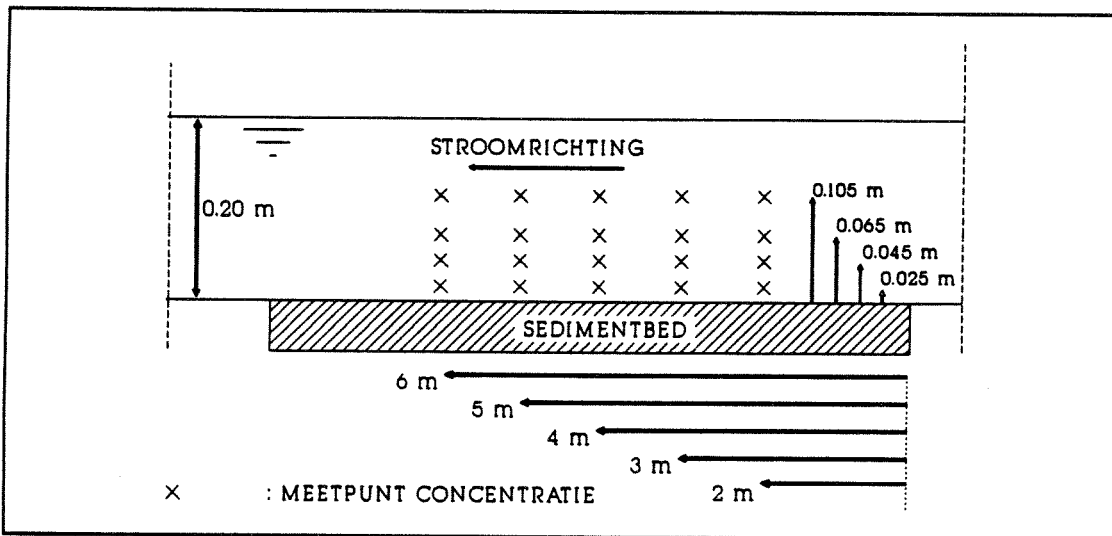
Stroomgoot B:

Bij de transportproeven met het zuivere zand zijn op vijf plaatsen in de goot (2, 3, 4,

5 en 6 m vanaf begin bed) op vier hoogtes (0.025, 0.045, 0.065 en 0.105 m boven het bed) concentraties gemeten (figuur 3.8).



Figuur 3.7 Meetpunten stroomgoot A

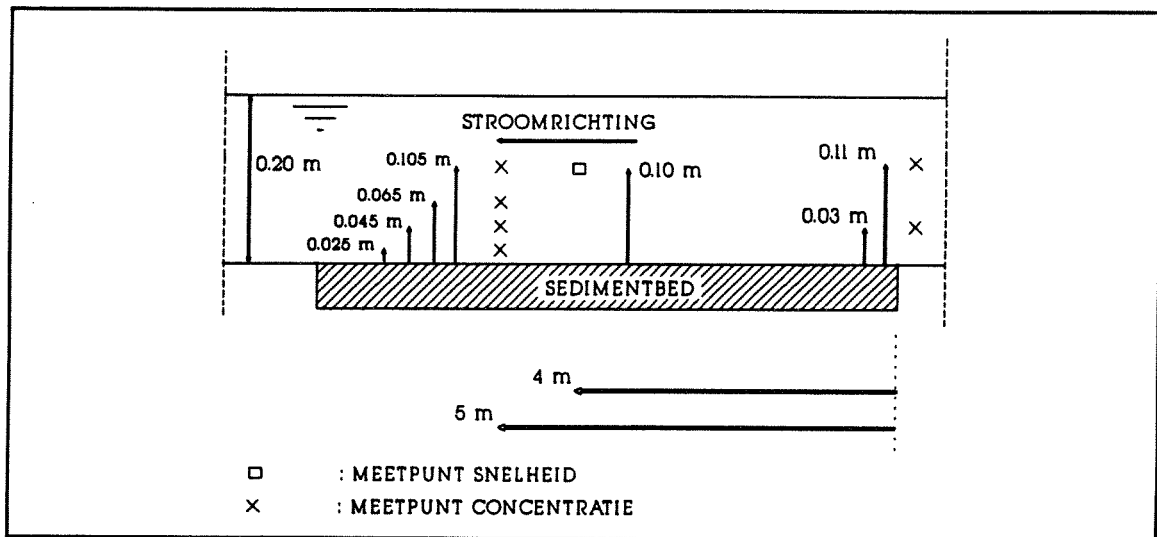


Figuur 3.8 Meetpunten stroomgoot B met zuiver zandbed

Bij de transport proeven met de zand-slibcombinaties zijn op twee plaatsen in de goot concentraties gemeten. Aan het begin van het bed zijn op twee hoogtes (0.03 en 0.11 m boven het bed) concentraties gemeten. Op 5 m vanaf het begin van het bed is de concentratie op vier hoogtes gemeten (0.01, 0.03, 0.05 en 0.09 m boven het bed) (figuur 3.9)

Tijdens de concentratiemetingen is de gemiddelde snelheid (over 60 s gemiddeld) op 4 m vanaf het begin van het bed gemeten. In eerste instantie zijn telkens snelheidsprofielen over de eerste 0.10 à 0.15 m boven het bed gemeten. Later is alleen op

0.10 m boven het bed de snelheid gemeten (figuur 3.9). Door middel van de snelheidsprofielen kan de bodemschuifspanning bepaald worden.



Figuur 3.9 Meetpunten stroomgoot B zand-slibcombinaties

3.7 Beschrijving en verwerking meetresultaten

3.7.1 Stroomgoot A

Snelheid

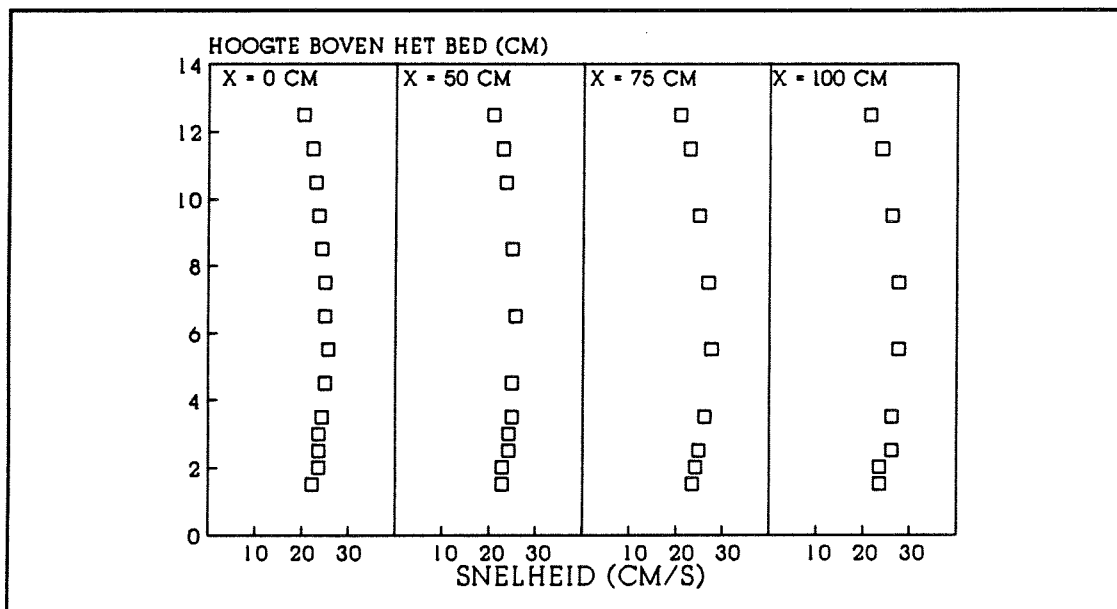
Voorafgaande aan de concentratiemetingen zijn enkele snelheidsprofielen (in de vertikaal) gemeten op verschillende plaatsen langs het bed. Figuur 3.10 geeft een voorbeeld van een dergelijke meting. In dit geval is er gebruik gemaakt van een vaste bodem met een kunstmatige ruwheid van 105 μm . Het blijkt dat de stroomsnelheid vrijwel constant is over de hoogte en over de lengte van het bed.

Wanneer het snelheidsprofiel vlak bij het bed bekend is kan daarmee de bodemschuifspanning bepaald worden. Er geldt immers:

$$v(z) = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \ln\left(\frac{z}{r/33}\right) \quad (3.1)$$

waarin

- $v(z)$: snelheid op hoogte z boven het bed
- τ : bodemschuifspanning
- ρ : dichtheid
- κ : constante van von Karman (0.4)
- r : bodemruwheid



Figuur 3.10 Snelheidsprofielen op verschillende plaatsen in de goot (X = afstand vanaf het begin van het bed)

In deze formule is zowel de τ als de r onbekend. Wanneer echter het verloop van $v(z)$ over de hoogte bekend is kunnen zowel τ als r bepaald worden.

Omdat het door het gebruik van de micropropeller helaas niet mogelijk was om binnen 1.5 cm van de bodem snelheden te meten en juist in dit geval (vanwege de korte lengte van de testsectie) de snelheden vlak bij het bed belangrijk zijn voor de bodemschuifspanning is het slechts mogelijk een ruwe schatting te maken van de aanwezige bodemschuifspanning.

Door gebruik te maken van de snelheidsmeting op 1.5 cm boven het bed ($\approx 0.95 * V_{gem}$, met V_{gem} de gemiddelde stroomsnelheid) en aan te nemen dat de bodemruwheid 0.003 m is, kan een schatting gemaakt worden voor de bodemschuifspanning (tabel 3.7).

Tabel 3.7 Bodemschuifspanning berekend met behulp van het snelheidsprofiel.

gemiddelde stroomsnelheid (m/s)	τ (N/m ²)
0.1	0.03
0.2	0.22
0.3	0.50
0.4	0.89
0.5	1.38

Verhang

Met behulp van het verhang is het eveneens mogelijk om de bodemschuifspanning te bepalen. Hierbij wordt er van uitgegaan dat geldt:

$$\tau = \rho g R i \quad (3.2)$$

waarin τ : bodemschuifspanning
 ρ : dichtheid
 R : hydraulische straal
 i : verhang

Het gemeten verval heeft niet alleen betrekking op de schuifspanning bij de bodem. De zijwanden en de deksel zullen eveneens een bijdrage leveren. Vanoni en Brooks [1957] beschrijven een procedure waarmee de bijdrage van de weerstand van de zijwanden van een goot berekend kan worden. Deze procedure kan eenvoudig aangepast worden voor de aanwezigheid van de deksel.

Bij de omrekening van het verhang naar de bodemschuifspanning wordt ervan uitgegaan dat het snelheidsprofiel volledig ontwikkeld is. Dit is echter bij de hier beschreven proeven niet het geval. Het is dan ook te verwachten dat de berekende bodemschuifspanningen aan de hoge kant zijn. Bij een niet ontwikkeld snelheidsprofiel wordt relatief minder weerstand door de bodem geboden (ten opzichte van de wanden en het dak) dan bij een volledig ontwikkeld snelheidsprofiel.

Omdat de apparatuur gemakkelijk beïnvloed wordt door het aanwezige slib zijn uiteenlopende waarden gevonden voor de verhangen. Door de algemene trend te volgen zijn echter globaal de bodemschuifspanningen bepaald (tabel 3.8).

Tabel 3.8 Bodemschuifspanning berekend door middel van het verhang

gemiddelde stroomsnelheid (m/s)	τ (N/m ²)
0.2	0.2
0.3	0.7
0.4	1.5 à 2.5

De overeenkomst tussen resultaten van beide metingen is bevredigend.

Concentratie

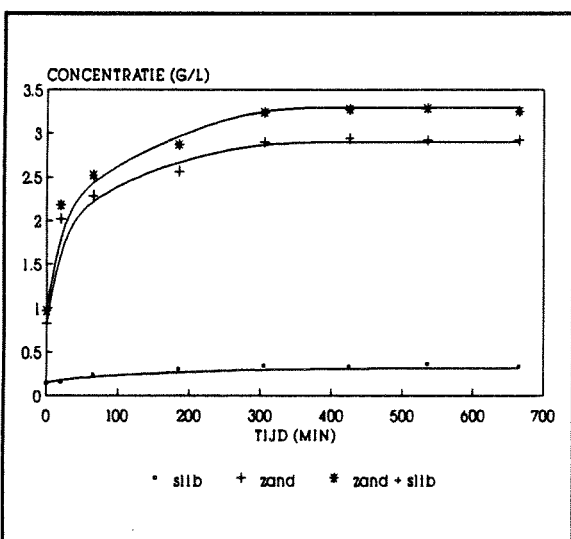
De resultaten van de gemeten concentraties staan vermeld in Appendix B.

De variatie van de gemeten concentraties is tamelijk groot. Dit is te wijten aan het

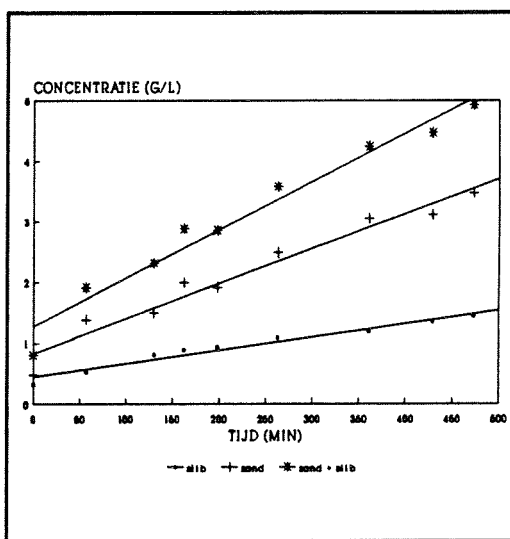
volume van de afgetapte monsters (100 ml). Op zich kan de sedimentconcentratie van 100 ml vloeistof tot op 0.0056 g/l nauwkeurig bepaald worden. Echter door de korte duur van het aftappen (6 à 10 s) is de afgetapte hoeveelheid sediment gevoelig voor onregelmatigheden in de concentraties in de goot. Omdat het zand zich eerder onregelmatig zal voortbewegen (in de vorm van zandwolken) zal vooral de zandconcentratie een grote variatie te zien kunnen geven.

De proeven met het zuivere zandbed geven een zeer grillig verloop van de concentratie in de tijd te zien. Dit grillige verloop wordt hoogstwaarschijnlijk voornamelijk veroorzaakt door de onregelmatigheden in de concentraties in de goot. Uit de metingen blijkt echter wel duidelijk dat vrijwel direct na het begin van een bepaalde constante stroomsnelheid de concentratie een soort evenwicht bereikt.

Bij de proeven met de zand-slibmengsels is dit niet het geval. De concentraties blijven toenemen in de loop van de tijd. Pas na vele uren ontstaat er soms een soort evenwicht. Het verloop van de concentratie in de tijd is ofwel lineair ofwel exponentieel. Een voorbeeld van beide gevallen wordt in figuur 3.11 en 3.12 gegeven.



Figuur 3.11 Exponentieel concentratieverloop (7.5% Eems Dollard slib, stroomsnelheid 0.43 m/s)



Figuur 3.12 Lineair concentratieverloop (17% kaoliniet, stroomsnelheid 0.43 m/s)

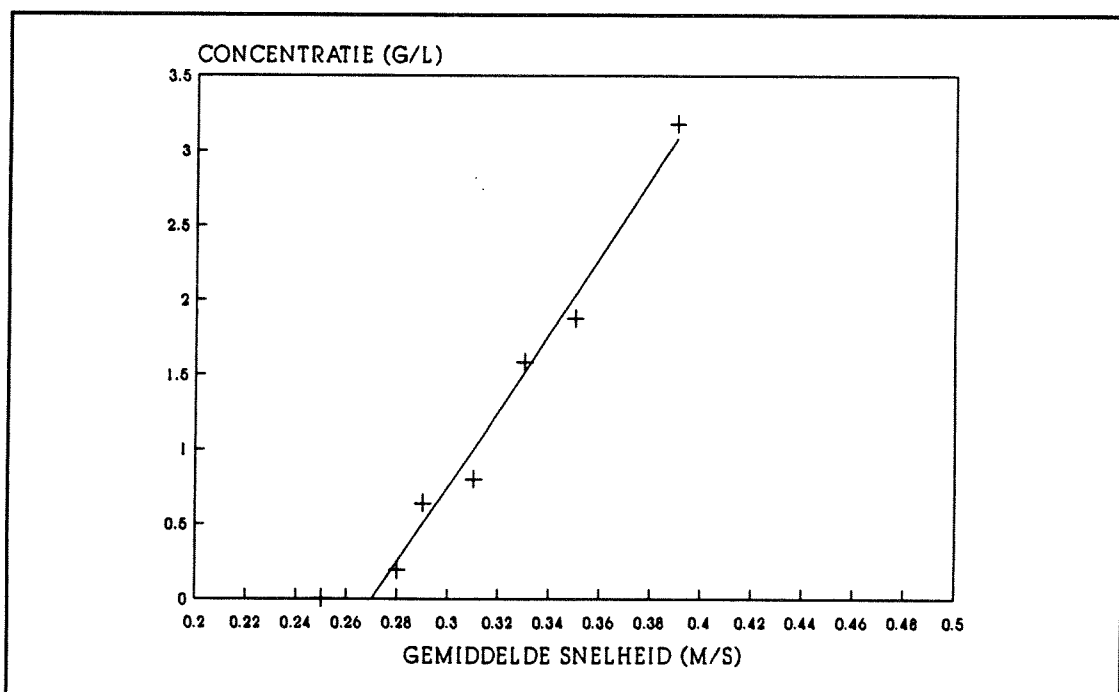
Beide soorten erosie worden ook bij zuiver slib aangetroffen (zie paragraaf 2.3.1, figuur 2.2 en 2.3). Het lineaire verloop van de concentratie in de tijd is een duidelijke eigenschap van puur cohesief materiaal. Het exponentiële verloop kan het gevolg zijn van een toenemende bodemdichtheid over de diepte van het bed (Metha en Partheniades [1979]). In dit geval is het echter ook mogelijk dat het veroorzaakt is door het verzadigd raken van de vloeistof met zand. In de testsectie zal dan zand neergeslagen zijn waardoor een gedeelte van het bed bedekt is en niet verder kan eroderen.

Het is noodzakelijk een waarde te definiëren waarmee de verschillende zand-slibmengsels met elkaar vergeleken kunnen worden om zodoende de invloed van het percentage slib en het soort slib te onderzoeken. De concentratie na 60 min stromen wordt als vergelijkingswaarde aangenomen.

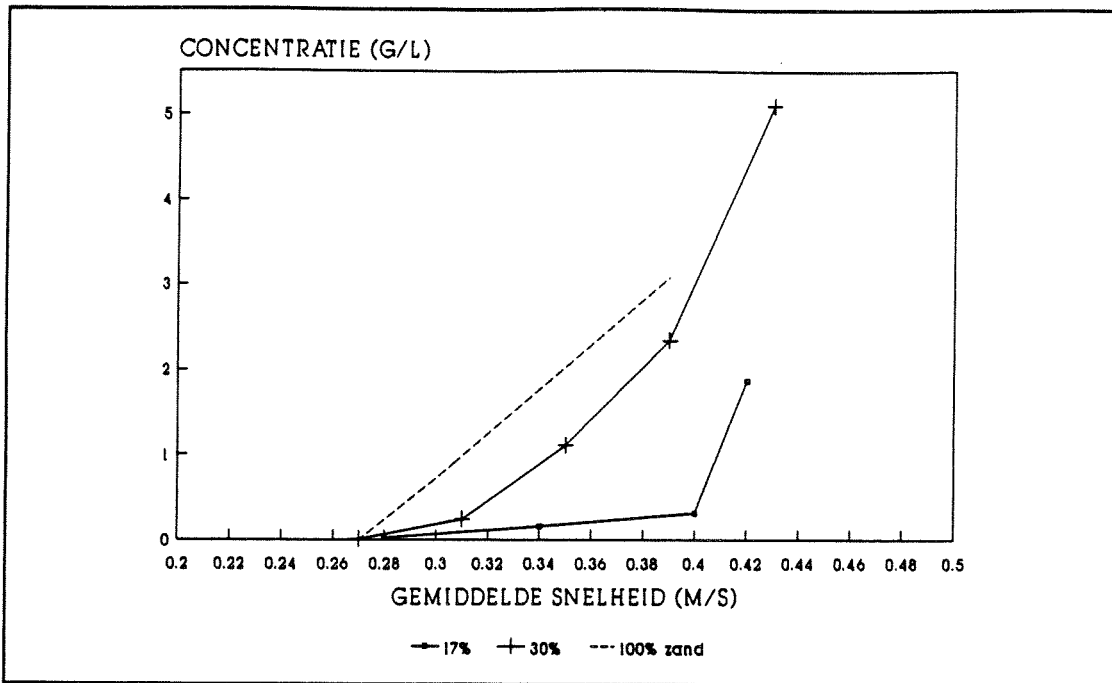
Omdat de concentraties in de loop van de tijd nogal eens een grillig verloop vertonen is het niet reëel een enkele gemeten concentratie als vergelijkingswaarde te gebruiken. Om dit te voorkomen wordt met behulp van alle concentraties die in de eerste 60 à 120 min stromen gemeten zijn een exponentieel verloop bepaald. De waarde die deze curve voor $t=60$ min aanneemt wordt als representatief aangenomen voor de concentratie en zodoende voor de erosie in het desbetreffende geval.

Om de randeffecten van het neerslaan van zand in de testsectie zoveel mogelijk buiten beschouwing te laten zijn alleen de concentratiemetingen van de eerste 60 à 120 minuten stromen gebruikt.

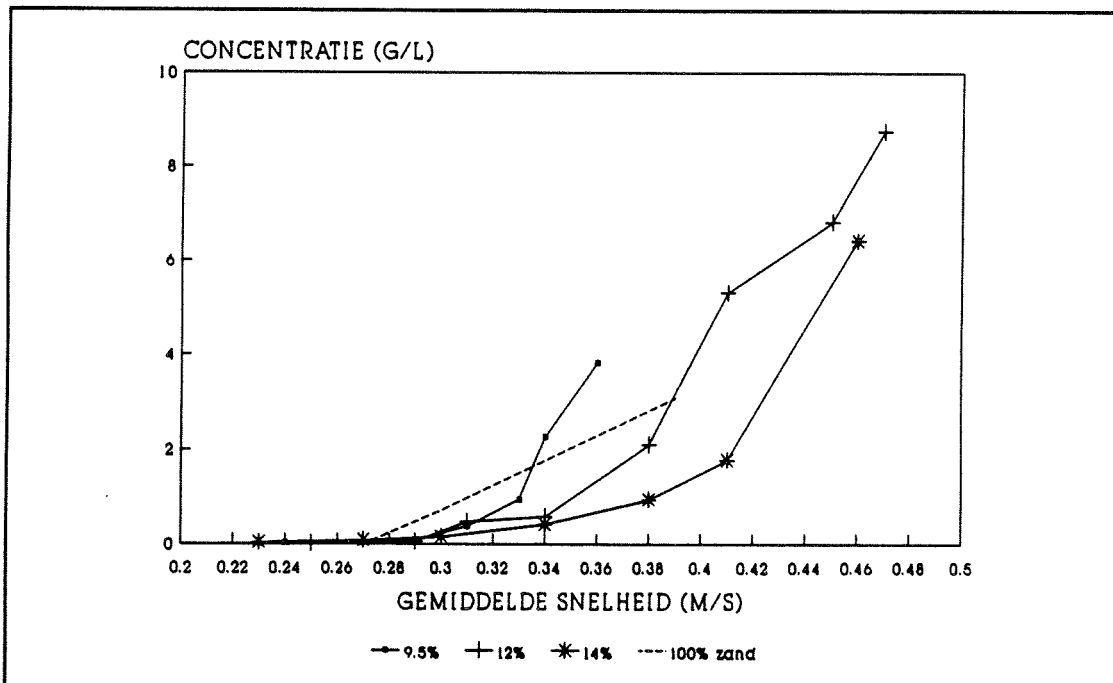
De aldus berekende referentiewaarden voor de concentraties (van de totale concentratie, zand en slib) zijn voor de verschillende zand-slibmengsels als ook voor het zuivere zandbed weergegeven in figuur 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, en 3.17. De in figuur 3.13 gegeven concentraties (voor het zuivere zandbed) zijn in dit geval niet de concentraties die na 60 min bereikt zijn maar de gevonden evenwichtsconcentratie die vrijwel direct na het begin van de proef verkregen is. In de overige figuren (figuur 3.14, 3.15, 3.16 en 3.17) is tevens het verloop van de concentratie van het zuivere zandbed weergegeven (gestreepte lijn).



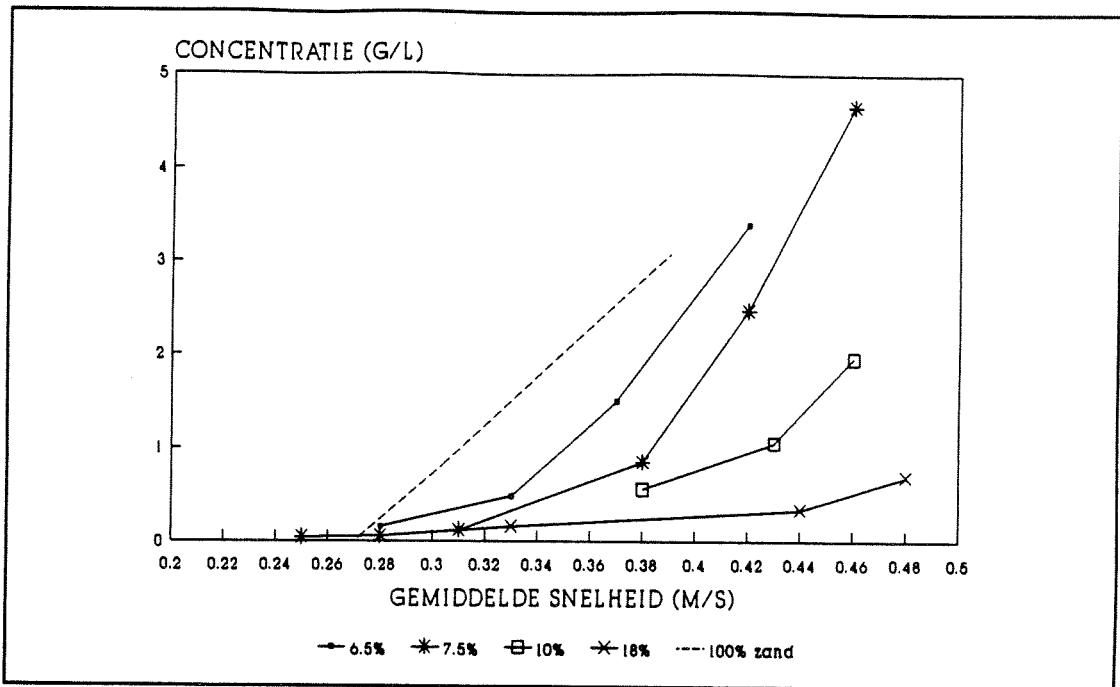
Figuur 3.13 Concentratie als functie van de gemiddelde snelheid voor een zuiver zandbed ($D_{50} = 105 \mu\text{m}$)



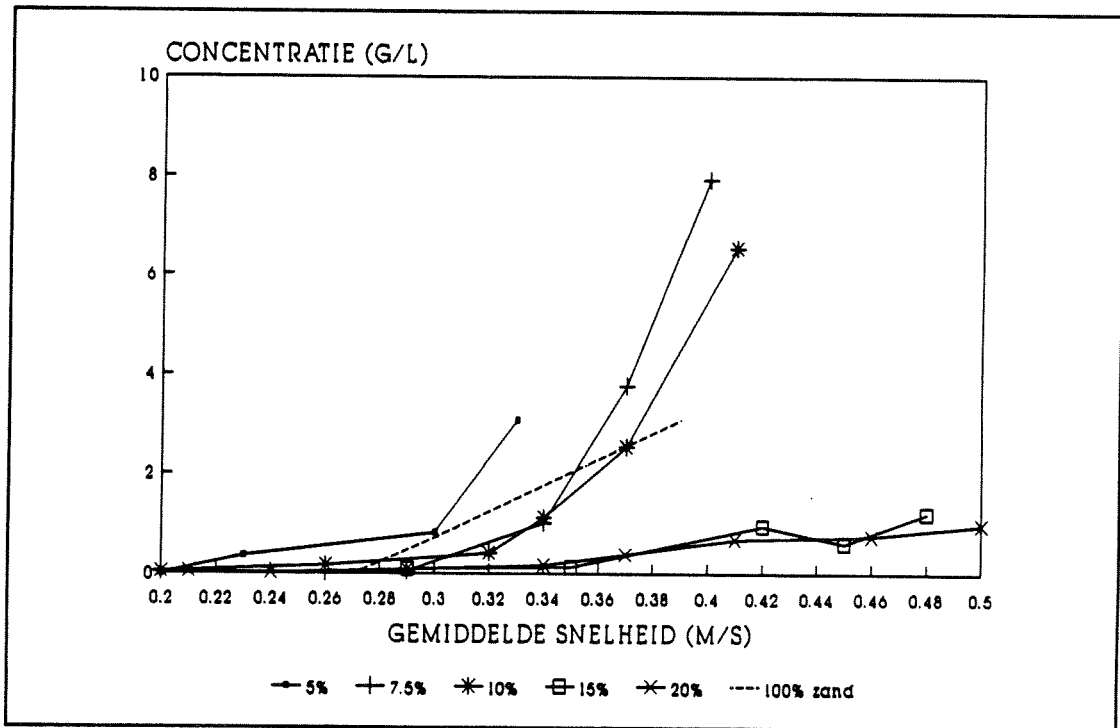
Figuur 3.14 Concentratie (na 60 min stromen) van zand en slib (gezamenlijk) als functie van de gemiddelde snelheid voor een bed van zand met kaoliniet (17%, 30%)



Figuur 3.15 Concentratie (na 60 min stromen) van zand en slib (gezamenlijk) als functie van de gemiddelde snelheid voor een bed van zand met Haafense klei (9.5%, 12% en 14%)



Figuur 3.16 Concentratie (na 60 min stromen) van zand en slib (gezamenlijk) als functie van de gemiddelde snelheid voor een bed van zand met Eems Dollard slib (6.5%, 7.5%, 10% en 18%)



Figuur 3.17 Concentratie (na 60 min stromen) van zand en slib (gezamenlijk) als functie van de gemiddelde snelheid voor een bed van zand met Oesterslib (5%, 7.5%, 10%, 15% en 20%)

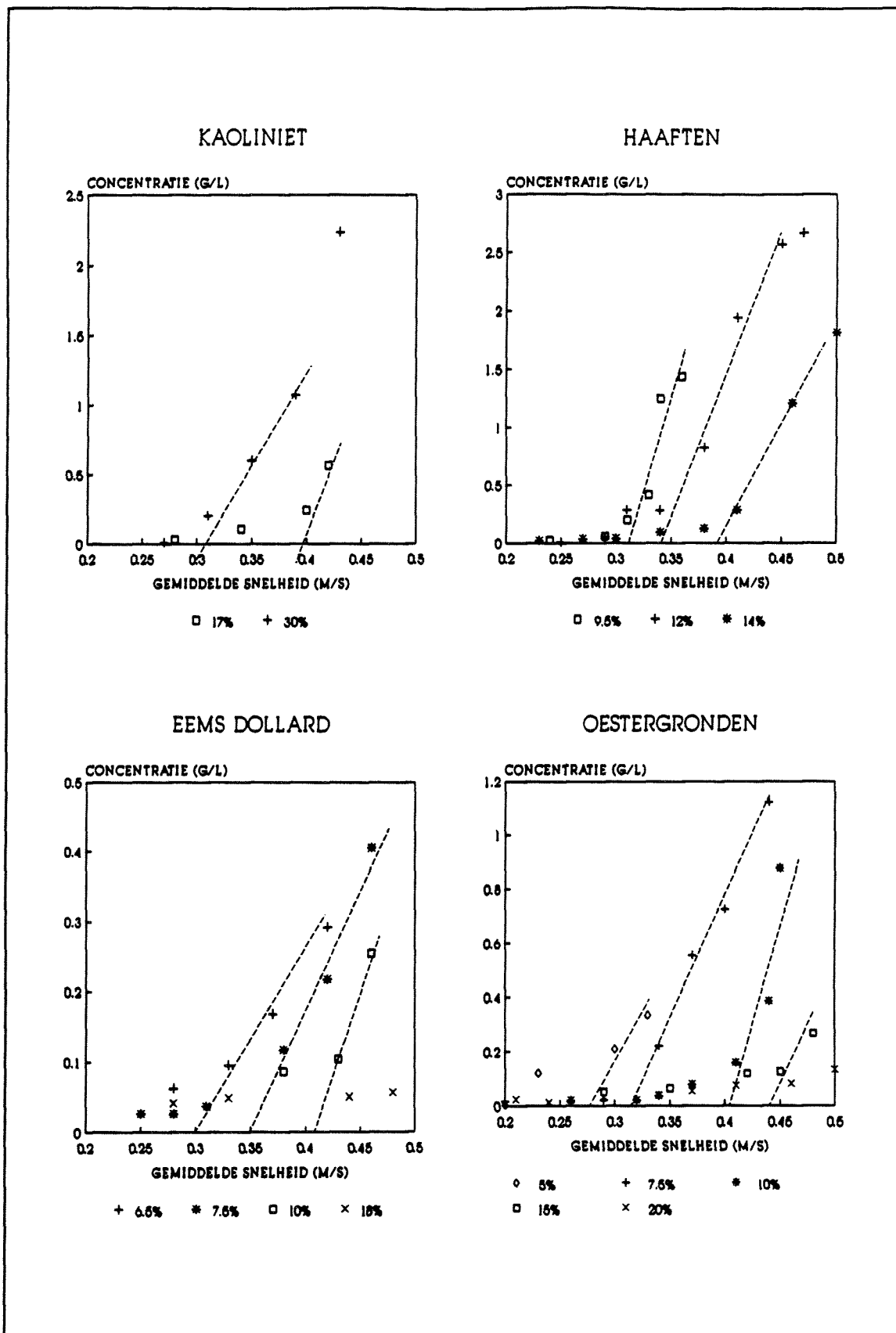
Het effect van het slib is duidelijk zichtbaar. In vrijwel alle gevallen levert een hoger percentage slib een gereduceerde concentratie. Alleen het kaolinetbed vormt een uitzondering.

Na 60 min zijn de berekende concentraties niet altijd kleiner dan de gemeten concentraties van het zuivere zandbed. Hier moet wel bij vermeld worden dat de concentraties van de zand-slibmengsels pas na 60 min stromen verkregen zijn terwijl de concentraties van het zandbed al direct aanwezig zijn. Door de aanwezigheid van het slib zou de concentratie van de zand-slibmengsels enigszins groter kunnen zijn dan die van het zuivere zandbed. Het feit dat ze echter in sommige gevallen beduidend groter zijn is op zich niet te verklaren. Hoogstwaarschijnlijk ligt de oorzaak in de opstelling zelf met de bijbehorende beperkingen aan het stroombeeld.

Critische stroomsnelheid

Omdat in de kleine goot de bodemschuifspanning niet direct en eenduidig bepaald kan worden zal niet de kritische bodemschuifspanning maar de kritische stroomsnelheid V_c bepaald worden.

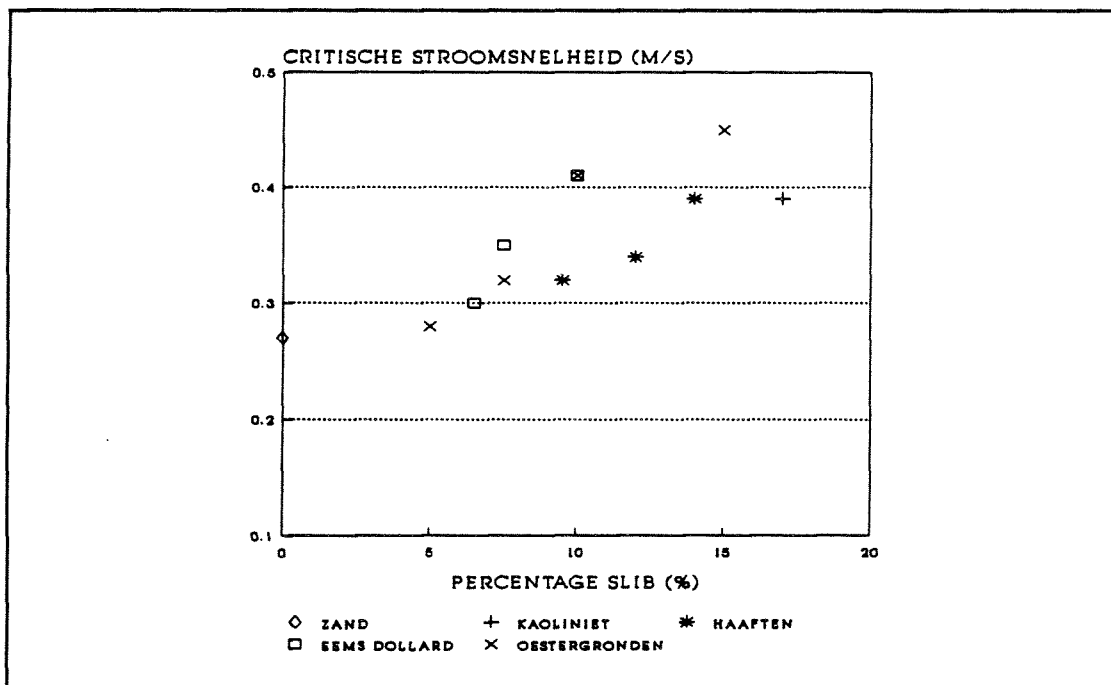
De V_c van een zand-slibmengsel wordt gedefiniëerd als de stroomsnelheid waarbij het gehalte aan sediment in suspensie plotseling sterk toeneemt. De V_c wordt bepaald door in de grafiek waar de referentiewaarde van de concentraties gekoppeld wordt aan de stroomsnelheid, een lijn te trekken door de punten (concentraties) waar de concentratie duidelijk is toegenomen. Door deze lijn te snijden met de x-as (snelheidsas) wordt de kritische stroomsnelheid verkregen. In figuur 3.18 is dit voor de verschillende slibsoorten uitgevoerd. In dit geval is gebruik gemaakt van de referentiewaarde voor alleen het slibaandeel in de totale concentratie. De resultaten staan in tabel 3.9 en in figuur 3.19. In tabel 3.9 is tevens de bodemschuifspanning, berekend door middel van het verhang (zie ook tabel 3.8) en door middel van het snelheidsprofiel (zie ook tabel 3.7) toegevoegd.



Figuur 3.18 Bepaling kritische stroomsnelheid voor verschillende percentages en verschillende soorten slib

Tabel 3.9 Critische stroomsnelheid voor verschillende soorten en percentages slib.

	slib perc. (%)	critische stroomsnelheid (m/s)	τ_c (verhang) (N/m ²)	τ_c (snelh. profiel) (N/m ²)
zand	0	0.27	0.5	0.40
kaoliniet	17	0.39	1.4	0.84
	30	0.30	0.7	0.50
Haaftens slib	9.5	0.32	0.8	0.57
	12	0.34	1.0	0.64
	14	0.39	1.4	0.84
Eems Dollard slib	6.5	0.30	0.7	0.50
	7.5	0.35	1.1	0.68
	10	0.41	1.6	0.93
	18	> 0.48		> 1.28
Oestergrond slib	5	0.28	0.6	0.43
	7.5	0.32	0.8	0.57
	10	0.41	1.6	0.93
	15	0.45		1.12
	20	> 0.50		> 1.38



Figuur 3.19 Critische stroomsnelheid als functie van het percentage slib voor verschillende soorten slib

3.7.2 Stroomgoot B

Snelheid

Tijdens de transportproeven zijn een aantal snelheidsprofielen gemeten. Hierbij zijn de snelheden gemeten over de eerste 10 à 15 cm vanaf het bed in het midden van de goot op 4 m vanaf het begin van het bed.

Door aan te nemen dat het snelheidsprofiel een logaritmisch verloop heeft volgens formule (3.3) kan met behulp van de metingen de bodemschuifspanning en de bodemruwheid berekend worden.

$$v(z) = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \ln\left(\frac{z}{r/33}\right) \quad (3.3)$$

waarin	$v(z)$: snelheid op hoogte z boven het bed
	τ	: bodemschuifspanning
	ρ	: dichtheid
	κ	: constante van von Karman (0.4)
	r	: bodemruwheid

In het geval van een zuiver zandbed ontstaan al bij lage snelheden ribbels waardoor de bodemruwheid en dus de bodemschuifspanning sterk toeneemt. Als er echter slib in het bed aanwezig is ontstaan zelfs bij hoge snelheden geen ribbels. In dat geval blijft de bodemruwheid constant. Uit een analyse van de gemeten snelheidsprofielen bleek dat de bodemruwheid inderdaad nagenoeg constant blijft voor toenemende stroomsnelheid (0.37 tot 1.30 m/s). De op deze wijze verkregen gemiddelde bodemruwheid is $\approx 330 \mu\text{m}$.

Wanneer aangenomen wordt dat deze ruwheid in alle proeven aanwezig is kan de bodemschuifspanning door middel van een enkele gemeten snelheid berekend worden.

In verdere proeven is telkens de snelheid op een hoogte van 10 cm boven het bed gemeten. De bodemschuifspanning kan dan door middel van vergelijking 3.3 als volgt berekend worden:

$$\tau = 1.886 [v(10)]^2 \quad (3.4)$$

waarin:	$v(10)$: snelheid op 10 cm vanaf de bodem (m/s)
	τ	: bodemschuifspanning (N/m ²)

Concentratie

Als referentie voor de proeven met de zand-slibcombinaties is een transportproef

uitgevoerd met zuiver zand. De resultaten van de gemeten concentraties van deze proef zijn gegeven in Bijlage C.

In tabel 3.10 worden de door middel van de gemeten concentratie- en snelheidsprofielen berekende transporten gegeven.

Tabel 3.10 Transport zuiver zandbed

V (m/s)	water- hoogte (m)	transport (kg/ms)				
		afstand vanaf begin bed (m)				
		2	3	4	5	6
0.28	0.20	.0017	.0017	.0021	.0020	.0023
0.32	0.21	.0032	.0058	.0037	.0044	.0049
0.34	0.24	.0023	.0045	.0080	.0059	.0064

Vergeleken met transporten berekend met de transportformules van Bijker [1971] of Van Rijn [1984] (tabel 3.11) blijken de gevonden transporten realistische waarden te zijn.

Tabel 3.11 Transporten berekend met formule van Bijker [1971] en Van Rijn [1984]

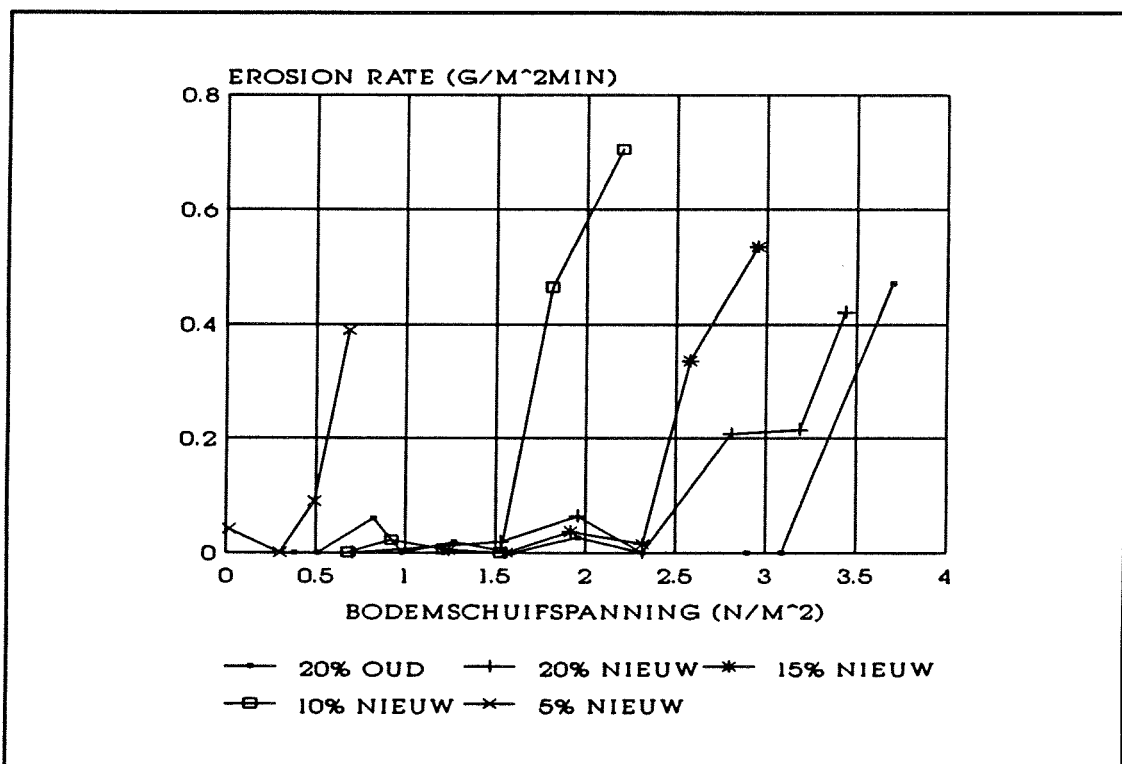
stroom- snelheid (m/s)	Bijker		Van Rijn
	bodemruwheid (m)	transport (kg/ms)	transport (kg/ms)
0.28	0.01	.0025	.0010
0.32	0.02	.0069	.0043
0.33	0.02	.0084	.0077

De resultaten van de gemeten concentraties van de verschillende zand-slibmengsels zijn eveneens gegeven in Bijlage C. In de daar gegeven tabellen worden telkens de gemiddelde slibconcentratie en de gemiddelde zandconcentratie aan het begin van het bed gegeven, alsmede de gemiddelde slibconcentratie en de afzonderlijke zandconcentraties aan het eind van het bed.

De erosie van het bed kan op twee manieren bekeken worden. Evenals bij een zandbed kan de toename van de concentratie over het bed bekeken worden. In dat geval worden de op één tijdstip gemeten concentraties aan het begin en aan het eind van het bed met elkaar vergeleken. Uit de metingen blijkt echter dat de zandconcentraties zowel aan het begin als aan het eind van het bed erg laag zijn en de slibconcentratie tussen beide punten niet of nauwelijks toeneemt. Het is dus niet zinvol om op deze manier de erosie te bepalen.

Een tweede manier om de erosie te bekijken is de toename van de concentratie in de tijd te analyseren. In dat geval moet alleen de slibconcentratie gebruikt worden. Het merendeel van het geërodeerde zand bezinkt immers in de retourbak. Evenals in stroomgoot A worden hier zowel lineair toenemende concentraties als exponentieel verlopende concentraties in de tijd gevonden. Omdat in dit geval de exponentieel verlopende concentraties veel minder uitgesproken zijn dan de lineair verlopende, wordt hier uitgegaan van lineair toenemende concentraties in de tijd.

De resultaten van de toename van de concentratie in de tijd, ofwel de erosiesnelheid, zijn voor verschillende zand-slibmengsels (Oesterslib) en verschillende bodemschuifspanningen weergegeven in figuur 3.20. De hierbij gebruikte bodemschuifspanningen zijn berekend met formule 3.3. Het is duidelijk bij welke bodemschuifspanning de concentratie begint toe te nemen oftewel wat de kritische bodemschuifspanning voor begin van beweging is. De kritische bodemschuifspanning τ_c voor de verschillende zand-slibmengsels is gegeven in tabel 3.12. In deze tabel is eveneens de τ_c van zuiver zand ($D_{50} = 100\mu\text{m}$) gegeven (paragraaf 2.2.3).



Figuur 3.20 Toename van de concentratie in de tijd als functie van de bodemschuifspanning voor mengsels van zand met verschillende percentages Oesterslib (oude en nieuwe lading)

Tabel 3.12 Critische bodemschuifspanning voor verschillende zand-slibmengsels.

Oesterslib percentage (%)	τ_c (N/m ²)
20 (oud)	3.1
20 (nieuw)	2.5
15 (nieuw)	2.3
10 (nieuw)	1.5
5 (nieuw)	0.4
0 (zuiver zand)	0.1

3.8 Conclusies omtrent sedimenttransport van zand-slibmengsels

In twee stroomgoten (goot A en goot B) zijn proeven uitgevoerd ten behoeve van de transport/erosie-eigenschappen van zand-slibmengsels met slibpercentages van 5 tot 20%.

Goot A:

In goot A zijn referentieproeven met zuiver zand uitgevoerd. Daarnaast zijn diverse soorten zand-slibmengsels met verschillende percentages slib beproefd. Zowel zoetwater slib (kaolinet en Haaftens slib) als zoutwater slib (slib afkomstig van de Eems Dollard en van de Oestergronden op de Noordzee) is hiervoor gebruikt.

In deze proeven is het helaas niet goed mogelijk om de bodemschuifspanning te bepalen aangezien:

- het welliswaar mogelijk is om snelheden te meten, echter niet dicht genoeg bij het bed om een zodanig snelheidsprofiel te meten dat de bodemschuifspanning hiermee bepaald kan worden;
- de betrouwbaarheid van de meting van het verhang en de omrekening naar de bodemschuifspanning te wensen overlaten.

De proeven in goot A geven duidelijk aan dat de aanwezigheid van slib in zand invloed heeft op het erosiegedrag van zand. Al bij zeer lage percentages slib (5%) gedraagt het zand-slibmengsel zich op dezelfde manier als zuiver slib; er is geen sprake meer van een constant transport maar veeleer van een constante (soms ook verlopende) erosie in de tijd.

Zowel voor zoetwater slib als voor zoutwater slib geldt dat een hoger percentage slib een grotere reductie op de erosie geeft, terwijl de kritische stroomsnelheid voor begin van erosie toeneemt.

Naast het feit dat het niet goed mogelijk is om de bodemschuifspanning te bepalen kunnen door de beperkingen van deze goot, zoals het onnatuurlijke stroombeeld en de kleine inhoud van het gehele systeem, geen concretere conclusies getrokken worden.

Goot B heeft een ruimere opzet dan goot A. Hierdoor wordt een natuurlijker stroombeeld verkregen en kunnen concrete waarden voor de kritische bodemschuifspanning bepaald worden. Het nadeel van goot B naast goot A is dat meer bodemmateriaal nodig is waardoor minder makkelijk verschillende soorten en percentages slib getest kunnen worden.

In goot B zijn naast referentieproeven met zuiver zand alleen proeven uitgevoerd met natuurlijk zoutwater slib afkomstig van de Oestergronden op de Noordzee. Het slibpercentage is gevarieerd van 5 tot 20%.

Deze proeven geven hetzelfde beeld als de proeven in goot A:

- de aanwezigheid van slib geeft het zand het karakter van een slibbed,
- de erosie wordt gereduceerd bij een hoger percentage slib,
- de kritische stroomsnelheid neemt toe bij een hoger percentage slib.

In goot B is het mogelijk om een zodanige snelheidsprofiel te meten dat de bodemschuifspanning (τ) hiermee bepaald kan worden. In tabel 3.12 is de kritische bodemschuifspanning (τ_c) gegeven als functie van het percentage slib. De invloed van het slib op de kritische bodemschuifspanning is al merkbaar bij 5% slib. Een hoger percentage slib geeft een aanzienlijke toename van de τ_c ; 20% slib geeft een $\tau_c = 3.1 \text{ N/m}^2$ terwijl voor zuiver zand geldt $\tau_c \approx 0.1 \text{ N/m}^2$.

4. Zelfingravingsproces van pijpleidingen op zee

4.1 Algemeen

Erosie rond constructies op een zandige bodem is een bekend en te verwachten fenomeen. Echter het verschijnsel dat pijpleidingen, die op een zandige (niet-cohesieve) bodem zijn geplaatst, zichzelf onder bepaalde omstandigheden geheel in kunnen graven is pas enkele jaren bekend.

Terwijl over het algemeen de erosie rond constructies als een onprettig fenomeen gezien wordt, wordt het zelfingraven van pijpleidingen vaak als gewenst ervaren. In gebieden met drukke scheepvaartroutes of visserijactiviteiten kan het verplicht zijn dat pijpen in de zeebodem begraven zijn (met een zekere minimale dekking). Dit ter voorkoming van calamiteiten met enerzijds de pijpleiding en anderzijds vissersvaartuigen. Het gedwongen ingraven van pijpleidingen (door middel van het vooraf graven van geulen die later afgedekt worden) is echter een kostbare aangelegenheid. Het zelfingraven van pijpen is daardoor sterk kostenbesparend.

Pijpleidingen die oorspronkelijk op een vlakke (niet-cohesieve) zandgrond gelegd zijn kunnen na verloop van tijd volledig in de grond verdwenen zijn. Dit is het gevolg van een sterke ontgroning rond de pijpleiding die nadat de pijp voldoende gezakt is weer opgevuld wordt met materiaal. De ontgrondingskuilen kunnen een diepte bereiken van 1 tot 3 maal de pijpdiameter. De ontwikkeling van de ontgrondingskuil is afhankelijk van de hydraulische omstandigheden (stroom, golven, getij of een combinatie hiervan). De voornaamste oorzaken van de ontgrondingen zijn de toegenomen turbulentie rond de pijpleiding en een toegenomen stroomsnelheid onder de pijpleiding (wanneer daar een open ruimte aanwezig is). Beide factoren veroorzaken een plaatselijke verhoogde sedimenttransportcapaciteit en daarmee een plaatselijke erosie.

4.2 Zelfingravingsproces in niet-cohesief materiaal

Het zelfingraven van pijpleidingen op een niet-cohesieve zandige zeebodem kan verdeeld worden in verschillende onderdelen:

- uitschuring rond de pijpleiding,
- de zakking van de pijpleiding,
- het opvullen van de ontgrondingskuil.

De onderdelen uitschuring en zakking vinden over het algemeen tegelijkertijd plaats en beïnvloeden elkaar als volgt:

- de zakking van de pijp is afhankelijk van de grootte van de ontgrondingskuil in de lengterichting van de pijp (Mao [1986], Leeuwestein [1985]);

- het zakken van de pijp versterkt de erosie onder de pijp door de kleinere doorstroomopening onder de pijp (Mao [1986], Waterloopkundig Laboratorium [1982a] [1982b]).

In de fase dat de pijp over grotere afstand vrij van de bodem hangt bestaat de kans dat de pijp gaat vibreren (Mao [1986]). Ook dit heeft een grotere uitschuring tot gevolg (Sumer et al [1988], Mao [1986][1987]). In deze situatie is echter de stabiliteit van de pijp zelf kritischer (Fredsoe et al [1985], Sumer et al [1988], Mao [1986] [1987]).

Wanneer de pijp, nadat hij in de ontgrondingskuil gezakt is, de bodem raakt en de sedimentatie rond de pijp de erosie gaat overtreffen, zal de pijp ingegraven worden. Afhankelijk van hoe ver de pijp gezakt is zal deze uiteindelijk geheel of gedeeltelijk in de bodem verdwijnen.

Terwijl voor het zelfingraven van pijpleidingen de zakking van de pijp en het opvullen van de kuil essentieel zijn, is de uitschuring rond de pijp bepalend voor de mate van een eventuele ingraving.

4.3 Uitschuring rond pijpleidingen op een niet-cohesieve bodem

4.3.1 Begin van uitschuring rond pijpleidingen

Wanneer een pijp op een vlakke erodeerbare bodem geplaatst wordt in een gebied waar een zodanige stroming aanwezig is dat bodemmateriaal verplaatst kan worden, zal er erosie plaatsvinden rond de pijp. In dit stadium is de erosie onder te verdelen in loeferosie en lijerosie. Een invloedsfactor op de lijerosie is de drukgradiënt in het bed.

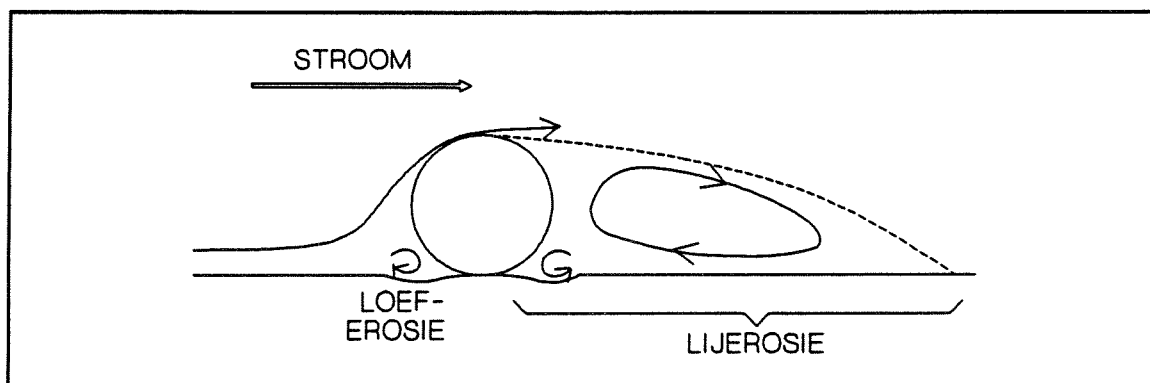
Loef- lijerosie

Zolang de pijp contact maakt met de bodem zal aan de bovenstroomse en aan de benedenstroomse zijde een wervel ontstaan. Deze wervel zorgt zowel boven- als benedenstrooms van de pijp voor erosie (loeferosie respectievelijk lijerosie) (figuur 4.1).

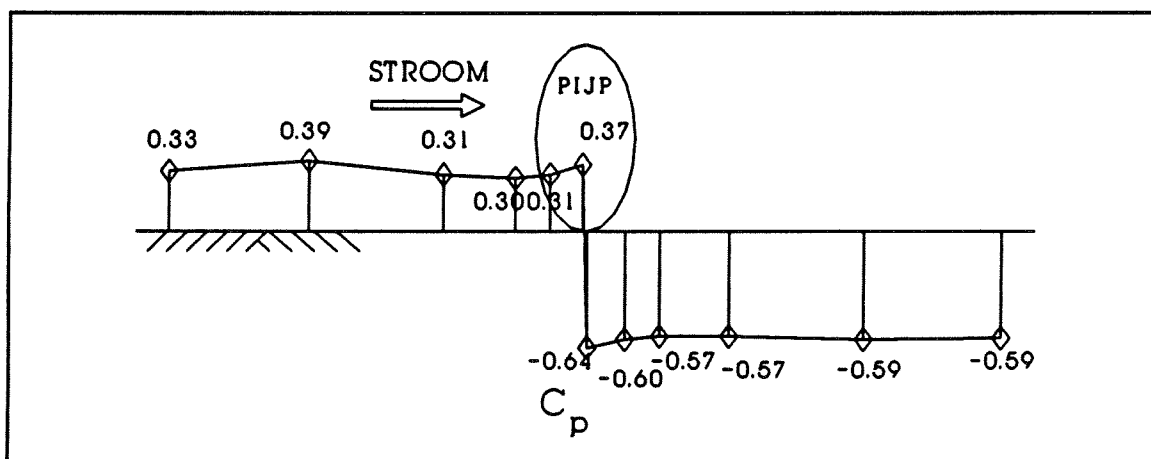
Drukgradiënt

Het drukverschil in de bodem, de drukgradiënt, veroorzaakt op zich geen erosie maar kan het eroderen wel vergemakkelijken. Wanneer de pijp op de bodem rust zal de druk in de bodem ter plaatse van de pijp plotseling van positief naar negatief

veranderen met een maximale negatieve druk direct onder de pijp (figuur 4.2, Bearman en Zdravkovich [1978]).



Figuur 4,1 Loef- en lijerosie in het geval van een pijp in contact met de bodem



Figuur 4,2 Druk-coëfficiënt langs een vlakke plaat met daarop een pijp (Bearman en Zdravkovich [1978]).

De drukvariaties zijn als volgt afhankelijk van de druk-coëfficiënt C_p :

$$P - P_{\infty} = \frac{1}{2} \rho C_p V^2 \quad (4.1)$$

- waarin
- P : druk op scheidingsvlak bodem - water
 - P_{∞} : druk in ongestoorde toestand (stroomopwaarts) op scheidingsvlak bodem - water
 - ρ : dichtheid water
 - C_p : druk-coëfficiënt
 - V : snelheid in ongestoorde toestand

In een bodem van loskorrelig materiaal hebben drukvariaties een grondwaterstroming tot gevolg. De drukvariaties, veroorzaakt door de aanwezigheid van de pijp, zijn echter niet groot genoeg om daadwerkelijk materiaal uit het bed te eroderen (Mao [1986]). De grondwaterstroming onder de pijp door zal wel de stabiliteit van de zandkorrels benedenstreams van de pijp verminderen. Hierdoor kunnen ze gemakkelijker geërodeerd worden door eventuele turbulenties in de stroming.

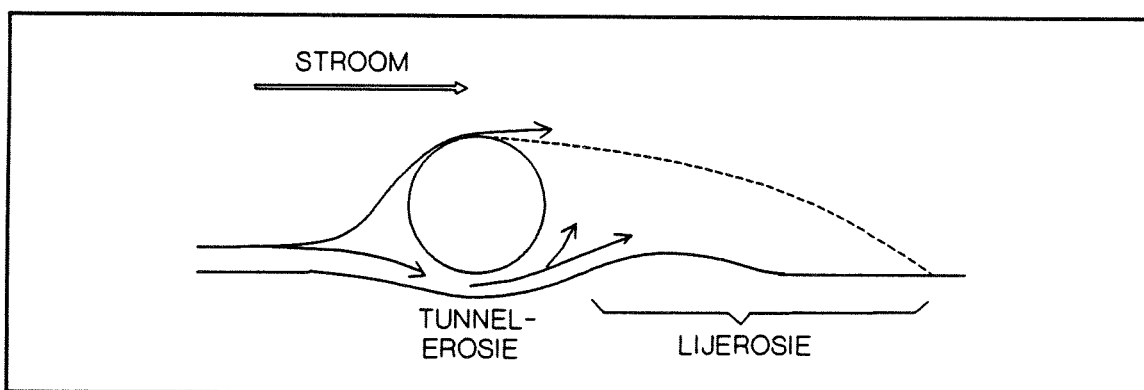
4.3.2 Uitschuring rond pijpleidingen

Op het moment dat er een opening onder de pijp ontstaat of, als gevolg van onregelmatigheden in het bed er al een opening aanwezig is, zal er een snelle progressieve erosie onder en achter de pijp plaatsvinden. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in tunnelerosie en lijerosie. Voorts kan ook hier de drukgradiënt in het bed een rol spelen in het erosieproces.

Tunnelerosie.

Onder de pijp wordt materiaal geërodeerd als gevolg van de verhoogde stroomsnelheid onder de pijp (figuur 4.3, tunnelerosie). Deze verhoogde stroomsnelheid veroorzaakt een verhoogde transportcapaciteit wat een ontgroning oplevert. Pas wanneer de transportcapaciteit onder de pijp gelijk is aan die bovenstreams van de pijp in ongestoorde situatie zal een evenwicht bereikt zijn en geen verdere uitschuring onder de pijp plaatsvinden (Bijker [1976]).

Tunnelerosie zorgt in een relatief korte tijd voor een smalle ontgrondingskuil (enkele pijpdiameters breed) met relatief steile wanden (1:2).



Figuur 4,3 Tunnel- en lijerosie in het geval van een vrij hangende pijp.

Lijerosie

Benedenstrooms van de pijp wordt de erosie aangeduid met lijerosie (figuur 4.3). Lijerosie is in vergelijking met de tunnelerosie een veel langzamer verlopend proces dat zorgt voor een verbreding van de ontgrondingskuil.

Lijerosie kan veroorzaakt worden door:

- turbulenties in het zog achter de pijp,
- de stroming die over de pijp heentrekt en de bodem weer raakt.

- Het zog achter de pijp.

Op de plaats waar het zog de bodem raakt zal een verhoogde turbulentie ofwel een verhoogde variatie van de snelheid aanwezig zijn. Sumer et al [1988] vonden in modelproeven bij een vlak bed een piek in de root-mean-square snelheden ($=\sqrt{(v'_{\text{gem}})^2}$) vlak boven de bodem op een afstand $x/\phi \sim 1.2$ à 2.5 vanaf het hart van de pijp. Jensen et al [1988] vonden eveneens in modelproeven bij een eroderend bed eenzelfde piek op een afstand $x/\phi \sim 2$ à 4 .

Bij een voldoende opening onder de pijp (opening/ $\phi > 0.3$, Bearman en Zdravkovich [1978], opening/ $\phi > 0.05$, Jensen [1987]) zal er aan de onderkant van de pijp vortex-shedding plaatsvinden. Dit heeft een grotere turbulentie in de rand van het zog tot gevolg.

- De stroming die over de pijp heentrekt.

Daar waar de doorgaande stroom die over de pijp trekt de bodem weer raakt vindt eveneens erosie plaats. Deze erosie verloopt veel trager dan de tunnelerosie en de lijerosie direct achter de pijp.

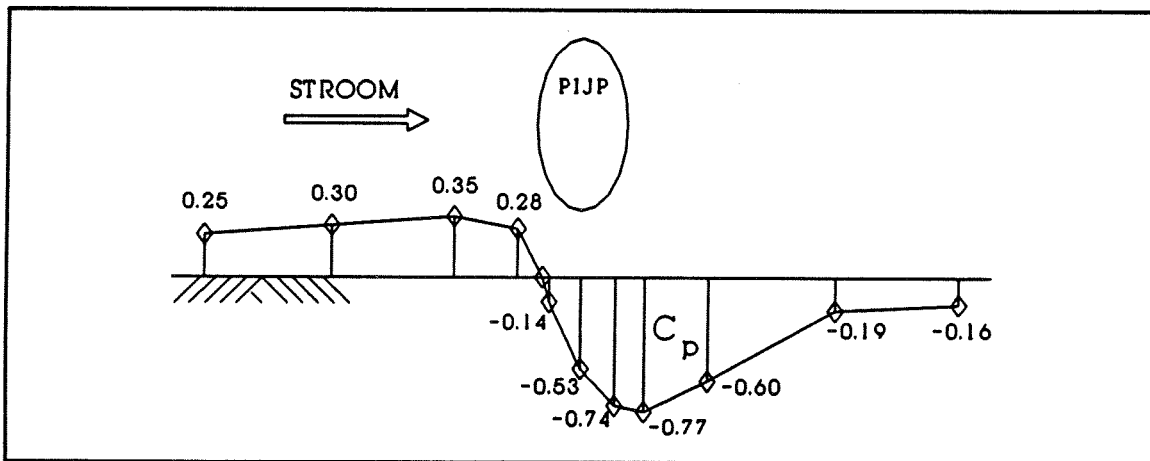
Het is vooral dit laatste fenomeen dat verantwoordelijk is voor de brede ontgrondingskuilen met de flauwe zijwanden (1:16 à 1:20) die in het prototype gevonden worden (Waterloopkundig Laboratorium [1982], Hulsbergen [1984]).

Drukgradiënt

Drukvariaties in het bed kunnen een rol spelen bij de erosie benedenstrooms van de pijp. De drukvariaties veroorzaken weliswaar geen directe erosie maar verminderen de stabiliteit van de zandkorrels in het bed.

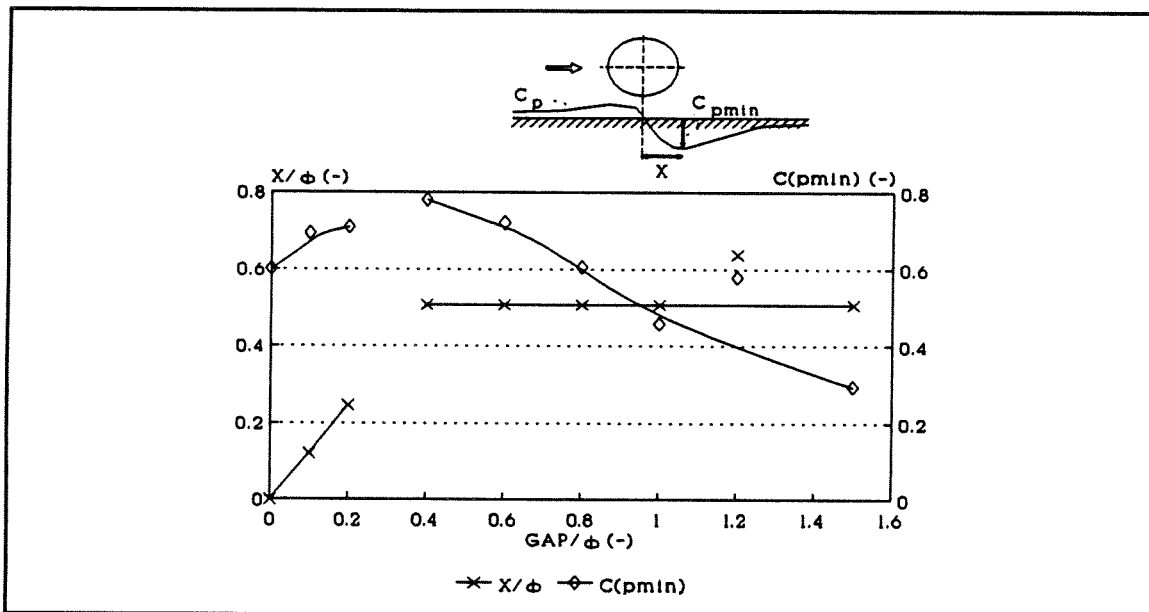
Een pijp net boven een vlakke plaat veroorzaakt een plotselinge daling van de drukcoëfficiënt juist benedenstrooms van het hart van de pijp (figuur 4.4 Bearman en Zdravkovich [1978]).

Wanneer de afstand tussen de pijp en de plaat groter wordt zal de maximale negatieve waarde van de druk-coëfficiënt (piekwaarde) naar achteren (benedenstrooms) schuiven, terwijl de piekwaarde zelf groter wordt. Bij een relatieve spleethoogte van



Figuur 4.4 Druk-coëfficiënt langs een vlakke plaat met een pijp op korte afstand van de plaat (Bearman en Zdravkovich [1978])

opening/ $\phi \sim 0.4$ is de piekwaarde maximaal en ligt op een afstand $0.5 \cdot \phi$ benedenstrooms van het hart van de pijp. Bij een nog grotere opening blijft de piek op dezelfde plaats liggen terwijl de absolute waarde ervan weer afneemt (figuur 4.5).



Figuur 4.5 Maximale negatieve druk-coëfficiënt op een vlakke plaat als functie van de afstand tussen een pijp en die vlakke plaat (Bearman en Zdravkovich [1978]).

4.3.3 Berekening uitschuring rond pijpleidingen

Nog voordat de mogelijkheid van het ingraven van pijpleidingen ontdekt was, ontwikkelde Kjeldsen [1974] een empirische formule voor de uiteindelijke diepte van

ontgrondingskuilen onder een gefixeerde pijp in een stroming.

$$\frac{y}{\phi} = 0.972 \left[\frac{V^2}{2g\phi} \right]^{0.20} \quad (4.2)$$

waarin y : ontgrondingskuildiepte
 ϕ : pijpdiameter
 V : stroomsnelheid

Deze formule is bepaald voor:

$$\begin{aligned} 9.84 \cdot 10^3 < Re < 2.05 \cdot 10^5 \\ 0.113 < Fr < 0.678 \\ 0.15 < \theta < 0.50 \end{aligned}$$

waarin Re : Reynolds getal

$$Re = \frac{V\phi}{\nu} \quad (4.3)$$

Fr : Froude getal

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g\phi}} \quad (4.4)$$

θ : Shields parameter voor de ongestoorde situatie (zonder pijp)

$$\theta = \frac{\tau}{\rho g(s-1)D_{50}} \quad (4.5)$$

ν : kin. viscositeit
 τ : bodemschuifspanning
 ρ : dichtheid van water
 g : versnelling van de zwaartekracht
 s : relatieve dichtheid van sediment
 D_{50} : karakteristieke korreldiameter

Aan de hand van een breed assortiment aan gegevens van modelproeven pasten Leeuwestein et al [1985] de formule van Kjeldsen aan door de invloed van de korreldiameter in acht te nemen:

$$\frac{y}{\phi} = 0.972 \left[\frac{V^2}{2g\phi} \right]^{0.26} \left[\frac{\phi}{D_{50}} \right]^{0.04} \quad (4.6)$$

Deze formule is bepaald voor:

$$\begin{aligned} 3 \cdot 10^3 < Re < 4.5 \cdot 10^5 \\ 0.1 < Fr < 0.8 \\ 100 \mu\text{m} < D_{50} < 700 \mu\text{m} \end{aligned}$$

waarin D_{50} : karakteristieke korreldiameter

In Denemarken is een mathematisch model ontwikkeld waarmee de ontwikkeling van de ontgrondingskuil onder een gefixeerde pijp in een stroming berekend kan worden. Hierbij wordt uitgegaan van een potentiaalstroom rond de pijp (Müller [1929]) waarop een 'vortex-body' gesuperponeerd wordt (Fredsoe en Hansen [1984]); de bodenvorm is variabel gemaakt (Mao [1986], Hansen, Fredsoe en Mao [1986]). De resultaten komen goed overeen met de experimentele resultaten van onder andere Kjeldsen [1974].

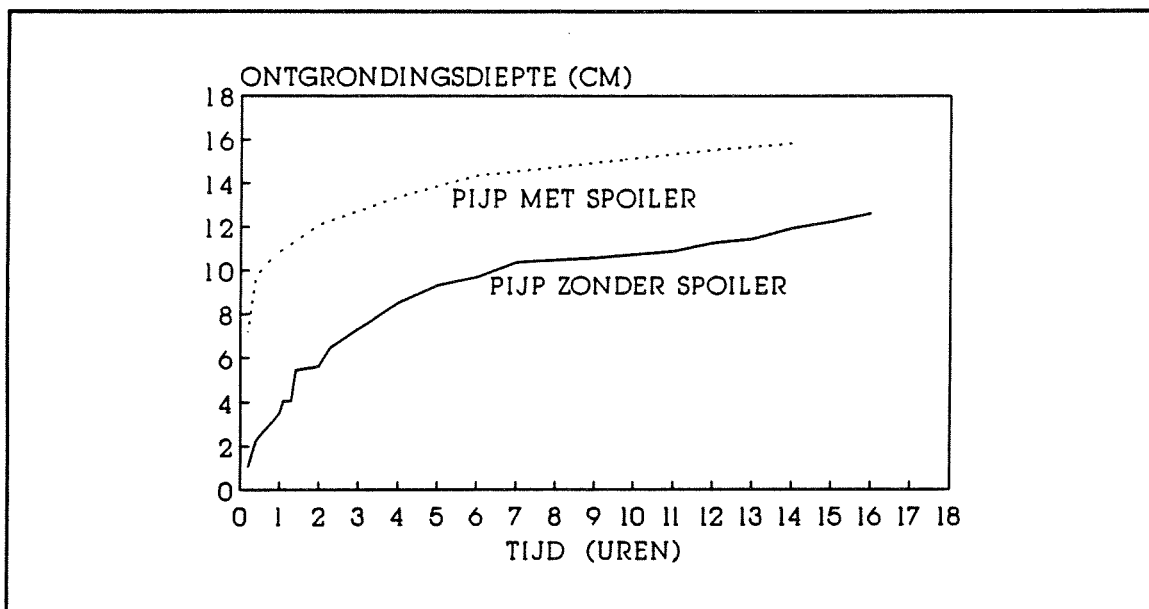
De formule die Kjeldsen ontwikkelde (vergelijking 4.2) wordt tot op heden gezien als een uiterst betrouwbare formule waarmee op eenvoudige wijze de ontgrondingskuil berekend kan worden.

4.4 Effect van een spoiler

Uit onderzoek blijkt dat pijpleidingen onder bepaalde omstandigheden in staat zijn zichzelf in te graven. De mate van ingraving is echter niet altijd even bevredigend. Hulsbergen [1984], [1986] toonde aan dat de aanwezigheid van een spoiler, in de vorm van een loodrecht omhoog gerichte plastic vin, de erosie rond pijpleidingen niet alleen vergroot maar ook versnelt (figuur 4.6). Zowel in modelproeven (Hulsbergen [1984]) als in proeven op prototype schaal (Hulsbergen [1986], Waterloopkundig Laboratorium [1986]) als in prototype proeven (Waterloopkundig Laboratorium [1988], Submarine Pipeline Spoilers B.V. [1990]) blijken de ontgrondingskuilen aanzienlijk vergroot te zijn.

Het oorspronkelijke doel van spoilers op een pijp was de stabiliteit te vergroten. Door de aanwezigheid van de spoiler wordt de plaats van het loslaatpunt van de stroming over de pijp heen gefixeerd. De kans op het fibreren van de pijp wordt hiermee aanzienlijk verminderd.

Wat betreft de ontgrondingen heeft de spoiler het effect dat het aanstroomoppervlak groter is. Hierdoor wordt de stroomsnelheid en daarmee de transportcapaciteit onder en achter de pijp vergroot. Het gevolg hiervan is een sterkere erosie.



Figuur 4.6 Ontwikkeling ontgrondingskuil onder een pijp ($\phi = 0.32$ m) met en zonder spoiler in een doorgaande stroom ($V = 0.37$ m/s) (Waterloorkundig Lab. [1986]).

4.5 Uitschuring rond pijpleidingen op een cohesieve bodem

In principe zou voor pijpleidingen op een bodem van cohesief materiaal hetzelfde ontgrondingsmechanisme moeten gelden als voor pijpleidingen op een niet-cohesieve bodem. Het stroombeeld rond de pijp is immers hetzelfde. Aangezien een cohesieve bodem echter een aanzienlijk hogere kritische bodemschuifspanning voor begin van beweging heeft zal pas bij grotere stroomsnelheden ontgroning plaatsvinden.

Bij inspecties van pijpleidingen gelegen in gebieden met een slibgehalte van meer dan 10% blijkt echter dat er een ingravingsproces plaatsvindt dat geheel anders van aard is dan het ingravingsproces dat is waargenomen in gebieden met alleen zand (niet-cohesief).

Opnamen gemaakt tijdens een survey van één van de leidingen, gelegen op de Oestergronden op de Noordzee (de K7-K8 leiding, 18 inch diameter), een jaar na plaatsing, geven een smalle ontgrondingskuil te zien (ongeveer twee maal de diameter van de pijp) met zeer steile, plaatselijk zelfs negatieve taluds. De bovenkant van de pijpleiding ligt nog op 1/3 pijpdiameter boven het oorspronkelijke vlakbed niveau (Rijkswaterstaat [1985]).

Het meest opvallende verschil met ontgrondingskuilen onder pijpleidingen op niet-cohesieve gronden is de taludhelling. Niet-cohesieve gronden geven zeer flauwe taludhellingen te zien (1:15 à 1:30). De oorzaak van het afwijkende gedrag van de ingraving van de K7-K8 leiding is hoogstwaarschijnlijk het cohesieve karakter van de grond en daarmee de verhoogde erosiebestendigheid.

5. Proeven zelfingraven pijpleidingen

5.1 Inleiding

In het verleden is het ingravingsproces van pijpleidingen op een niet-cohesieve bodem vrij uitvoerig onderzocht. Zowel met empirische vergelijkingen als met rekenmodellen is het mogelijk gebleken om een redelijke voorspelling te maken voor de uitschuringsdiepte. Wanneer er echter slib in het niet-cohesieve materiaal aanwezig is wijkt het ingravingsproces af van het gebruikelijke proces en zijn de voorspellings technieken niet meer toepasbaar.

Het doel van dit deel van het onderzoek is een beter inzicht te krijgen in het erosiemechanisme rond pijpleidingen op een slibrijke bodem. Daarnaast wordt de invloed van een spoiler op de pijp op het erosiegedrag onderzocht.

Om een beter inzicht te krijgen in het erosiegedrag rond pijpleidingen zijn proeven uitgevoerd met modelpijpjes (diameter 3.1 cm en 6.0 cm) en zand-slibmengsels van zand met verschillende slibpercentages. Als referentie is een proef met zuiver zand uitgevoerd. Vervolgens zijn verschillende zand-Oesterslibbedden en één zand-kaoliniet bed uitgetest. Dezelfde zand-slibmengsels zijn eveneens gebruikt voor de transportproeven beschreven in hoofdstuk 3.

In eerste instantie is bij een constante snelheid de ontwikkeling van de ontgrondingskuil in de loop van de tijd bekeken. Daarnaast is bij een toenemende snelheid het moment van begin van erosie onder de pijp onderzocht.

5.2 Experimentele opzet

De proeven zijn uitgevoerd in dezelfde goot als gebruikt is voor het onderzoek naar het sedimenttransport van slibrijk zand (hoofdstuk 3). In die proeven is de desbetreffende goot met stroomgoot B aangeduid (paragraaf 3.2).

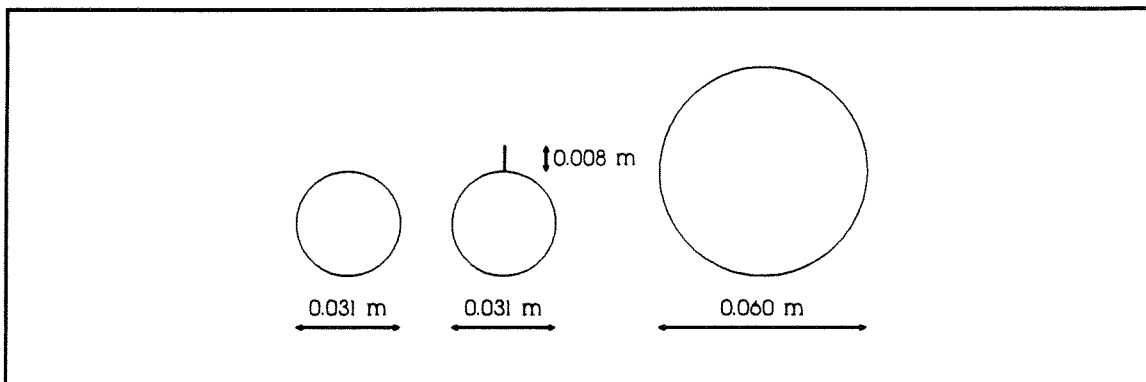
De stroomgoot is in zijn geheel 23 m lang, 0.5 m breed en 0.5 m hoog. In een gedeelte van de goot is de bodem 0.1 m verhoogd. In het overgebleven diepere gedeelte is het bodemmateriaal geplaatst. Hierdoor ontstaat een sedimentbed met een lengte van 7 m, een breedte van 0.5 m en een dikte van 0.1 m.

Tijdens de proeven is het gedeelte van de goot waar zich het sedimentbed bevindt versmald tot 0.25 m voor het verkrijgen van hogere snelheden. De versmalling is symmetrisch over de breedte aangebracht.

De stroomgoot is voorzien van een retourbak met een doorsnede van $1 \times 1 \text{ m}^2$ en ongeveer dezelfde lengte als de stroomgoot.

De opstelling en de afmetingen van deze stroomgoot staan vermeld in figuur 3.2.

Voor de modelpijp is gebruik gemaakt van drie PVC pijpjes (figuur 5.1), twee met een diameter van 3.1 cm en één met een diameter van 6.0 cm. Op een van de pijpjes met een diameter van 3.1 cm is over de volle lengte een spoiler aangebracht in de vorm van een loodrecht omhoogstekende PVC vin van 0.8 cm.



Figuur 5.1 Dwarsdoorsnede modelpijpjes

De ontwikkeling van ontgrondingskuilen rond de pijpjes is op twee manieren bestudeerd:

- als functie van de tijd; bij een constante stroomsnelheid zijn in de loop van de tijd de bodemprofielen gemeten,
- als functie van de snelheid; de snelheid is met stappen van 0.1 m/s opgevoerd, elke snelheid blijft een vaste periode (15 min) gehandhaafd.

In tabel 5.1 worden de verschillende zand-slibmengsels gegeven alsmede de wijze van testen.

5.3 Instrumentatie

5.3.1 Snelheden

De stroomsnelheden in de goot zijn gemeten met een Electro-Magnetische Snelheidsmeter (EMS) waarbij telkens de tijd-gemiddelde waarden bepaald zijn (30 s).

In principe kan met een electromagnetische snelheidsmeter tot vlak bij de bodem gemeten worden. Om echter te voorkomen dat er onder de EMS erosie plaatsvindt is

niet dicht bij het bed gemeten dan 0.01 m. Om de bodemschuifspanning te kunnen bepalen zijn snelheidsprofielen in de onderste 0.10 m van de waterkolom gemeten.

Tabel 5.1 Samenstelling verschillende geteste zand-slibmengsels.

zand-slib combinatie		pijp diameter cm			waterdiepte m	functie van de tijd	functie van de snelheid
slib-perc. %	afkomst slib	3.1	3.1 + vin	6.0		stroomsnelheid	
0	(zuiver zand)			x	0.28	0.25	
		x			0.34	0.28	
		x		x	0.30	0.32	
30	kaoliniet	x	x	x	0.21	0.40	
		x		x	0.22	0.43	
		x	x	x	0.23	0.48	
20	Oestergronden, Noordzee (eerste lading)	x	x		0.24	0.52	
		x	x		0.26	0.69	
		x	x		0.28	0.88	
		x	x		0.29	1.10	
20	Oestergronden, Noordzee (tweede lading)		x		0.16	0.6	
		x	x		0.18	0.7	
		x	x		0.20	0.8	
		x	x		0.22	0.9	
16	Oestergronden, Noordzee (tweede lading)	x	x		0.30		x
10	Oestergronden, Noordzee (tweede lading)	x	x		0.30		x
5	Oestergronden, Noordzee (tweede lading)	x	x		0.30		x

5.3.2 Bodemprofielen

De bodemprofielen zijn gemeten met behulp van twee PROVO's (PROfielVOLgers).

Een PROVO heeft de eigenschap dat hij een constante afstand bewaart ten opzichte van het bed. Terwijl de PROVO met een constante snelheid over het bed voortgetrok-

ken wordt, wordt de hoogte van de PROVO door middel van een elektrisch signaal vastgelegd.

Tijdens het meten van de bodemprofielen is het modelpijpje uit de goot verwijderd. Loodrecht op de pijp zijn per keer maximaal 6 bodemprofielen gemeten. De profielen zijn verdeeld over de lengte van de pijp en niet dichter dan 5 cm vanaf de zijwanden gemeten. Elk profiel beslaat 1 à 1.5 m rond de pijp.

5.3.3 Saliniteit

De proeven met het zuivere zand en met het zand-kaoliniet mengsel zijn met kraanwater uitgevoerd.

De proeven met het natuurlijke slib afkomstig van de Oestergronden op de Noordzee zijn uitgevoerd met kunstmatig aangemaakt zoutwater. Dit water is verkregen door kraanwater te mengen met een combinatie van zouten in een gelijke verhouding als deze in een natuurlijk zout milieu voorkomen (Mitchell [1976]): 30.7% Na⁺, 3.3% Mg²⁺, 1.7% K⁺, 1.1% Ca²⁺, 53.2% Cl⁻, 10.0% SO₄²⁻.

5.4 Eigenschappen gebruikte bodemmaterialen en granulometrie

De proeven omtrent de erosie rond pijpleidingen zijn met dezelfde bodemsamenstellingen uitgevoerd als de proeven omtrent de transporteigenschappen (Hoofdstuk 3). Telkens wanneer de concentratiemetingen voor de bepaling van de transporteigenschappen uitgevoerd waren zijn vervolgens met hetzelfde bed de modelproeven omtrent de erosie rond pijpleidingen uitgevoerd.

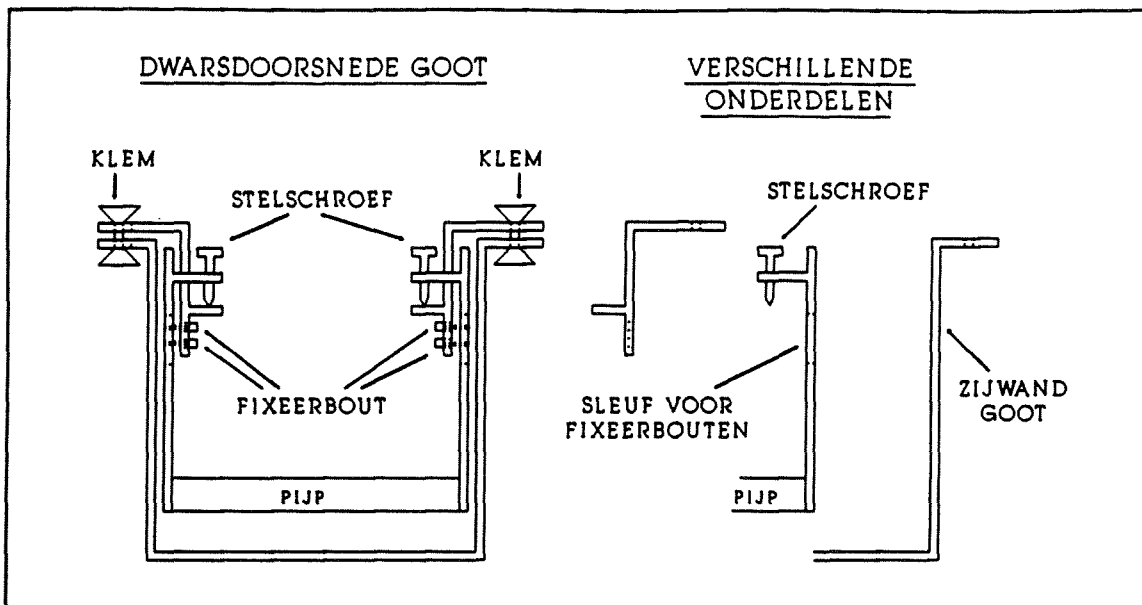
De mineralogische samenstelling van de gebruikte bodemmaterialen en de granulometrie staan respectievelijk beschreven in paragraaf 3.5.1 en paragraaf 3.5.2.

5.5 Eigenschappen gebruikte modelpijpjes

Voor de modelpijpjes zijn twee PVC pijpjes gebruikt met een diameter van 3.1 cm en één PVC pijpje met een diameter van 6.0 cm. Eén van de twee pijpjes met een diameter van 3.1 cm is over de volle lengte voorzien van een loodrecht omhoog stekende PVC vin van 0.8 cm (zie figuur 5.1).

Aan de zijkant van de pijpjes zijn verticale strippen gemonteerd. Bovenaan elke strip

bevinden zich twee fixeerbouten en één stelschroef. Het principe van de stelschroeven en de fixeerbouten is weergegeven in figuur 5.2.



Figuur 5.2 Principe van de ophanging van de modelpijpjes met verstelbare hoogte.

Bij het begin van elke proef is de hoogte van de pijp ingesteld en gefixeerd. Tijdens de bodemprofielmetingen is het noodzakelijk de pijp te verwijderen. Hiervoor hoeven alleen de fixeerbouten verwijderd te worden. De pijp kan door middel van de onveranderde stelschroeven weer op exact dezelfde hoogte teruggehangen worden.

5.6 Meetprocedure

Snelheidsmetingen

In eerste instantie zijn snelheidsprofielen gemeten over de onderste 0.10 m vanaf het bed. Uit de analyse van deze snelheidsprofielen bleek dat de bodemruwheid nagenoeg constant blijft voor toenemende stroomsnelheid (0.37 tot 1.3 m/s). Dit kan verklaard worden door de afwezigheid van ribbels. De op deze wijze berekende gemiddelde bodemruwheid is $\approx 330 \mu\text{m}$.

Wanneer aangenomen wordt dat deze bodemruwheid in alle proeven aanwezig is en bovendien wordt aangenomen dat er telkens een logaritmisch snelheidsprofiel aanwezig is dan kan de bodemschuifspanning direct uit een enkele gemeten snelheid bepaald worden (zie ook paragraaf 3.7.2).

In verdere proeven is telkens 1 m bovenstreams van de modelpijp op een hoogte van 0.10 m boven het bed de snelheid gemeten. De bodemschuifspanning volgt dan uit (vergelijking 3.3 en 3.4, paragraaf 3.7.2):

$$\tau = 1.886 [v(10)]^2 \quad (5.1)$$

waarin $v(10)$: snelheid 0.10 m boven de bodem (m/s)
 τ : bodemschuifspanning (N/m²)

Voorbereiding bodemmateriaal

Voor de voorbereiding van het bodemmateriaal wordt verwezen naar paragraaf 3.6.

Ontgrondingsproeven

Voorafgaand aan elke ontgrondingsproef is het ongestoorde bed gemeten. Dit is vooral bij de zand-slibmengsels noodzakelijk omdat daar niet altijd een volkomen horizontaal, vlak bed aanwezig is.

Vervolgens is de pijp in de goot gehangen en de hoogte ingesteld. Bij het zuivere zandbed maakt de pijp contact met het bed terwijl bij de zand-slib mengsels een initiële opening van enkele millimeters tussen de pijp en het bed aanwezig is.

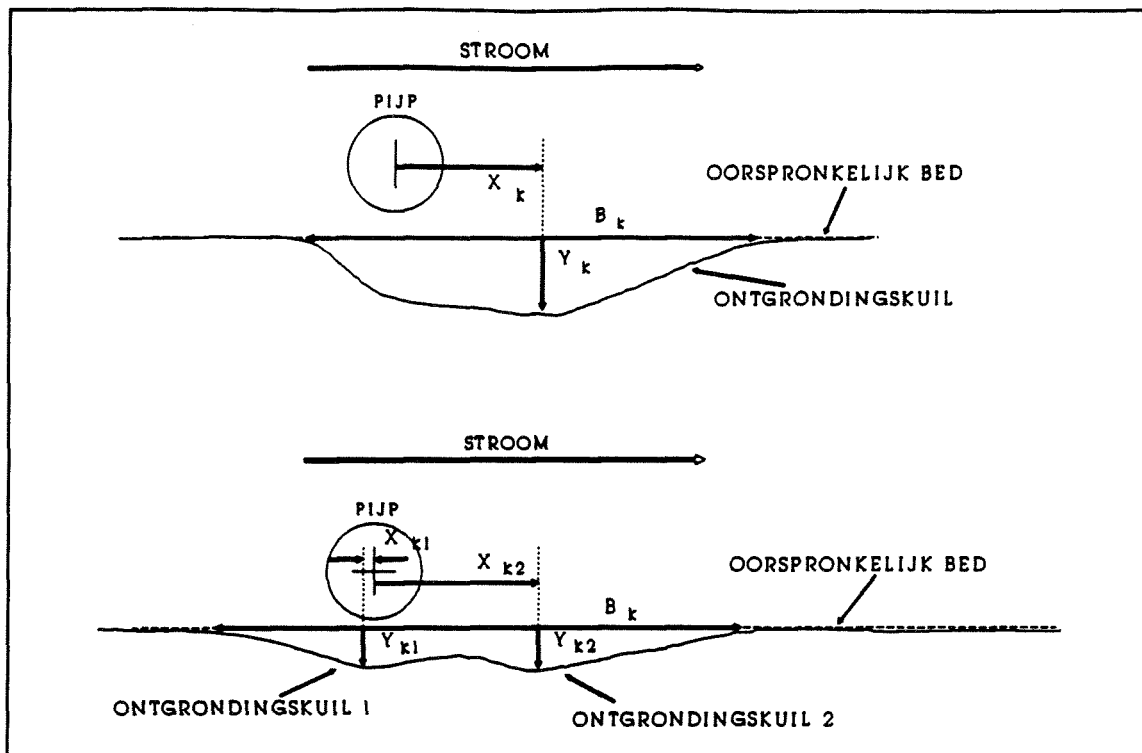
Na enige tijd stromen is de pijp verwijderd en zijn de bodemprofielen (maximaal 6) gemeten. Na het terugplaatsen van de pijp in dezelfde positie is ofwel met eenzelfde snelheid ofwel met een hogere snelheid een volgende periode gestroomd. Deze procedure is herhaald totdat het gewenste resultaat is bereikt.

5.7 Analyse bodemprofielen

Tijdens de ontgrondingsproeven op het zuivere zand zijn per meting 2 bodemprofielen gemeten. Tijdens de ontgrondingsproeven op de zand-slibbedden zijn per keer maximaal 6 bodemprofielen bepaald.

Het gemiddelde van de gemeten bodemprofielen wordt aangenomen als representatief bodemprofiel voor de desbetreffende situatie.

Van het gemiddelde bodemprofiel is het diepste punt van de kuil (Y_v), de plaats van het diepste punt ten opzichte van het hart van de pijp (X_v) en de breedte van de kuil (B_v) bepaald (figuur 5.3).



Figuur 5.3 Definitieschets van de analyse van bodem-profielen.

5.8 Beschrijving resultaten

5.8.1 Resultaten ontgrondingsproeven zuiver zand

De ontgroning rond pijpleidingen op een zuiver zandbed heeft plaats gevonden op de verwachte wijze. In eerste instantie, wanneer de pijp nog contact maakt met het bed, vindt bovenstrooms en benedenstrooms van de pijp erosie plaats door de daar aanwezige wervels (loef- en lijerosie). Zodra er een opening onder de pijp ontstaat vindt een snelle erosie onder de pijp plaats (tunnelerosie). Het zand dat onder de pijp geërodeerd wordt slaat direct achter de pijp neer en vormt een plaatselijke aanzanding. Na verloop van tijd verschuift deze aanzanding naar achteren (benedenstrooms) (tunnel- en lijerosie).

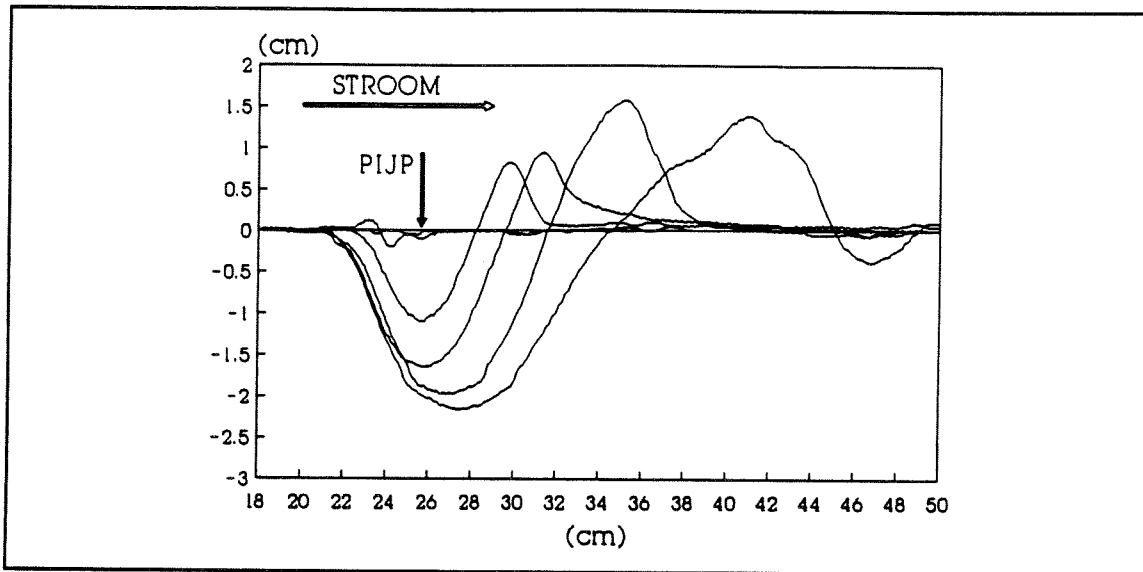
Figuur 5.4 geeft een kenmerkend verloop van de ontwikkeling van zo'n ontgrondingskuil.

- X_k (plaats diepste punt van de kuil ten opzichte van het hart van de pijp)

Het diepste punt van de ontgrondingskuil ligt in eerste instantie vrijwel recht onder het hart van de pijp:

$$X_k \approx 0 \text{ cm}$$

Later trekt dit punt verder naar achteren.



Figuur 5.4 Ontwikkeling ontgrondingskuil onder een pijp op een zuiver zandbed (pijpdiameter 3.1 cm, gemiddelde stroomsnelheid 0.28 m/s, tijd= 0, 15, 25, 55, 115, 240 min)

- Y_k (diepte ontgrondingskuil)

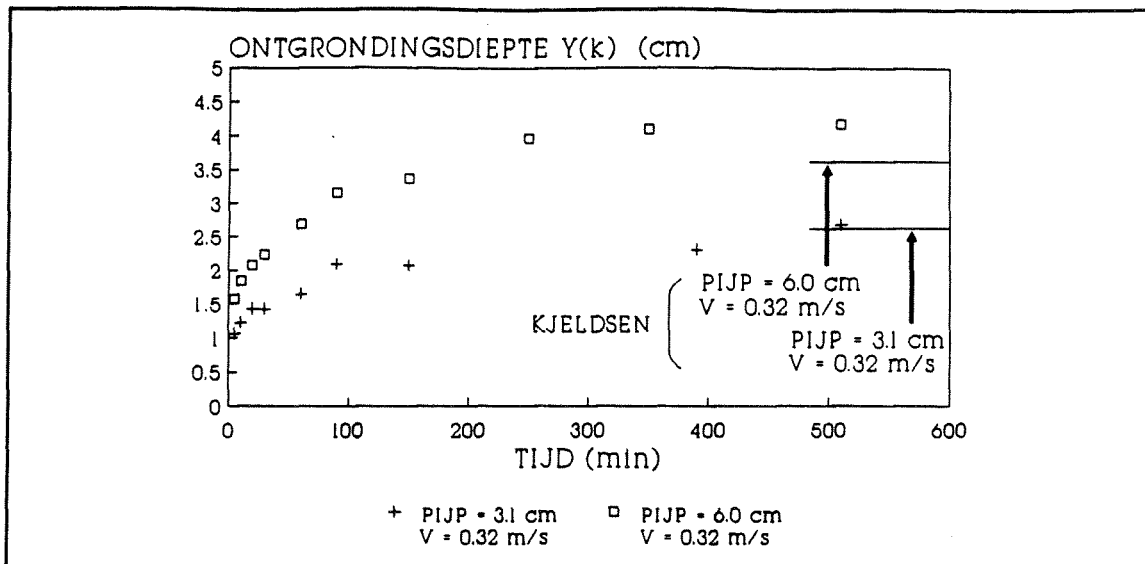
De ontwikkeling van de maximale kuildiepte in de loop van de tijd is gegeven in figuur 5.5. In figuur 5.5 is tevens de evenwichtskuildiepte aangegeven volgens Kjeldsen [1974] (vergelijking 4.2, paragraaf 4.3.3).

- B_k (breedte ontgrondingskuil)

De breedte van de ontgrondingskuil neemt in de loop van de tijd toe.

5.8.2 Resultaten ontgrondingsproeven zand-kaolinietbed

De ontgraving rond een pijpleiding op een zand-kaolinietbed heeft op een andere wijze plaats gevonden dan op een zuiver zandbed. Om enige erosie te verkrijgen zijn zowel hogere stroomsnelheden als een initiële opening onder de pijp gebruikt (pijp hoger boven het bed gehangen).



Figuur 5.5 Ontwikkeling ontgrondingsdiepte in de loop van de tijd op een zuiver zandbed

Onder de pijp ontstaat na verloop van tijd een kuil van enkele millimeters tot een centimeter. Bij vrijwel alle proeven ontstaat enkele centimeters benedenstrooms van de pijp een tweede kuil. Over het algemeen ontwikkelt deze tweede kuil zich verder (dieper) dan de eerste kuil direct onder de pijp (Bijlage D). Er zijn echter ook proeven waar de eerste kuil groter is, of waar de eerste en de tweede kuil in elkaar overgaan (Bijlage D).

In figuur 5.6 is een voorbeeld gegeven van de ontwikkeling van een ontgrondingskuil in een zand-kaolinetbed. Het verschil met de ontwikkeling op het zuivere zandbed is duidelijk:

- de kuildiepte is aanzienlijk kleiner (in de orde van grootte van millimeters),
- er vindt geen aanzanding benedenstrooms van de pijp plaats,
- de ontgroning heeft een W-vormig profiel, ofwel, er ontstaat een tweede ontgrondingskuil enkele cm's benedenstrooms van het hart van de pijp.

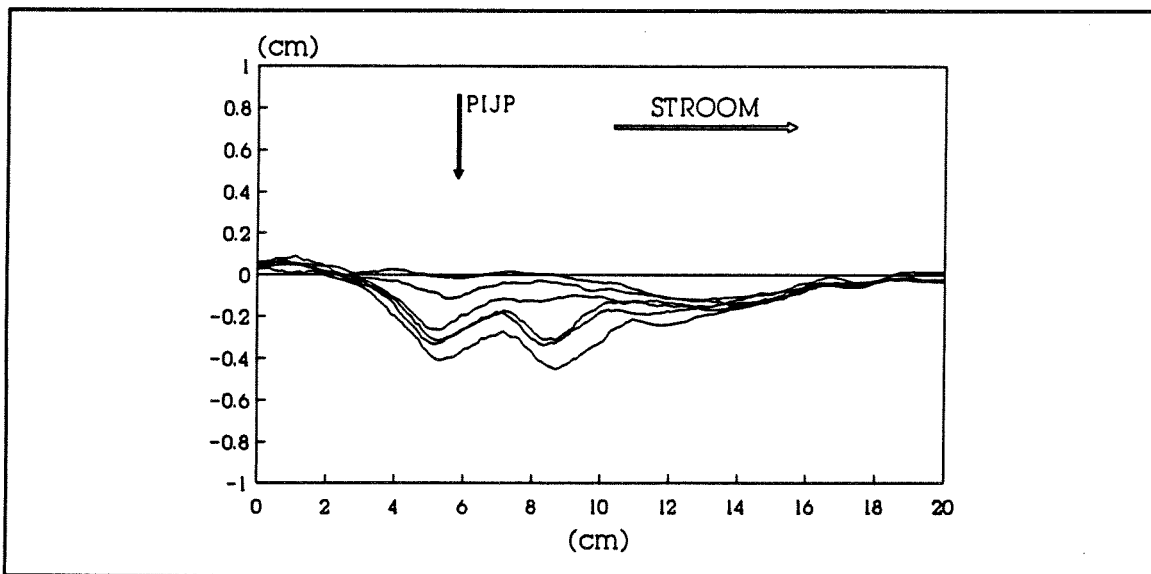
De overeenkomst met de erosie op het zuivere zandbed is dat de erosie 'korrelsgevijs' plaatsvindt.

- X_k

Het diepste punt van de eerste ontgrondingskuil (direct onder de pijp) ligt vrijwel recht onder het hart van de pijp. Een tweede ontgrondingskuil ontstaat ongeveer 3 cm benedenstrooms van de pijp. Voor de geteste omstandigheden is de plaats van deze tweede ontgrondingskuil onafhankelijk van zowel de stroomsnelheid als de diameter van de pijp.

$$X_{k1} \approx 0 \text{ cm}$$

$$X_{k2} \approx 3 \text{ cm}$$



Figuur 5.6 Ontwikkeling ontgrondingskuil onder een pijp op een zand-kaolinietbed (pijpdiameter 3.1 cm, gemiddelde stroomsnelheid 0.40 m/s, zand met 30% kaoliniet, tijd = 0, 15, 60, 120, 240, 360 min)

- Y_k

De ontwikkeling van de diepte van de eerste kuil (direct onder de pijp) in de loop van de tijd is gegeven in figuur 5.7 en 5.8.

In de beide figuren is als referentie de ontwikkeling van de kuildiepte op zuiver zand gegeven.

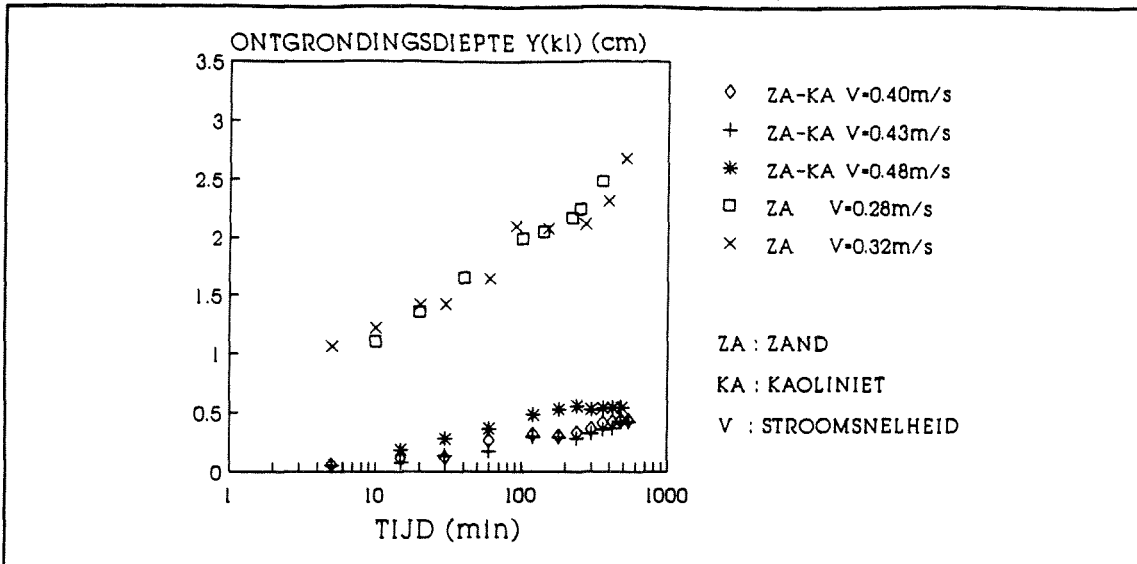
Het verhogen van de stroomsnelheid heeft slechts een kleine invloed op de diepte van de beide ontgrondingskuilen. Uit de proeven (Bijlage D) volgt dat de tweede kuil enigszins meer beïnvloed wordt door een hogere stroomsnelheid dan de eerste kuil.

In tabel 5.2 wordt de diepte van de ontgrondingskuilen na 6 uur stromen gegeven zoals die volgt uit het verloop van de gemeten ontgrondingskuilen alsmede de diepte zoals die in een evenwichtssituatie volgens Kjeldsen [1974] (vergelijking 4.2, paragraaf 4.3.3) zou zijn. De gemeten kuildieptes van de eerste kuil zijn een factor 5 à 10 kleiner dan de verwachte ontgrondingskuilen (volgens Kjeldsen). Hierbij moet vermeld worden dat de evenwichts-situatie op het zand-kaolinietbed na 6 uur stromen nog niet bereikt is.

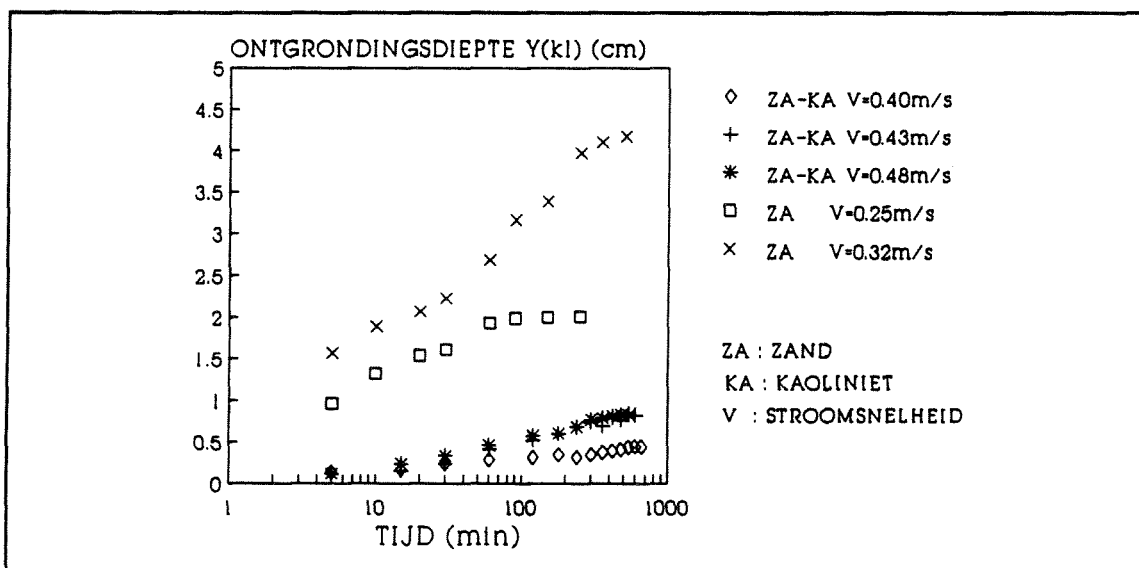
- B_k

De breedte van de ontgrondingskuilen onder de kleine pijp is 10 à 11 cm en varieert nauwelijks voor de verschillende geteste snelheden.

$$B_k \approx 10 \text{ à } 11 \text{ cm} \quad (\phi = 3.1 \text{ cm})$$



Figuur 5.7 Ontwikkeling ontgrondingsdiepte in de loop van de tijd zowel op een zand- als een zand-kaolinetbed (pijpdiameter 3.1 cm)



Figuur 5.8 Ontwikkeling ontgrondingsdiepte in de loop van de tijd op zowel een zand- als een zand-kaolinetbed (pijpdiameter 6.0 cm).

De breedte van de kuilen onder de grote pijp neemt toe voor toenemende stroomsnelheden.

$$B_k \approx 10 \text{ cm} \quad V = 0.40 \text{ m/s} \quad (\phi = 6.0 \text{ cm})$$

$$B_k \approx 15 \text{ cm} \quad V = 0.48 \text{ m/s} \quad (\phi = 6.0 \text{ cm})$$

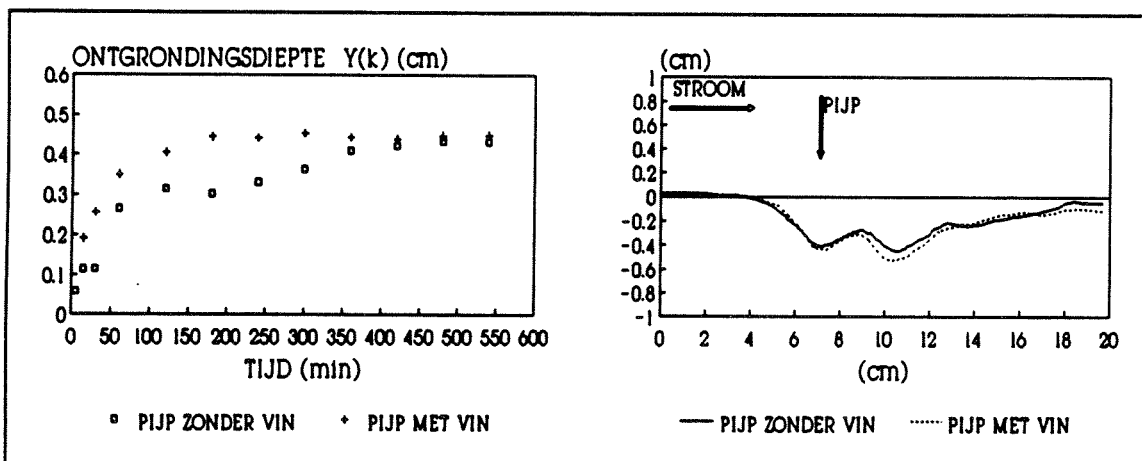
Tabel 5.2 Ontgrondingskuildiepte gemeten na 6 uur stromen (eerste en tweede kuil) en berekend volgens Kjeldsen [1974] (vergelijking 4.2, paragraaf 4.3.3).

diameter pijp (cm)	stroomsnelheid (m/s)	diepte ontgrondingskuil (cm)		
		berekend uit het verloop van de gemeten kuilen		berekend volgens Kjeldsen (verg. 4.2)
		Y_{k1}	Y_{k2}	
3.1	0.40	0.4	0.4	2.3
	0.43	0.4	0.4	2.4
	0.48	0.6	1.0	2.5
6.0	0.40	0.4	0.4	3.9
	0.43	0.7	1.0	4.0
	0.48	0.8	1.1	4.2

Invloed spoiler

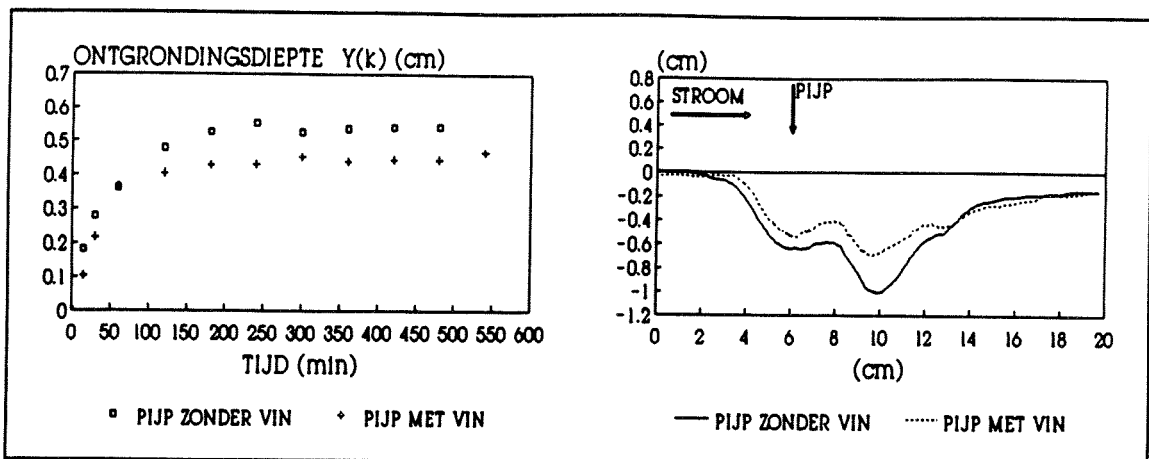
Met de kleine pijp (diameter 3.1 cm) zijn eveneens proeven uitgevoerd met een op de pijp gemonteerde spoiler. De uiteindelijke ontgrondingskuil, zowel de breedte (B_k) als de diepte (Y_k), onder de pijp met de spoiler verschilt vrijwel niet van die onder de pijp zonder spoiler.

In figuur 5.9 en 5.10 is het verloop van de diepte van de kuil direct onder de pijp (de eerste kuil) in de tijd gegeven voor twee verschillende stroomsnelheden. In de beide figuren is eveneens de na 360 min stromen gevormde kuil gegeven.



Figuur 5.9 Ontgrondingskuildiepte als functie van de tijd en de ontgrondingskuil na 360 min stromen (pijpdiameter 3.1 cm, stroomsnelheid 0.40 m/s)

Figuur 5.10 geeft aan dat de pijp met de vin zelfs een kleinere ontgrondingskuil veroorzaakt heeft dan de pijp zonder vin, echter de verschillen zijn zeer klein (orde van grootte van millimeters).



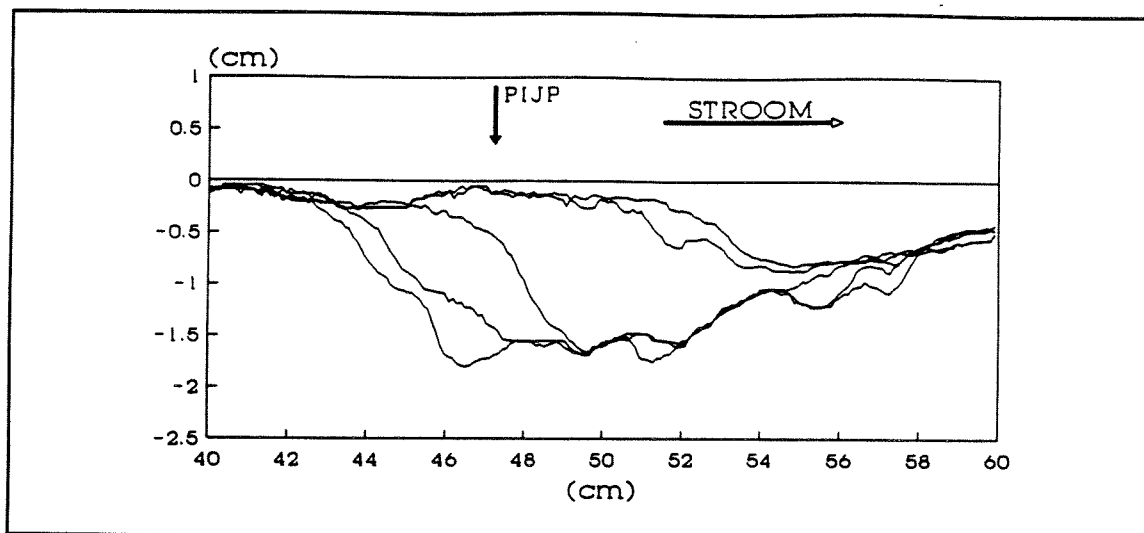
Figuur 5.10 Ontgrondingsdiepte als functie van de tijd en de ontgrondingskuil na 360 min stromen (pijpdiameter 3.0 cm, stroomsnelheid 0.48 m/s)

5.8.3 Resultaten ontgrondingsproeven zand-Oesterslibbed

De ontgrondingen rond pijpleidingen op een zand-Oesterslibbed verliepen nog weer anders dan de ontgrondingen op het zand-kaolinetbed. Alhoewel de percentages slib (5 tot 20%) lager waren dan die van het zand-kaolinetbed (30%) zijn toch nog hogere stroomsnelheden nodig gebleken om enige ontgroning te veroorzaken.

De erosie zelf heeft een ander karakter dan de erosie op een zand-, of zand-kaolinetbed in die zin dat de erosie niet 'korrelsgewijs' optreedt maar met brokken tegelijk. Bij een zekere stroomsnelheid slaan vrij plotseling brokken van 0.1 cm^3 à 1.0 cm^3 uit het bed. De ontgrondingskuil krijgt hierdoor een vrij grillig verloop (figuur 5.11). De kuildieptes zijn groter (enkele cm) dan de kuildieptes in het zand-kaolinetbed (enkele mm). De erosie start ofwel onder ofwel vlak achter het hart van de pijp.

In figuur 5.11 is een voorbeeld gegeven van de ontwikkeling van een ontgrondingskuil op een zand-Oesterslibbed. De in de figuur afgebeelde bodemprofielen zijn de in een enkele raai gemeten profielen. Dit in tegenstelling tot de in de Bijlagen gegeven bodemprofielen waar de over verschillende raaien gemiddelde bodemprofielen gegeven zijn.



Figuur 5.11 Ontwikkeling ontgrondingskuil onder een pijp op een zand-Oesterslibbed (pijp = 3.1 cm, vin = 0.8 cm, zand met 20% Oesterslib, $V = 0.90$ m/s, tijd = 0, 15, 30, 45, 60 min)

Invloed spoiler

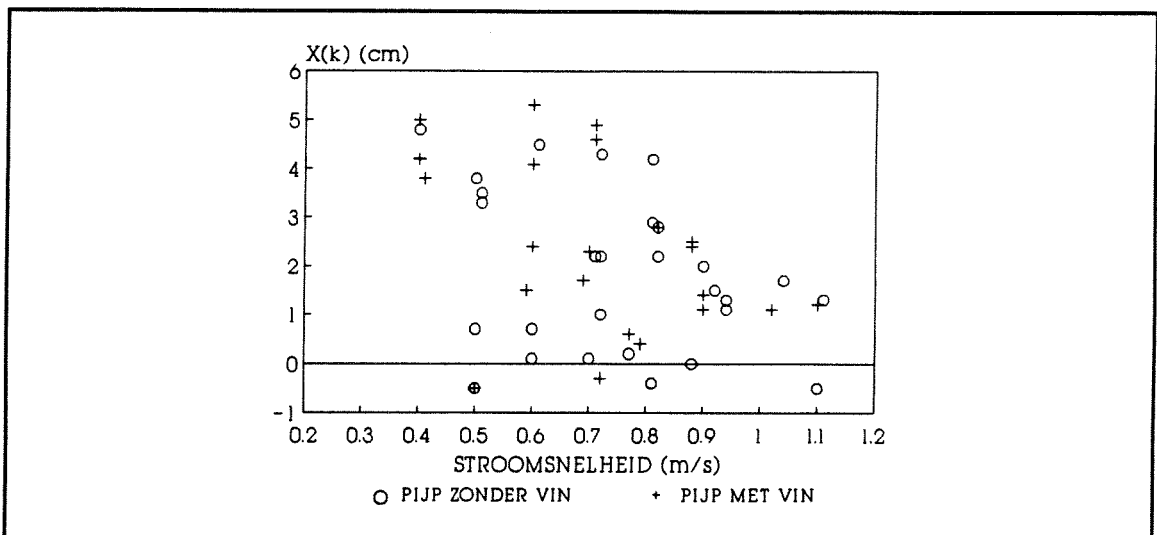
In Bijlage D, in het gedeelte van de Oesterslibbedden staan telkens gelijkwaardige proeven met een pijp met spoiler en een pijp zonder spoiler naast elkaar afgebeeld. De aanwezigheid van de spoiler lijkt vooral de breedte van de ontgrondingskuil en in mindere mate de diepte van de kuil te beïnvloeden. Verder is de kritische stroomsnelheid voor begin van erosie onder de pijp enigszins lager voor een pijp met een spoiler dan voor een pijp zonder spoiler. Beide facetten zullen hieronder nader beschreven worden.

- X_t

Door het grillige verloop van de ontgrondingskuilen varieert de plaats van het diepste punt sterk. Waarden van 0.5 cm bovenstrooms tot 5 cm benedenstrooms zijn waargenomen. Gemiddeld over alle metingen ligt het diepste punt van de kuil ongeveer 2 cm achter (benedenstrooms van) het hart van de pijp.

Een spoiler op de pijp lijkt de plaats van het diepste punt niet duidelijk te beïnvloeden.

In figuur 5.12 is de plaats van het diepste punt ten opzichte van het hart van de pijp als functie van de stroomsnelheid voor de verschillende zand-Oesterslibbedden en voor zowel de pijpjes met vin als de pijpjes zonder vin gegeven.



Figuur 5.12 Plaats diepste punt ontgrondingskuil ten opzichte van het hart van de pijp (X_k in cm).

- Y_k

In principe zal de diepte van de ontgrondingskuil afhankelijk zijn van de stroomsnelheid en het slibpercentage. Uit de proeven kan globaal vastgesteld worden dat:

- een hogere stroomsnelheid diepere kuilen veroorzaakt, ook hier geldt dat door het grillige verloop van de ontgrondingskuilen geen duidelijk verband te zien is tussen de stroomsnelheid en de kuildiepte,
- een hoger slibpercentage levert kleinere ontgrondingskuilen op in die zin dat eenzelfde kuildiepte bij een hoger slibpercentage bereikt wordt met een hogere stroomsnelheid.

Een spoiler op de pijp veroorzaakt diepere kuilen.

In figuur 5.13 staan voor de verschillende zand-Oesterslibbedden de kuildieptes gegeven.

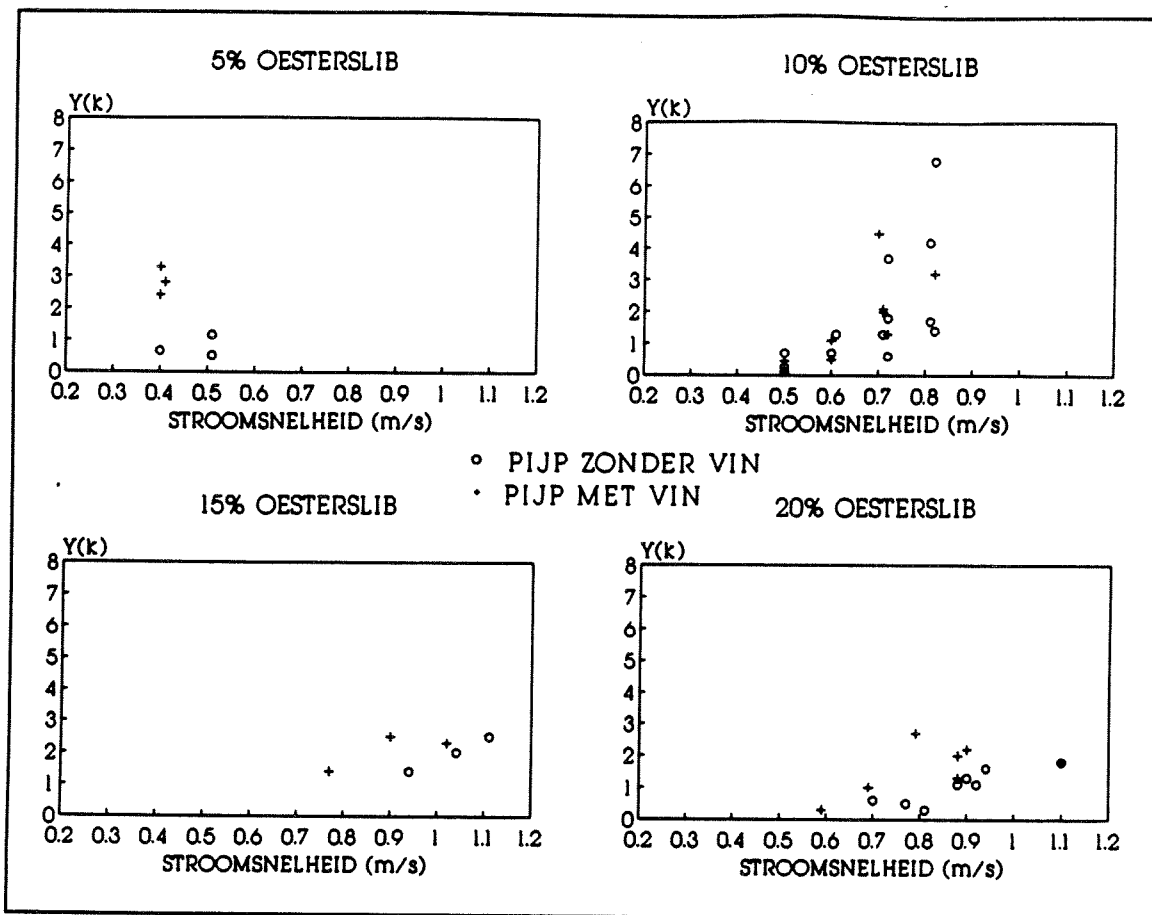
- B_k

Voor de breedte van de ontgrondingskuilen geldt globaal:

- een hogere stroomsnelheid geeft bredere ontgrondingskuilen,
- een hoger slibpercentage veroorzaakt smallere ontgrondingskuilen.

Een spoiler op de pijp heeft bredere ontgrondingskuilen tot gevolg.

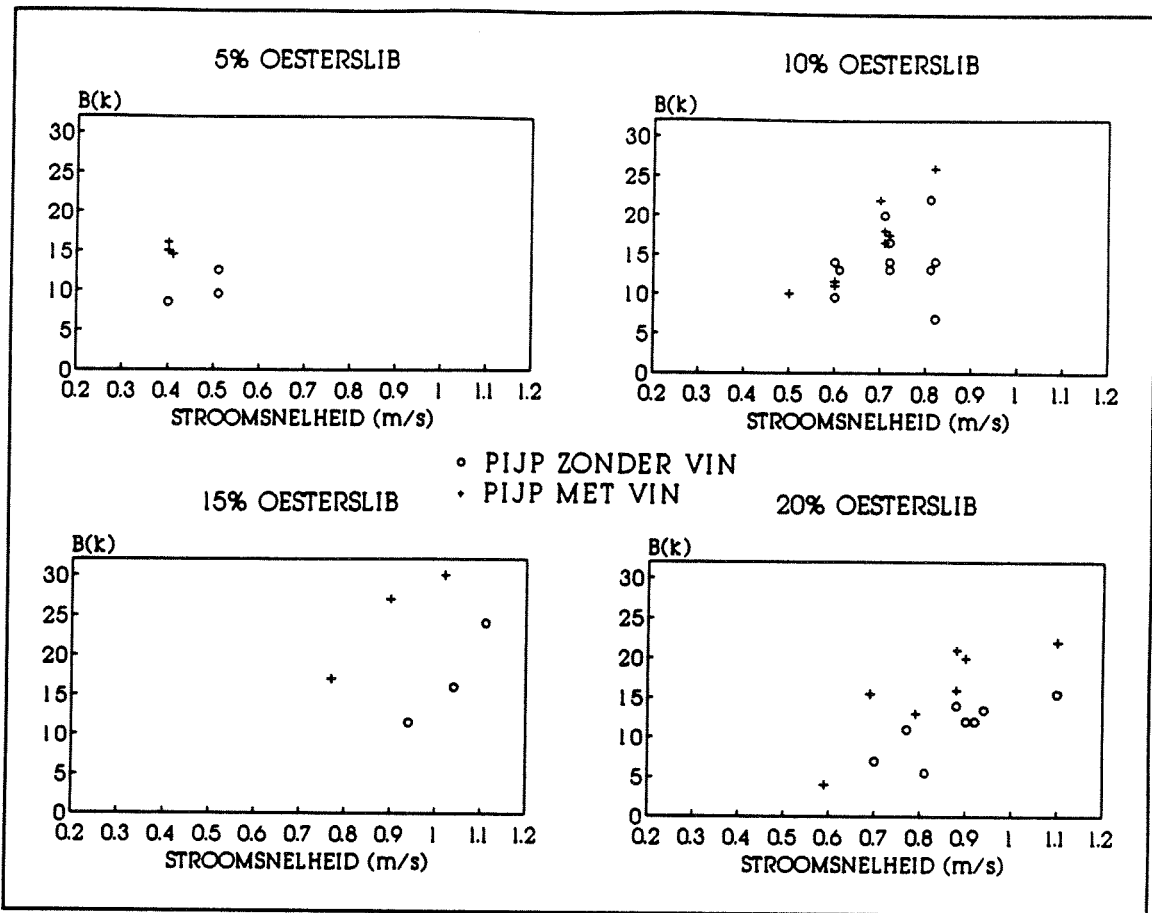
De breedtes van de ontgrondingskuilen zijn in figuur 5.14 gegeven als functie van de stroomsnelheid voor de pijpjes met en de pijpjes zonder vin.



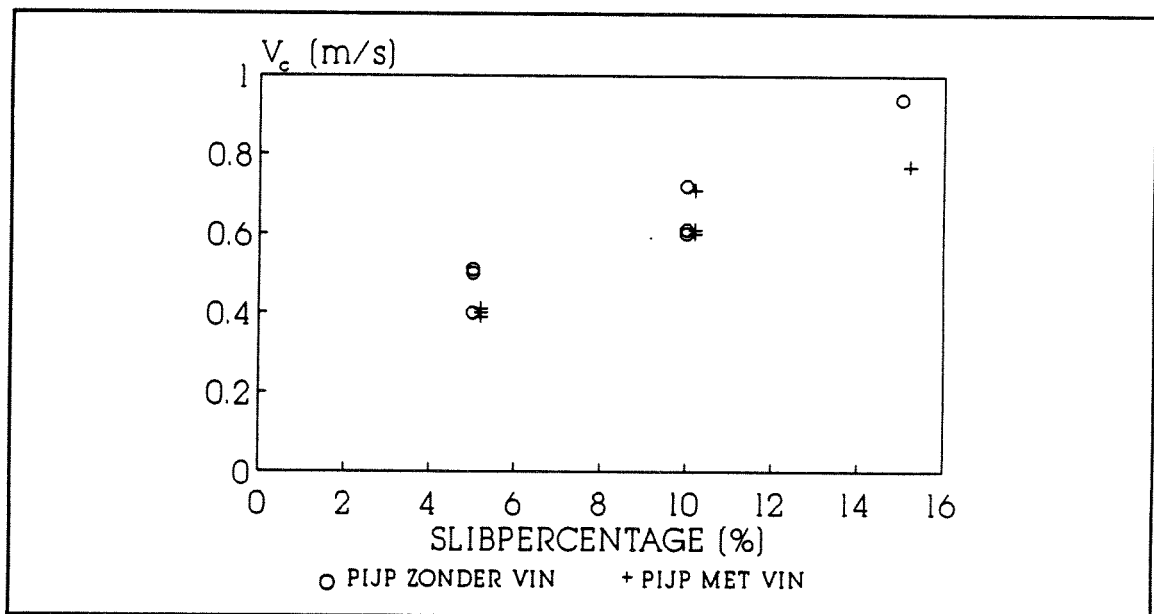
Figuur 5.13 Ontgrondingskuildiepte (Y_k in cm).

- V_c (critische stroomsnelheid voor begin van erosie onder de pijp)

V_c is de over de totale waterdiepte gemiddelde stroomsnelheid waarbij erosie ontstaat onder de pijp. Door de stroomsnelheid met stappen van 0.10 m/s op te voeren is V_c bepaald. In figuur 5.15 staan voor de verschillende slibpercentages en zowel de pijpjes met vin als de pijpjes zonder vin de gevonden kritische stroomsnelheden vermeld.



Figuur 5.14 Breedte ontgrondingskuilen (B_k in cm).



Figuur 5.15 Critische stroomsnelheid (gemiddelde snelheid) voor begin van erosie onder de pijp (V_c in m/s).

5.9 Van model naar prototype

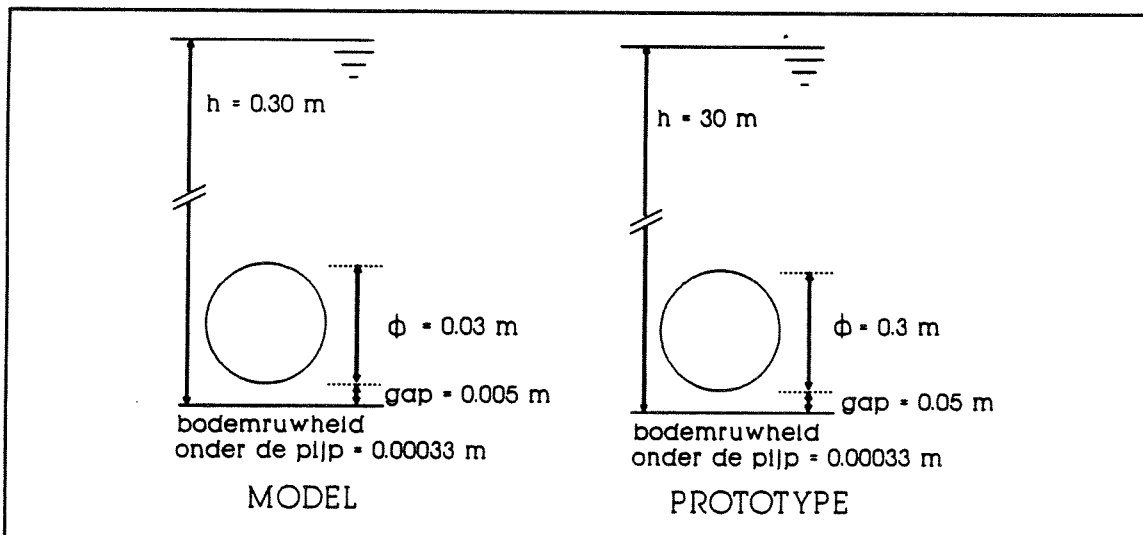
5.9.1 Stroming

Om een uitspraak te kunnen doen over de uitschuring rond prototype pijpleidingen moeten de resultaten van de modelproeven vertaald worden naar prototype schaal.

Zowel de prototype- als de modelomstandigheden waar in deze paragraaf van uitgegaan wordt staan vermeld in figuur 5.16.

In het prototype is de bodemruwheid onder de pijp gelijk gekozen aan die in het model. In werkelijkheid zal er in het prototype een grotere ruwheid aanwezig zijn als gevolg van bodemoneffenheden. Wanneer echter het punt van begin van beweging bekeken wordt moet geen gebruik gemaakt worden van de totale ruwheid, veroorzaakt door elementen als ribbels of andere oneffenheden. In dat geval is het noodzakelijk de ruwheid te gebruiken die gekoppeld is aan de ruwheid van de te eroderen elementen, ofwel de sedimentdeeltjes. (N.B. In transportformules wordt over het algemeen gebruik gemaakt van $\mu\tau$ waarbij τ weliswaar de bodemschuifspanning is afhankelijk van de totale ruwheid, gekoppeld aan ribbels of iets dergelijks, echter μ is de ribbelfactor die de verhouding aangeeft van de bodemschuifspanning gerelateerd aan de korrels en die gerelateerd aan de ribbels.)

Voor de ruwheid in het prototype ver voor de pijp is een waarde aangehouden van 0.03 m (niet aangegeven in figuur 5.16).



Figuur 5.16 Afmetingen model en prototype.

In het model is voor een bodem met verschillende slib-percentages (Oesterslib) de kritische snelheid voor begin van erosie onder de pijp bepaald:

5% slib	→	$V \approx 0.40 \text{ m/s}$
10% slib	→	$V \approx 0.60 \text{ m/s}$
15% slib	→	$V \approx 0.80 \text{ m/s}$

Dit zijn de over de waterdiepte gemiddelde stroomsnelheden.

Om te bepalen wanneer in het prototype erosie zal optreden moet de kritische bodemschuifspanning onder de pijp in het prototype gelijk zijn aan die in het model:

$$\tau_{gap\ m} : \tau_{gap\ p} = 1 \quad (5.2)$$

waarin τ : bodemschuifspanning
gap : opening onder de pijp
m : model
p : prototype

De bodemschuifspanning is evenredig met het quotiënt van het kwadraat van de snelheid en de Chezy-coëfficiënt:

$$\tau \sim \frac{V^2}{C^2} \quad (5.3)$$

waarin V : stroomsnelheid
 C : Chezy coëfficiënt

Als de bodemschuifspanning onder de pijp op schaal 1 weergegeven wordt in het prototype dan moet gelden:

$$\frac{V_{gap\ m}^2}{C_{bodem\ gap\ m}^2} : \frac{V_{gap\ p}^2}{C_{bodem\ gap\ p}^2} = 1 \quad (5.4)$$

Voor de Chezy-coëfficiënt onder de pijp geldt:

$$C_{bodem\ gap} = 18 * \log \frac{12 * \frac{gap}{2}}{r} \quad (5.5)$$

waarin r : bodemruwheid

De opening onder de pijp (gap) is in het prototype 10 maal zo groot aangenomen als in het model. Wanneer in het prototype onder de pijp eenzelfde ruwheid aangenomen wordt als in het model dan geldt:

$$C_{\text{bodem gap } m} : C_{\text{bodem gap } p} = 2 : 3 \quad (5.6)$$

Voor de snelheid moet dan eveneens gelden

$$V_{\text{gap } m} : V_{\text{gap } p} = 2 : 3 \quad (5.7)$$

Om de stroomsnelheid onder de pijp op te kunnen schalen moet eerst een aanname gedaan worden voor de grootte van deze snelheid. Dit kan op verschillende manieren gebeuren.

Methode 1:

Stel dat de snelheid onder de pijp evenredig is met de snelheid voor de pijp ter hoogte van het scheidingsvlak van water dat over, respectievelijk onder de pijp doorgaat. Uit snelheidsmetingen rond een pijp vlak bij de bodem (beschreven in paragraaf 7.5) volgt een scheidingsvlak wat 0.1 à 0.2 maal de pijpdiameter boven de onderkant van de pijp ligt (figuur 5.17).

Voor de snelheid ter hoogte van het scheidingsvlak geldt dan:

$$V_{(0.2\phi+gap) m} : V_{(0.2\phi+gap) p} = 2 : 3 \quad (5.8)$$

Voor het begin van erosie onder de pijp geldt voor de gemiddelde stroomsnelheid:

slibpercentage:	5%,	10%,	15%	
	↓	↓	↓	
	$\bar{V}_m = 0.40,$	$0.60,$	0.80	(5.9)

Uitgaande van een logaritmischesnelheidsprofiel (paragraaf 3.7.2, vergelijking 3.3) is de snelheid ter hoogte van het scheidingsvlak:

$$V_{(0.2\phi+gap) m} = 0.30, 0.46, 0.60 \text{ m/s} \quad (5.10)$$

Voor de snelheid ter hoogte van het scheidingsvlak in het prototype moet dan gelden (aangenomen dat het scheidingsvlak in het prototype op dezelfde hoogte ten opzichte van de pijp ligt als in het model):

$$V_{(0.2\phi+gap) p} = 0.45, 0.69, 0.90 \text{ m/s} \quad (5.11)$$

Wanneer deze snelheid nu omgerekend wordt naar de over de volle hoogte gemiddelde snelheid moet gebruik gemaakt worden van de totale ruwheid, veroorzaakt door ribbels of andere bodemoneffenheden. Voor deze totale ruwheid wordt een waarde van 0.03 m aangehouden.

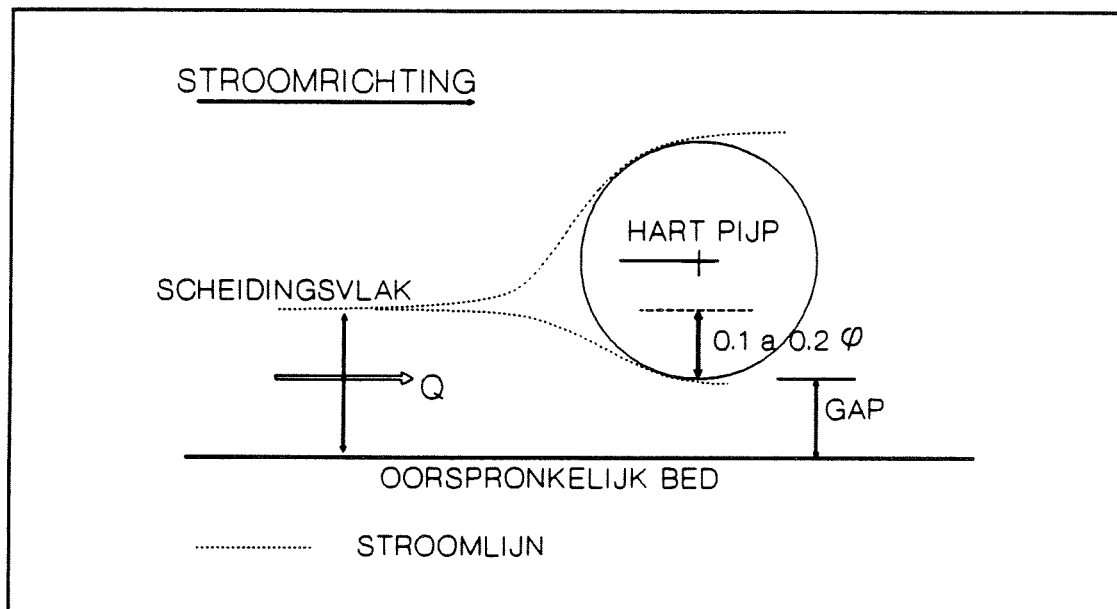
De gemiddelde stroomsnelheid in de prototype situatie wordt dan:

$$\bar{V}_p = 0.88, 1.35, 1.76 \text{ m/s} \quad (5.12)$$

Methode 2:

Stel dat de snelheid onder de pijp evenredig is met het quotiënt van het debiet dat onder de pijp doorgaat en de opening (gap) onder de pijp:

$$V_{gap} = \frac{Q_p}{gap} \quad (5.13)$$



Figuur 5.17 Scheidingsvlak pijp in een stroom.

Wanneer aangenomen wordt dat het scheidingsvlak 0.2ϕ boven de onderkant van de

pijp ligt dan kan het debiet dat onder de pijp doorstroomt bepaald worden door integratie van het snelheidsprofiel onder dit vlak.

Nog steeds geldt:

$$V_{gap\ m} : V_{gap\ p} = 2 : 3 \quad (5.14)$$

Omdat de snelheid nu evenredig gekozen wordt met het quotiënt van het debiet onder de pijp en de opening onder de pijp, geldt:

$$\left(\frac{Q_p}{gap}\right)_m : \left(\frac{Q_p}{gap}\right)_p = 2 : 3 \quad (5.15)$$

De opening onder de pijp is in het prototype 10 maal zo groot aangenomen als de opening in het model.

$$gap_m : gap_p = 1 : 10 \quad (5.16)$$

Ofwel:

$$Q_{p\ m} : Q_{p\ p} = 2 : 30 \quad (5.17)$$

Het debiet dat onder de pijp doorgaat is gelijk aan het debiet dat voor de pijp onder het niveau van het scheidingsvlak doorgaat (figuur 5.17). Wanneer dit scheidingsvlak op 0.2ϕ boven de onderkant van de pijp ligt dan kan het debiet als volgt berekend worden.

$$Q_{(0.2\phi+gap)} = \int_0^{0.2\phi+gap} v(z) dz \quad (5.18)$$

Uitgaande van een logaritmisch snelheidsprofiel levert dit:

$$Q_z = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \left[0.5 \epsilon z_0 + z \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - z \right] \quad (5.19)$$

met

$$z = 0.2\phi + gap \quad (5.20)$$

waarin τ : bodemschuifspanning
 κ : constante van von Karman (0.4)
 ρ : dichtheid
 z_0 : $\tau/33$
 r : bodemruwheid

In het model levert dit voor de verschillende slibpercentages (5%, 10% en 15% slib):

$$Q_{(0.2\phi+gap) m} = 0.0029, 0.0044, 0.0058 \text{ m}^3/\text{ms} \quad (5.21)$$

In het prototype moet dus gelden:

$$Q_{(0.2\phi+gap) p} = 0.044, 0.065, 0.087 \text{ m}^3/\text{ms} \quad (5.22)$$

De gemiddelde stroomsnelheid in het prototype wordt dan:

$$\bar{V}_p = 0.95, 1.43, 1.91 \text{ m/s} \quad (5.23)$$

Uit het bovenstaande blijkt dat de benodigde stroomsnelheid of bodemschuifspanning op verschillende manieren opgeschaald kan worden. De resultaten van de beide berekeningsmethoden staan in tabel 5.3 vermeld. De verschillen zijn niet erg groot.

Tabel 5.3 Gemiddelde stroomsnelheid (m/s) in het prototype voor begin van erosie onder de pijp

	slibpercentage in bodem		
	5%	10%	15%
methode 1	0.88	1.35	1.76
methode 2	0.95	1.43	1.91

5.9.2 Stroming en golven

Of er wel of geen erosie rond pijpleidingen ontstaat is sterk afhankelijk van de turbulentie achter de pijp en dus van het al of niet ontstaan van een turbulent zog. Het ontstaan hiervan is in het geval dat er alleen golven zijn afhankelijk van het Keulegan-Carpenter getal ($KC = UT/\phi$, waarin U de snelheid, T de golfperiode en ϕ de pijp diameter is). Voor $KC < 6$ vindt geen ontwikkeling van een zog plaats (Mao 1986). Voor $KC > 6$ zal er wel een zog ontstaan, echter met een beperkte lengte:

$$\frac{L}{\phi} = 0.8 + 0.064KC \quad 6 < KC < 82 \quad (5.24)$$

$$\frac{L}{\phi} = 6 \quad 82 < KC \quad (5.25)$$

waarin L : lengte zog

De stroomsnelheden onder de pijp zullen hoger zijn dan die boven de pijp. Dientengevolge kan er onder de pijp een grotere turbulentie ontstaan, echter de vraag is of de tijdsduur die nodig is om een turbulent zog te ontwikkelen lang genoeg zal zijn.

Stel dat, in het geval van golven en stroom, de bodemschuifspanning onder de pijp evenredig toeneemt met de bodemschuifspanning voor de pijp. In dat geval zal er erosie onder de pijp optreden wanneer de bodemschuifspanning voor de pijp een bepaalde waarde overschrijdt, of dit nu veroorzaakt wordt door stroming of door stroming en golven. De waarden van de bodemschuifspanning voor de pijp waarbij onder de pijp erosie ontstaat staan in tabel 5.4 vermeld.

Tabel 5.4 Bodemschuifspanning (N/m^2) in het prototype op een ongestoord bed voor begin van erosie onder een pijp.

	slibpercentage in bodem		
	5%	10%	15%
methode 1	1.41	3.31	5.63
methode 2	1.64	3.72	6.64

De bodemschuifspanning voor stroming en golven (Bijker [1971]) kan bepaald worden door middel van :

$$\overline{\tau}_{sg} = \tau_s \left[1 + 0.5 \left[\xi \frac{u_o}{V} \right]^2 \right] \quad (5.26)$$

met:

$$\xi = C \sqrt{\frac{f_w}{2g}} \quad (5.27)$$

en:

$$f_w = \exp \left[-5.997 + 5.213 \left[\frac{a_o}{r} \right]^{-0.194} \right] \quad (5.28)$$

waarin

- τ_{sg} : bodemschuifspanning voor stroming en golven
- τ_s : bodemschuifspanning voor stroming
- u_o : maximale snelheid vlak boven de bodem als gevolg van golven (afhankelijk van golfhoogte en periode)
- V : snelheid als gevolg van stroming
- C : Chezy-coëfficiënt
- f_w : weerstands factor voor golven
- a_o : amplitude waterdeeltjes vlak boven de bodem als gevolg van golven (afhankelijk van golfhoogte en periode)
- r : bodemruwheid

Wanneer aangenomen wordt dat golfhoogte en -periode aan elkaar gerelateerd kunnen worden door (geldt voor de Noordzee):

$$T = 3.94 H_{sig}^{0.376} \quad (5.29)$$

dan kan voor elke stroomsnelheid de minimale significante golfhoogte bepaald worden waarbij de desbetreffende bodemschuifspanning bereikt wordt.

Stel het geval van een bodem met 5% slib. Wanneer alleen stroming zou plaats vinden dan zou een gemiddelde stroom-snelheid nodig zijn van 0.88 m/s (methode 1) om erosie onder de pijp te initiëren. Een gemiddelde stroomsnelheid van 0.88 m/s betekent bij een waterdiepte van 30 m een bodem-schuifspanning in de ongestoorde situatie van 1.41 N/m² (met een bodemruwheid van 0.03 m).

Als er stroming en golven tegelijk plaatsvinden dan zal deze zelfde bodemschuifspanning van 1.41 N/m² overschreden moeten worden om erosie onder de pijp te initiëren. In het geval van stroming en golven geldt voor de bodemschuifspanning vergelijking 5.26. Als nu een gemiddelde stroomsnelheid aanwezig is van bijvoorbeeld 0.4 m/s dan kan de bijbehorende u_o berekend worden waarvoor geldt dat $\tau_{sg} = 1.41 \text{ N/m}^2$ is. De berekening van u_o is iteratief uitgevoerd:

- er wordt uitgegaan van een golfhoogte, H,
- de bijbehorende golfperiode T wordt berekend met vergelijking 5.29,
- met H en T worden a_o en u_o berekend,
- tot slot wordt τ_{sg} bepaald,
- wanneer de berekende τ_{sg} kleiner is dan de gewenste τ_{sg} wordt er een grotere H gekozen en de procedure wordt herhaald.

Bij een golfhoogte van 3.95 m blijkt de bodemschuifspanning van 1.41 N/m² bereikt te zijn. In dat geval geldt: H = 3.95 m → T = 6.6 s → $u_o = 0.24$ m/s , $a_o = 0.25$ m → $f_w = 0.08$ → $\xi = 4.7$ → $\tau_{sg} = 1.41$ N/m².

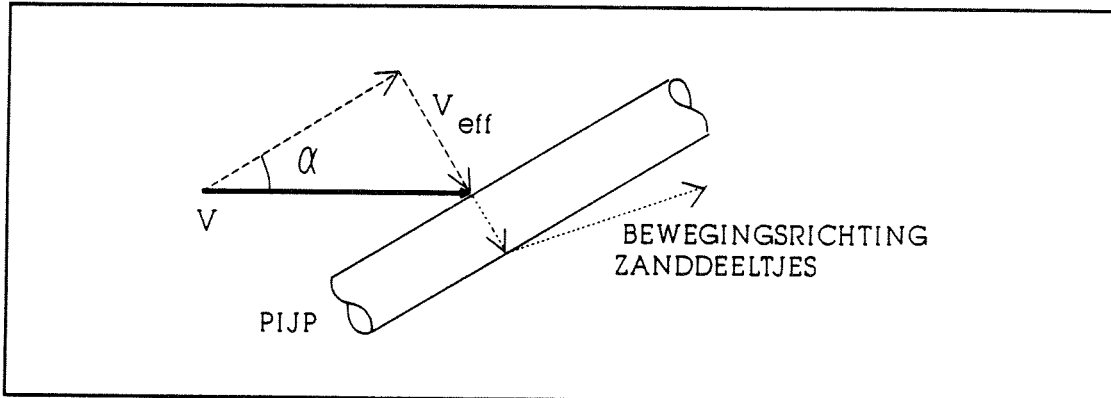
In tabel 5.5 staat voor diverse situaties de golfhoogte gegeven waarbij de in tabel 5.4 gegeven bodem-schuifspanningen (berekend met methode 1) bereikt worden.

Tabel 5.5 Golfhoogte (m) waarbij de gegeven bodemschuifspanning bereikt wordt voor verschillende stroomsnelheden en verschillende waterdieptes.

BODEMSCHUIFSPANNING 1.41 N/m ²			
stroom-snelheid (m/s)	waterdiepte (m)		
	25	30	35
0.20	3.44	4.17	4.94
0.40	3.23	3.95	4.69
0.60	2.83	3.52	4.20
0.80	1.89	2.52	3.16
BODEMSCHUIFSPANNING 3.31 N/m ²			
0.20	4.66	5.59	6.55
0.40	4.53	5.47	6.40
0.60	4.32	5.22	6.14
0.80	4.00	4.87	5.74
BODEMSCHUIFSPANNING 5.63 N/m ²			
0.20	5.72	6.80	7.90
0.40	5.63	6.70	7.79
0.60	5.47	6.53	7.60
0.80	5.23	6.27	7.32

5.9.3 Scheef aanstromen

De erosieproeven in het model zijn uitgevoerd met de stroming loodrecht op de pijpas. In het prototype zal de stroming niet altijd loodrecht op de pijp plaatsvinden. Bij erosieproeven op zand is gebleken dat wanneer de hoek tussen de stroomrichting en de as van de pijp kleiner wordt de uitschuringsdiepte ook kleiner wordt. Direct onder de pijp blijkt het sediment in dat geval toch loodrecht op de pijpas te bewegen (figuur 5.18) (Mao [1986]). Dit gebeurt echter met een effectieve snelheid die lager is dan de stroomsnelheid.



Figuur 5.18 Bewegingsrichting sedimenttransport onder een scheef aangestroomde pijp.

Bij het scheef aanstromen in het prototype zal de gemiddelde stroomsnelheid groter moeten zijn dan de berekende noodzakelijke snelheid om eenzelfde effectieve snelheid onder de pijp te bewerkstelligen.

Wanneer de stroming een hoek met de pijp maakt kleiner dan 30° vindt er bovendien geen vortex shedding meer plaats (Mao 1988). In het geval van zandslibbedden speelt de turbulentie en dus het al of niet aanwezig zijn van vortices een niet onbelangrijke rol.

5.9.4 Pijpruwheid

In het prototype kan pijp door aangroeiing ruwer zijn dan in het model. Dit houdt in dat de weerstand van de opening onder de pijp groter is dan het veronderstelde geval van een gladde pijp. Er zal dan ook minder water onder de pijp doorstromen en dus zal ook de bodemschuifspanning onder de pijp kleiner zijn. Voor het opschalen van de snelheden zal dit tot gevolg hebben dat de benodigde snelheid om in het prototype erosie te veroorzaken hoger zal moeten zijn dan de oorspronkelijk berekende snelheid.

5.9.5 Schaaleffecten

Bij het opschalen van modelproeven naar prototypeschaal spelen haast onvermijdelijk schaaleffecten een rol. In het geval van opschalen van stroomproeven met pijpleidingen wordt met name de vorm en de grootte van het zog achter de pijp beïnvloed door schaaleffecten. Het Re -getal speelt hierin een belangrijke rol.

Het Re -getal op zich bepaalt de verhouding van traagheids- en viskeuze krachten. Wanneer dit Re -getal niet op schaal 1 opgeschaald wordt dan speelt ofwel de traagheid ofwel de viscositeit in het prototype een relatief belangrijkere rol.

Wat betreft de vorm en de turbulentie van het zog achter de pijp spelen zowel het Re -getal van de pijp als het Re -getal van de opening onder de pijp een rol.

$$Re_{pijp} = \frac{V \phi}{\nu} \quad Re_{gap} = \frac{V gap}{\nu} \quad (5.30)$$

waarin	Re_{pijp}	: Reynolds getal pijp
	Re_{gap}	: Reynolds getal opening onder de pijp
	V	: stroomsnelheid
	ϕ	: pijpdiameter
	gap	: opening onder de pijp
	ν	: kinematische viscositeit

Re-getal pijp

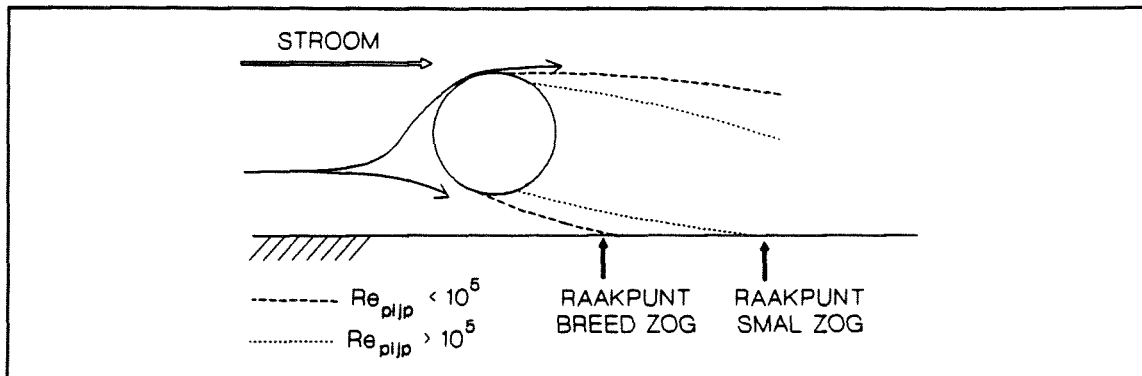
- Vorm van het zog

Het Re -getal van de pijp bepaalt de weerstandsfactor, C_D , van de pijp en daarmee het stroombeeld rond de pijp. Bij een Re -getal van circa 10^5 vindt er een plotselinge daling van de C_D -waarde plaats. Dit houdt voor het stroombeeld in dat de stroming het oppervlak van de pijp makkelijker en dus verder kan volgen. Het loslaatpunt van de stroming rond de pijp trekt naar achteren en het zog achter de pijp wordt smaller.

In het prototype is het goed mogelijk dat het Re -getal van de pijp juist voorbij dit overgangspunt ligt (voor een pijp van 0.30 m en een snelheid van 0.50 m/s is Re_{pijp} $1.5 \cdot 10^5$) terwijl in het model het Re -getal van de pijp zich voor dit overgangspunt bevindt (voor een pijp van 0.03 m en een snelheid van 0.5 m/s is Re_{pijp} $1.5 \cdot 10^4$). Dit houdt in dat in het prototype de C_D -waarde kleiner is en daarmee het zog dus relatief smaller is dan in het model.

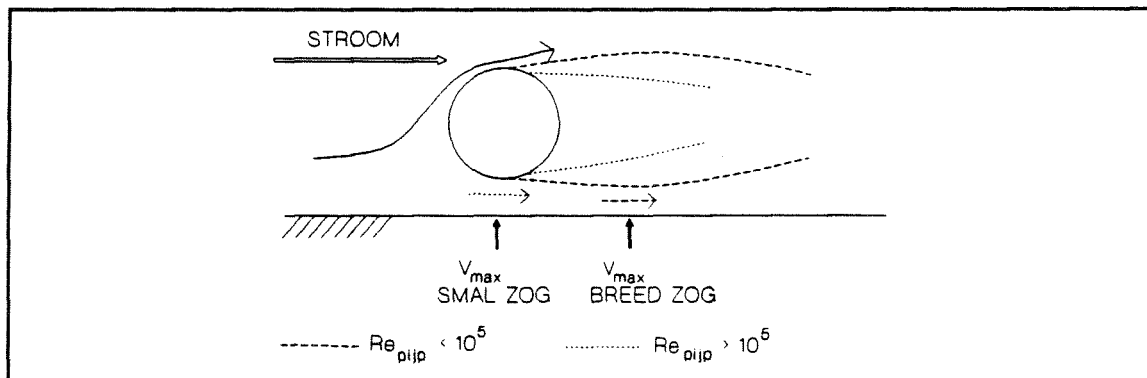
In de modelproeven begint de erosie veelal niet onder maar achter de pijp. Dit wordt ofwel veroorzaakt door een verhoogde turbulentie op die plaats (Sumer et al [1988], Jensen et al [1988]), ofwel door een maximale stroomsnelheid op die plaats.

De verhoogde turbulentie bij de bodem wordt veroorzaakt door het zog dat de bodem raakt. Wanneer in het prototype het zog relatief smaller is zal het raakpunt van het zog aan de bodem verder naar achteren (benedenstrooms) schuiven (figuur 5.19) of zal het zog de bodem helemaal niet meer raken.



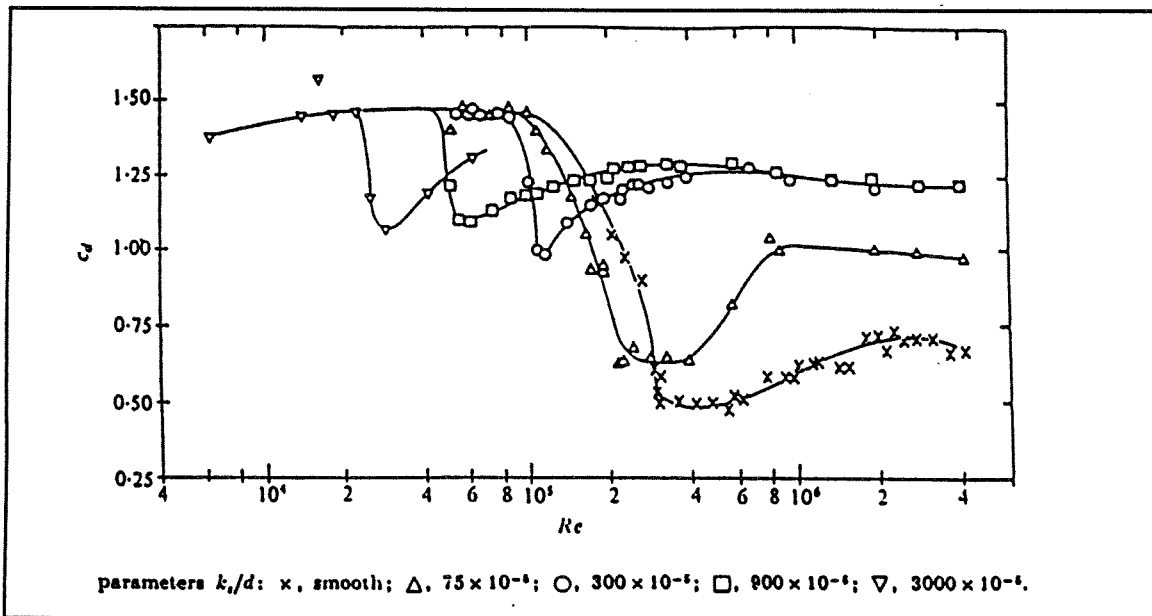
Figuur 5.19 Invloed van de breedte van het zog op de plaats waar het zog de bodem raakt

De maximale stroomsnelheid bij de bodem wordt veroorzaakt door de jet onder de pijp die voorbij de pijp samentrekt. Een smaller zog in het prototype heeft het gevolg dat de maximale snelheid bij de bodem verder naar voren trekt (onder de pijp) (figuur 5.20).



Figuur 5.20 Invloed van de breedte van het zog op de plaats van de maximale snelheid vlak boven het bed.

Wanneer de pijp ruwer wordt vermindert het effect van het Re -getal op de C_D -waarde (Achenbach en Heinecke (1981)). Bij een ruwere pijp zal de plotselinge daling in de C_D -waarde bij een lager Re -getal plaatsvinden ($r/\phi = 0.03$ i.p.v. gladde pijp, dan daling van het kritische Re -getal van $3 \cdot 10^5$ naar $2 \cdot 10^4$), bovendien is de daling van de C_D -waarde zelf in dat geval minder groot (figuur 5.21). Wanneer de pijp in het prototype een redelijke aangroeiing heeft zal de ruwheid al snel zodanig groot worden ($r/\phi \gg 0.03$) dat de invloed van het Re -getal nagenoeg wegvalt.



Figuur 5.21 Invloed pijpruwheid op C_D -waarde (k_s = pijpruwheid, d = pijpdiameter) (Achenbach en Heinecke [1981]).

Het ruwer worden van de pijp heeft op zich een positieve invloed op het zog. Voor een pijp ver van de wand geldt dat het loslaatpunt van de stroom verder naar voren zal trekken ($\alpha_s \sim 110^\circ$) in vergelijking met een gladde pijp ($\alpha_s \sim 140^\circ$) (Achenbach en Heinecke [1981]).

- Turbulentie aan de randen van het zog

Naast de vorm van het zog bepaalt het Re -getal van de pijp de mate van 'vortex-shedding'. Voor $Re_{\text{pijp}} > 400$ geldt dat het zog achter de pijp turbulent wordt. Voor lage Re -getallen ligt de plaats waar het zog turbulent wordt echter nog ver achter de pijp. Wanneer het Re -getal toeneemt verschuift dit punt naar de pijp toe. Voor $Re_{\text{pijp}} \approx 10^5$ bereikt dit punt de pijp waardoor de 'boundary layer' van de pijp turbulent wordt. (Dit heeft tot gevolg dat de stroom de pijp makkelijker en verder kan volgen waarmee de plotselinge daling van de C_D -waarde verklaard wordt.) In het prototype ligt de grens voor een pijp met een diameter van 0.3 m bij een stroomsnelheid van 0.33 m/s. In het model ligt die grens voor een pijp van 0.03 m op 3.3 m/s.

Re-getal opening onder de pijp

Het Re -getal van de opening onder de pijp beïnvloedt de vorm en grootte van de jet die onder de pijp door komt. Dit Re -getal kan niet op de juiste wijze opgeschaald worden ($n_{Re} \neq 1$). In het model zullen de viskeuze krachten dan ook relatief belangrijker zijn dan in het prototype. Hierdoor zal de stroming onder de pijp in het model een groter invloedsgebied hebben en dus ook een bredere kuil onder de pijp veroorzaken.

5.9.6 Stroom- en golfgegevens van de Oestergronden op de Noordzee

Op de Oestergronden op de Noordzee is het afwijkende ingravingsgedrag van pijpleidingen waargenomen. De Oestergronden bevinden zich globaal in de vakken K7-K8-K9 en L4-L7 van het Nederlands Continentale Plat. De diepte is net groter dan 30 m. De aanwezigheid van slib in het bodemmateriaal geeft aan dat gemiddeld genomen de bodemschuifspanning zo laag is dat het slib kan bezinken.

Stroomgegevens

De in het desbetreffende gebied voorkomende stroomsnelheden staan vermeld in tabel 5.6 (zie ook figuur 5.22). Deze gegevens zijn afkomstig van Rijkswaterstaat, Directie Noordzee.

De maximaal voorkomende stroomsnelheid bij een gemiddeld springtij is 0.77 m/s. Bij een bodem met 5% slib is de benodigde gemiddelde snelheid om erosie onder de pijp te initiëren 0.88 à 0.95 m/s (tabel 5.3).

Tabel 5.6 Gemiddelde stroomsnelheden op de Oestergronden

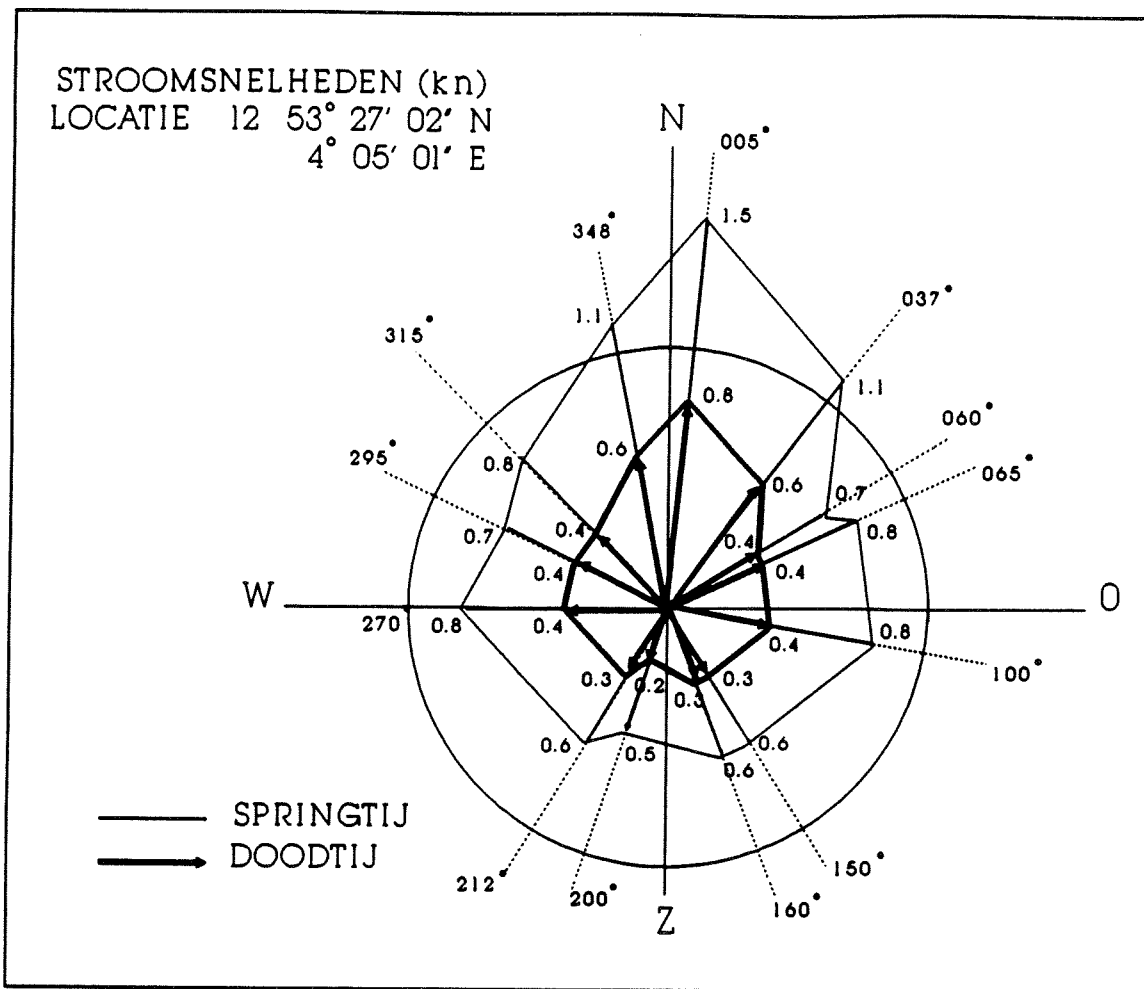
richting	doodtij		springtij	
	kn	m/s	kn	m/s
N	0.8	0.41	1.5	0.77
NO	0.6	0.31	1.1	0.57
O	0.4	0.21	0.8	0.41
ZO	0.3	0.15	0.6	0.31
Z	0.3	0.15	0.6	0.31
ZW	0.3	0.15	0.7	0.36
W	0.4	0.21	0.8	0.41
NW	0.4	0.21	0.8	0.41

Golfgegevens

De golfgegevens uit het desbetreffende gebied zijn afkomstig van het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) [1978]. Van gegevens uit de periode maart 1973 tot februari 1976 is door middel van de Weibull verdeling de overschrijdingsgrafiek bepaald voor alle seizoenen tesamen (figuur 5.23).

De gemiddelde golfhoogte voor de verschillende seizoenen is gegeven in tabel 5.7.

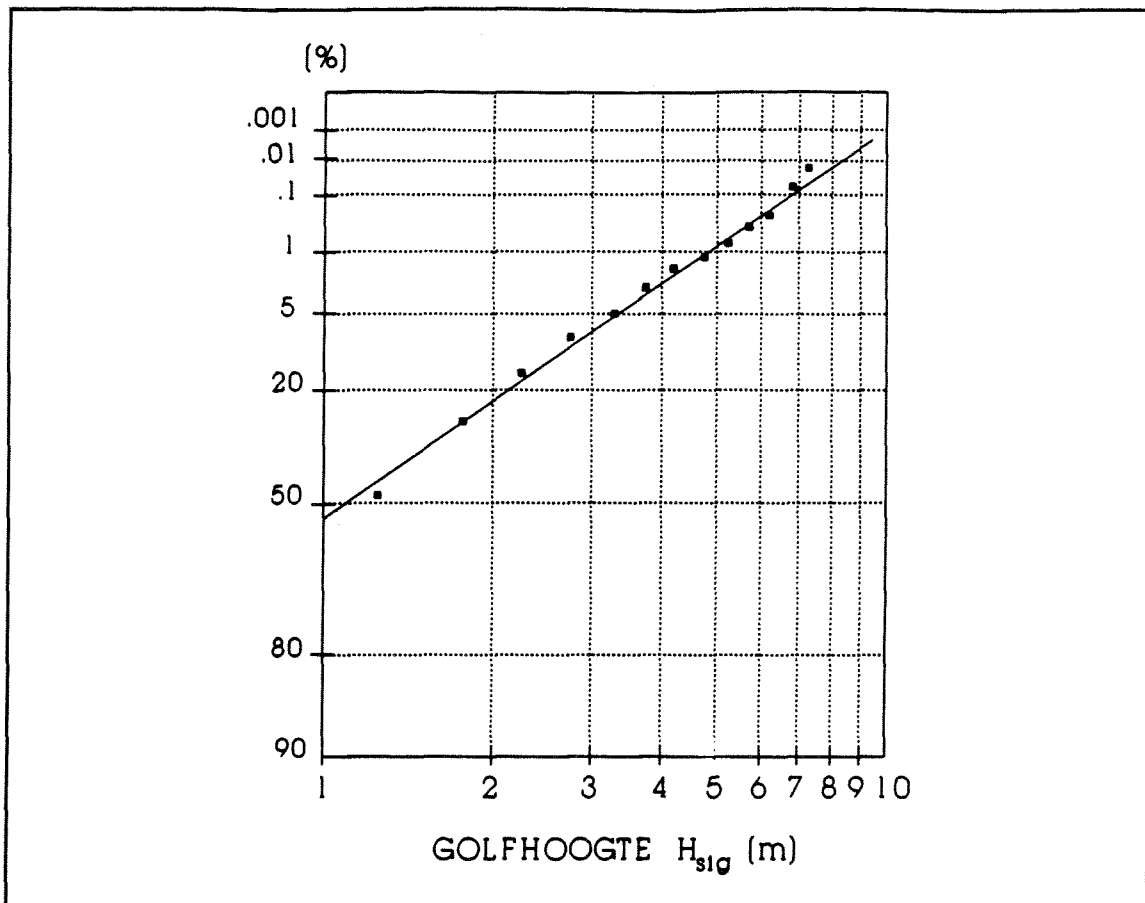
Voor een bodem met 5% slib geldt dat bij een gemiddelde getijstroom van 0.40 m/s golven van ongeveer 4 m nodig zijn om enige erosie onder pijpleidingen op te wekken. Uit figuur 5.23 blijkt dat deze golven een overschrijdingskans hebben van ongeveer 2%.



Figuur 5.22 Stroomroos van de Oestergronden.

Tabel 5.7 Gemiddelde significante golfhoogte voor de verschillende seizoenen.

	H_{sig} (m)
winter	1.90
lente	1.35
zomer	1.00
herfst	1.75
gehele jaar	1.44



Figuur 5.23 Overschrijdingskans voor H_{sig} op de Oestergronden.

5.10 Conclusies omtrent de uitschuring rond pijpelingen op slibrijk zand

De ontgrondingskuilen op een zuiver zandbed onder een modelpijpje voldoen redelijk aan de door Kjeldsen bepaalde ontgrondingsformule (paragraaf 4.3.3, vergelijking 4.2).

Door het toevoegen van kaolinite, een weinig cohesieve slibsoort, aan het bodemmateriaal in de verhouding van 70% zand en 30% kaolinite, is de ontgrondingsdiepte een factor 5 à 10 kleiner dan de met Kjeldsens formule berekende kuildiepte terwijl de benodigde stroomsnelheid om erosie op te wekken toeneemt ($V=0.40$ m/s). Als gevolg van de hoge snelheden en de lage erosie blijft de aanzanding benedenstrooms van de pijp achterwege. Het materiaal dat geërodeerd is wordt direct afgevoerd. De erosiekuil blijft beperkt tot een smal gebied onder en achter de pijp (totale breedte $\approx 3\phi$).

Een natuurlijk zand-slibmengsel waarvan het slib duidelijk cohesieve eigenschappen vertoont, geeft een ander ontgrondingsmechanisme te zien. In tegenstelling tot zuivere zandbedden of zand-kaolinetbedden waar het sediment 'korrelsgewijs' erodeert, vindt de erosie bij natuurlijk zand-slib met brokken tegelijk plaats. De cohesiviteit van het slib maakt het mengsel zodanig compact dat individuele korrels slechts zeer moeilijk uit het bed verwijderd kunnen worden. Voordat dit stadium bereikt wordt zijn er al brokken materiaal uit het bed weggeslagen. In het bed zijn blijkbaar vlakken waar de binding minder sterk is dan de binding van een individuele zandkorrel in het bed.

Het gevolg van de 'broksgewijze' erosie is dat er diepere (0.1 à 2ϕ) en bredere (3 à 10ϕ) kuilen ontstaan dan bij het weinig cohesieve zand-kaolinetbed. De benodigde snelheid waarbij erosie optreedt is echter nog hoger dan bij een zand-kaolinetbed. Voor 5, 10 en 15 % slib is de over de waterdiepte gemiddelde stroomsnelheid waarbij in het model erosie onder de pijp optreedt respectievelijk ongeveer 0.40, 0.60 en 0.80 m/s.

De aanwezigheid van een spoiler op de pijp veroorzaakt enigszins diepere en bredere ontgrondingskuilen terwijl de stroomsnelheid waarbij erosie optreedt lager is. Het verschil is echter slechts klein.

Wanneer de modelomstandigheden vertaald worden naar prototypeschaal (waterdiepte ongeveer 30 m) dan worden voor de gemiddelde stroomsnelheid waarbij erosie onder de pijp optreedt waarden gevonden van 0.88 à 0.95, 1.3 à 1.4 en 1.8 à 1.9 m/s voor een bodem met respectievelijk 5, 10 en 15% slib. Deze snelheden worden tijdens een gemiddeld springtij niet overschreden.

De aanwezigheid van golven kan de bodemschuifspanning en daarmee de erosie onder de pijp versterken. Bij een zand-slibbed van 5% slib en een gemiddelde stroomsnelheid van 0.40 m/s zijn echter golven nodig van ongeveer 4 m om erosie onder de pijp op te wekken. In het desbetreffende gebied is de overschrijdingskans van dergelijke golfhoogtes 2%.

Bijkomende factoren zoals

- een stroomsnelheid die niet loodrecht maar scheef op de pijp staat,
- een grotere ruwheid van de prototype pijp,

hebben tot gevolg dat de stroomsnelheid waarbij erosie op zal treden hoger is dan de hierboven bepaalde snelheden.

6. Stroming rond pijpleidingen

6.1 Algemeen

Het ingraven van pijpleidingen is enerzijds afhankelijk van het bodemmateriaal, anderzijds van het stroombeeld rond de pijp. Kennis van dit stroombeeld geeft inzicht in de parameters die bepalend zijn voor de erosie.

Het stroombeeld rond een pijp nabij de bodem is globaal besproken in paragraaf 4.3.1 en 4.3.2. In paragraaf 5.9 zijn zijdelings verschillende aspecten van het stroombeeld besproken zoals:

- het scheidingsvlak van water dat over en water dat onder de pijp doorstroomt (paragraaf 5.9.1),
- de loslaatpunten van de stroming op de pijp (paragraaf 5.9.5),
- turbulentie bij het bed veroorzaakt door het zog achter de pijp (paragraaf 5.9.5),
- invloed van de ruwheid van de pijp (paragraaf 5.9.5).

In dit hoofdstuk zal het stroombeeld rond een pijp zowel ver van een wand als in de nabijheid van een wand in zijn totaliteit besproken worden.

6.2 Stroombeeld rond een pijp

6.2.1 Stroombeeld rond een pijp ver van de wand

Het stroombeeld rond een pijp is sterk afhankelijk van het Re-getal van de pijp (Tritton [1977]):

$$Re_{pijp} = \frac{V \phi}{\nu} \quad (6.1)$$

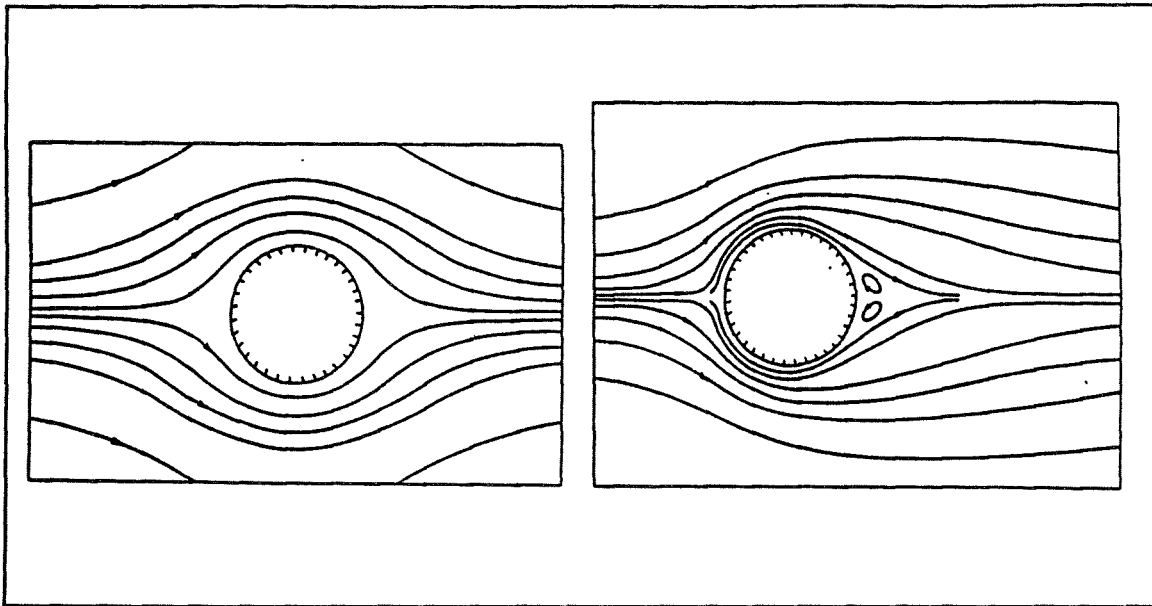
waarin V : stroomsnelheid
 ϕ : pijpdiаметer
 ν : kinematische viscositeit

Re-getal $\ll 1$

De stroming vloeit als het ware om de pijp heen. Boven- en benedenstrooms van de pijp zijn de stroomlijnen volledig symmetrisch (figuur 6.1).

Re-getal > 4

Aan de benedenstroomse zijde laat de stroom de pijp los. Er ontstaan twee ingesloten wervels dicht tegen de pijp aan (figuur 6.1).



Figuur 6.1 Stroomlijnen rond een pijp voor $Re \ll 1$ en $Re \approx 10$ (Tritton [1977])

Re-getal > 40

Het punt waar de stroming de pijp loslaat trekt verder naar voren (bovenstrooms). Voor een Re-getal oplopend van 20 tot 100 vermindert de hoek van het loslaatpunt van de stroming (het stagnatiepunt aan de voorzijde van de pijp is dan als 0° aangenomen) van 135° tot 110° (Justesen [1988]).

De stroom benedenstrooms van de pijp wordt instabiel. Er ontstaat een 'von Karman wervelstraat' waar om en om aan beide zijde van het zog regelmatig wervels ontstaan. Hoe hoger het Re-getal hoe dichter bij de pijp de wervels ontstaan.

Re-getal > 200

De wervels worden onregelmatig en instabiel (drie-dimensionaal). Het zog wordt volledig turbulent.

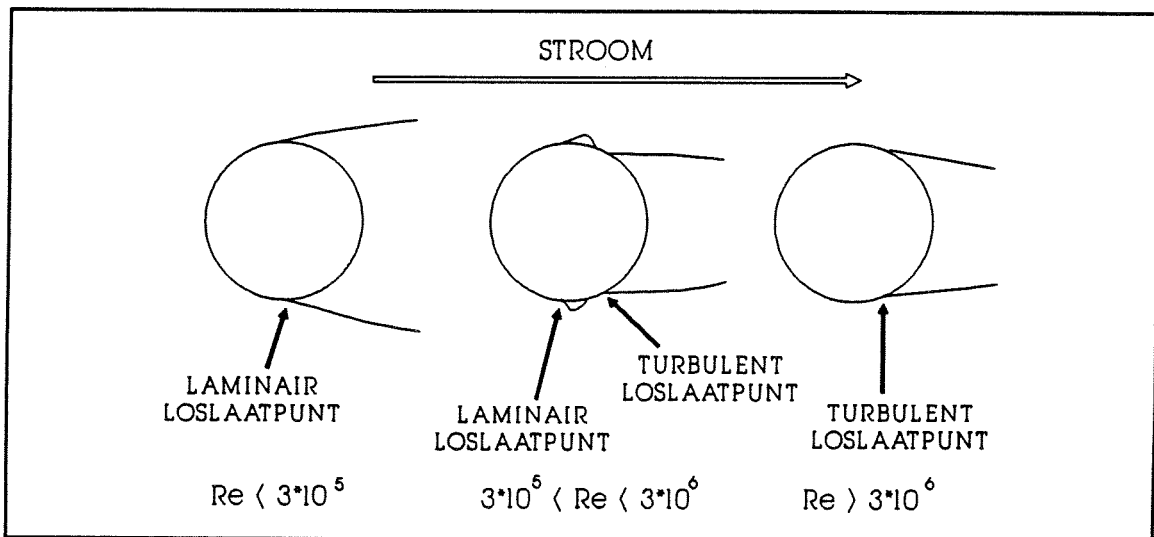
Re-getal > 400

Het zog wordt nog instabieler. Ook de wervels zelf worden in dit stadium turbulent. De stroming die langs de pijp trekt vormt een laminaire grenslaag op de pijp. Deze laminaire grenslaag is tot voorbij het punt waar de stroming de pijp loslaat laminair. Op enige afstand achter de pijp wordt deze turbulent.

Bij een verder oplopend Re-getal blijft het zog turbulent en trekken de loslaatpunten verder naar voren (bovenstreams). Het punt waar de laminaire grenslaag turbulent wordt trekt steeds meer naar de pijp toe.

Re-getal $\approx 3 \cdot 10^5$

De laminaire grenslaag wordt direct na het loslaatpunt turbulent. De turbulente stroming maakt weer contact met de pijp, maar laat even later (een klein stukje verder op de pijp) weer los (figuur 6.2). Het zog wordt in dit stadium smaller omdat het uiteindelijke loslaatpunt meer naar achteren (benedenstreams) ligt. Het gevolg hiervan is dat de weerstandscoefficiënt van de pijp, C_D , een plotselinge daling vertoont. Het bijbehorende Re-getal wordt het kritische Re-getal genoemd.



Figuur 6.2 Loslaatpunt van de stroming voor een oplopend Re-getal

Re-getal $> 3 \cdot 10^6$

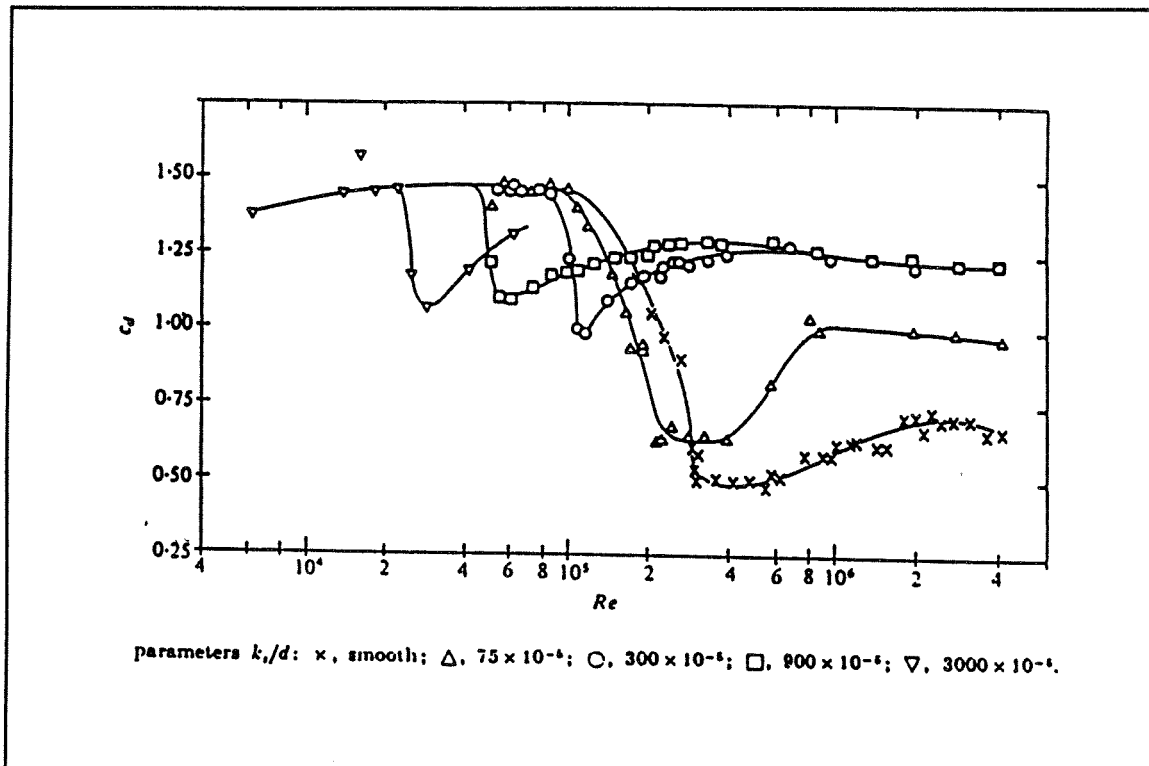
De grenslaag is direct op de pijp al turbulent. Door het turbulente karakter van de grenslaag kan de stroming de pijp makkelijker en verder over het oppervlak volgen (figuur 6.2). Het punt waar deze turbulente grenslaag de pijp loslaat bevindt zich meer naar achteren op de pijp dan bij de laminaire grenslaag. Het zog wordt hierdoor een stuk smaller.

Bij nog hogere Re-getallen trekt ook het turbulente loslaatpunt weer verder naar voren waardoor het zog weer langzaam breder wordt.

6.2.2 Stroombeeld rond een ruwe pijp ver van de wand

Een ruwere pijp heeft het gevolg dat de grenslaag op de pijp eerder turbulent wordt.

Achenbach en Heinecke [1981] onderzochten de invloed van de ruwheid van de pijp ($r/\phi = \text{klein tot } r/\phi = 30 \cdot 10^{-3}$) op de weerstandscoefficiënt, C_D , en daarmee op de loslaatpunten van de stroming. Wanneer de pijp ruwer wordt is het kritische Re-getal (waarbij de C_D plotseling vermindert) kleiner terwijl de daling van C_D zelf ook minder groot is (figuur 6.3). Het effect hiervan is dat voor een ruwere pijp het loslaatpunt minder ver naar achteren trekt wanneer het kritische Re-getal bereikt is.



Figuur 6.3 Weerstandsfactor van de pijp, C_D , als functie van het Re-getal (Achenbach en Heinecke [1981])

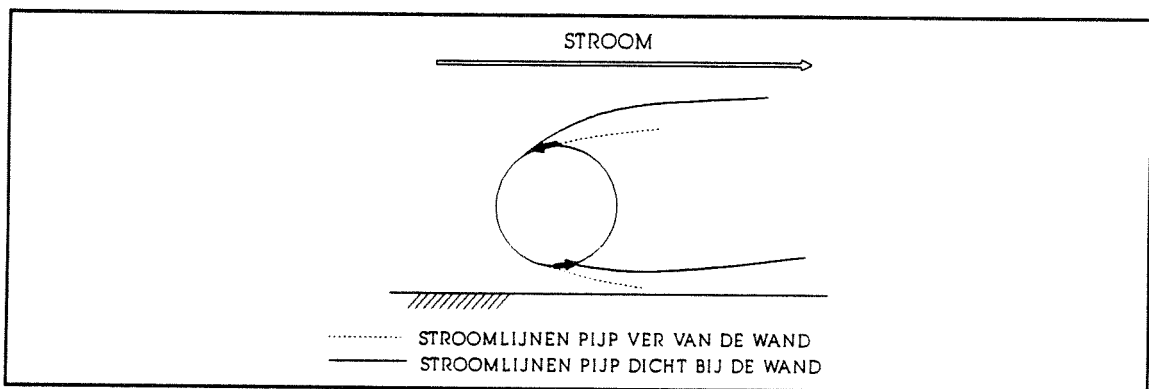
Wanneer het kritische Re-getal nog niet bereikt is ligt het loslaat punt van de stroming tussen de 90° en de 110° voor de verschillende ruwheden. In het geval dat het kritische Re-getal bereikt is trekt het loslaatpunt bij een gladde pijp meer naar achteren (140°) dan bij een ruwe pijp (110°).

6.2.3 Invloed van een wand op het stroombeeld rond een pijp

Wanneer een pijp zich vlak boven of tegen een wand bevindt zal het stroombeeld niet meer symmetrisch zijn aan de boven- en onderzijde van de pijp. Het stagnatiepunt van de stroming aan de voorkant van de pijp zal verschuiven. De loslaatpunten van de stroming rond de pijp zullen eveneens verschuiven. Het zog achter de pijp is niet meer symmetrisch en raakt mogelijk de wand. In het geval van een erodeerbare wand (bodem) zal dit dus ook invloed hebben op de ontgroningen.

- Stagnatiepunt, scheidingsvlak en loslaatpunten van de stroming

Bearman en Zdravkovich [1978] onderzochten de invloed van een wand op het stroombeeld rond de pijp door middel van het meten van drukken in het oppervlak van de pijp ($\phi = 1.9\text{cm}$, $Re = 4.8 \cdot 10^4$). Zij vonden dat het stagnatiepunt van de stroming meer naar de wandkant van de pijp schuift. Door middel van de visualisering van de stroming ($\phi = 5\text{cm}$, $Re = 2.5 \cdot 10^4$) toonden zij aan dat het loslaatpunt van de stroming aan de wandkant van de pijp evenveel naar achteren (benedenstrooms) trekt als het loslaatpunt aan de vrije zijde van de pijp naar voren (bovenstrooms) trekt (figuur 6.4).



Figuur 6.4 Verschuiving van de loslaatpunten van de stroming rond een pijp veroorzaakt door een naburige wand

Jensen en Sumer [1986] bepaalden de plaats van het stagnatiepunt aan de hand van de dikte van de grenslaag op de pijp (visuele waarnemingen). De plaats waar de grenslaag een dikte van nagenoeg nul heeft is het stagnatiepunt. Zij gebruikten voor hun proeven een enkele pijp ($\phi = 3\text{ cm}$) en een enkele stroomsnelheid ($V = 0.20\text{ m/s}$). Bij een pijp oneindig ver van de wand ligt dit punt zoals te verwachten is op 0° , ofwel op de hoogte van het hart van de pijp. Wanneer de opening tussen de pijp en de wand echter kleiner wordt verschuift het stagnatiepunt meer naar de wandkant van de pijp:

$$\frac{\text{opening}}{\phi} = \infty \quad \rightarrow \quad \text{hoek stagnatiepunt } 0^\circ \quad (6.2)$$

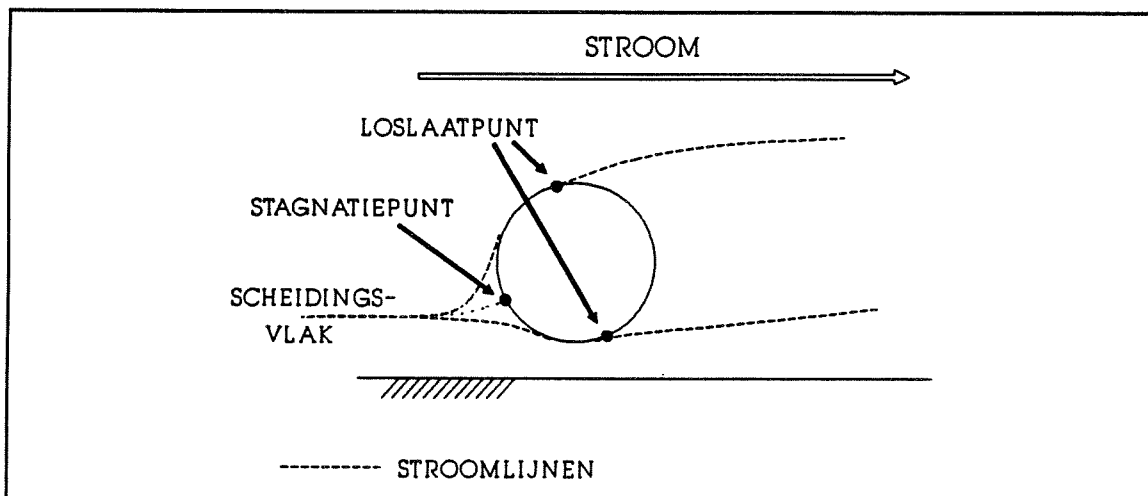
$$\frac{\text{opening}}{\phi} = 2 \quad \rightarrow \quad \text{hoek stagnatiepunt } -10^\circ \quad (6.3)$$

$$\frac{\text{opening}}{\phi} = 0.1 \quad \rightarrow \quad \text{hoek stagnatiepunt } -24^\circ \quad (6.4)$$

In de proeven van Jensen en Sumer verschuiven de loslaatpunten op dezelfde manier als Bearman en Zdravkovich dat beschreven.

Van Meerendonck en Van Roermund [1981] bepaalden niet het stagnatiepunt maar het scheidingsvlak van water wat over, respectievelijk onder de pijp doorstroomt.

De definitieschets van zowel het stagnatiepunt als het scheidingsvlak is gegeven in figuur 6.5. In de figuur is te zien dat het stagnatiepunt niet op dezelfde hoogte hoeft te liggen als het scheidingsvlak. Alleen wanneer de pijp oneidig ver van de wand is zal dit wel het geval zijn. Dichter bij de wand zal het stagnatiepunt meer naar het midden van de pijp liggen dan het scheidingsvlak.



Figuur 6.5 Definitie stagnatiepunt en scheidingsvlak van een stroming rond een pijp vlak bij een wand

Van Meerendonck en Van Roermund gebruikten een verticaal bellenscherm om de hoogte van het scheidingsvlak vast te stellen. Daarnaast berekenden zij de hoogte van het scheidingsvlak door het debiet onder de pijp te meten (d.m.v. Laser Doppler snelheidsmetingen) en vervolgens, door integratie van een ongestoord snelheidsprofiel, de hoogte te bepalen waaronder ditzelfde debiet stroomt.

In de proeven van Van Meerendonck en Van Roermund wordt gebruik gemaakt van een reeds geërodeerde bodem waarbij de hoogte van de pijp steeds verminderd wordt totdat de bodem van de ontgrondingskuil bereikt is.

Voor een pijp ($\phi = 5$ cm, $V = 0.17$ m/s) die naar het bed toe zakt geldt dat het scheidingsvlak in eerste instantie omlaag trekt tot $0.26 \cdot \phi$ onder het hart van de pijp (onderkant pijp 1.3 cm boven oorspronkelijke vlakke bed niveau). Bij het verder zakken van de pijp schuift het scheidingsvlak weer enigszins omhoog naar $0.2 \cdot \phi$ onder het hart van de pijp (onderkant pijp op oorspronkelijk vlakke bed niveau). Wanneer de pijp in de erosiekuil zakt trekt het scheidingsvlak nog verder omhoog.

- Het zog achter de pijp

Het zog achter de pijp is turbulent. In het geval van een niet-cohesieve, zuivere zandbodem zorgt deze turbulentie voor de erosie benedenstrooms van de pijp.

Sumer, Jensen, Mao en Fredsoe [1988] toonden aan dat de turbulentie in het zog eerder voor erosie zorgt dan de verhoogde stroomsnelheid onder de pijp. Door de 'ongestoorde' Shieldsparameter, θ , ($\theta = V_* / (g(s-1)D)$), met V_* de schuifspanningssnelheid, $s = \rho_s / \rho$ en D de korreldiameter van het bodemmateriaal) voldoende laag te houden (0.018) en de opening voldoende groot werden alle effecten naast het loslaten van de wervels minimaal gehouden. Er vond duidelijk benedenstrooms van de pijp een ontgroning plaats.

Uit snelheidsmetingen vlak boven een vlak bed bleek dat er een piek in de standaardafwijking van de snelheden (σ , een maat voor de turbulentie) zat op een afstand van 1.2 à $2.5 \cdot \phi$ achter het hart van de pijp.

$$\sigma = \sigma_v = \sqrt{\overline{(v')^2}} \quad (6.5)$$

$$v' = v_i - \bar{v} \quad (6.6)$$

waarin	σ	: standaardafwijking van de snelheid
	v'	: afwijking van de momentane snelheid op de gemiddelde snelheid
	$\frac{v_i}{v}$: instantane snelheid
	\bar{v}	: gemiddelde snelheid

Uit dezelfde metingen bleek eveneens dat de lengte van de turbulente zone achter de pijp vlak boven het bed afhankelijk is van de opening onder de pijp:

$$\frac{\text{opening}}{\phi} = 0.6 \quad \rightarrow \quad \frac{\text{turbulente zone}}{\phi} \approx 8 \quad (6.7)$$

waarin	opening	: opening tussen de pijp en de wand
	ϕ	: pijpdiameter

Jensen, Sumer, Jensen en Fredsoe [1988] voerden eveneens snelheidsmetingen uit vlak boven een bed achter een pijp, maar dit keer boven een geërodeerd bed. Zij vonden een piek in de waarde van σ vlak boven het bed op een afstand van 2 à $4 \cdot \phi$ achter het hart van de pijp.

6.3 Stroombeeld rond een pijp met een spoiler vlak boven een bed

De aanwezigheid van een spoiler op een pijp heeft in twee opzichten invloed op het stroombeeld rond de pijp:

- het geblokkeerde oppervlak is groter waardoor het debiet dat onder de pijp doorstroomt toeneemt,
- het loslaatpunt van de stroming aan de bovenkant van de pijp wordt gefixeerd (het belangrijkste effect van dit gefixeerde loslaatpunt is een verminderde kans op het vibreren van de pijp)

In diverse proeven met een niet-cohesieve bodem is aangetoond dat de ontgrondingskuilen onder een pijp met een spoiler aanzienlijk dieper zijn dan onder een pijp zonder een spoiler. Bovendien wordt de erosie door de spoiler versneld.

- Hulsbergen [1984] → modelproeven
- Hulsbergen [1986] → modelproeven op prototype schaal
- Waterloopkundig Laboratorium [1986] → modelproeven op prototype schaal
- Waterloopkundig Laboratorium [1988] → prototype proeven
- Submarine Pipeline Spoiler B.V. [1990] → prototype proeven.

Door middel van een numeriek model is het stroombeeld rond een pijp met een spoiler vergeleken met dat van een pijp zonder spoiler ($\phi = 0.5$ m, $V = 0.70$ m/s, waterdiepte 1.67, bodemmateriaal $D_{50} = 0.22$ mm, Van Beek, Bijker en Wind [1988]). Uit dit model bleek dat de stroomsnelheden onder de pijp ongeveer 30% vergroot werden door de aanwezigheid van de spoiler. Deze grotere stroomsnelheid werd veroorzaakt door het grotere drukverschil tussen de voor- en achterzijde van de pijp. Naast een verhoogde stroomsnelheid onder de pijp werd de turbulentie ongeveer drie maal versterkt.

7. Experimenten stroming rond pijpleidingen op of vlak boven de bodem

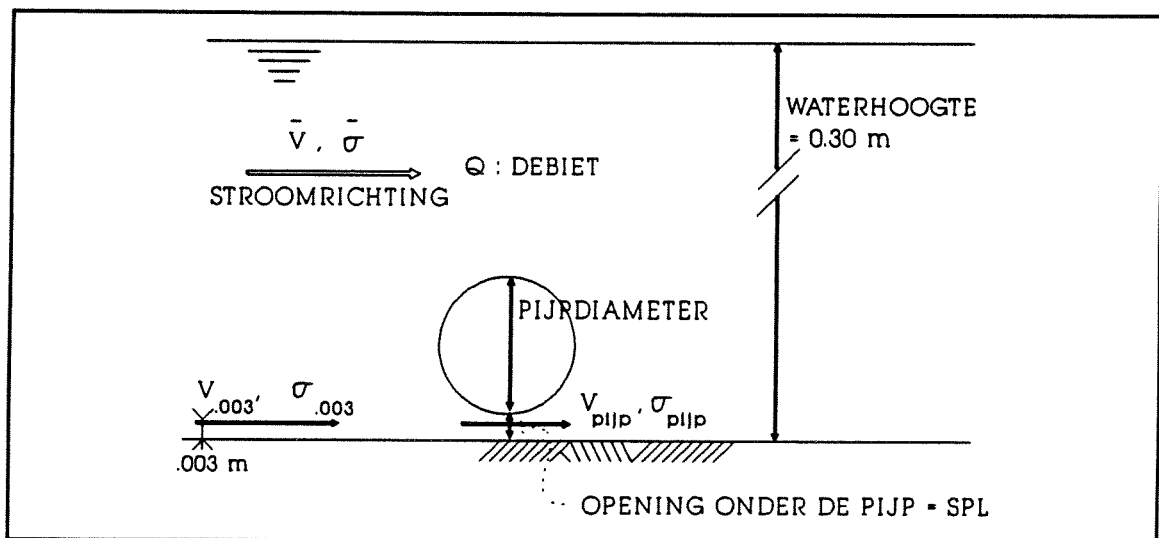
7.1 Inleiding

Bij de erosie onder een pijp op een niet-cohesieve bodem gaat men er (terecht) van uit dat de verhoogde stroomsnelheid onder de pijp de erosie veroorzaakt. In het geval van een pijp op een cohesieve bodem ontstaat de erosie echter veelal achter de pijp. Of deze erosie veroorzaakt wordt door de verhoogde stroomsnelheid of door een plaatselijk verhoogde turbulentie is niet direct te zeggen.

Op een zuivere zandbodem (niet-cohesief) is duidelijk geworden dat een spoiler op de pijp de erosie versnelt en versterkt (Hulsbergen [1984][1986]). Er wordt van uit gegaan dat een dergelijke spoiler een maximaal effect heeft wanneer deze loodrecht omhoog op het midden van de pijp gemonteerd zit. De invloed van een enigszins scheef gemonteerde spoiler (niet bovenop de pijp maar meer naar de zijkant) is niet bekend.

In dit hoofdstuk worden snelheidsmetingen beschreven rond modelpijpjes. Vlak boven de bodem worden snelheden en turbulenties gemeten onder en achter een pijp met verschillende diameters en op verschillende hoogtes boven het bed. De invloed van de stand van de spoiler op het stroombeeld wordt bekeken door het meten van snelheden en turbulenties in een heel vlak achter de pijp.

In figuur 7.1 is een schematisatie van de meetsectie gegeven met daarbij de in dit hoofdstuk gebruikte parameters.

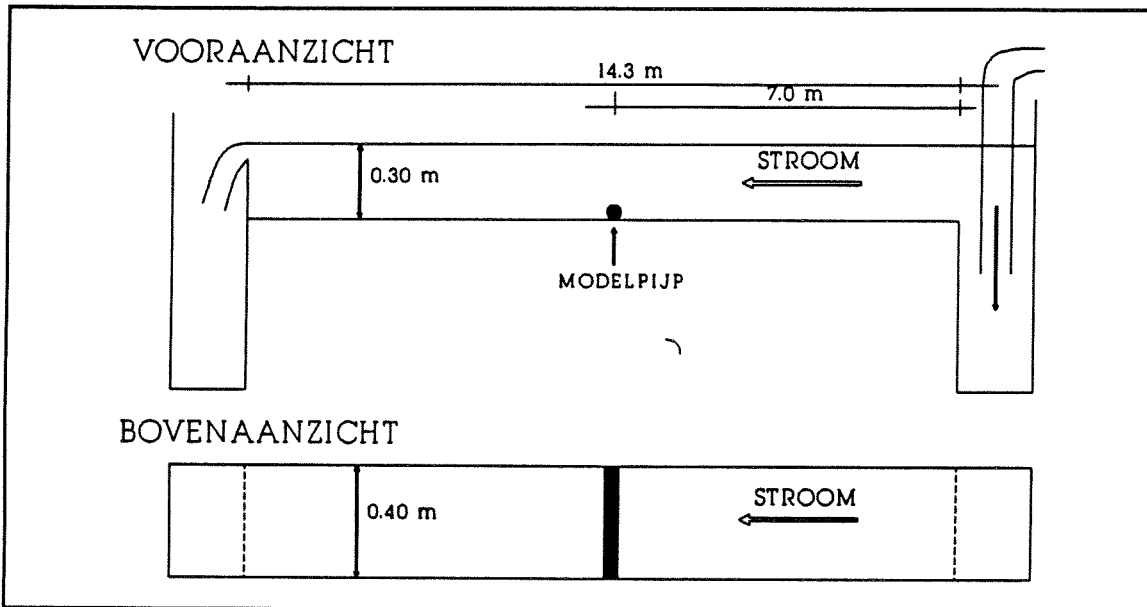


Figuur 7.1 Schematisatie van de meetsectie met de gebruikte parameters

7.2 Experimentele opzet

De proeven zijn uitgevoerd in een stroomgoot van het Laboratorium voor Vloeistof Mechanica van de TU Delft. De hier gebruikte goot is een andere dan de in de vorige hoofdstukken beschreven stroomgoten (stroomgoot A en B).

De stroomgoot is 14.3 m lang, 0.4 m breed en 0.4 m hoog. De bodem van de goot bestaat uit PVC platen met een zeer geringe ruwheid. De waterdiepte in de goot wordt constant gehouden op 0.30 m. De opstelling en de afmetingen van de goot staan vermeld in figuur 7.2.



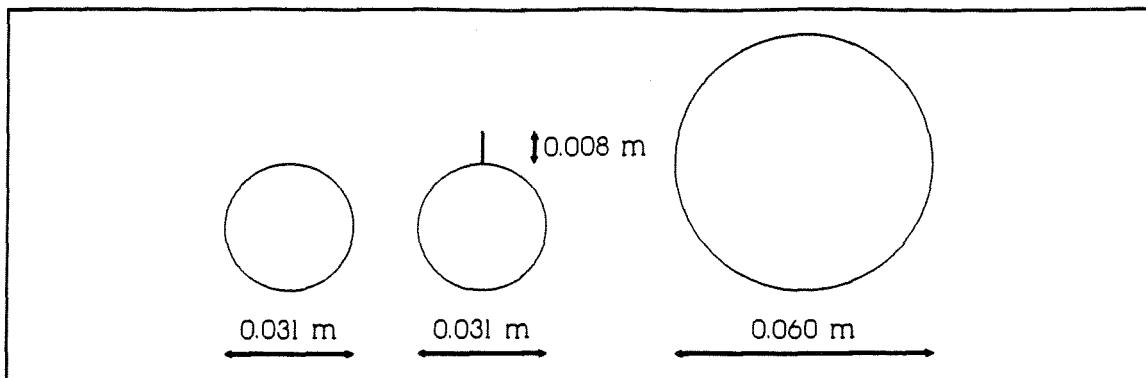
Figuur 7.2 Opstelling stroomgoot

Het modelpijpe is op 7 m vanaf het begin van de goot gemonteerd. Het pijpe wordt dwars op de stroming aangebracht en beslaat de volle breedte van de goot. De hoogte van het pijpe kan gevarieerd worden. Voor de modelpijpes is gebruik gemaakt van 3 gladde PVC pijpes (dezelfde als die gebruikt zijn in de erosieproeven, zie paragraaf 5.2) waarvan de afmetingen gegeven zijn in figuur 7.3.

7.3 Instrumentatie

7.3.1 Snelheden

Voor het meten van de snelheden is gebruik gemaakt van een Laser Doppler snelheidsmeter. Met de Laser Doppler is het mogelijk om in twee richtingen tegelijk de snelheid te meten.



Figuur 7.3 Dwarsdoorsnede modelpijpjes

Vlak boven de bodem kan slechts in één richting, namelijk horizontaal, de snelheid gemeten worden. Vanaf 9 mm vanaf de bodem kan zowel horizontaal als verticaal de snelheid gemeten worden.

Het voordeel van de Laser Doppler snelheidsmeter is dat de apparatuur buiten de goot opgesteld kan worden zodat de stroming zelf niet gestoord wordt. Alleen de laserstralen moeten vrije doorgang hebben door de goot.

7.4 Analyse snelheidsmetingen

Door middel van een aan de Laser Doppler geschakelde PC wordt per meting gedurende 1 minuut met een frequentie van 50 Hz de snelheid gemeten. Op deze manier worden 3000 snelheidsmetingen verkregen. Hiervan wordt de gemiddelde snelheid bepaald:

$$V = \frac{\sum v_i}{n} \quad (7.1)$$

waarin v_i : instantane snelheidsmeting ($i = 1$ tot n)
 n : aantal snelheidsmetingen (3000)

Van de metingen wordt eveneens de standaardafwijking van de snelheid bepaald welke een maat is voor de turbulentie:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (v_i - V)^2}{n}} \quad (7.2)$$

waarin V : de gemiddelde snelheid

7.5 Beschrijving meetresultaten

7.5.1 Snelheidsprofielen

Voorafgaande aan de snelheidsproeven rond de pijpjes zijn de snelheidsprofielen gemeten in ongestoorde situatie (zonder pijpje).

In de goot is telkens de waterhoogte constant gehouden terwijl het debiet gevarieerd wordt. Er is gebruik gemaakt van een drietal debieten; 12, 30 en 60 l/s (tabel 7.1). Met een gootbreedte van 0.40 m en een constante waterdiepte van 0.30 m levert dit gemiddelde stroomsnelheden op van respectievelijk 0.10, 0.25 en 0.50 m/s.

Bij de verwerking van de snelheidsmetingen rond de pijpjes worden de stroomsnelheden en de standaardafwijkingen van de snelheden dimensieloos gemaakt door ze te delen door respectievelijk de ongestoorde gemiddelde stroomsnelheid zoals hierboven beschreven en de ongestoorde gemiddelde standaardafwijking van de snelheid. Voor de ongestoorde gemiddelde standaardafwijking van de snelheid wordt aangenomen dat deze 10% is van de gemiddelde stroomsnelheid (Hinze [1975]) (tabel 7.1).

Bij de metingen op 3 mm boven het bed wordt gebruik gemaakt van de ongestoorde snelheden en standaardafwijking van de snelheden op 3 mm boven het bed. Hierbij worden de op die hoogte gemeten waarden gebruikt. Deze waarden staan eveneens in tabel 7.1 vermeld.

Tabel 7.1 Gebruikte debieten met bijbehorende gemiddelde stroomsnelheid en standaardafwijking van de snelheid.

debiet [l/s]	gemiddelde snelheid [m/s]	gemiddelde stand. afw. [m/s]	snelheid 3 mm boven bed [m/s]	stand. afw. 3 mm boven bed [m/s]
Q	\bar{V}	$\bar{\sigma}$	$V_{.003}$	$\sigma_{.003}$
12	0.10	0.010	0.07	0.017
30	0.25	0.025	0.16	0.030
60	0.50	0.050	0.31	0.052

7.5.2 Stroomsnelheden vlak boven het bed

Bij de erosieproeven op het slibrijke zand is opgevallen dat de erosie niet onder maar enkele centimeters (≈ 3 cm) achter het hart van de pijp begint. Of deze erosie

veroorzaakt wordt door de stroomsnelheid of de turbulentie is niet duidelijk. Om hier enig inzicht in te krijgen zijn op 3 mm boven het bed horizontale snelheden gemeten voor:

- verschillende stroomsnelheden (0.10, 0.25, 0.50 m/s)
- verschillende openingen onder de pijp (0.0, 0.4, 0.8 cm)
- verschillende pijpdiameters (3.1, 6.0 cm).

In Bijlage E1 zijn de resultaten gegeven in de vorm van dimensieloze snelheden en dimensieloze standaardafwijkingen van snelheden. Deze beide dimensieloze waarden zijn als volgt berekend:

$$V [-] : V_n = \frac{V_{hor}}{\bar{V}} \quad (7.3)$$

$$\sigma [-] : \sigma_n = \frac{\sigma_{hor}}{\sigma} \quad (7.4)$$

waarin

V_n	: dimensieloze stroomsnelheid
σ_n	: dimensieloze standaard afwijking van de snelheid (σ)
\bar{V}	: gemiddelde stroomsnelheid
σ	: gemiddelde σ
V_{hor}	: horizontale stroomsnelheid
σ_{hor}	: horizontale σ

Het dimensieloos maken van de snelheden door middel van de over de totale hoogte gemiddelde snelheid is een gebruikelijke en betrouwbare manier; de totale gemiddelde snelheid is eenvoudig en eenduidig te bepalen.

Echter wanneer de erosie bekeken wordt is het beter om te kijken in hoeverre de snelheden vlak bij het bed versterkt of vertraagd worden, oftewel de snelheid in de nabijheid van de pijp te vergelijken met de ongestoorde snelheden (ver van de pijp vandaan) op hetzelfde niveau.

In tabel 7.1 zijn zowel de (ongestoorde) gemiddelde snelheden (\bar{V}) als de ongestoorde snelheden op 3 mm boven het bed ($V_{.003}$) gegeven. De in Bijlage E1 gegeven dimensieloze snelheden kunnen omgerekend worden naar de (eveneens dimensieloze) verhouding van de snelheden onder de pijp en de ongestoorde snelheden (ver voor de pijp) op hetzelfde niveau.

$$\begin{array}{l} \text{dimensieloze snelheid} \\ \text{(d.m.v. gemiddelde snelheid)} \end{array} : \frac{V}{\bar{V}} = V_n \quad (7.5)$$

dimensieloze snelheid
(d.m.v. ongestoorde snelheid

3 mm bovenbed)

$$: \frac{V}{V_{.003}} = V_n * \frac{\bar{V}}{V_{.003}} \quad (7.6)$$

waarin V : stroomsnelheid
 \bar{V} : gemiddelde stroomsnelheid
 V_n : dimensieloze stroomsnelheid (d.m.v. de gemiddelde snelheid)
 $V_{.003}$: ongestoorde stroomsnelheid 3 mm boven het bed

Op dezelfde wijze kan de dimensieloze standaardafwijking omgerekend worden.

De factoren $\bar{V}/V_{.003}$ (voor de snelheid) en $\bar{\sigma}/\sigma_{.003}$ (voor de standaardafwijking van de snelheid) zijn voor de verschillende debieten gegeven in tabel 7.2.

Tabel 7.2 Omrekeningsfactoren voor de dimensieloze snelheid naar de verhouding van de snelheid onder de pijp en de snelheid ver voor de pijp op hetzelfde niveau.

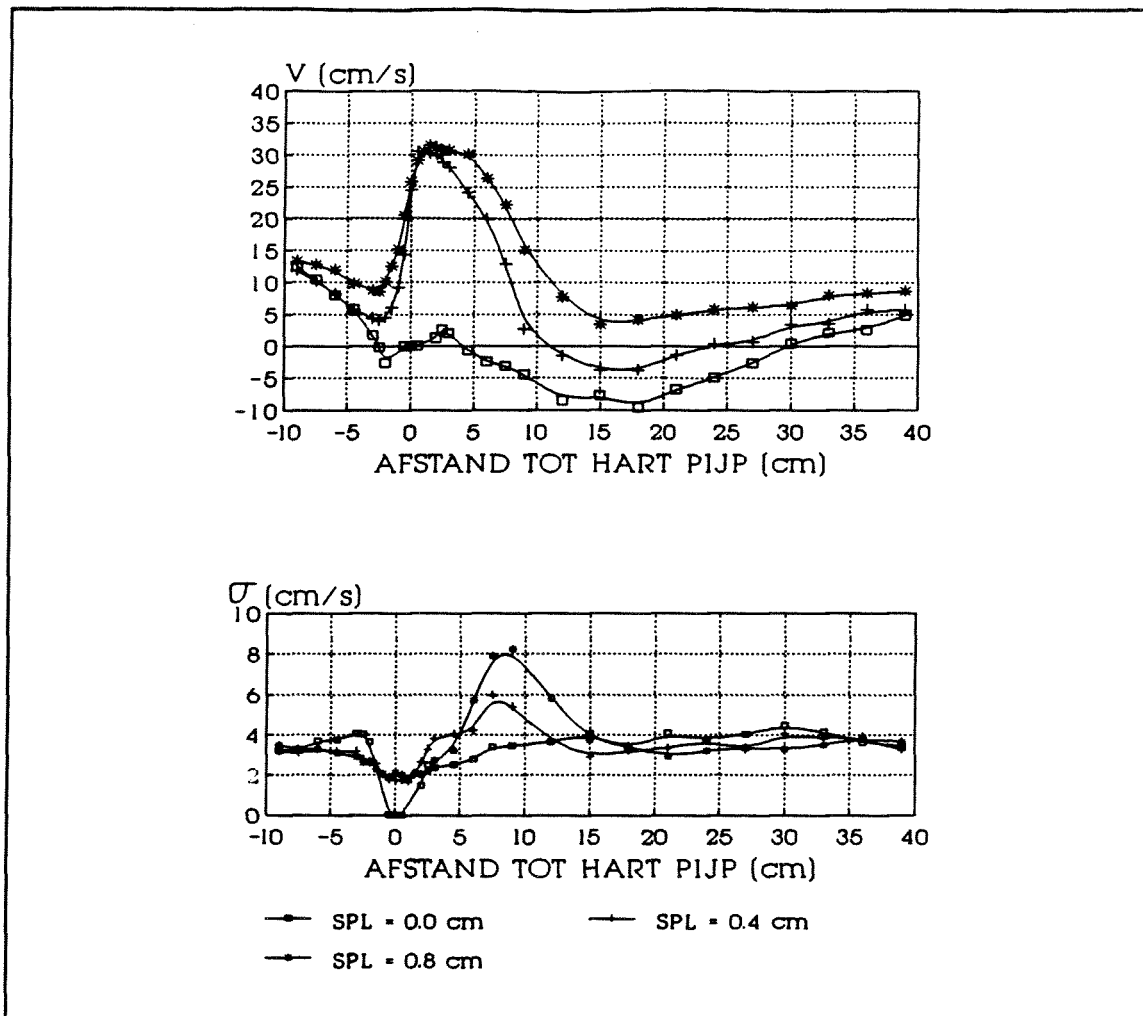
debiet [l/s]	$\bar{V}/V_{.003}$ [-]	$\bar{\sigma}/\sigma_{.003}$ [-]
12	1.43	0.59
30	1.56	0.83
60	1.61	0.96

Een voorbeeld van een van de metingen waarbij gebruik gemaakt wordt van de oorspronkelijke niet dimensieloze meetwaarden is gegeven in figuur 7.4.

In tabel 7.3 zijn de waarden gegeven van V_{max} en σ_{max} met de bijbehorende afstanden vanaf het hart van de pijp waar deze optreden. Verder is de verhouding gegeven van V_{max} en σ_{max} met respectievelijk $V_{.003}$ en $\sigma_{.003}$. De daarbij gebruikte waarden voor de ongestoorde situatie zijn gegeven in de tabel 7.1.

V :

Bij de pijp die contact maakt met het bed zijn duidelijk de beide wervels te zien (bijlage E1) boven- en benedenstrooms van de pijp direct tegen de pijp aan (zie ook figuur 4.1 paragraaf 4.3.1). Deze beide wervels zorgen in eerste instantie voor het begin van erosie onder de pijp. De snelheden vlak boven het bed veroorzaakt door de wervels zijn echter zeer laag ($0.1 \text{ à } 0.2 * \bar{V}$, ofwel $0.14 \text{ à } 0.32 * V_{.003}$).



Figuur 7.4 Snelheid en standaardafwijking van de snelheid op 3 mm boven het bed ($\phi = 3.1$ cm, debiet = 30 l/s, SPL = opening onder de pijp)

Wanneer er een opening onder de pijp aanwezig is (0.4 of 0.8 cm) blijkt dat de maximale stroomsnelheid, V_{\max} , niet onder maar achter het hart van de pijp plaatsvindt. Zowel voor de kleine pijp ($\phi = 3.1$ cm) als voor de grote pijp ($\phi = 6.0$ cm) ligt V_{\max} 0.5 à 1.5 cm benedenstrooms van het hart van de pijp.

Voor V_{\max} geldt globaal:

- voor de opening van 0.8 cm is V_{\max} enigszins lager dan voor de opening van 0.4 cm,
- de verhouding van V_{\max} en $V_{.003}$ is vrijwel gelijk voor de verschillende stroomsnelheden,
- een grotere pijp levert een grotere V_{\max} .

Voor de plaats waar V_{\max} optreedt geldt:

- voor de kleine pijp: wanneer de opening onder de pijp groter wordt schuift de plaats waar V_{\max} optreedt naar achteren,

- voor de grote pijp: wanneer de opening onder de pijp groter wordt blijft de plaats waar V_{max} optreedt gelijk of schuift naar voren.

Tabel 7.3 V_{max} [cm/s] en σ_{max} [cm/s] voor $\phi = 3.1$ en 6.0 cm, een opening onder de pijp van 0.4 en 0.8 cm en debieten van 12 , 30 en 60 l/s.

V_{max} [cm/s] EN AFSTAND VANAF HART PIJP [cm]				
	pijp 3.1 cm		pijp 6.0 cm	
	opening 0.4 cm	opening 0.8 cm	opening 0.4 cm	opening 0.8 cm
DEBIET 12 l/s				
V_{max}	13.0	12.8	17.1	15.8
$V_{max} / V_{.003}$	1.9	1.9	2.5	2.3
afstand vanaf pijp	0.5	1.0	1.5	1.0
DEBIET 30 l/s				
V_{max}	30.5	31.5	38.3	36.9
$V_{max} / V_{.003}$	1.9	2.0	2.4	2.3
afstand vanaf pijp	0.5	1.5	1.0	1.0
DEBIET 60 l/s				
V_{max}	64.2	63.7	80.4	75.6
$V_{max} / V_{.003}$	1.9	1.7	2.1	2.3
afstand vanaf pijp	0.5	1.0	0.5	0.5
σ_{max} [cm/s] EN AFSTAND VANAF HART PIJP [cm]				
DEBIET 12 l/s				
σ_{max}	2.4	3.3	2.4	2.9
$\sigma_{max} / \sigma_{.003}$	1.4	1.9	1.4	1.7
afstand vanaf pijp	6.0	7.5	9.0	12.0
DEBIET 30 l/s				
σ_{max}	6.0	8.2	5.8	7.4
$\sigma_{max} / \sigma_{.003}$	2.0	2.7	1.9	2.5
afstand vanaf pijp	7.5	9.0	12.0	18.0
DEBIET 60 l/s				
σ_{max}	14.4	14.1	15.9	15.9
$\sigma_{max} / \sigma_{.003}$	2.8	2.7	3.1	3.1
afstand vanaf pijp	9.0	9.0	9.0	15.0

Wanneer de pijp nog contact maakt met het bed ofwel wanneer de opening onder de pijp nog klein is bevindt zich op enige afstand benedenstrooms van de pijp een gebied waar de snelheden negatief (naar de pijp toe gericht) zijn. Deze negatieve snelheden worden veroorzaakt door een achter de pijp gevormde neer. De afmetingen van de

pijp hebben invloed op deze neer:

- een grotere pijp geeft grotere negatieve snelheden,
- het gebied waar de negatieve snelheden optreden is groter voor een grotere pijp,
- voor de kleine pijp vinden bij een opening van 0.8 cm geen negatieve snelheden meer plaats, terwijl voor de grote pijp bij alle gebruikte openingen negatieve snelheden gevonden worden.

σ :

Uit de metingen blijkt dat bij een opening onder de pijp van 0.4 cm en met name bij de hogere snelheden een soort dubbele piek aanwezig is in het verloop van σ . De eerste piek bevindt zich op 3 à 4 cm achter het hart van de pijp, de tweede op 7 à 9 cm achter het hart van de pijp.

Bij een grotere opening onder de pijp (0.8 cm) is er over het algemeen maar een enkele piek die:

- groter is dan de beide pieken bij de opening van 0.4 cm,
- verder achter de pijp ligt (9 à 15 cm achter het hart van de pijp) dan de pieken bij de opening van 0.4 cm.

De σ onder en direct achter de pijp is lager dan die in de ongestoorde situatie. Pas enkele centimeters (circa 2 cm) achter de pijp bereikt de σ hetzelfde niveau als de σ in de ongestoorde situatie. De σ bereikt een maximale waarde, σ_{\max} , op 3 of meer cm achter de pijp.

Voor σ_{\max} geldt:

- een grotere opening onder de pijp geeft een grotere σ_{\max} (behalve voor het debiet van 60 l/s),
- σ_{\max} lijkt in mindere mate afhankelijk te zijn van de pijpdiameter,
- een hogere snelheid levert een grotere verhouding van σ_{\max} en $\sigma_{.003}$, ofwel de turbulentie wordt relatief meer versterkt voor een hogere snelheid.

Voor de plaats waar σ_{\max} optreedt geldt:

- bij een grotere opening onder de pijp ligt de σ_{\max} verder naar achteren (behalve voor $\phi = 3.1$ cm en debiet = 60 l/s),
- bij een grotere stroomsnelheid ligt σ_{\max} enigszins verder naar achteren (ook al is dit niet heel duidelijk).

Wat betreft het begin van erosie, die bij de zand-slibbedden enkele cm's achter de pijp optreedt, is het blijkbaar zo dat deze veroorzaakt wordt door de combinatie van een hoge stroomsnelheid en een verhoogde turbulentie. Wanneer alleen de verhoogde stroomsnelheid de erosie zou veroorzaken dan zou de erosie dicht tegen de pijp aan gelegen hebben, immers op 0.5 à 1.5 cm achter het hart van de pijp is de snelheid al maximaal. De turbulentie bereikt pas op 2 à 3 cm achter het hart van de pijp zijn

oorspronkelijke ongestoorde waarde en vertoont over het algemeen vrij snel daarna een plaatselijke maximale waarde (eerste piek).

7.5.3 Invloed van een loodrecht omhoog gerichte vin

De erosie rond pijpen is afhankelijk van de snelheden en turbulenties vlak boven het bed. De invloed van een op de pijp gemonteerde vin is in eerste instantie onderzocht door de snelheden te meten op 3 mm boven het bed. Om een beter algemeen beeld te krijgen van de invloed van de vin op het stroombeeld zijn eveneens horizontale en verticale snelheden gemeten op diverse afstanden van de pijp (van 3 tot 21 cm benedenstrooms van de pijp) en diverse hoogtes boven het bed (0.9 tot 7.5 cm).

- Invloed van de vin op de snelheden vlak boven het bed

In Bijlage E1 zijn de resultaten van de snelheidsmetingen op 3 mm boven het bed gegeven voor:

- verschillende stroomsnelheden (0.10, 0.25 en 0.50 m/s)
- verschillende openingen onder de pijp (.0, 0.4 en 0.8 cm)
- een pijpje van 3.1 cm met een vin van 0.8 cm

Uit de metingen blijkt dat de vin min of meer hetzelfde effect heeft op de snelheden vlak boven het bed als een grotere pijp (paragraaf 7.5.2). In tabel 7.4 zijn de waarden gegeven van V_{\max} en σ_{\max} . De tabel is hetzelfde opgebouwd als tabel 7.3.

Uit tabel 7.4 blijkt dat zowel voor V_{\max} en σ_{\max} als voor de plaats waar deze beide waarden optreden vrijwel hetzelfde geldt als voor de grotere pijp in paragraaf 7.5.2 wanneer deze vergeleken wordt met de kleine pijp zonder vin.

Het meest duidelijke effect van de vin is echter de lengte van het gebied achter de pijp waar V en σ hoger zijn dan in de ongestoorde toestand. Voor een pijp met een vin is dit gebied duidelijk groter dan wanneer er geen vin op de pijp aanwezig is. Met name op een zandige bodem zal dit een gunstig effect hebben op de breedte van de ontgrondingskuil.

Samenvattend geldt voor de pijp met de vin in vergelijking met de pijp zonder vin :

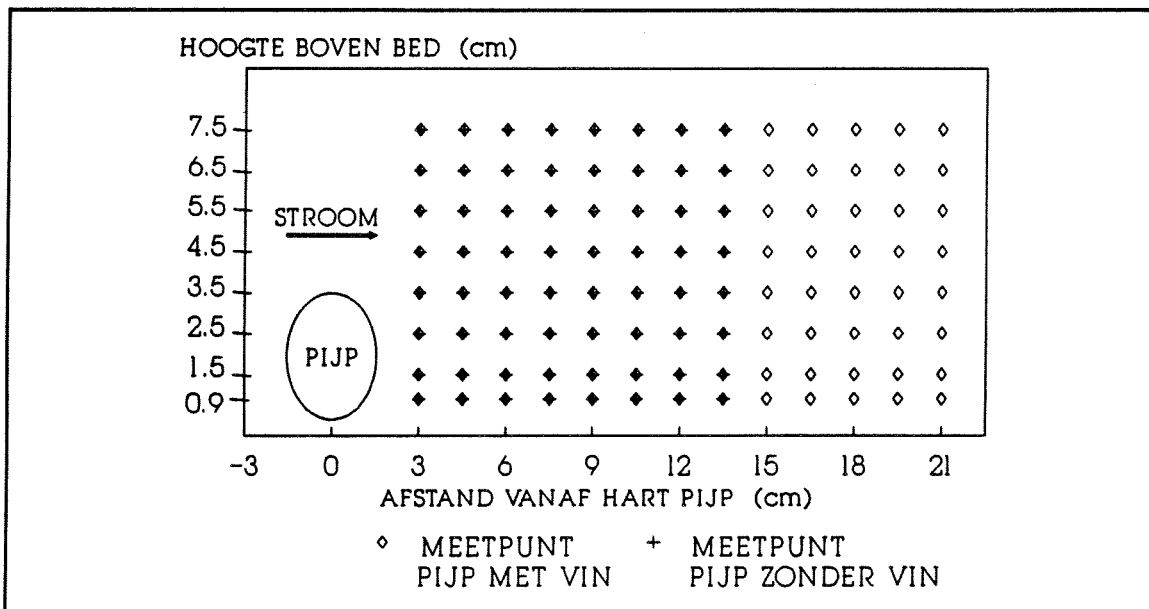
- de maximale snelheid is hoger voor een pijp met een vin,
- σ_{\max} wordt niet (duidelijk) beïnvloed door de aanwezigheid van de vin (alleen voor het debiet 60 l/s),
- de plaats waar de σ_{\max} optreedt ligt voor de pijp met de vin verder achter de pijp,
- het gebied achter de pijp waar een verhoogde V en σ optreedt is voor de pijp met de vin groter.

Tabel 7.4 V_{\max} [cm/s] en σ_{\max} [cm/s] voor $\phi = 3.1$ cm en 3.1 cm met een vin van 0.8 cm, een opening onder de pijp van 0.4 en 0.8 cm en debieten van 12, 30 en 60 l/s.

V_{\max} [cm/s] EN AFSTAND VANAF HART PIJP [cm]				
	pijp 3.1 cm		pijp 3.1 cm + vin	
	opening 0.4 cm	opening 0.8 cm	opening 0.4 cm	opening 0.8 cm
DEBIET 12 l/s				
V_{\max}	13.0	12.8	14.1	14.2
$V_{\max} / V_{.003}$	1.9	1.9	2.0	2.1
afstand vanaf pijp	0.5	1.0	0.5	1.5
DEBIET 30 l/s				
V_{\max}	30.5	31.5	35.8	34.1
$V_{\max} / V_{.003}$	1.9	2.0	2.3	2.2
afstand vanaf pijp	0.5	1.5	0.5	1.0
DEBIET 60 l/s				
V_{\max}	64.2	63.7	73.0	
$V_{\max} / V_{.003}$	1.9	1.7	2.3	
afstand vanaf pijp	0.5	1.0	0.5	
σ_{\max} [cm/s] EN AFSTAND VANAF HART PIJP [cm]				
DEBIET 12 l/s				
σ_{\max}	2.4	3.3	2.5	2.9
$\sigma_{\max} / \sigma_{.003}$	1.4	1.9	1.5	1.7
afstand vanaf pijp	6.0	7.5	7.5	12.0
DEBIET 30 l/s				
σ_{\max}	6.0	8.2	7.4	7.4
$\sigma_{\max} / \sigma_{.003}$	2.0	2.7	2.5	2.5
afstand vanaf pijp	7.5	9.0	9.0	15.0
DEBIET 60 l/s				
σ_{\max}	14.4	14.1	15.4	16.8
$\sigma_{\max} / \sigma_{.003}$	2.8	2.7	3.0	3.2
afstand vanaf pijp	9.0	9.0	12.0	15.0

- Invloed van de vin op het stroombeeld achter de pijp

Om een indruk te krijgen van de invloed van de vin op het stroombeeld zijn op verschillende plaatsen benedenstrooms van de pijp zowel horizontale als verticale snelheden gemeten. Voor de pijp met de vin is hiervoor een groter gebied bemeaten dan voor de pijp zonder vin. In figuur 7.5 staan de gemeten punten aangegeven.



Figuur 7.5 Meetpunten rond de pijp ten behoeve van het stroombeeld

In Bijlage E2 zijn de dimensieloze snelheden en de dimensieloze standaardafwijkingen van de snelheden gegeven, waarbij de snelheden eveneens als vectoren in een figuur zijn gegeven. Hierbij is de dimensieloze V_n en de dimensieloze σ_n als volgt berekend:

$$V_n = \sqrt{\left(\frac{V_{hor}}{\bar{V}}\right)^2 + \left(\frac{V_{ver}}{\bar{V}}\right)^2} * \frac{V_{hor}}{|V_{hor}|} \quad (7.7)$$

$$\sigma_n = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{hor}}{\bar{\sigma}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{ver}}{\bar{\sigma}}\right)^2} \quad (7.8)$$

waarin

- V_n : dimensieloze stroomsnelheid
- σ_n : dimensieloze σ
- $\frac{\sigma_n}{\bar{\sigma}}$: gemiddelde stroomsnelheid (tabel 7.1)
- $\frac{\sigma_{hor}}{\bar{\sigma}}$: gemiddelde σ (tabel 7.1)
- V_{hor} : horizontale stroomsnelheid
- V_{ver} : verticale stroomsnelheid
- σ_{hor} : horizontale σ
- σ_{ver} : verticale σ

De laatste term in vergelijking 7.7 ($V_{hor}/|V_{hor}|$) is toegevoegd om aan te geven of de stroming van de pijp af gericht is of er naar toe. Hierbij wordt dus alleen rekening gehouden met de horizontale richting.

V_n :

Het effect van de spoiler op de stroomsnelheid, V_n , wordt direct duidelijk uit de figuren met de snelheidsvectoren. Het gebied achter de pijp waar het stroombeeld beïnvloed wordt door de pijp is groter wanneer er een spoiler op de pijp aanwezig is; niet alleen de lengte maar vooral de hoogte is groter.

Wanneer gekeken wordt op welk niveau boven het bed de dimensieloze snelheid groter dan 1 wordt, ofwel wanneer de snelheid weer boven de oorspronkelijke gemiddelde snelheid uitkomt, dan blijkt dit te zijn:

- voor de pijp zonder vin --> 4.5 à 5.5 cm boven het bed
(opening onder de pijp 0.4 cm --> 1 à 2 cm boven de bovenkant van de pijp,
opening onder de pijp 0.8 cm --> 1 cm boven de bovenkant van de pijp)
- voor de pijp met vin --> 6.5 à 7.5 cm boven het bed
(opening onder de pijp 0.4 cm --> 2 à 3 cm boven de bovenkant van de vin,
opening onder de pijp 0.8 cm --> 2 à 3 cm boven de bovenkant van de vin)

Het gebied direct achter de pijp waar negatieve snelheden voorkomen, ofwel waar de stroming naar de pijp toe gericht is is voor de pijp met de vin groter dan voor de pijp zonder vin;

- voor de pijp zonder vin strekt dit gebied zich uit tot 7.5 à 9 cm achter het hart van de pijp en 1.5 à 3.5 cm boven het bed,
- voor de pijp met de vin strekt dit gebied zich uit tot 12 à 16.5 cm achter het hart van de pijp en 1.5 à 5.5 cm boven het bed.

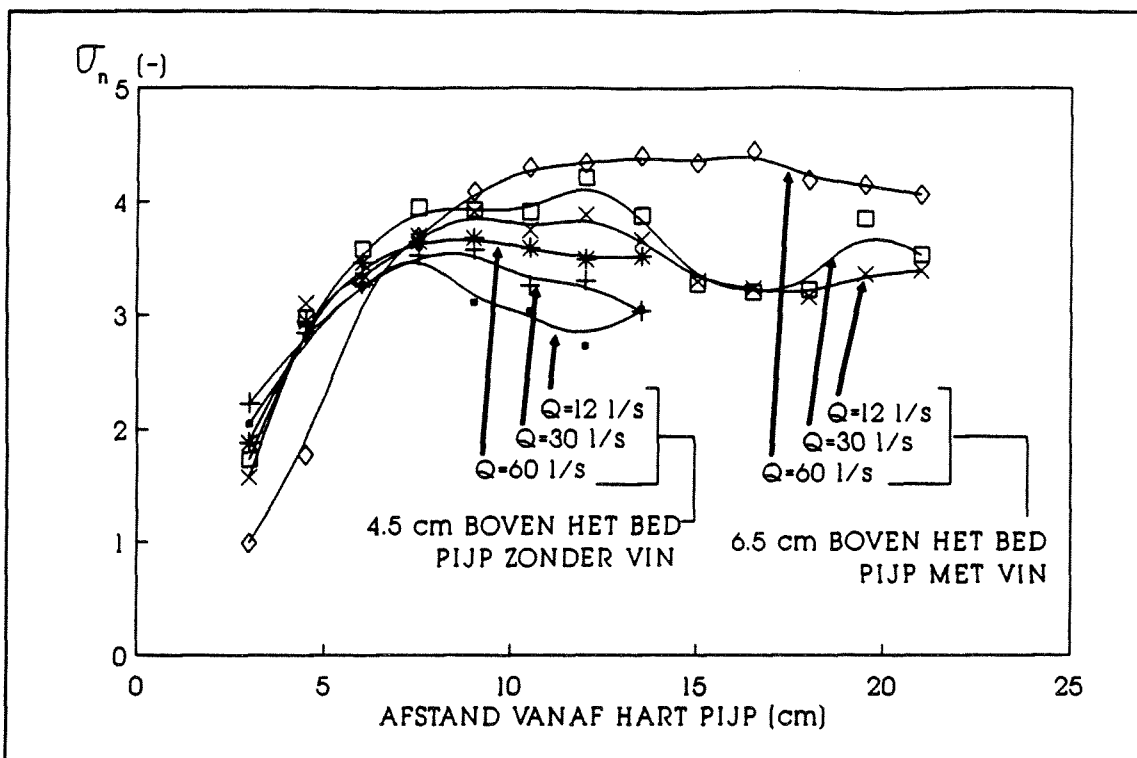
σ_n :

Evenals bij de stroomsnelheid, V_n , geldt voor de standaardafwijking van de snelheid, σ_n , dat de vin vooral effect heeft op de grootte van het gebied achter de pijp dat beïnvloed wordt door de pijp; dit gebied wordt groter wanneer er een vin op de pijp zit. De σ_n in dit gebied is enigszins groter voor de pijp met de vin.

Uit de metingen blijkt dat achter de pijp op een bepaalde hoogte boven het bed een hogere σ_n aanwezig is. Deze hogere σ vormt hoogstwaarschijnlijk de rand van het zog achter de pijp. De hoogte boven het bed waar deze hogere σ_n voorkomen verschilt voor de pijp zonder vin en de pijp met vin;

- pijp zonder vin --> 4.5 cm boven het bed
- pijp met vin --> 6.5 cm boven het bed

De grote van de σ_n in deze strook is voor de pijp met de vin groter dan voor de pijp zonder vin. In figuur 7.6 is σ_n voor de beide pijpen op de desbetreffende hoogtes uitgezet voor verschillende stroomsnelheden.

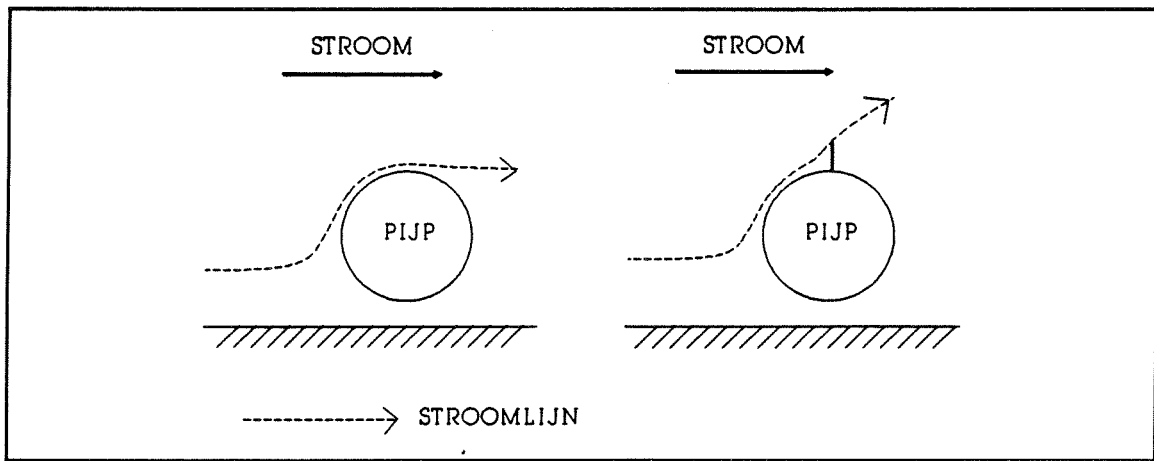


Figuur 7.6 Standaardafwijking van de snelheid (op een hoogte van 4.5 cm boven het bed) voor de pijp zonder vin en (op een hoogte van 6.5 cm boven het bed) voor de pijp met vin, beide pijpjes op 0.4 cm boven het bed

Zowel uit de snelheden als uit de standaardafwijkingen van de snelheden blijkt dat de vin een sterke invloed heeft op het gebied waar de stroming verstoord wordt door de pijp. Uit de hoogte van het gebied waar V en σ beïnvloed worden blijkt dat de vin meer effect heeft dan het vergroten van het aanstroomoppervlak met het oppervlak van de vin zelf. Dit kan verklaard worden door de wijze waarop de stroom over de pijp heen trekt. Bij een pijp zonder vin trekt de stroming langs het oppervlak van de pijp om op een zeker punt het oppervlak los te laten en min of meer in de richting van de oorspronkelijke stroomrichting (oftewel horizontaal) verder te gaan (figuur 7.7). Voor een pijp met een vin wordt de plaats waar de stroming de pijp loslaat gefixeerd. Bij de top van de vin stroomt het water enigszins omhoog gericht van de vin af (figuur 7.7). De hoogte van het verstoorde stroomgebied wordt hierdoor groter dan alleen de hoogte van de vin zelf.

7.5.4 Invloed van de stand van de vin

Om het zelfingraven van pijpleidingen te stimuleren wordt gebruik gemaakt van een op de pijp gemonteerde vin. Er wordt van uitgegaan dat deze vin een maximale effect heeft wanneer de vin midden bovenop de pijp gemonteerd is.

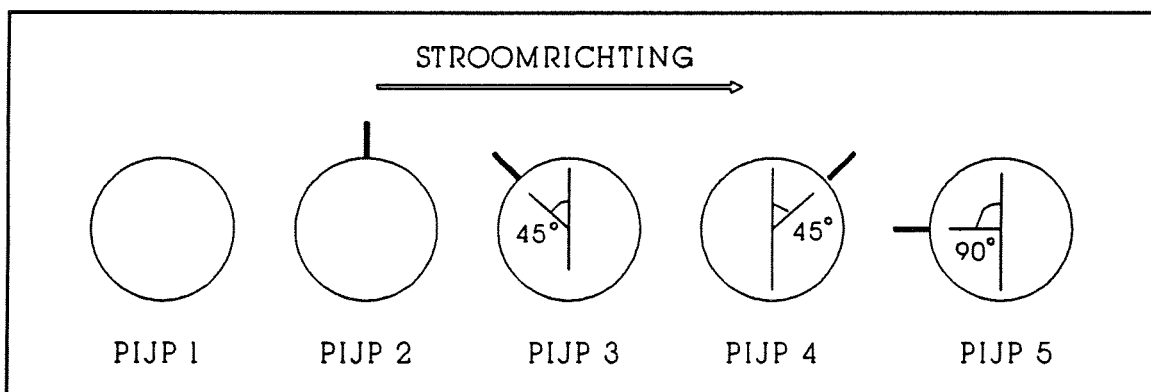


Figuur 7.7 Strooming over een pijp zonder, respectievelijk met vin

In de modelproeven die tot op heden uitgevoerd zijn (Hulsbergen [1984][1986]) wordt dan ook gebruik gemaakt van een pijp met een in het midden gemonteerde recht omhoog stekende vin.

Wanneer de prototype pijpen op de bodem gelegd worden is het echter mogelijk dat de vin niet meer precies in het midden van de pijp zit. In hoeverre het effect van de vin hierdoor verzwakt of misschien wel versterkt wordt is niet bekend.

Om hier enig zicht in te krijgen zijn proeven uitgevoerd met de kleine pijp ($\phi = 3.1$ cm) met de vin in verschillende standen gemonteerd. De geteste standen zijn in figuur 7.8 gegeven.



Figuur 7.8 Standen van de vin op de verschillende geteste pijpjes

Voor de verschillende pijpjes zijn de stroomsnelheden op 3 mm boven het bed voor:

- verschillende stroomsnelheden (0.10, 0.25, 0.50 m/s)
- verschillende openingen onder de pijp (0.0, 0.2, 0.4, 0.8, 1.0 cm)

Ook hier is de snelheid en de standaardafwijking van de snelheid dimensieloos gemaakt door middel van de ongestoorde gemiddelde stroomsnelheid en de ongestoorde gemiddelde standaardafwijking van de snelheid (zie paragraaf 7.5.2 vergelijking 7.3 en 7.4).

Uit de metingen blijkt (Bijlage E3), evenals in paragraaf 7.5.2, dat de maximale stroomsnelheid niet onder maar achter de pijp plaats vindt. De exacte plaats is moeilijk aan te geven omdat de stapgrootte tussen de verschillende meetpunten vrij groot is ten opzichte van het verloop van de snelheid. Bij de hier gebruikte stapgrootte van 1.5 cm ligt de maximale snelheid voor vrijwel alle metingen op 1.5 cm achter het hart van de pijp.

In tabel 7.5 is voor de proeven met een opening onder de pijp de maximale stroomsnelheid (V_{\max}) gegeven met de daarbij behorende afstand ten opzichte van het hart van de pijp.

Tabel 7.6 is een soortgelijke tabel als tabel 7.5, echter hier wordt de maximale standaardafwijking van de snelheid (σ_{\max}) gegeven van elke proef met de daarbij behorende afstand ten opzichte van het hart van de pijp.

V_n :

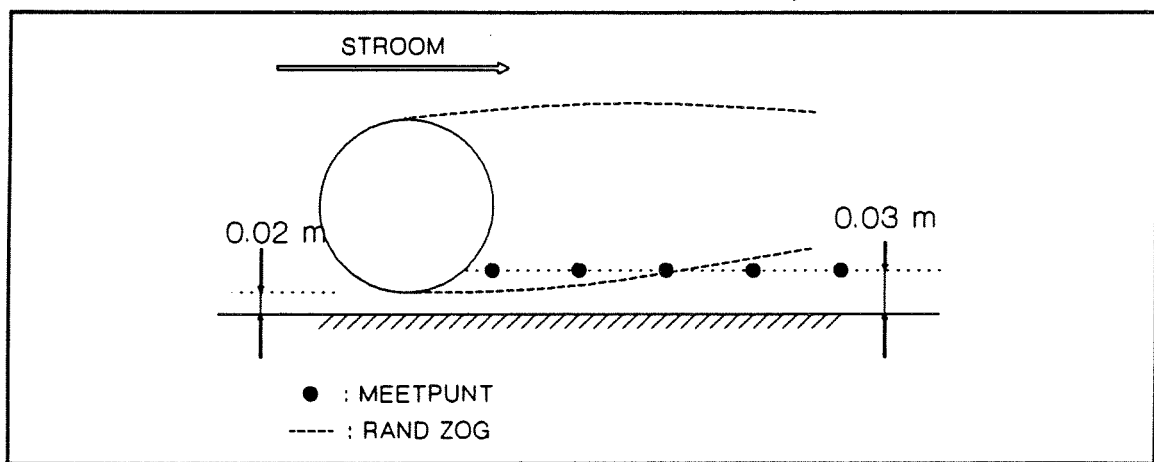
Voor de opening onder de pijp van 0.2 cm ligt voor alle proeven $V_{\max n}$ op 4.5 cm achter het hart van de pijp. Dit is waarschijnlijk de bovenkant van de rand van het zog (figuur 7.9), immers de meethoogte is groter dan de opening onder de pijp. De maximale waarde, $V_{\max n}$, is bovendien kleiner dan 1, ofwel V_{\max} is minder dan de oorspronkelijke stroomsnelheid.

In de overige proeven ligt het maximum voor vrijwel alle gevallen 1.5 cm achter de pijp, voor enkele gevallen op 3 cm achter het hart en één keer zelfs op 6 cm achter het hart van de pijp. Wanneer het maximum verder naar achteren ligt is over het algemeen de opening onder de pijp groot (0.8 of 1.0 cm).

Voor de verschillende vinstanden geldt:

- vin recht omhoog (pijp 2): $V_{\max n}$ is hoger dan voor de pijp zonder vin (pijp 1), echter hoe hoger de stroomsnelheid, hoe kleiner het verschil is,
- vin 45° naar voren (pijp 3): $V_{\max n}$ is ongeveer hetzelfde als bij de vin recht omhoog (pijp 2),
- vin 45° naar achteren (pijp 4) en vin 90° naar voren (pijp 5): $V_{\max n}$ heeft dezelfde orde van grootte als de pijp zonder vin (pijp 1).

Blijkbaar heeft de vin op de pijp alleen zin als deze recht omhoog of 45° tegen de stroom ingericht gemonteerd zit. Deze beide mogelijkheden (recht omhoog en 45° tegen de stroom in) hebben min of meer hetzelfde effect op de maximale stroomsnelheid. Het effect van de vin omhoog wordt in elk geval niet versterkt door het asymmetrisch plaatsen van de vin.



Figuur 7.9 Plaats meetpunten ten opzichte van het zog achter de pijp

σ_n :

Over het algemeen geldt dat voor toenemende opening onder de pijp de $\sigma_{\max n}$ toeneemt en bovendien verder naar achteren trekt.

De σ_n wordt niet duidelijk beïnvloed door de aanwezigheid van de vin in welke stand deze ook bevestigd is op de pijp.

7.5.5 Scheidingsvlak ten opzichte van de pijp

Het scheidingsvlak van een stroming rond een pijp is gedefinieerd als het vlak waar het water dat over en het water dat onder de pijp doorstroomt zich scheidt (zie figuur 6.5 paragraaf 6.2.3).

Wanneer het scheidingsvlak bekend is kunnen in principe uit het ongestoorde snelheidsprofiel het debiet en daarmee de snelheden onder de pijp bepaald worden. Andersom geredeneerd kan het scheidingsvlak bepaald worden aan de hand van de snelheden onder de pijp.

Er zijn diverse proeven uitgevoerd waarbij de snelheid onder de pijp gemeten is; niet alleen tijdens de metingen beschreven in paragraaf 7.5.2 en 7.5.3, echter ook bij aparte metingen waarbij alleen de snelheid direct onder de pijp gemeten is. Uit deze metingen blijkt echter dat er een vrij grote variatie is in de meetwaarden. Uit eerder beschreven proeven blijkt dat juist onder de pijp een sterk verloop van de snelheid aanwezig is. Het gevolg hiervan is dat een enkele snelheidsmeting onder de pijp zeer gevoelig is voor de plaats van de meting in horizontale richting.

Tabel 7.5 Maximale snelheid, $V_{\max n}$, 3 mm boven het bed voor verschillende pijpjes en verschillende stroom-snelheden

opening onder pijp [cm]	PIJP 1		PIJP 2		PIJP 3		PIJP 4		PIJP 5	
	$V_{\max n}$ [-]	X [cm]	$V_{\max n}$ [-]	X [cm]	$V_{\max n}$ [-]	X [cm]	$V_{\max n}$ [-]	X [cm]	$V_{\max n}$ [-]	X [cm]
q=12 l/s										
0.2			0.61	4.5	0.07	4.5	0.41	4.5	0.64	4.5
0.4	1.14	1.5	1.34	1.5	1.34	1.5	1.30	1.5	1.30	1.5
0.6	1.22	1.5	1.34	1.5	1.42	1.5	1.30	1.5	1.35	1.5
0.8	1.23	3.0	1.37	1.5	1.54	1.5	1.31	1.5	1.31	1.5
1.0	1.29	1.5	1.39	3.0	1.39	1.5	1.33	1.5	1.37	1.5
q=30 l/s										
0.2	0.55	4.5	0.78	4.5	0.67	4.5	0.53	4.5	0.75	4.5
0.4	1.20	1.5	1.39	1.5	1.36	1.5	1.24	1.5	1.24	1.5
0.6	1.24	1.5	1.40	1.5	1.38	1.5	1.24	1.5	1.33	1.5
0.8	1.33	1.5	1.40	1.5	1.41	1.5	1.29	1.5	1.23	1.5
1.0	1.35	3.0	1.42	6.0	1.44	3.0	1.29	1.5	1.29	1.5
q=60 l/s										
0.2	0.59	4.5	0.78	4.5	0.68	4.5	0.52	4.5	0.54	4.5
0.4			1.31	1.5	1.27	1.5	1.20	1.5	1.14	1.5
0.6	1.29	1.5	1.31	1.5	1.30	1.5	1.21	1.5	1.28	1.5
0.8	1.29	1.5	1.31	1.5	1.30	1.5	1.25	1.5	1.29	1.5
1.0	1.30	3.0	1.31	3.0	1.30	1.5	1.26	1.5	1.30	1.5

Wanneer van de diverse metingen telkens per meetomstandigheid de maximaal voorkomende waarde genomen wordt dan blijkt hier toch enige structuur in te zitten (tabel 7.7 figuur 7.10, 7.11, 7.12).

Tabel 7.6 Maximale standaardafwijking van de snelheid, $\sigma_{\max n}$, 3 mm boven het bed voor verschillende pijpjes en verschillende stroomsnelheden

opening onder pijp [cm]	PIJP 1		PIJP 2		PIJP 3		PIJP 4		PIJP 5	
	$\sigma_{\max n}$ [-]	X [cm]	$\sigma_{\max n}$ [-]	X [cm]	$\sigma_{\max n}$ [-]	X [cm]	$\sigma_{\max n}$ [-]	X [cm]	$\sigma_{\max n}$ [-]	X [cm]
q=12 l/s										
0.2	2.19	3.0	2.05	3.0	1.82	7.5	1.72	3.0	2.29	6.0
0.4	2.56	7.5	2.32	7.5	2.97	7.5	2.69	7.5	2.75	7.5
0.6	2.40	7.5	2.76	13.5	2.97	7.5	2.58	7.5	2.46	7.5
0.8	3.15	7.5	2.70	13.5	2.89	7.5	2.50	7.5	2.48	7.5
1.0	3.27	7.5	2.84	13.0	4.27	7.5	3.10	7.5	2.92	7.5
q=30 l/s										
0.2	2.15	3.0	2.56	7.5	1.64	6.0	1.54	6.0	2.08	6.0
0.4	2.00	4.5	2.06	13.5	2.05	7.5	2.11	7.5	2.11	7.5
0.6	1.95	13.5	3.20	13.5	2.24	13.5	2.02	7.5	1.87	7.5
0.8	2.47	7.5	2.40	13.5	1.78	13.5	2.40	7.5	2.40	7.5
1.0	3.54	7.5			2.81	7.5	2.88	7.5	3.72	7.5
q=60 l/s										
0.2	2.58	6.0	2.23	7.5	2.39	7.5	2.08	6.0	2.33	7.5
0.4			3.39	13.5	2.11	7.5	1.81	7.5	1.98	7.5
0.6	2.29	13.5	2.98	13.5	2.64	13.5	1.77	7.5	1.20	7.5
0.8	2.36	13.5	2.63	13.5	2.94	13.5	2.64	7.5	2.42	7.5
1.0	3.89	7.0	2.93	20.0	3.12	13.5	2.41	7.5	3.58	7.5

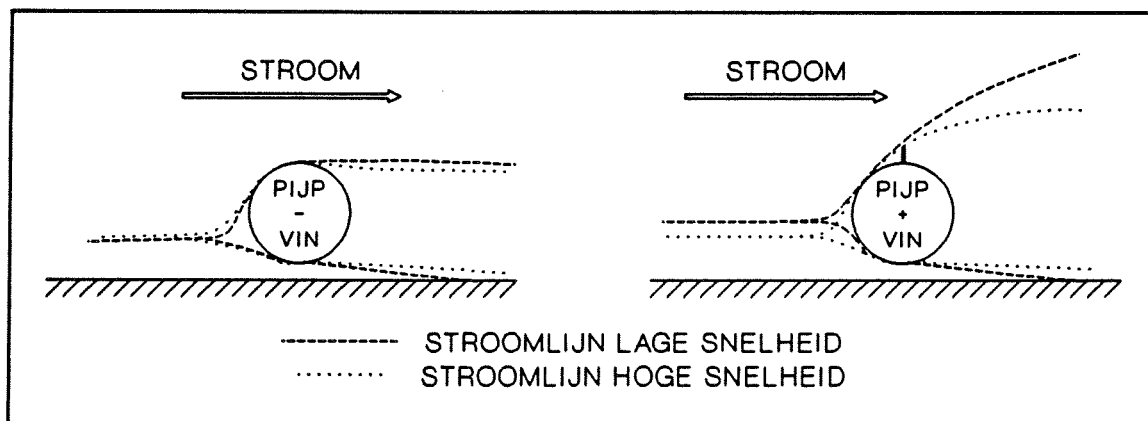
Voor de snelheid onder de pijp en een opening groter of gelijk aan 0.4 cm geldt:
 - een grotere opening onder de pijp geeft over het algemeen lagere stroomsnelheden,

- voor de kleine en de grote pijp geeft een hogere gemiddelde stroomsnelheid (debiet) een enigszins hogere $V_{\text{pijp n}}$,
- voor de pijp met de vin geldt het tegenovergestelde, namelijk dat een hogere stroomsnelheid een kleinere $V_{\text{pijp n}}$ oplevert.

Tabel 7.7 Snelheid onder de pijp ($V_{\text{pijp n}}$ [-]) voor verschillende pijpjes, verschillende stroomsnelheden en verschillende openingen onder de pijp

opening onder pijp [cm]	DEBIET 12 l/s			DEBIET 30 l/s			DEBIET 60 l/s		
	$\phi=3.1\text{cm}$	$\phi=3.1\text{cm} +\text{VIN}$	$\phi=6.0\text{cm}$	$\phi=3.1\text{cm}$	$\phi=3.1\text{cm} +\text{VIN}$	$\phi=6.0\text{cm}$	$\phi=3.1\text{cm}$	$\phi=3.1\text{cm} +\text{VIN}$	$\phi=6.0\text{cm}$
0.4	1.28	1.72	1.52	1.17	1.54	1.50	1.24	1.47	1.54
0.5	1.18	1.70	1.46	1.18	1.53	1.46	1.28	1.45	1.58
0.6	1.16	1.68	1.42	1.23	1.50	1.52	1.28	1.44	1.56
0.8	1.18	1.66	1.32	1.21	1.45	1.41	1.24	1.37	1.49
1.0	1.16	1.60	1.42	1.16	1.42	1.36	1.22	1.34	1.46
1.2	1.08	1.60	1.41	1.15	1.37	1.36	1.22	1.31	1.41

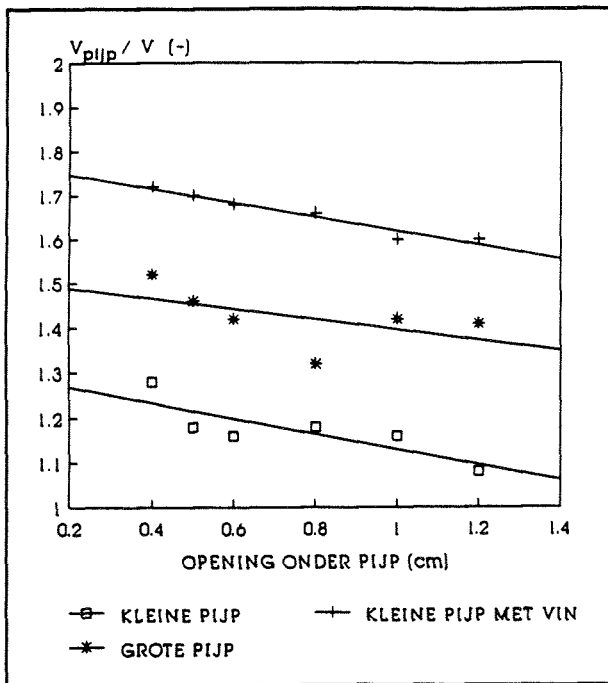
Deze laatste twee aspecten kunnen als volgt uitgelegd worden. De snelheid onder de pijp is afhankelijk van het debiet onder de pijp en dus van het scheidingsvlak (voor de pijp) van water dat over en water dat onder de pijp doorstroomt. Bij de pijp zonder vin varieert de hoogte van het scheidingsvlak slechts weinig bij een toenemende gemiddelde stroomsnelheid omdat het stroombeeld slechts weinig varieert (figuur 7.10). Bij de pijp met vin varieert het stroombeeld veel sterker bij een toenemende gemiddelde stroomsnelheid; hoe hoger de gemiddelde stroomsnelheid, hoe vlakker de stroming over de pijp trekt (figuur 7.10). Als gevolg hiervan zal het scheidingsvlak omlaag schuiven (bij een toenemende gemiddelde stroomsnelheid).



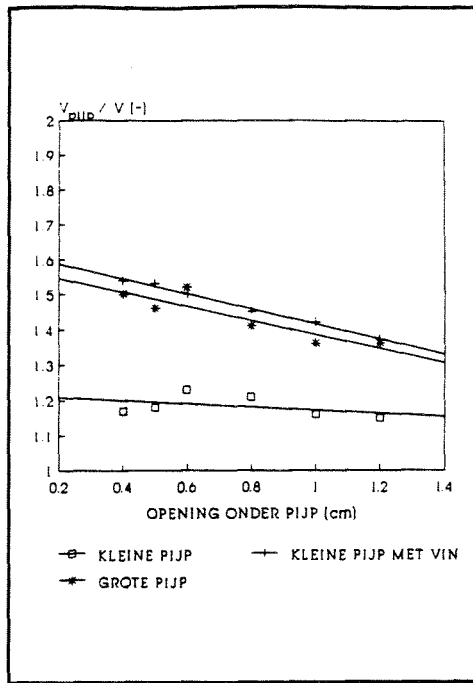
Figuur 7.10 Stroombeeld en scheidingsvlak als functie van de stroomsnelheid voor een pijp en een pijp zonder vin

Voor de berekening van de hoogte van het scheidingsvlak zijn de volgende aannames gedaan:

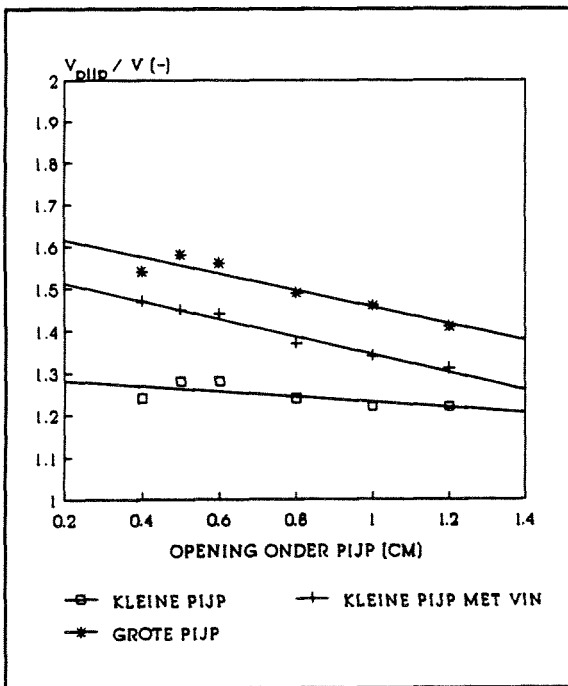
- de stroomsnelheid onder de pijp is lineair afhankelijk van de opening onder de pijp (d.m.v. lineaire regressie bepaald) (figuur 7.11, 7.12, 7.13),



Figuur 7.11 Snelheden onder de pijp als functie van de opening onder de pijp voor een debiet van 12 l/s



Figuur 7.12 Snelheden onder de pijp als functie van de opening onder de pijp voor een debiet van 30 l/s



Figuur 7.13 Snelheden onder de pijp als functie van de opening onder de pijp voor een debiet van 60 l/s

- in de opening onder de pijp is een constante snelheid over de volle hoogte van de opening aanwezig.

Het debiet onder de pijp kan als volgt berekend worden:

$$Q_p = \text{opening} * V_p \quad (7.9)$$

waarin Q_p : het debiet onder de pijp
 opening : de hoogte van de opening onder de pijp
 V_p : de snelheid onder de pijp

In het ongestoorde snelheidsprofiel geldt:

$$Q_z = \int_0^z V(z) dz \quad (7.10)$$

waarin Q_z : het debiet onder het vlak op hoogte z
 z : hoogte boven het bed
 $V(z)$: stroomsnelheid op hoogte z

Uitgaande van een logaritmisch snelheidsprofiel levert dit (zie paragraaf 5.9.1, vergelijking 5.19):

$$Q_z = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \left[0.5 e z_0 + z \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - z \right] \quad (7.11)$$

waarin τ : bodemschuifspanning
 κ : constante van von Karman (0.4)
 ρ : dichtheid
 z_0 : waarde gerelateerd aan de bodemruwheid

Wanneer τ en z_0 bekend zijn kan de hoogte van z uitgerekend worden waarvoor geldt:

$$Q_z = Q_p \quad (7.12)$$

In tabel 7.8, 7.9, 7.10 staan achtereenvolgens het berekende debiet onder de pijp (Q_p ; vergelijking 7.9, met de snelheid bepaald door lineaire regressie, figuur 7.11, 7.12, 7.13), de hoogte van het scheidingsvlak ten opzichte van het bed (z ; vergelijking 7.11 met $z_0 = 22 \mu\text{m}$) en de hoogte van het scheidingsvlak ten opzichte van de onderkant van de pijp (z') berekend volgens:

$$z' = \frac{z - \text{opening}}{\phi} \quad (7.13)$$

- waarin
- z' : hoogte scheidingsvlak ten opzichte van de onderkant pijp als gedeelte van de pijpdiameter
 - z : hoogte scheidingsvlak ten opzichte van de bodem
 - ϕ : pijpdiameter (voor de pijp met vin is dit de hoogte van het geblokkeerde oppervlak)

Tabel 7.8 Berekende debiet onder de pijp, Q_p [m^2/s].

opening onder pijp [cm]	DEBIET 12 l/s			DEBIET 30 l/s			DEBIET 60 l/s		
	$\phi=3.1\text{cm}$	$\phi=3.1\text{cm} + \text{VIN}$	$\phi=6.0\text{cm}$	$\phi=3.1\text{cm}$	$\phi=3.1\text{cm} + \text{VIN}$	$\phi=6.0\text{cm}$	$\phi=3.1\text{cm}$	$\phi=3.1\text{cm} + \text{VIN}$	$\phi=6.0\text{cm}$
0.4	.49	.69	.60	1.20	1.54	1.51	2.54	2.94	3.15
0.5	.61	.85	.74	1.49	1.90	1.86	3.16	3.62	3.89
0.6	.72	1.01	.88	1.79	2.25	2.20	3.77	4.29	4.61
0.8	.93	1.32	1.16	2.36	2.92	2.85	4.97	5.55	5.99
1.0	1.13	1.62	1.43	2.93	3.54	3.46	6.15	6.72	7.29
1.2	1.32	1.91	1.69	3.49	4.11	4.03	7.31	7.81	8.51

Tabel 7.9 Hoogte scheidingsvlak ten opzichte van de bodem [cm]

opening onder pijp [cm]	DEBIET 12 l/s			DEBIET 30 l/s			DEBIET 60 l/s		
	$\phi=3.1\text{cm}$	$\phi=3.1\text{cm} + \text{VIN}$	$\phi=6.0\text{cm}$	$\phi=3.1\text{cm}$	$\phi=3.1\text{cm} + \text{VIN}$	$\phi=6.0\text{cm}$	$\phi=3.1\text{cm}$	$\phi=3.1\text{cm} + \text{VIN}$	$\phi=6.0\text{cm}$
0.4	0.9	1.2	1.0	0.9	1.1	1.0	0.9	1.0	1.1
0.5	1.1	1.4	1.2	1.0	1.3	1.2	1.1	1.2	1.3
0.6	1.2	1.6	1.4	1.2	1.4	1.4	1.2	1.4	1.5
0.8	1.5	2.0	1.8	1.5	1.8	1.8	1.6	1.7	1.8
1.0	1.7	2.4	2.1	1.8	2.1	2.1	1.9	2.0	2.2
1.2	2.0	2.7	2.4	2.1	2.4	2.3	2.2	2.3	2.4

Voor een grotere opening onder de pijp ligt het scheidingsvlak dichterbij het hart van de pijp. Dit is te verwachten, immers voor een pijp oneindig ver van de wand ligt het scheidingsvlak op dezelfde hoogte als het hart van de pijp.

Tabel 7.10 Hoogte scheidingsvlak ten opzichte van de onderkant van de pijp als gedeelte van de pijpdiameter

opening onder pijp [cm]	DEBIET 12 l/s			DEBIET 30 l/s			DEBIET 60 l/s		
	$\phi=3.1\text{cm}$	$\phi=3.1\text{cm} + \text{VIN}$	$\phi=6.0\text{cm}$	$\phi=3.1\text{cm}$	$\phi=3.1\text{cm} + \text{VIN}$	$\phi=6.0\text{cm}$	$\phi=3.1\text{cm}$	$\phi=3.1\text{cm} + \text{VIN}$	$\phi=6.0\text{cm}$
0.4	.15	.19	.10	.15	.17	.10	.16	.15	.11
0.5	.18	.22	.12	.16	.19	.12	.18	.18	.13
0.6	.19	.24	.13	.18	.21	.13	.19	.19	.14
0.8	.21	.30	.16	.23	.24	.16	.24	.23	.17
1.0	.23	.35	.18	.24	.27	.18	.27	.26	.19
1.2	.24	.37	.20	.27	.30	.18	.31	.27	.20

7.6 Conclusies omtrent de stroming rond pijpleidingen op of vlak boven de bodem in een modelopstelling

Wanneer een pijp contact maakt met de bodem zal er geen stroming onder de pijp plaatsvinden. Wervels aan de boven- en benedenstroomse zijde van de pijp direct tegen de pijp aan zullen in dit stadium voor de initiële erosie moeten zorgen. De snelheden vlak boven het bed (3 mm boven het bed), veroorzaakt door deze wervels zijn echter lager dan de ongestoorde snelheden op dezelfde hoogte (0.14 à 0.23 maal de snelheid in de ongestoorde situatie 3 mm boven het bed).

Als er een voldoende grote opening (groter of gelijk aan 0.4 cm) aanwezig is tussen de pijp en de bodem zal de stroming met een verhoogde snelheid onder de pijp doorstromen. De maximale snelheid wordt echter niet recht onder het hart van de pijp bereikt maar ongeveer 0.5 à 1.5 cm (0.1 à 0.5 * pijpdiameter) benedenstrooms van het hart van de pijp (pijpdiameter 3.1 en 6.0 cm).

De maximale snelheid 3 mm boven het bed is een factor 1.1 à 1.5 maal de ongestoorde gemiddelde stroomsnelheid, ofwel 1.6 à 2.2 maal de ongestoorde snelheid op 3 mm boven het bed (geldig voor een pijpdiameter van 3.1 cm en een opening onder de pijp van 0.4 à 1.0 cm).

Voor een opening variërend van 0.4 tot 1.0 cm varieert de maximale stroomsnelheid slechts weinig. Wanneer de opening kleiner is dan 0.4 cm neemt de maximale snelheid snel af.

Een grotere pijp levert hogere maximale snelheden onder de pijp op, ook wanneer de opening onder de pijp evenredig groter wordt genomen. Hier moet wel bij vermeld worden dat de bodemruwheid bij de experimenten gelijk is.

De standaardafwijkingen van de snelheden (σ , maat voor de turbulentie) zijn onder de pijp lager dan in de ongestoorde situatie. Enkele cm's benedenstrooms van de pijp wordt de oorspronkelijke σ bereikt en overschreden. De maximale σ wordt pas vanaf 3 cm achter het hart van de pijp bereikt.

De plaats van σ_{\max} en σ_{\max} zelf zijn beide afhankelijk van de gemiddelde stroomsnelheid en de opening onder de pijp. Zowel voor een hogere stroomsnelheid als voor een grotere opening onder de pijp wordt de maximale σ groter en trekt verder naar achteren.

De afmetingen van de pijp hebben geen zichtbare invloed op σ .

Benedenstrooms van een pijp, die contact maakt met de bodem of een kleine afstand van het bed verwijderd is, vinden vlak boven het bed negatieve snelheden (naar de pijp toe gericht) plaats. Deze negatieve snelheden zijn groter voor een grotere pijp. Bovendien is het gebied waar deze negatieve snelheden optreden groter voor een grotere pijp.

Om de erosie onder pijpleidingen te stimuleren wordt veelal een vin op de pijp gemonteerd. De aanwezigheid van de vin heeft in principe dezelfde effecten als een grotere pijp; de snelheid onder de pijp wordt groter, de maximale σ ligt verder achter de pijp maar is niet duidelijk groter.

Het stroombeeld rond de pijp, met name de stroom die over de pijp heen trekt, wordt duidelijk beïnvloed door de aanwezigheid van de vin; de lengte, en vooral de hoogte van het gebied waar de stroomsnelheden verstoord worden is aanzienlijk groter wanneer er een vin op de pijp gemonteerd zit; terwijl het geblokkeerde oppervlak met 25% vergroot wordt door de vin wordt de hoogte van het verstoorde stroomveld 50% groter. De σ in het verstoorde stroomgebied is enigszins groter dan wanneer er geen vin aanwezig is, echter niet significant.

Wanneer de vin niet midden bovenop de pijp gemonteerd zit maar meer naar de zijkant, worden de maximale stroomsnelheden vlak boven het bed niet verder versterkt. Bij een vin 45° tegen de stroom in gericht is het effect nagenoeg hetzelfde als bij een vin recht omhoog. Een vin 45° met de stroom mee en een vin 90° tegen de stroom in gericht hebben duidelijk minder effect. In de beide laatstgenoemde situaties hebben de stroomsnelheden vlak boven het bed dezelfde orde van grootte als bij de pijp zonder vin.

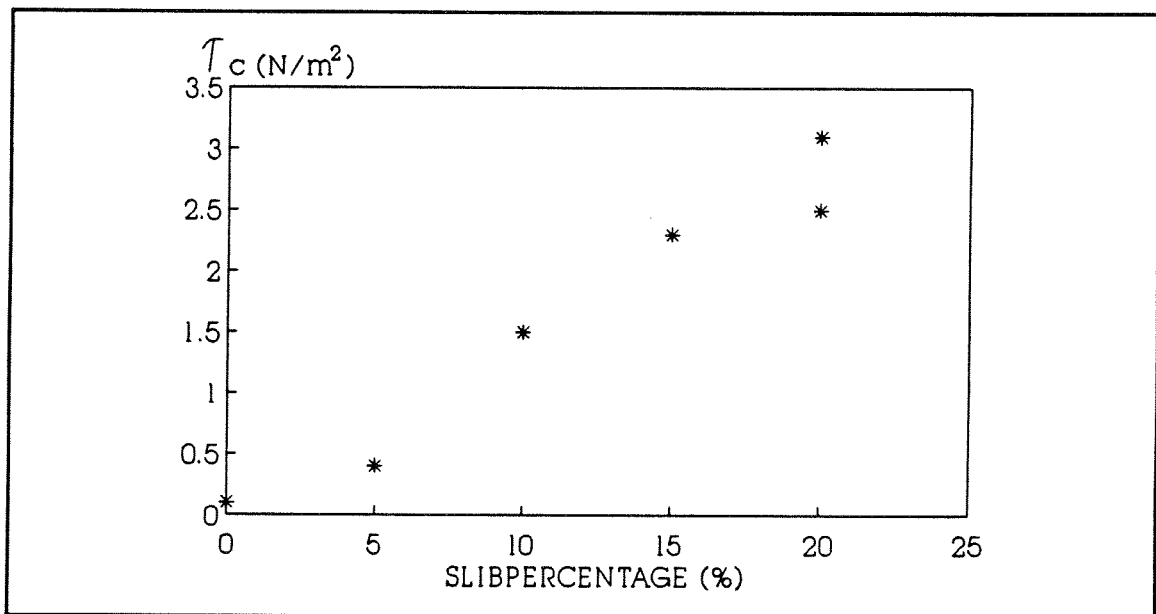
Het scheidingsvlak van water dat over en water dat onder de pijp doorstroomt is zowel afhankelijk van de pijpdiameter als van de opening onder de pijp. Bij een grotere opening onder de pijp ligt het scheidingsvlak meer naar het hart van de pijp. Een grotere pijpdiameter geeft een scheidingsvlak dat ten opzichte van de bodem hoger ligt, echter ten opzichte van de pijpdiameter lager ligt. Bij een evenredig aan de pijpdiameter toegenomen opening onder de pijp geldt dat het scheidingsvlak relatief ten opzichte van de pijp meer naar het hart van de pijp ligt.

8. Samenvatting en conclusies

- Transport van slibhoudend zand

Heel algemeen zijn de transporteigenschappen van slibhoudend zand bestudeerd door het meten van sedimentconcentraties boven een zand-slibbed bij verschillende stroomsnelheden. Bij dit deel van het onderzoek is gebruik gemaakt van zand-slibmengsels van zand gemengd met verschillende soorten, zowel zoet- (kaoliniet of Haafense klei) als zoutwater slib (Eems Dollard slib, zand-slib afkomstig van de Oestergronden). Als referentie is een zuiver zandbed gebruikt.

Uit de resultaten blijkt dat voor slibhoudend zand de kritische bodemschuifspanning waarbij transport begint hoger ligt dan voor een zuiver zandbed. Hoe hoger het percentage slib, hoe hoger ook de kritische bodemschuifspanning (figuur 8.1). Wanneer eenmaal transport optreedt heeft dit transport hetzelfde karakter als zuiver slibtransport en niet als zuiver zandtransport; het materiaal erodeert slechts zeer langzaam waardoor de sedimentconcentratie in suspensie slechts langzaam toeneemt en pas na zeer lange tijd mogelijk een evenwichtstransport bereikt. In de uitgevoerde proeven is na 8 uur stromen het evenwicht nog niet bereikt.



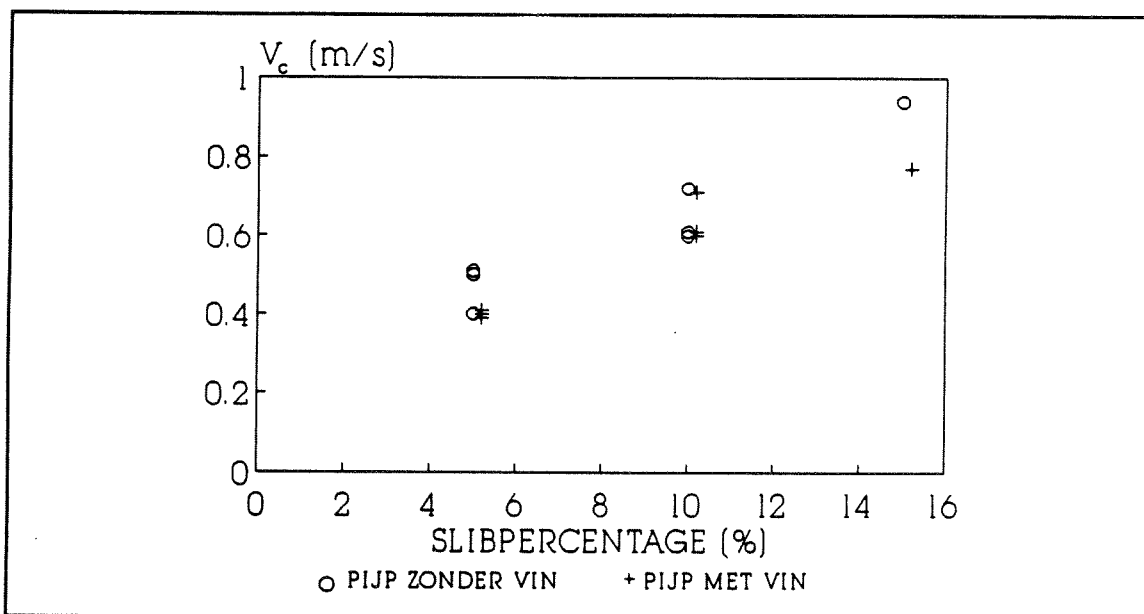
Figuur 8.1 Kritische bodemschuifspanning als functie van het slibpercentage (zand-slibmengsels afkomstig van de Oestergronden op de Noordzee)

- Erosie rond pijpleidingen op slibhoudend zand

Het erosiegedrag rond pijpleidingen is onderzocht door het meten van ontgrondingskuilen die ontstaan zijn bij verschillende stroomsnelheden. In dit gedeelte van het onderzoek is gebruik gemaakt van een kunstmatig zand-slibmengsel (kaoliniet

met zand) en een zuiver natuurlijk zand-slibmengsel afkomstig van het in hoofdstuk 1 beschreven gebied op de Noordzee (Oestergronden). Door het bijmengen van zuiver zand met het natuurlijke zand-slibmengsel zijn zand-slibmengsels verkregen met lagere slibpercentages. Als referentie is wederom gebruikt gemaakt van een zuiver zandbed.

Ook in dit gedeelte van het onderzoek blijkt dat de aanwezigheid van het slib een duidelijke invloed heeft op het erosiegedrag rond de pijpleidingen. Om bij de zand-slibmengsels enige erosie op te wekken zijn hogere snelheden noodzakelijk dan voor het zuivere zandbed. Wanneer eenmaal erosie optreedt gebeurt dit op een geheel andere wijze dan bij het zuivere zand. De wijze van eroderen is verschillend voor het kunstmatige zand-slibmengsel en voor het natuurlijke zand-slibmengsel. Het kunstmatige zand-slibmengsel geeft zeer kleine ontgrondingskuilen waarbij opvalt dat de ontgroning als het ware uit twee kuilen bestaat (het profiel van de ontgrondingskuilen is W-vormig). Bij het natuurlijke zand-slibmengsel vindt de erosie niet 'korrelsgewijs' plaats maar met brokken tegelijk. De erosie is hierdoor op zich groter dan bij het kunstmatige zand-slibmengsel. De benodigde stroomsnelheden om enige erosie op te wekken zijn echter groter dan bij het kunstmatige zand-slibmengsel (figuur 8.2). De erosie begint niet recht onder de pijp maar enigszins benedenstrooms van de pijp.



Figuur 8.2 Critische stroomsnelheid (gemiddelde snelheid in het model) voor begin van erosie onder de pijp (V_c in m/s) (zand-slibmengsel afkomstig van de Oestergronden op de Noordzee).

De aanwezigheid van een vin midden op de pijp stimuleert het erosiegedrag op een zuivere zandbodem. Op zand-slibbedden wordt de erosie onder de pijp eveneens versterkt door de aanwezigheid van een vin. De ontgrondingskuil wordt dieper en breder, de erosie vindt bij enigszins lagere snelheden plaats.

Wanneer de situatie die in het model beproefd is opgeschaald wordt naar prototype schaal dan blijkt er onder prototype omstandigheden in het desbetreffende gebied, de Oestergronden, nauwelijks erosie op te kunnen treden als gevolg van tunnelerosie. De hiervoor benodigde stroomsnelheden, voor zowel een pijp met als zonder vin, komen in het desbetreffende gebied niet of alleen onder extreme omstandigheden voor (tabel 8.1). Uit prototype metingen blijkt echter dat er wel een zeker ingravingsproces plaatsvindt, ook al is dit anders (minder) dan het bekende ingravingsproces op zand. De oorzaak van de erosie in het prototype is vooralsnog niet duidelijk. Het is mogelijk dat in het prototype de structuur van de turbulenties groter is dan de fijnere turbulenties in het model. Het effect van deze turbulenties op de erosie, ofwel het exacte oppikmechanisme van slib, zou hiervoor nader onderzocht moeten worden. Het is echter ook niet uitgesloten dat bodemleven (krabben en vissen), dat de bodem rond de pijp loswoelt, een belangrijke rol speelt in het erosieproces.

Tabel 8.1 Gemiddelde stroomsnelheid (m/s) in model en prototype waarbij onder de pijp erosie optreedt.

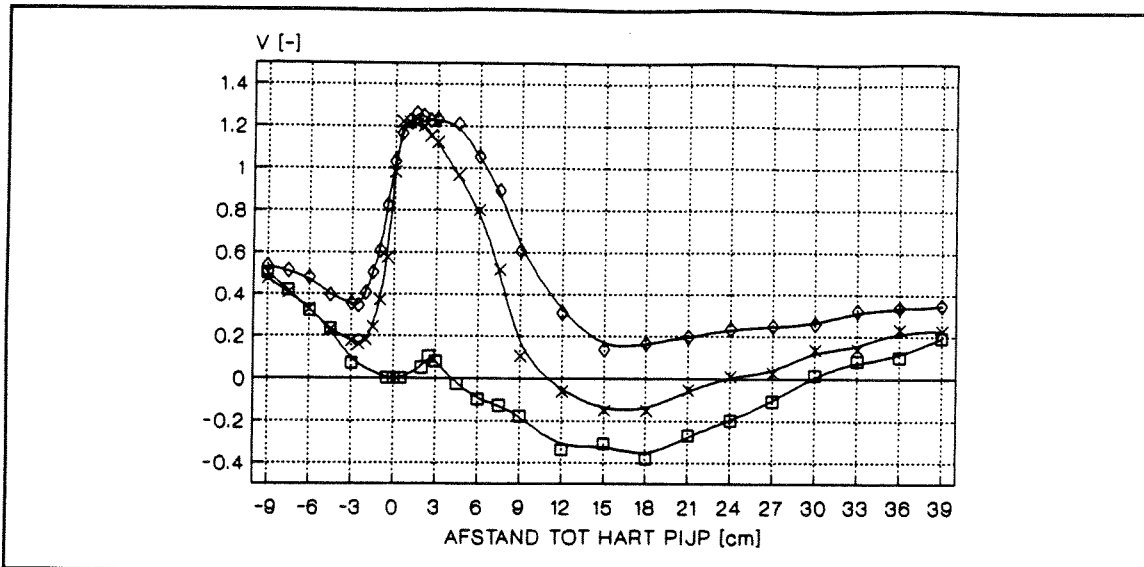
	slibpercentage in de bodem		
	5%	10%	15%
model	0.40	0.60	0.80
prototype	0.88 à 0.95	1.35 à 1.43	1.76 à 1.91

- Stroombeeld rond de pijp

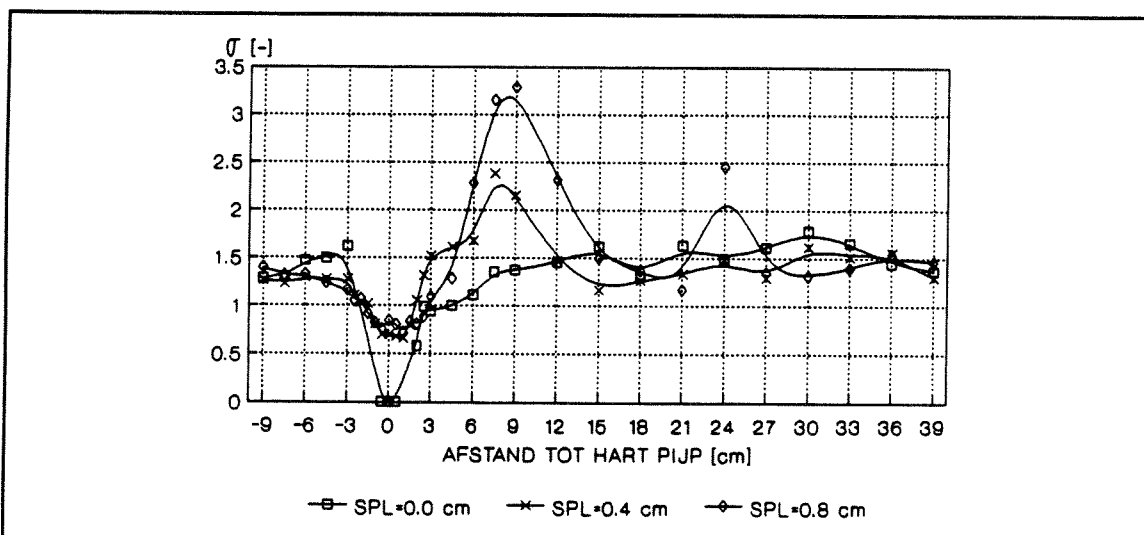
Door middel van een Laser-Doppler zijn snelheden gemeten in de nabijheid van een modelpijp en over een gedeelte van de bodem voor en achter de desbetreffende pijp. De proeven zijn uitgevoerd met een vaste, vlakke bodem. De maximale stroomsnelheid vlak boven de bodem vindt niet direct onder de pijp plaats maar enigszins benedenstrooms van de pijp (figuur 8.3). De turbulentie wordt nog verder benedenstrooms van de pijp maximaal (figuur 8.4).

Wanneer er een vin op de pijp gemonteerd is wordt de maximale stroomsnelheid vlak boven het bed groter. Voor de maximale turbulentie vlak boven het bed heeft de vin minder invloed. Een scheef op de pijp gemonteerde vin zal de maximale snelheid en de maximale turbulentie niet extra versterken (ten opzichte van de recht omhoog staande vin). Voor een scheef tegen de stroom in gerichte vin is het effect nagenoeg gelijk aan een recht omhoog stekende vin. Een scheef met de stroom mee gerichte vin of een vin recht tegen de stroom in geven ongeveer dezelfde snelheden en turbulenties als een pijp zonder vin.

De vin heeft aanzienlijke invloed op het stroombeeld achter (benedenstrooms van) de pijp; de lengte en de hoogte waarover de snelheden en de turbulenties verstoord worden door de aanwezigheid van de pijp zijn duidelijk groter.



Figuur 8.3 Dimensieloze horizontale stroomsnelheden (V/V_{gcm}) 3 mm boven het bed (pijpdiameter = 3.1 cm, $V_{gcm} = 0.25$ m/s)



Figuur 8.4 Dimensieloze horizontale standaardafwijking van de snelheden (σ/σ_{gcm}) 3 mm boven het bed (pijpdiameter = 3.1 cm, $\sigma_{gcm} = 0.025$ m/s, SPL = opening onder de pijp)

Literatuur

- Abdel Rahman N.M. [1962],
The effects of flowing water on cohesive beds.
Thesis presented to Hydraulic Research and Soil Mechanics Laboratory, Swiss
Federal Institute of Technology, Zurich.
- Achenbach, E. and E. Heinecke [1981]
On Vortex Shedding from smooth and Rough Cylinders in the Range of
Reynolds Numbers $6 \cdot 10^3$ to $5 \cdot 10^6$.
Journal of Fluid Mechanics, Vol. 109, pp 239-251.
- Ackers, P. and W.R. White [1973]
Sediment Transport, New Approach and Analyses.
Journal of the Hydraulic Division, Vol.99, No. HY11, pp. 2041-2060.
- Amos, C.L. and D.C. Mosher [1985]
Erosion and deposition of fine-grained sediments from the Bay of Fundy.
Sedimentology, Vol. 32, No.6, pp. 815-832.
- Ariathurai, R. and K. Arulanandan [1978]
Erosion rates of cohesive soils.
Journal of the Hydraulics Division, Vol.104, HY2, pp. 279-283.
- Bagnold, R.A. [1963]
Mechanics of Marine Sedimentation.
The Sea, Vol. 3, M.N. Hill, Ed. Wiley-Interscience, pp. 507-528.
- Bearman and Zdravkovich [1978]
Flow around a Circular Cylinder near a Plane Boundary.
Journal of Fluid Mechanics, Vol.89, Part 1.
- Beek, F.A. van, R. Bijker and H.G. Wind [1988]
Simulation of Erosion and Sedimentation around Marine Structures by Means
of a Numerical Model.
Proceedings of the International Conference on Behaviour of Offshore
Structures, Trondheim.
- Behre, K.E., J.D. Dörjes and G. Irion [1984]
Ein Datierter Sedimentkern aus dem Holozän der Südlichen Nordsee.
Probleme der Küstenforschung im Südlichen Nordseegebiet, Band 15, pp
135-148.

- Bijker, E.W. [1976]
Wave-Seabed-Structure Interaction.
Proceedings International Conference on the Behaviour of Offshore Structures, Trondheim.
- Bijker, E.W. [1971]
Longshore Transport Computations.
Journal of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Volume 97, WW4, pp 687-701.
- Bosman, J.J., E.T.J.M. van der Velden and C.H. Hulsbergen [1987]
Sediment Concentration Measurement by Transverse Suction.
Coastal Engineering 11, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- Bull, M.K. and J.L. Willis [1961]
Some Results of Experimental Investigations of the Surface Pressure Fields due to a Turbulent Boundary Layer.
University of Southampton, Department of Aeronautics and Astronautics, Report No.199.
- Cormault P. [1968],
Determination experimentale du debit solide d'erosion de sediments fons cohesifs,
Proceedings 14th Congress of IAHR, Paris.
- Delft Hydraulics, C.H. Hulsbergen [1982]
Behaviour of the L10A/F Pipelines.
Report M1818.
- Delft Hydraulics [1982a]
Self Burying Mechanism of L4-L7 Pipelines on the Bottom of the North Sea.
Study on Morphological and Stability Aspects. Report on Model Investigation.
Report M1830.
- Delft Hydraulics [1982b]
Self-Burial of Submarine Pipelines. Large Scale Model Experiments on the Scour Mechanism due to Uniform Flow.
Report M2019
- Delft Hydraulics [1986]
The Effect of Spoilers on Self-Burial of Submarine Pipelines.
Report H445, Appendix A.
- Delft Hydraulics, C.H. Hulsbergen [1988]
Evaluation of Self-Burial Effect of Spoiler on K12-a/
K12-cc Pipeline.
Report H822

- Engelund, F. and E. Hansen [1967]
 A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams, Teknisk Forlag,
 Copenhagen, Denmark.
- Fischer, H.B., E.J. List, R.C.Y. Kon, J. Imberger and N.H. Brooks [1979]
 Mixing in Inland and Coastal Waters.
 Academic Press Inc.
- Fredsoe, J. and E.A. Hansen [1984]
 Lift forces on Pipelines in Steady Flow
 DCAMM, Report 295, Technical University of Denmark.
- Fredsoe, J., B.M. Sumer, J. Andersen and E.A. Hansand [1985]
 Transverse Vibration of a Cylinder Very Close to a Plane Wall.
 Proceedings of the 4th International Offshore Mechanics and Arctic
 Engineering Symposium, Dallas, ASME, 1, 601.
- Gularte, R.C., W.E. Kelly and V.A. Nacci [1980]
 Erosion of cohesive sediments as a rate process
 Ocean Engineering, Vol.7, No.4, pp. 539-551.
- Hansen, E.A., J. Fredsoe and Y. Mao [1986]
 Two-dimensional Scour below Pipelines.
 Proceedings Fifth International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic
 Engineering.
- Hinze, J.O. [1975]
 Turbulence.
 McGraw-Hill Book Company
- Hjelmfelt, A.T. and C.W. Lenau [1970]
 Nonequilibrium Transport of Suspended Sediment.
 Journal of the Hydraulics Division, Vol.96, No.HY7.
- Huang, J. [1987]
 An investigation on sediment scouring effect at Lianyun Harbour in cohesive
 material erosion regime.
 Nanjing Hydraulic Research Institute.
- Hulsbergen, C.H. [1984]
 Stimulated Self-Burial of Submarine Pipelines.
 Offshore Technology Conference, OTC.4667
- Hulsbergen, C.H. [1986]
 Spoilers for Stimulated Self-Burial of Submarine Pipelines.
 Offshore Technology Conference, OTC.5339

- Jensen, B.L. and B.M. Sumer [1986]
 Boundary Layer over a Cylinder Placed near a Wall.
 Prog.Rep. 64, Inst. Hydrodyn. and Hydraulic Engrg., Tech. Univ. Denmark.
- Jensen, B.L. [1987]
 Large-Scale Vortices in the Wake of a Cylinder Placed Near a Wall.
 Proceedings Second International Conference on Laser Anemometry,
 Glasgow, United Kingdom.
- Jensen, B.L., B.M. Sumer, H.R. Jensen and J. Fredsoe [1988]
 Flow around and Forces on a Pipeline near a Scoured Bed.
 Seventh International Conference on Offshore and Arctic Engineering,
 Houston.
- Justesen, P. [1988]
 Computation of Steady and Oscillatory Flows around a Circular Cylinder.
 Prog.Rep. 68, pp43-58, Institute of Hydrodynamic and Hydraulic
 Engineering, Technical University of Denmark.
- Kalinske, A.A. [1942]
 Criteria for Determining Sand Transportation by Surface Creep and Saltation,
 Trans. A.G.U., pp. 639-643.
- Kamphuis, J.W. and K.R. Hall [1983]
 Cohesive material erosion by unidirectional current.
 Journal of Hydraulic Engineering, Vol.109, No.1, pp. 49-61.
- Kelly, W.E. and R.C. Gularte [1981]
 Erosion resistance of cohesive soils.
 Journal of the Hydraulics Division, Vol.107, HY10, pp. 1211-1224.
- Kjeldsen, S.P. [1974]
 Experiments with Local Scour around Submarine Pipelines in a Uniform
 Current.
 Technical University of Norway, Trondheim.
- Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut [1978]
 Wind and Wave Climate in the Netherlands Sector of the North Sea between
 53° and 54° North Latitude, Scientific Report W.R. 78-9.
- Kusuda, T., T. Umita and Y. Awaya [1982]
 Erosional process of fine cohesive sediments.
 Mem. Fac. Eng., Kyushu Univ. 42, 4, pp. 317-333.
- Kuti, E.O. and C.L. Yen [1976]
 Scouring of cohesive soils.
 Journal of Hydraulic Research, Vol. 14, No. 3, pp. 195-206.

- Lavelle, J.W., H.O. Mofjeld and E.T. Baker [1984]
 An in situ erosion rate for a fine-grained marine sediment.
 Journal of Geophysical Research, Vol.89, No. C4, pp. 6543-6552.
- Leeuwestein, W. [1985]
 The Natural Self Burial of Submarine Pipelines.
 MATS- Stability of Pipelines, Scour and Sedimentation.
 Delft University of Technology, Coastal Engineering Group.
- Leeuwestein, W., E.W. Bijker, E.B. Peerbolte and H.G. Wind [1985]
 The Natural Self-Burial of Submarine Pipelines.
 Behaviour of Offshore Structures, Amsterdam.
- Mao, Y [1986]
 The Interaction between a Pipeline and an Erodible Bed.
 Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University
 of Denmark, Series Paper No.39
- Mao, Y [1987]
 The Flow Induced Pipe Vibration During its Sagging Process.
 Journal of Hydraulic Research, Vol. 25, No.5.
- Meerendonck, E. van and A.J.G.M. van Roermund [1981]
 Ontgroningen onder Pijpleidingen ten gevolge van Stroom.
 Kustwaterbouwkunde, Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft.
- Mehta, A.J. and E. Partheniades [1979]
 Kaolinite Resuspension Properties.
 Journal of the Hydraulics Division, Vol. 105, HY4, pp. 411-416.
- Meyer-Peter, E. and R. Muller [1948]
 Formulas for Bed-Load Transport.
 Proceedings Second Congress IAHR, Stockholm, Sweden
- Migniot, C. [1963]
 Étude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur
 comportement sous des actions hydrodynamiques.
 La Houille Blanche, No.7, pp.591-620
- Migniot, C. [1989]
 Tassement et rhéologie des vases, première partie.
 La Houille Blanche, No.1, pp.11-29
 Tassement et rhéologie des vases, deuxième partie.
 La Houille Blanche, No.2, pp.95-111

- Mitchell, J.K. [1976]
Fundamentals of Soil Behavior.
John Wiley & Sons, Inc.
- Montague, C.L. [1984]
Influence of Biota on Erodibility of Sediments.
Proceedings of a Workshop on Cohesive Sediment Dynamics.
Tampa, Florida, pp. 251-269.
- Müller, W. [1929]
Systeme von Doppelquellen in der ebenen Strömung.
Zeitschrift für angew. Math. und Mech., 9, Heft 3.
- Murray, W.A. [1977]
Erodibility of coarse sand-clayey silt mixtures.
Journal of the Hydraulics Division, Vol 103, HY 10, pp. 1222-1227.
- Nalluri Alvarez [1976]
Erosion of Cohesive Sediment Beds in Open Channels.
Euromech 215, Mechanics of Sediment Transport in Fluvial and Marine
Environment.
- Otsubo K. and K. Muruoka [1988]
Critical Shear Stress of Cohesive Bottom Sediments.
Journal of Hydraulic Engineering, Vol.114, No.10.
- Parchure, T.M. and A.J. Mehta [1985]
Erosion of soft cohesive sediment deposits.
Journal of Hydraulic Engineering, Vol.111, No.10.
- Partheniades E. [1965]
Erosion and deposition of cohesive soils,
Journal of the Hydraulics Division, Vol. 91, No. HY1.
- Rijkswaterstaat [1985]
Zelfverdieping Off Shore Pijpleidingen.
Rijkswaterstaat, Memo, Directie Noordzee
- Rijkswaterstaat [1987]
The Closure of Tidal Basins.
Delft University Press.
- Rijn, L.C. van [1984]
Sediment Transport: Part I: Bed Load Transport, Part II: Suspended Load
Transport, Part III: Bed Forms and Alluvial Roughness, Journal of Hydraulic
Engineering, Vol. 110, No.10, 11, 12.

- Rijn, L.C. van [1985]
 The effect of waves on Kaolinite/Sand Beds
 Delft Hydraulics, M 2060
- Seehydrographischer Dienst DDR [1968]
 Atlas der Gezeitenströme für die Nordsee, der Kanal und die Irische See.
- Smerdon E.T. and R.P. Beasley [1959]
 The tractive force theory applied to stability of open channels in cohesive soils.
 Research Bulletin 715, College of Agriculture, University of Missouri, Columbia.
- Submarine Pipeline Spoilers B.V. [1990]
 Evaluation of Spoiler Effect on Stimulated Self-Burial of Placid International Oil Ltd. K12-a/K12-cc Pipeline.
 Submarine Pipeline Spoilers B.V.
- Sumer, B.M., H.R. Jensen, Y. Mao and J. Fredsoe [1988]
 Effect of Lee-Wake on Scour below Pipelines in Current.
 Journal of Waterways, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol.114, No.5
- Sumer, B.M., Y. Mao and J. Fredsoe [1988]
 Interaction between Vibrating Pipe and Erodible Bed.
 Journal of Waterways, Port, Coastal, en Ocean Engineering, vol.114, No.1.
- Terwindt, J.H.J., H.N.C. Breusers and J.N. Svasek [1966]
 Experimenteel onderzoek naar de erosie van zand-kleilaminaten,
 Nota K241, Waterloopkundig Laboratorium Delft
- Tritton D.J. [1977]
 Physical Fluid Dynamics.
 Nostrand Reinhold (UK) Co.Ltd.
- Umita T., T. Kusuda, T. Futawatari, Y. Awaya and M. Onuma [1986],
 A Model of Erosion of Soft Cohesive Sediments.
 Third International Symposium on River Sedimentation, Mississippi.
- Vanoni, V.A. and N.H. Brooks [1957]
 Laboratory Studies of the Roughness and Suspended Load of Alluvial Streams.
 California Institute of Technology, California, Report No.E-68.

BIJLAGE A

Eigenschappen van slib

INHOUD BIJLAGE A

1.	Inleiding	A1
2.	Kleimineralen	A1
2.1	Structuur van kleimineralen	A1
2.2	Rand- en wandlading van kleimineralen	A1
2.3	Electrische dubbellaag van kleimineralen	A2
2.4	Verbindingen van kleimineralen	A3
3.	Het uitvlokken van slib	A4
4.	Invloed van electroliet op de eigenschappen van slib	A6
5.	Invloed van de pH op de eigenschappen van slib	A8
6.	Invloed van organisch materiaal op de eigenschappen van slib	A8
6.1	Algemeen	A8
6.2	Polaire organische moleculen	A9
6.3	Organische polymeren	A9
6.4	Invloed organisch materiaal op slib in suspensie	A10
6.5	Invloed organisch materiaal op bezonken slib (bodemmateriaal)	A11
7.	Eigenschappen verschillende kleimineralen	A13
7.1	Algemeen	A13
7.2	Kaoliniet	A14
7.3	Montmorilloniet	A15
7.4	Illiet	A16
	Literatuur	A17

1 INLEIDING

Slib bestaat uit elementen met een diameter kleiner dan $53 \mu\text{m}$. Slib is zelf onder te verdelen in colloïdale stoffen (diameter $< 1 \mu\text{m}$) en niet colloïdale stoffen (diameter $> 1 \mu\text{m}$). Tot de colloïdale stoffen behoren de kleimineralen. De niet colloïdale stoffen worden ook wel met silt aangeduid en bevatten mineralen zoals quartz, veldspar en glimmer. Het kenmerkende cohesieve karakter van slib wordt veroorzaakt door de colloïdale fractie.

De kleimineralen bestaan uit plaatvormige deeltjes die aan de oppervlakken een negatieve lading bezitten. Het geladen karakter van de deeltjes maakt het mogelijk dat verschillende deeltjes elkaar aantrekken of afstoten. Dit aantrekken of afstoten veroorzaakt het uitvlokken respectievelijk dispergeren van een mengsel.

2 KLEIMINERALEN

2.1 STRUCTUUR VAN KLEIMINERALEN

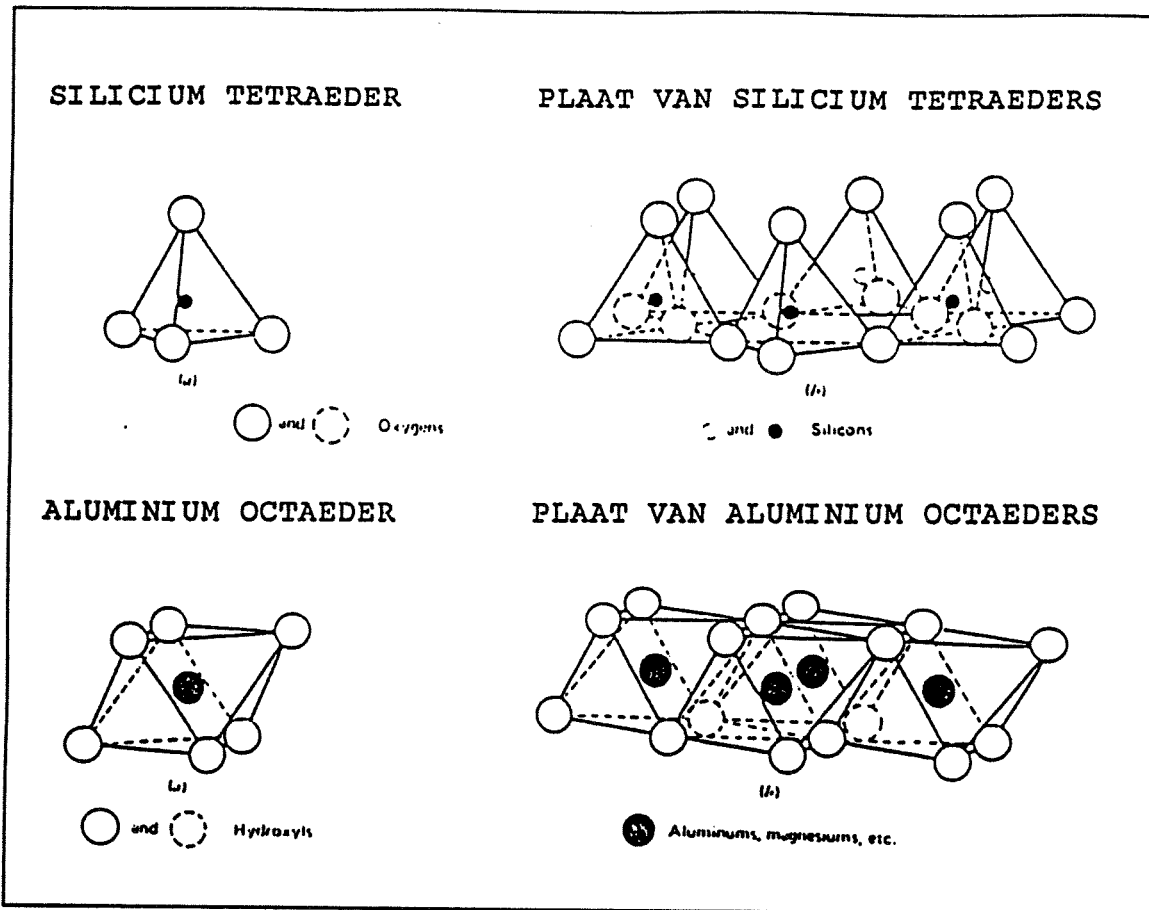
Kleideeltjes zijn opgebouwd uit een stapeling van platen van Silicium (SiO_4) tetraëders en platen van Aluminium ($\text{Al}_2(\text{OH})_6$) of Magnesium ($\text{Mg}_3(\text{OH})_6$) octaëders (minder vaak voorkomende cationen in deze octaëders zijn Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Ti^{4+} , Ni^{2+} , Cr^{3+} , Li^+). Een voorbeeld van de afzonderlijke platen is gegeven in figuur A.1.

De platen van SiO_4 tetraëders hebben aan één van de twee kanten (vrije) restvalenties. De restvalenties worden bezet wanneer SiO_4 -platen aan $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ (of $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$) platen gekoppeld worden (vorming kleimineraal). In principe is dan het geheel electroneutraal, echter er zijn altijd enkele Si^{4+} atomen die verwisseld worden met Al^{3+} of Mg^{2+} atomen (isomorfe substitutie). Op de plaatsen waar dit gebeurt zullen negatieve restvalenties overblijven. Het gevolg is een plaatvormig deeltje, opgebouwd uit verschillende lagen, met aan de vlakke wanden (de boven- en onderzijde) een aantal vrije negatieve valenties. Aan de randen (de zijkanten) van de plaatvormige deeltjes bevinden zich veel meer (vrije) restvalenties als gevolg van onvoltooide tetraëders en octaëders. Deze restvalenties zijn echter zowel positief als negatief.

2.2 RAND- EN WANDLADINGEN VAN KLEIMINERALEN

De lading aan de rand en de wanden van de kleideeltjes wordt veroorzaakt door restvalenties in het oppervlak van het deeltje.

De negatieve lading aan de wand van de kleideeltjes is onafhankelijk van de omringende vloeistof. De lading aan de randen van de kleideeltjes is wel afhankelijk van de omringende vloeistof. Bepaalde ionen kunnen een binding aangaan met de randen van de deeltjes (door middel van preferente adsorptie). Zij worden als het ware in de structuur opgenomen en neutraliseren daar de positieve ladingen. Op deze



Figuur A.1 Bouwelementen van kleideeltjes (silicium tetraëders en aluminium octaëders) (Mitchell [1976]).

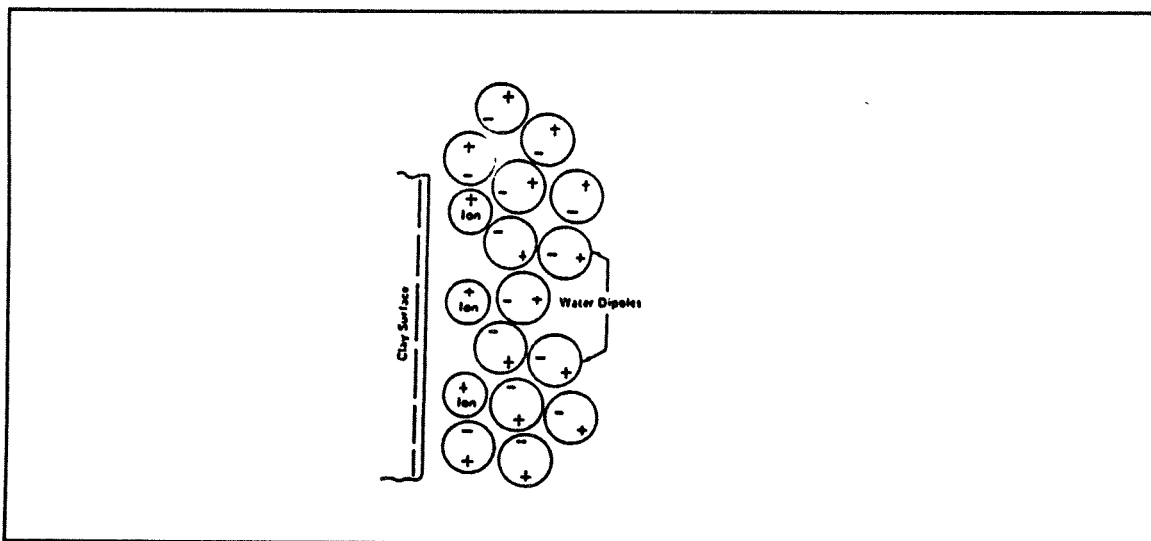
manier blijven ook bij de rand alleen maar negatieve restvalenties over.

Een andere mogelijkheid om de randlading van de deeltjes te beïnvloeden is een verandering van de pH. In een basisch milieu ($\text{pH} > 7$) zullen de OH-groepen van de wanden en randen van het deeltje een H^+ afstaan. Hierdoor blijft een negatieve restvalentie over. In de wanden heeft dit weinig invloed omdat deze toch al negatief geladen zijn. In de rand kan deze reactie echter tot gevolg hebben dat de positieve lading verdwijnt of zelfs overgaat in een negatieve lading.

2.3 ELECTRISCHE DUBBELLAAG VAN KLEIMINERALLEN

De elektrisch geladen wanden en randen van de kleideeltjes zullen tegengesteld geladen ionen uit de oplossing naar zich toe trekken. In een waterige oplossing zullen dat in eerste instantie watermoleculen zijn. Watermoleculen zijn dipolen die hun positieve kant naar de kleideeltjes zullen keren. Wanneer er andere positief geladen ionen in de oplossing aanwezig zijn dan kunnen de watermoleculen vervangen worden door deze ionen.

De door de kleideeltjes aangetrokken geladen ionen of dipolen vormen een laagje om het kleideeltje heen. De combinatie van wandionen en tegenionen wordt de elektrische dubbellaag genoemd (figuur A.2). Afhankelijk van de tegenionen is de dubbellaag groter of kleiner en kunnen zodoende de kleideeltjes meer of minder makkelijk benaderd worden door andere deeltjes. Deze benaderbaarheid van de deeltjes is weer bepalend voor het wel of niet samenklonteren en uitvlokken van de deeltjes.



Figuur A.2 Elektrische dubbellaag van een kleideeltje (Mitchell [1976]).

2.4 VERBINDINGEN VAN KLEIDEELTJES

De elektrisch geladen kleideeltjes trekken andere elektrisch geladen deeltjes aan en kunnen afhankelijk van de omstandigheden zwakke tot zeer sterke bindingen aangaan. De aangetrokken deeltjes kunnen zijn:

- a. cationen afkomstig van opgeloste zouten (bijv. Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+),
- b. andere kleideeltjes,
- c. organische deeltjes.

ad a: Wanneer er in de oplossing aanwezige cationen (bijvoorbeeld afkomstig van opgeloste zouten) aangetrokken worden dan zullen deze in de elektrische dubbellaag opgenomen worden. Watermoleculen worden dan vervangen door de veel kleinere en sterker geladen cationen. De dubbellaag wordt op die manier ingedrukt en de kleideeltjes worden beter benaderbaar voor andere kleideeltjes.

ad b: Kleideeltjes kunnen bindingen aangaan met andere kleideeltjes wat uitvlokken tot gevolg heeft. Deze bindingen worden in een apart onderdeel besproken (Par.3: "Het uitvlokken van slib").

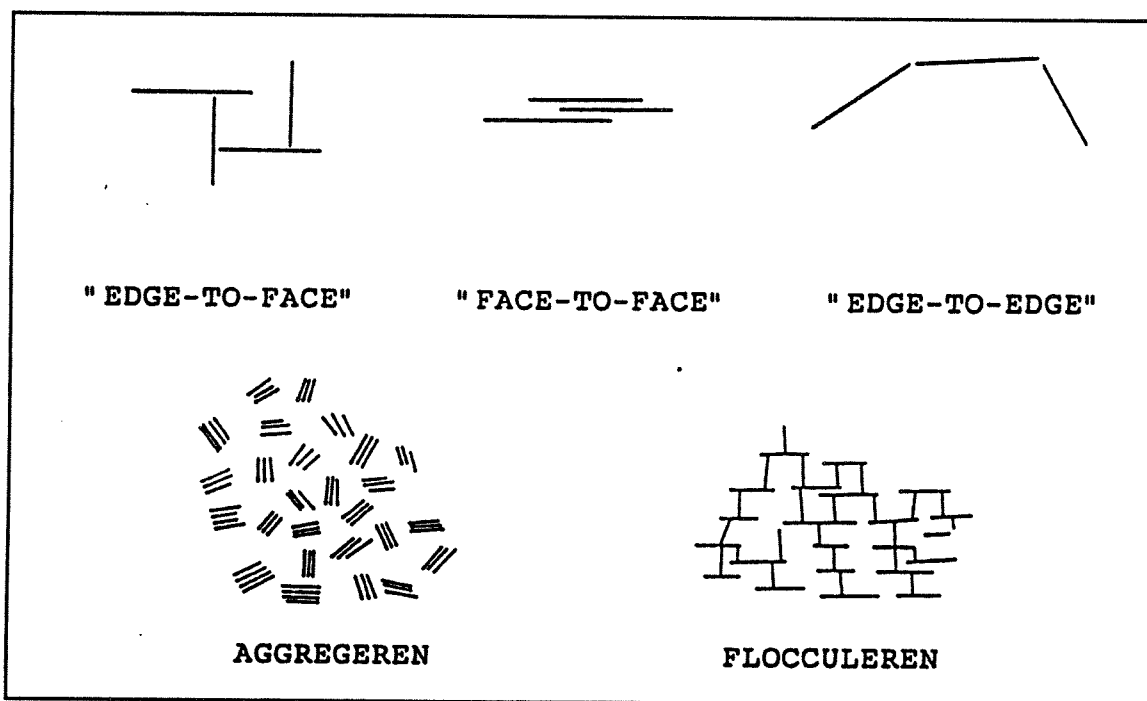
ad c: Organische deeltjes kunnen eenzelfde cohesief karakter vertonen als kleideeltjes. Het is mogelijk dat de organische deeltjes elektrische ladingen bezitten maar het is ook mogelijk dat ze weliswaar ongeladen zijn maar een polair karakter hebben. Om

die reden kunnen kleideeltjes ook verbindingen aangaan met organische deeltjes. Verbindingen tussen kleideeltjes en organische deeltjes kunnen het uitvlokken van slib stimuleren of juist tegengaan. Deze verbindingen worden eveneens in een apart onderdeel besproken (Par.6 "Invloed van organisch materiaal op de eigenschappen van slib").

3 HET UITVLOKKEN VAN SLIB

Het uitvlokken van kleideeltjes kan op verschillende manieren gebeuren (figuur A.3). Wanneer de positief geladen randen een verbinding aangaan met de negatief geladen wanden (edge-to-face verbinding) ontstaat een kaartenhuisachtige structuur. Op deze manier worden grote vlokken gevormd met een relatief lage dichtheid. De vlokken zijn gemakkelijk uit elkaar te trekken omdat de bindingen relatief zwak zijn.

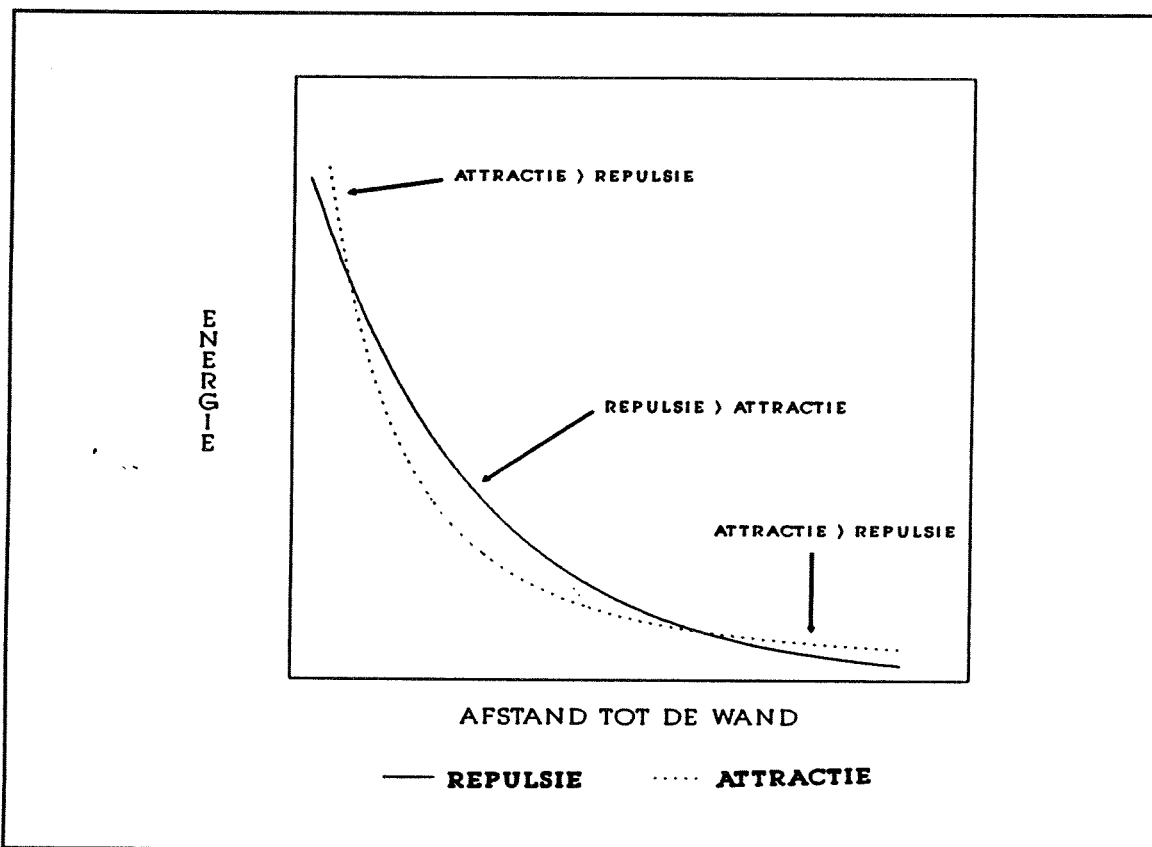
Wanneer echter de negatief geladen wanden (of de positief geladen randen) elkaar zeer dicht kunnen naderen ontstaan sterke Van der Waals verbindingen (face-to-face of edge-to-edge verbindingen). Op deze wijze ontstaan kleine hechte vlokken met een grote dichtheid. Het op deze manier samenklonteren van deeltjes wordt ook wel aggregeren genoemd.



Figuur A.3 Verbindingen tussen kleideeltjes.

De soort verbinding tussen verschillende deeltjes is afhankelijk van de intensiteit en het teken van de lading aan de rand en aan de wanden van het deeltje. (Bijv. wanneer aan de rand van het deeltje de attractie overheerst en aan de wand de repulsie dan ontstaan 'edge-to-edge' of 'edge-to-face' verbindingen). Een belangrijke factor hierbij is zowel de potentiële als de kinetische energie van het deeltje.

De potentiële energie van een deeltje wordt bepaald door de resultante van de attractie energie (aantrekkingskrachten) en de repulsie energie (afstotingskrachten). Aantrekkingskrachten komen voort uit Van der Waalskrachten. Deze Van der Waalskrachten zijn additief wat wil zeggen dat ze gelijk zijn aan de som van de krachten afzonderlijk (elke afzonderlijke restvalentie aan het oppervlak van het kleideeltje heeft een eigen relatief kleine aantrekkingskracht en alle afzonderlijke aantrekkingskrachten tesamen leveren de totale aantrekkingskracht). De aantrekkingskracht neemt evenredig af met $1/x^b$ ($1 < b < 6$) waarbij x de afstand tot het deeltje is. Afstotingskrachten komen voort uit elektrische afstoting. De afstotingskracht neemt evenredig af met e^{-x} . Ver van de wand en heel dicht bij de wand zullen de aantrekkingskrachten overheersen (figuur A.4). In het tussenliggende gebied zal de afstoting overheersen. Om een face-to-face verbinding aan te gaan met een ander deeltje moet dus een soort van barrière overwonnen worden.



Figuur A.4 Het verloop van de attractie- en de repulsie energie als functie van de afstand tot de wand

Naast potentiële energie hebben de deeltjes ook kinetische energie. Deze is afkomstig van de Brownse bewegingen. Turbulentie levert geen bijdrage aan de kinetische energie van de deeltjes. De tijdschaal van de turbulentie is in vergelijking met de tijdschaal van de Brownse beweging veel te groot.

Wanneer de kinetische energie groter is dan de potentiële (repulsie) energie dan kunnen de deeltjes een verbinding met elkaar aangaan. Het resultaat is vlokvorming.

Al of niet uitvlokken wordt bepaald door (Terwindt [1964]):

- de ionenconcentratie in de oplossing; een hoge ionenconcentratie zorgt voor een goede geleiding in de vloeistof, daarnaast kunnen veel watermoleculen uit de dubbellaag vervangen worden voor ionen waardoor de dubbellaag ingedrukt wordt en uitvlokken gestimuleerd wordt.
- de valentie van de ionen in de oplossing; ionen met een hoge valentie zullen de elektrische dubbellaag van het kleideeltje meer indrukken waardoor de deeltjes sneller zullen uitvlokken.
- de anionen in de oplossing (bijv. Cl⁻); deze kunnen onoplosbare verbindingen vormen met de tegenionen van de kleideeltjes.
- de deeltjes concentratie; bij een hoge concentratie is de kans dat verschillende deeltjes elkaar raken en een verbinding aangaan groter, bij een te hoge concentratie zal het uitvlokken weer trager verlopen omdat de deeltjes elkaar zullen hinderen.

Turbulentie levert geen directe bijdrage aan de kinetische energie van een deeltje en beïnvloedt op die manier ook niet het uitvlokken van deeltjes. Indirect heeft de turbulentie wel invloed op het uitvlokken. Turbulentie zorgt voor het mengen van de vloeistof met het elektrolyet en met vlokken. Bovendien zal een hoge turbulentie de vorming van grote vlokken tegengaan. De vlokken worden als het ware uit elkaar gerukt.

Pas uitgevlokt slib zal een zeer losse structuur te zien geven van vlokken die elkaar op enkele plaatsen raken. De slibdeeltjes zullen niet afzonderlijk geërodeerd worden maar als hele vlokken tegelijk. Erosie van een dergelijk bed zal gemakkelijk plaatsvinden omdat de vlokken nauwelijks gebonden zijn in het bed.

Wanneer het bed enigszins geconsolideerd is zullen de vlokken dichter op elkaar gedrukt worden en zal ook de erosie moeilijker verlopen. De vlokken worden nog steeds als hele vlokken geërodeerd, echter de vlokken zijn nu onderling steviger aan elkaar gebonden.

Een nog verder geconsolideerd bed geeft geen vlokken meer te zien maar een geheel van op elkaar gedrukte kleideeltjes. Deze deeltjes hebben nu een sterke binding met elkaar die slechts moeilijk verbroken kan worden.

4 INVLOED VAN ELECTROLIET OP DE EIGENSCHAPPEN VAN SLIB

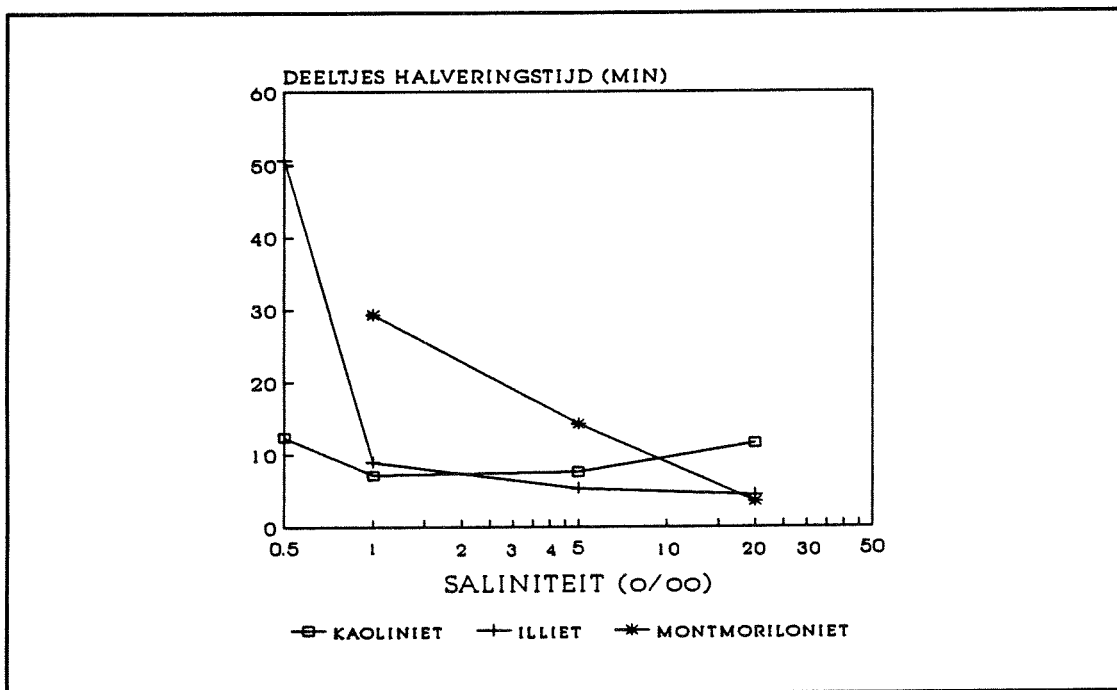
Door het toevoegen van een elektrolyet (zout) worden watermoleculen uit de dubbellaag van het kleideeltje door diffusie verwisseld door de zoutmoleculen (ionen). Deze ionen zijn kleiner dan de watermoleculen, bovendien zijn ze geladen. Het gevolg van deze verwisseling is dat de dubbellaag kleiner wordt; de lading van de kleideeltjes wordt op kortere afstand van de wand gecompenseerd. Als de dubbellaag kleiner is, is het mogelijk dat de verschillende deeltjes elkaar dichter naderen en kunnen de Van der Waalskrachten gaan overheersen. De negatief geladen wanden trekken elkaar ondanks de negatieve lading aan en er worden aggregaten gevormd.

Op deze manier ontstaat een hechte structuur van kleideeltjes.

Een ander gevolg van de aanwezigheid van een electroliet is een groter geleidend vermogen van de vloeistof. Hierdoor is het voor geladen deeltjes makkelijker om elkaar te beïnvloeden (aantrekken of afstoten). De reikwijdte van de aantrekkende dan wel afstotende kracht van een geladen deeltje is als het ware veel groter dan wanneer geen electroliet aanwezig zou zijn. Verschillende deeltjes kunnen elkaar op deze manier aantrekken en een verbinding vormen om gezamenlijk uit te vlokken.

Er bestaan theoriën die zeggen dat in een electrolietvrije oplossing eveneens uitvloeking plaatsvindt (Van Olphen en Fripiat [1977]). In dat geval bestaat de elektrische dubbellaag alleen uit watermoleculen en heeft zodoende een maximale grootte. Door de omvang van de deeltjes is de kans groot dat verschillende deeltjes elkaar tegen komen, een verbinding vormen (in dit geval edge-to-face verbindingen) en uitvlokken. In de praktijk wordt dit verschijnsel veelal niet gevonden (Terwindt [1964]).

De invloed van de saliniteit ofwel het electroliet is op zich afhankelijk van het kleimineraal. Bij een oplopende saliniteit (vanaf 0 o/oo) zullen in eerste instantie de kaolinetmineralen uitvlokken, vervolgens de illietmineralen en tenslotte de montmorillonietmineralen (figuur A.5).



Figuur A.5 Relatie tussen de halveringstijd en de saliniteit voor illiet, kaolinet en montmorilloniet (Gibbs [1983]).

Niet alleen de waarde van de saliniteit is belangrijk maar ook de samenstelling van de opgeloste zouten speelt een rol. Deze samenstelling wordt ook wel aangegeven door de SAR (sodium adsorption ratio), welke door Arulanandan [1975] werd gedefinieerd

als:

$$SAR = \frac{[Na^+] + [K^+]}{(0.5 * ([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]))^{0.5}}$$

$[Na^+]$, $[K^+]$, $[Ca^{2+}]$, $[Mg^{2+}]$: molaire concentratie van respectievelijk Natrium, Kalium, Calcium en Magnesium.

De SAR bepaalt de stabiliteit van de kleisoort. Een lage SAR (<2) geeft aan dat er in het materiaal relatief veel calcium en magnesium zit. De dubbellaag is hierdoor sterk ingedrukt en het materiaal zal dus stabiel zijn. Een hoge SAR (20 á 30) wil zeggen dat er relatief meer natrium en kalium aanwezig is. Het materiaal zal gemakkelijker (al bij lage zoutconcentraties) overgaan in gedispergeerde deeltjes, en is dus instabieler.

5 INVLOED VAN DE pH OP DE EIGENSCHAPPEN VAN SLIB

Door de pH te veranderen wordt voornamelijk de randlading beïnvloed (Wilson [1987]). In het oppervak van kleimineralen zit het bestanddeel SiOH. In een basisch milieu ($pH > 7$) staat dit element een H-atoom af: $SiOH \rightarrow SiO^- + H^+$. Er blijft een negatief geladen element (SiO^-) in het oppervlak van het kleimineraal achter (Mitchell [1976]). In het wandoppervlak zal dit verschijnsel niet veel effect hebben omdat het wandoppervlak al negatief geladen is. In de rand van het kleimineraal kan deze reactie echter tot gevolg hebben dat de positieve lading verdwijnt of zelfs overgaat in een negatieve lading. De deeltjes zijn dan aan alle kanten negatief geladen en een edge-to-face verbinding zal niet meer ontstaan; deflocculatie is het gevolg.

De invloed van de pH op de eigenschappen van slib wordt duidelijk door de verandering van de kritische bodemschuifspanning van een kaolinetbed. Bij een verlaging van de pH van 7 naar 5 wordt een verdubbeling van de kritische schuifspanning gevonden. Bij een verhoging van de pH van 7 naar 8 halveert de kritische bodemschuifspanning (Verreest en Berlamont [1986]).

6 INVLOED VAN ORGANISCH MATERIAAL OP DE EIGENSCHAPPEN VAN SLIB

6.1 ALGEMEEN

Organisch materiaal is zowel fysisch als chemisch een zeer complex materiaal. Alle stoffen die uit koolstof verbindingen bestaan worden onder de naam organisch materiaal verzameld. Mitchell [1976] definieert 5 soorten organisch materiaal: koolhydraten, proteïnen, vetten, koolwaterstoffen (hydrocarbons), en koolstoffen (carbons). Organisch materiaal kan sterk variëren in grootte, afhankelijk van de soort

en van de mate van degradatie. De zeer kleine deeltjes (colloïdale deeltjes) kunnen nog steeds sterk variëren in eigenschappen afhankelijk van het materiaal en de omstandigheden.

Colloïdale organische deeltjes kunnen worden geadsorbeerd door kleimineralen. Afhankelijk van de afmetingen en de aard van de organische deeltjes (al of niet polair, al of niet geladen) kunnen ofwel relatief zwakke ofwel sterke tot zeer sterke bindingen ontstaan.

6.2 POLAIRE ORGANISCHE MOLECULEN

Door de adsorptie van de zeer kleine polaire organische moleculen wordt de elektrische dubbellaag van de kleideeltjes groter wat uitvlokken tegengaat. De binding tussen de polaire organische moleculen en de kleimineralen is zeer sterk (van chemische aard). Een substantie van zeer fijne individuele deeltjes is het gevolg (Wilson [1987]).

(Een voorbeeld hiervan wordt gevonden in de porcelein industrie. Voor de productie van porcelein wordt het kleimineraal kaoliniet (China-klei) gebruikt. Om de kaoliniet beter te kunnen verwerken wordt deze opgeslagen in een urinemengsel. De urine vormt langzaam het organische bestanddeel urea welke een sterke binding aangaat met het kaoliniet. Het resultaat is een makkelijk verwerkbaar mengsel van zeer fijne individuele deeltjes kaoliniet.)

Uit een onderzoek met organische chemicalien (methanol, heptaan) blijkt het tegenovergestelde van wat hierboven beweerd wordt. Daar wordt geconcludeerd dat door de organische moleculen de elektrische dubbellaag ingedrukt wordt waardoor flocculatie gestimuleerd wordt. In de bodem heeft dit indrukken van de dubbellaag het naar elkaar toe trekken van de verschillende deeltjes tot gevolg en daarbij een compactere samenstelling van de bodem. De plasticiteit en de doorlatendheid van het bodemmateriaal kan maar hoeft niet noodzakelijk te veranderen. Wordt de plasticiteit beïnvloed dan wordt in tegenstelling tot het natuurlijke organische materiaal waar een verhoogde plasticiteit gevonden wordt, bij organische chemicalien juist een verlaagde of zelfs geheel geëlimineerde plasticiteit gevonden (Foreman en Daniel [1986]).

6.3 ORGANISCHE POLYMEREN

Door de afbraak van natuurlijk levend organisch materiaal ontstaan organische polymeren. Deze polymeren kunnen eveneens door de kleideeltjes geadsorbeerd worden.

Positief geladen polymeren kunnen een zeer sterke binding aangaan met het negatief geladen oppervlak van de kleideeltjes.

Negatief geladen polymeren kunnen gebonden worden aan de positief geladen randen van de kleideeltjes. Ze compenseren de randlading en werken zodoende het uitvlokingsmechanisme, gebaseerd op de aantrekking van positieve randlading en negatieve wandlading (edge-to-face), tegen.

Neutrale geadsorbeerde polymeren kunnen de flocculatie zowel verhinderen als stimuleren (Burchill et al [1981]). Een polymeer kan enerzijds optreden als brug tussen verschillende kleimineralen en zodoende flocculatie stimuleren (Mitchell [1976], Wilson [1987]), anderzijds kan een polymeer als beschermlaag dienen voor de kleidelen en zodoende flocculatie juist verhinderen (Terwindt [1964], Wilson [1987]).

(Evenals kleideeltjes kunnen humusdeeltjes een negatief geladen oppervlak bezitten. Dit geladen oppervlak trekt moleculen aan met een tegengestelde lading. Het deeltje wordt als het ware omgeven door een laag moleculen, de elektrische dubbellaag. Humus adsorbeert in een waterige oplossing bij voorkeur watermoleculen (hydrophiele colloïd). Deze watermoleculen worden niet gemakkelijk verwisseld voor andere moleculen (bijvoorbeeld zoutmoleculen). Zolang dit laagje water om de deeltjes, de zogenaamde hydratatielaag, aanwezig is zal geen uitvloeking plaatsvinden omdat de deeltjes elkaar niet dicht genoeg kunnen naderen. Bij de aanwezigheid van zoutmoleculen kan wel uitvloeking plaatsvinden, echter eerst moet de hydratatielaag ongedaan gemaakt worden. Door het hydrophiele karakter van de organische deeltjes zal dit niet gemakkelijk gebeuren; een hoog zoutgehalte is vereist. Kleimineralen bezitten geen directe voorkeur voor watermoleculen. Zij verwisselen geadsorbeerde watermoleculen gemakkelijk voor andere moleculen (bv. zoutmoleculen of andere kleideeltjes). De elektrische dubbellaag wordt hierdoor kleiner (ingedrukt) en uitvloeking is het gevolg. Het is mogelijk dat de hydrophiele colloïden (organische deeltjes) de hydrophobe colloïden (kleimineralen) afschermen voor de toenadering van zoutmoleculen. (Terwindt [1964]))

6.4 INVLOED ORGANISCH MATERIAAL OP SLIB IN SUSPENSIE

Zoals hierboven beschreven kan organisch materiaal een coating vormen om kleideeltjes. De kleideeltjes worden weliswaar groter, echter de toenadering tot andere kleideeltjes wordt verhinderd. Het gevolg hiervan is een vertraagde uitvloeking (Gibbs [1983]). Dit verschijnsel wordt voornamelijk waargenomen bij lage zoutgehaltes. Bij zeer lage zoutgehaltes (0.6 o/oo) kan de verhouding tussen de halveringstijd (tijd dat het aantal deeltjes gehalveerd is door coagulatie) van wel en niet gecoatete deeltjes oplopen tot een factor 5. Bij zoutgehaltes groter dan ongeveer 17 o/oo is het verschil verwaarloosbaar (Tabel 1).

Niet actief organisch materiaal heeft nauwelijks invloed op het uitvlokkingsgedrag van slib (Gibbs [1983]).

Tabel 1 Halveringstijd voor wel en niet gecoate kleideeltjes als functie van het zoutgehalte.

zoutgehalte (o/oo)	halveringstijd $T_{1/2}$ (min)	
	gecoate kleideeltjes	niet gecoate kleideeltjes
0.6	55	11
1.1	32	19
4.4	14	12
17	12.5	11

6.5 INVLOED ORGANISCH MATERIAAL OP BEZONKEN SLIB (BODEM-MATERIAAL)

Natuurlijk organisch materiaal in de bodem wordt ook wel humus genoemd. Humus kan de plasticiteit, de krimp, de samendrukbaarheid, de doorlatendheid en de schuifsterkte beïnvloeden (Mitchell [1976]). Evenals in suspensie kan het organisch materiaal een coating vormen om de kleimineralen waardoor zowel de eigenschappen van de kleimineralen als van de organische materialen zelf veranderen. Als dit niet gebeurt zullen ook de eigenschappen van de kleimineralen niet veranderen. De adsorptie van het organische materiaal (of eigenlijk het soort organisch materiaal) hangt evenals bij het slib in suspensie af van het zoutgehalte.

Het watergehalte van grond neemt toe bij toenemend percentage organisch materiaal. Dit toegenomen watergehalte levert niet alleen een grotere krimp maar eveneens een grotere samendrukbaarheid en een lagere schuifspanning.

Het water dat zich in de grond bevindt is voor een groot deel gebonden aan het organische materiaal (hydratatielaag). Dit geeft de grond een lagere doorlatendheid ook al heeft de grond een groter watergehalte en dus eigenlijk een groter poriënvolume.

De plasticiteit wordt eveneens beïnvloed door de aanwezigheid van organisch materiaal. De mate waarin is echter zowel afhankelijk van het kleimineraal als van het soort organisch materiaal. Toevoeging van een colloïdale extractie van zeewier (agar) aan kaoliniet levert een Plasticiteits Index (PI) die 10 (5% toevoeging) tot 15 (15% toevoeging) keer vergroot is (zie tabel 2). Toevoeging van hetzelfde materiaal aan bentoniet levert echter een vergroting van de PI van 1.6 (5% toevoeging) tot 1.8 (15% toevoeging) (Otsubo en Muraoka [1988]). Uit andere onderzoeken blijkt dat bij een toevoeging van 1 á 2 procent organisch materiaal aan een grondmonster een zelfde effect op de PI gevonden wordt als bij een toevoeging van 10 tot 20 procent slib ($< 2\mu\text{m}$) (Mitchell [1976]).

Tabel 2 Invloed van de toevoeging van organisch materiaal (agar) aan verschillende soorten klei (Otsubo en Muraoka [1988]).

	D_{50} (10^{-6} m)	Plasticiteits Index (%)
Kaoliniet	6.5	12.5
+ 5% agar		121.5
+ 10% agar		175.2
+ 15% agar		189.2
+ 20% agar		280.5
Bentoniet	14.4	153.5
+ 2.5% agar		213.6
+ 5% agar		247.2
+ 10% agar		215.6
+ 15% agar		277.4

Behalve het soort kleimineraal speelt ook het soort organisch materiaal een rol bij de invloed van de PI. Het estuariene Antwerpse slib en mariene Zeebrugge slib met nagenoeg eenzelfde granulometrische en mineralogische samenstelling verschilt duidelijk in plasticiteit en in kritische schuifspanning (Verreet en Berlamont [1986]). Bij onderzoek van het organisch materiaal blijkt dat het estuariene slib relatief meer polair, actief materiaal (humus- en fulvuszuren) bevat terwijl het mariene slib relatief veel non-actief, apolair materiaal bevat (lipoiden) (Tabel 3).

De humus- en de fulvuszuren zijn door hun polaire karakter voornamelijk verantwoordelijk voor veranderingen van de eigenschappen van slib. De fractie lipoiden en humine spelen een ondergeschikte rol.

Waarom in het estuariene slib meer polair materiaal en in het mariene slib meer apolair materiaal aanwezig is, is niet helemaal duidelijk. Het is mogelijk dat het zoutgehalte een rol speelt. Het zoutere Zeebruggeslib (zoutgehalte 31 o/oo) wordt veel minder beïnvloed door de aanwezigheid van het organische materiaal dan het brakke Antwerpse slib (zoutgehalte 4 ‰). Een vergelijkbaar resultaat werd gevonden bij het slib in suspensie (hierboven beschreven).

Om de complexiteit van de invloed van organisch materiaal te illustreren wordt een voorbeeld aangehaald van een bodem met levend (organisch) materiaal (organismen). Levende organismen (bv. wormen) wroeten in de bodem op zoek naar voedsel. Hierbij wordt de samenstelling van de bodem verstoord. Een veel lossere samenstelling is het resultaat. Aan de andere kant scheiden de levende organismen een eveneens organische substantie af (mucus). Deze slijmachtige substantie zorgt weer voor het samenkiten van grond en heeft daarmee een sterkere samenstelling van de grond tot gevolg (Montagne [1984]).

Tabel 3 Samenstelling organisch materiaal van Antwerpens en van Zeebrugge slib (Verreet et al [1986]).

	apolair organisch materiaal	polair organisch materiaal				
	lipoiden*	vrije humus zuren*	gebonden humus zuren*	vrije fulvus zuren*	gebonden fulvus zuren*	humine*
Antwerpen	0.87	0.49	0.85	0.24	0.07	2.00
Zeebrugge	2.10	0.20	0.15	0.07	0.04	1.10

* Verklaring organische bestanddelen:
-lipoiden: relatief instabiele apolaire stoffen, afkomstig van levend organisch materiaal. Door het apolaire karakter is dit materiaal niet interactief met andere deeltjes (kleideeltjes).
-humuszuren en fulvuszuren: hoogmoleculaire, polaire stoffen. Dit zijn actieve stoffen (door hun polaire karakter) die kunnen reageren met kleideeltjes.
-humine: stoffen die moeilijk afbreken. Deze stoffen lijken in principe op de humus- en fulvuszuren. Ze zijn echter zwaarder en veel minder actief. Ook al zijn deze stoffen net als de humus- en fulvuszuren hoogmoleculair, ze zijn toch relatief inert onafgebroken cellulosemateriaal).

7 EIGENSCHAPPEN VERSCHILLENDE KLEIMINERALEN

7.1 ALGEMEEN

De cohesiviteit van slib wordt voornamelijk bepaald door de kleifractie van het desbetreffende slib. Deze kleifractie bestaat meestal uit een mengsel van verschillende kleimineralen. De eigenschappen van het slib zijn afhankelijk van de samenstelling van de verschillende kleimineralen. Er zijn diverse kleimineralen (kaolinet, smectiet, montmorilloniet, vermiculiet, chloriet, bentoniet, illiet, saponiet enz.) die alle, afhankelijk van hun bouw, verschillende eigenschappen hebben.

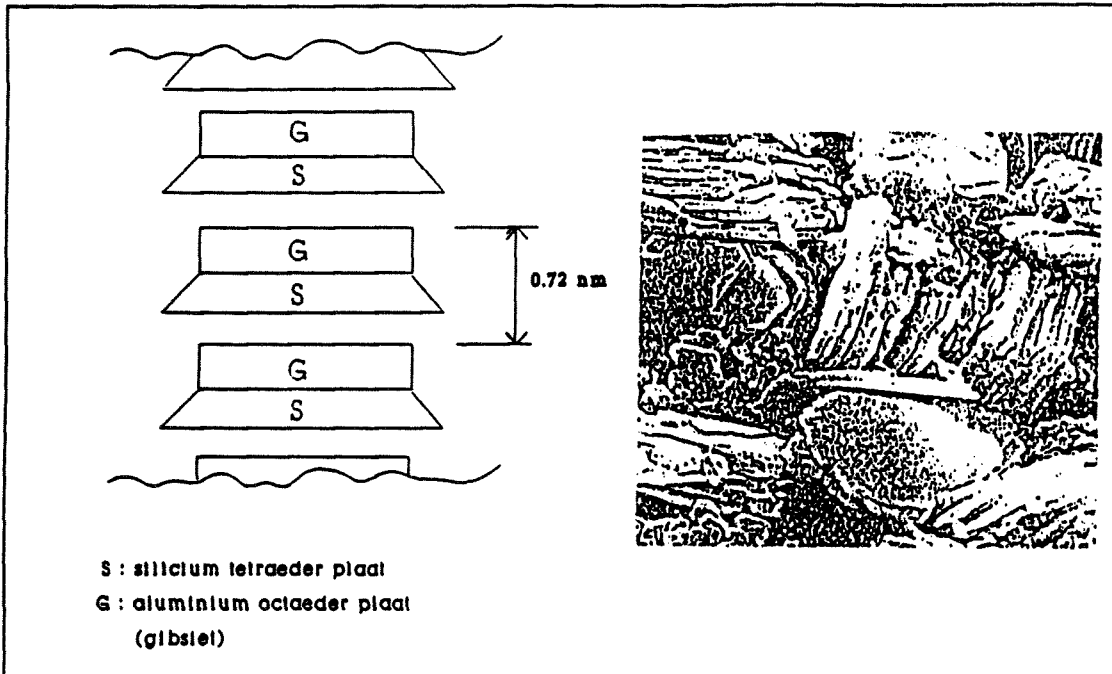
De eigenschappen van de meest voorkomende kleimineralen worden hier besproken.

Een veel voorkomende parameter van kleimineralen is de CEC, ofwel de 'cation exchange capacity'. De CEC zegt iets over de mate waarin een deeltje cationen kan binden. Een hoge CEC waarde geeft dus een groot aantal uitwisselbare cationen aan en daarmee samenhangend een deeltje dat een sterke binding aan kan gaan met andere deeltjes.

De hieronder vermelde gegevens zijn afkomstig uit Van Olphen en Fripiat [1977] en uit Mitchel [1976].

7.2 KAOLINIET

Kaolinite bestaat uit platen die opgebouwd zijn uit een laag silica tetraëders (SiO_4) gekoppeld aan een laag aluminium octaëders ($\text{Al}_2(\text{OH})_6$), ook wel gipsiet genoemd (figuur A.6). Hoogstwaarschijnlijk is bij kaolinite nauwelijks sprake van het vervangen van Si- of Al-atomen door andere atomen (isomorfe substitutie) en zal er dus weinig restlading op de wanden aanwezig zijn. Het feit dat er wel een CEC gemeten wordt bewijst dat er wel enige negatieve lading aanwezig is.



Figuur A.6 Schematisatie van de structuur van een kaolinite deeltje en een electron photomicrograph (breedte foto $17 \mu\text{m}$) van kaolinite deeltjes, Mitchell [1976].

De CEC van kaolinite is afhankelijk van de pH (een hoge pH, basisch milieu, geeft een negatieve randlading en dit geeft weer een hogere CEC) wat erop wijst dat de CEC gedeeltelijk bepaald wordt door de randlading.

Goed uitgekristalliseerde deeltjes bestaan uit goed gevormde zeskantige plaatjes (figuur A.6).

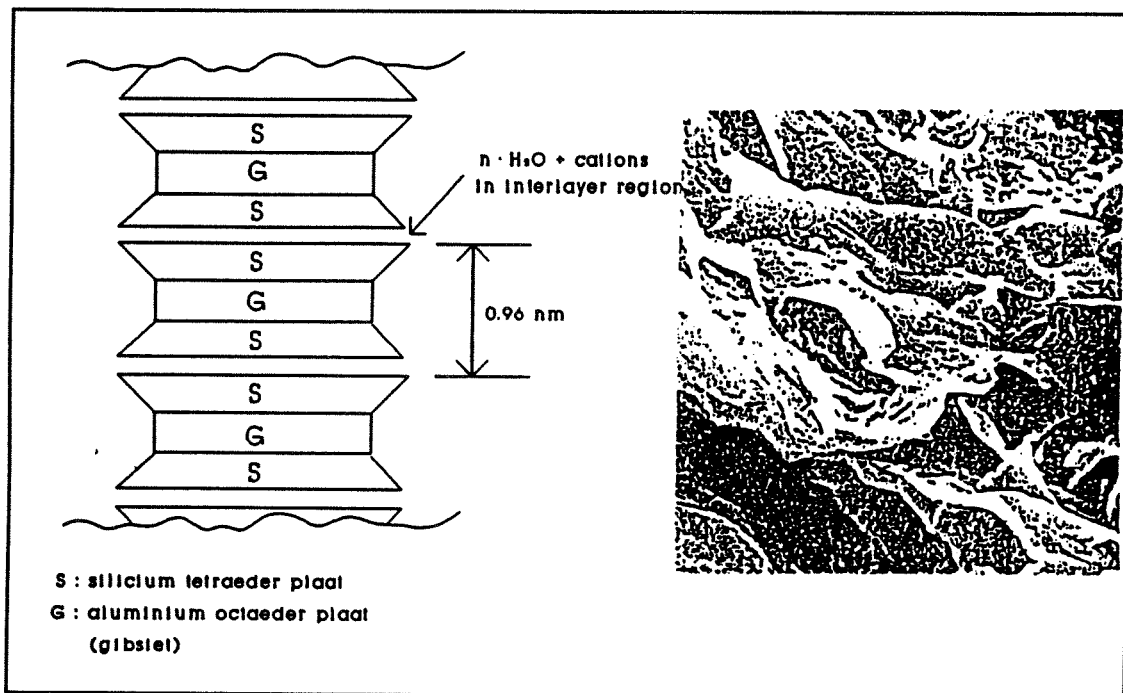
Het specifieke oppervlak is 10 tot $20 \text{ m}^2/\text{g}$.

De CEC is 3 tot $15 \text{ meq}/100\text{g}$.

Afmetingen zijn $0,05 - 2 \mu\text{m}$ (dikte) bij $0,1 - 4 \mu\text{m}$ (lengte).

7.3 MONTMORILLONIET

Montmorilloniet behoort tot de smectieten. Deze bestaan uit platen van een laag aluminium octaëders die tussen twee lagen silicium tetraëders gesandwiched zit. Verschillende platen (tetraëder-octaëder-tetraëder) worden weer aan elkaar gebonden (op elkaar) door Van der Waals krachten of door cationen die oneffenheden in de lading van de oppervlakken neutraliseren (figuur A.7). Deze bindingen zijn echter zeer zwak. In principe is het geheel electroneutraal, (het electroneutrale deeltje wordt pyropyliet-talk genoemd) echter door extensieve substitutie van aluminium en silicium door andere cationen (Mg, Fe, etc) krijgt het deeltje toch een lading. In een montmorilloniet deeltje is elk zesde aluminium atoom vervangen door een magnesium atoom. Als gevolg van dit hoge aantal, op deze manier ontstane, restvalenties is de cohesieviteit van montmorilloniet groot.



Figuur A.7 Schematisatie van de structuur van een montmorilloniet deeltje en een electron photomicrograph van montmorilloniet deeltjes (breedte foto $7.5 \mu\text{m}$), Mitchell [1976].

Montmorilloniet deeltjes bestaan uit zeer dunne, filmachtige schilfers (fig. A.7).

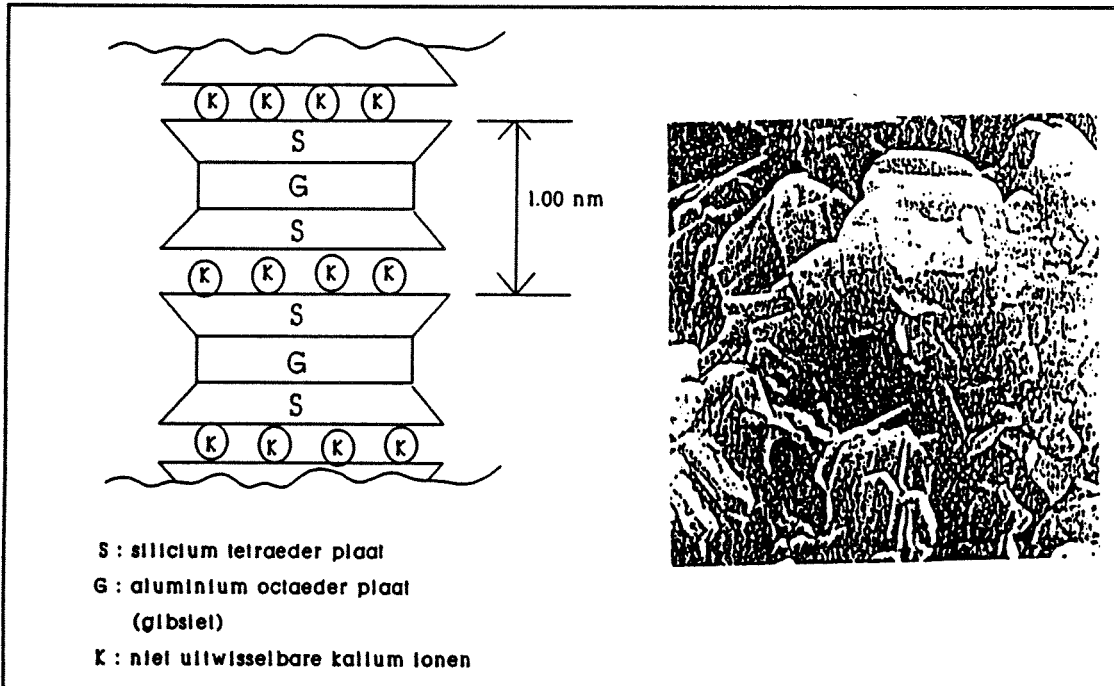
Het specifieke oppervlak is erg groot. Het primaire specifieke oppervlak (uitgezonderd het oppervlak van de interlaying zones) is 50 tot $120 \text{ m}^2/\text{g}$. Het secundaire oppervlak (plus interlaying zones) is 700 tot $840 \text{ m}^2/\text{g}$.

De CEC is 80 tot $150 \text{ meq}/100\text{g}$.

De afmetingen zijn 1 nm (dikte) bij 1 tot $2 \mu\text{m}$ (breedte).

7.4 ILLIET

Illiet behoort tot de mica-achtige mineralen. Deze bestaan uit dezelfde sandwich achtige delen als de smectieten. Bij mica deeltjes is echter een kwart van de silicium posities vervangen door aluminium. Het resterende ladingverschil wordt geneutraliseerd door niet-uitwisselbare kalium-ionen tussen de verschillende platen (figuur A.8).



Figuur A.8 Schematisatie van de structuur van een illiet deeltje en een electron photomicrograph van illietdeeltjes (breedte foto $7.5 \mu\text{m}$), Mitchell [1976].

Illiet verschilt weer enigszins van mica:

- er is minder silicium vervangen door aluminium,
- er is relatief weinig kalium,
- de aluminium is onregelmatig verdeeld,
- illiet is klein.

De CEC van illiet is kleiner dan voor montmorilloniet door de niet vervangbare kalium ionen tussen de platen.

Illiet bestaat uit zeer kleine schilferachtige deeltjes, die over het algemeen gemengd zijn met andere kleimineralen. De randen kunnen hexagonaal gekristalliseerd zijn (figuur A.8).

Het specifieke oppervlak is $101 \text{ m}^2/\text{g}$.

De CEC is 10 tot $40 \text{ meq}/100\text{g}$ (wanneer de kalium niet aanwezig zou zijn dan zou de CEC $150 \text{ meq}/100\text{g}$ zijn).

De afmetingen zijn 3 nm (dikte) bij maximaal $0.1 \mu\text{m}$ (breedte)

LITERATUUR

- Arulanandan, K. [1975]
Fundamental Aspects of Erosion of Cohesive Soils.
ASCE, Journal of the Hydraulics Division, Vol 101, HY5.
- Burchill, S., M.H.B. Hayes and D.J. Greenland [1981]
The Chemistry of Soil Processes.
John Wiley & Sons LTD.
- Foreman, David E. and David E. Daniel [1986]
Permeation of Compacted Clay with Organic Chemicals.
ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.112, No.7.
- Gibbs, Ronald J. [1983]
Effect of Natural Organic Coatings on the Coagulation of Particles.
American Chemical Society, Environ. Sci. Technol., Vol.17, No.4.
- Gibbs, Ronald J. [1983]
Coagulation Rates of Clay Minerals and Natural Sediments.
Journal of Sediment. Petrol., 53.
- Mitchell, James K. [1976]
Fundamentals of Soil Behaviour.
John Wiley & Sons.
- Montagne C.L. [1984]
Proceedings of a Workshop on Cohesive Sediment Dynamics.
Tampa, Florida.
- Olphen, H. van, and J.J. Fripiat [1977]
Data Handbook for Clay Materials and other Non-Metallic Minerals.
Pergamon Press.
- Otsubo, Kuninori and Kohji Muraoka [1988]
Critical Shear Stress of Cohesive Bottom Sediments.
ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.114, No.10.
- Terwindt, J.H.J. [1964]
Fysisch Chemische Eigenschappen van Slib in het Deltagebied.
Delft Hydraulics, K-237.
- Terzaghi, K and R.B. Beck
Soil Mechanics in Engineering Practice.

Verreet, G., J. van Goethem, W. Viaenne, J. Berlamont, R. Houthuys and E. Berleur [1986]
Relations between Physico-Chemical and Rheological Properties of Fine-Grained Muds.
3th International Symposium on River Sedimentation, Jackson, Mississippi.

Verreet, G., and J. Berlamont [1986]
Rheology and Non-Newtonian Behaviour of Sea and Estuarine Mud.
Presented at Encyclopedia of Fluid Mechanics, Vol. VII.
Gulf Publishing Co.

Wilson, M.J. [1987]
A Handbook of Determinative Methods in Clay Mineralogy.
Blackie & Son Limited.

BIJLAGE B

Concentratiemetingen stroomgoot A

INHOUD BIJLAGE B

Concentratietingen	100% zand	B2
Concentratietingen	17% kaoliniet, 83% zand	B2
Concentratietingen	30% kaoliniet, 70% zand	B2
Concentratietingen	9.5% haaftense klei, 90.5% zand	B3
Concentratietingen	12% haaftense klei, 88% zand	B3
Concentratietingen	14% haaftense klei, 86% zand	B4
Concentratietingen	6.5% Eems Dollard slib, 93.5% zand	B4
Concentratietingen	7.5% Eems Dollard slib, 92.5% zand	B5
Concentratietingen	10% Eems Dollard slib, 90% zand	B5
Concentratietingen	18% Eems Dollard slib, 82% zand	B6
Concentratietingen	5% slib Oestergrond, 95% zand	B6
Concentratietingen	7.5% slib Oestergrond, 92.5% zand	B7
Concentratietingen	10% slib Oestergrond, 90% zand	B7
Concentratietingen	15% slib Oestergrond, 85% zand	B8
Concentratietingen	20% slib Oestergrond, 80% zand	B8

CONCENTRATIEMETINGEN (g/l) GOOT A
100 % ZAND (D50 = 105 µm)

V (m/s)	TIJD (min)									
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-180	180-220	220-260
0.25			0.000	0.015	0.000	0.027				
0.28		0.175					0.230	0.200	0.297	
0.29		0.550	0.910	0.514	0.550	0.576				
0.31		0.694	0.776	0.961	0.884	0.771	0.802			
0.33		1.717	1.640		1.182	1.520	1.598			
0.35		2.164	1.419	2.179	1.403		2.244	2.172		
0.39		3.186		3.402					2.909	2.744

CONCENTRATIEMETINGEN (g/l) GOOT A
17% SLIB KAOLINIET

V (m/s)	TIJD (min)										
	30-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	160-180	180-200	200-300	300-400	400-500
0.28						0.044	0.044	0.052			
						0.001	0.001	0.008			
						0.044	0.045	0.060			
0.34		0.110	0.120	0.122	0.125						
		0.057	0.068	0.066	0.073						
		0.167	0.188	0.188	0.199						
0.40						0.434	0.302	0.326			
						0.355	0.416	0.482			
						0.789	0.717	0.808			
0.42	0.526			0.811		0.888	0.941	1.092	1.192	1.352	
	1.391			1.503		1.995	1.916	2.490	3.051	3.115	
	1.917			2.314		2.883	2.857	3.582	4.244	4.468	

CONC <53 µm
CONC >53 µm
CONC TOTAAL

CONCENTRATIEMETINGEN (g/l) GOOT A
30% SLIB KAOLINIET

V (m/s)	TIJD (min)										
	2	5	10	20	40	60	120	180	240	300	360
0.22	0.000	0.005	0.003	0.002	0.005	0.005	0.003		0.002	0.006	
	0.000	0.008	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000		0.015	0.005	
	0.000	0.013	0.004	0.002	0.005	0.005	0.003		0.017	0.010	
0.27	0.005	0.002	0.004	0.006	0.004	0.012	0.017	0.035	0.064	0.062	0.065
	0.005	0.002	0.000	0.001	0.001	0.010	0.010	0.012	0.007	0.010	0.008
	0.010	0.004	0.004	0.006	0.005	0.013	0.026	0.046	0.071	0.073	0.073
0.31	0.060	0.055	0.080	0.076	0.122	0.176	0.214	0.272	0.318	0.321	0.375
	0.005	0.010	0.026	0.041	0.043	0.054	0.072	0.071	0.075	0.045	0.126
	0.065	0.065	0.106	0.118	0.165	0.230	0.286	0.343	0.393	0.366	0.501
0.35	0.468	0.472	0.500	0.508	0.590	0.590	0.760	0.737	0.783	0.824	0.887
	0.355	0.351	0.451	0.500	0.433	0.514	0.553	0.517	0.490	0.655	0.684
	0.824	0.822	0.951	1.008	1.023	1.104	1.313	1.255	1.273	1.480	1.571
0.39	0.996	0.929	0.954	0.965	1.020	1.102	1.247	1.326	1.426	1.417	1.457
	0.885	1.017	1.036	1.092	1.153	1.362	1.594	1.599	1.432	1.711	1.591
	1.881	1.946	1.990	2.058	2.173	2.464	2.840	2.924	2.859	3.128	3.048
0.43	1.626	1.603	1.726	1.812	1.916	2.058	2.277	2.279	2.456	2.518	2.640
	3.067	2.622	2.502	2.706	3.094	3.197	3.293	3.428	3.735	3.678	3.761
	4.693	4.225	4.229	4.518	5.010	5.255	5.570	5.707	6.190	6.195	6.401

CONC <53 µm
CONC >53 µm
CONC TOTAAL

CONCENTRATIEMETINGEN (g/l) GOOT A
9.5% SLIB HAAFTENSE KLEI

V (m/s)	TIJD (min)								CONC <53 µm CONC >53 µm CONC TOTAAL
	0-10	10-20	20-40	40-70	70-100	100-150	150-200	200-300	
0.13					0.001	0.001			
					0.001	0.007			
					0.002	0.008			
0.24				0.024	0.019	0.015			
				0.001	0.001	0.002			
				0.025	0.020	0.018			
0.29				0.054	0.089	0.106			
				0.025	0.042	0.083			
				0.078	0.130	0.189			
0.31				0.231	0.250	0.285			
				0.174	0.278	0.299			
				0.405	0.528	0.584			
0.33				0.511	0.451	0.759	1.128		
				0.733	0.406	0.985	1.168		
				1.243	0.858	1.744	2.297		
0.34				1.253	1.267	1.332		1.225	
				1.089	1.319	0.872		1.030	
				2.341	2.586	2.204		2.255	
0.36				1.459	1.381	1.295			
				2.675	1.899	2.258			
				4.135	3.280	3.553			

CONCENTRATIEMETINGEN (g/l) GOOT A
12% SLIB HAAFTENSE KLEI

V (m/s)	TIJD (min)								CONC <53 µm CONC >53 µm CONC TOTAAL
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-60	60-80	80-100	100-140	
0.20				0.018	0.097		0.010	0.001	
				0.001	0.001		0.001	0.002	
				0.019	0.098		0.011	0.003	
0.25				0.003		0.019	0.001	0.050	
				0.001		0.067	0.001	0.002	
				0.004		0.087	0.002	0.052	
0.29			0.001			0.076	0.001	0.003	
			0.021			0.015	0.021	0.002	
			0.022			0.091	0.022	0.005	
0.31			0.322			0.236	0.310	0.282	
			0.186			0.212	0.178	0.200	
			0.508			0.448	0.488	0.482	
0.34			0.252			0.252	0.298	0.259	
			0.271			0.363	0.382	0.360	
			0.523			0.615	0.679	0.619	
0.38		0.744	0.806		0.691	0.941			
		0.745	1.109		1.056	1.325			
		1.490	1.915		1.747	2.265			
0.41			1.725		2.025		2.023	2.069	
			3.212		3.398		3.225	3.798	
			4.938		5.424		5.247	5.867	
0.45				2.385	2.627		2.739	2.650	
				4.754	4.274		3.879	3.985	
				7.140	6.901		6.618	6.635	
0.47				2.628		2.818	2.766	2.990	
				5.700		6.125	6.110	6.400	
				8.327		8.943	8.876	9.391	

CONCENTRATIEMETINGEN (g/l) GOOT A
14% SLIB HAAFTENSE KLEI

V (m/s)	TIJD (min)								CONC <53 μ m CONC >53 μ m CONC TOTAAL
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-60	60-80	80-100	100-140	
0.19			0.001			0.005		0.013	
			0.001			0.003		0.005	
			0.002			0.008		0.018	
0.23			0.020		0.016	0.016	0.023	0.023	
			0.011		0.007	0.007	0.019	0.016	
			0.031		0.023	0.023	0.043	0.039	
0.27		0.026			0.023	0.028	0.029	0.039	
		0.012			0.027	0.010	0.015	0.019	
		0.038			0.050	0.038	0.045	0.058	
0.27			0.032		0.037	0.031	0.038	0.025	
			0.045		0.034	0.052	0.039	0.031	
			0.078		0.071	0.083	0.078	0.056	
0.30			0.035		0.043	0.039	0.054	0.034	
			0.116		0.119	0.097	0.152	0.088	
			0.151		0.162	0.137	0.206	0.122	
0.34			0.082		0.087	0.098	0.103	0.108	
			0.264		0.383	0.332	0.348	0.331	
			0.345		0.470	0.430	0.451	0.439	
0.38				0.124	0.169	0.164	0.102	0.122	
				0.826	0.910	0.658	0.763	0.822	
				0.950	1.080	0.822	0.864	0.943	
0.41				0.225		0.318	0.354	0.411	
				1.389		1.510	1.730	1.648	
				1.614		1.828	2.085	2.059	
0.46					1.229	1.078	1.319	1.197	
					5.104	4.705	5.475	5.904	
					6.332	5.783	6.794	7.101	
0.50					1.639	1.874	2.029	2.211	
					7.185	9.297	9.678	8.558	
					8.824	11.171	11.707	10.769	

CONCENTRATIEMETINGEN (g/l) GOOT A
6.5% SLIB EEMS DOLLARD

V (m/s)	TIJD (min)								CONC <53 μ m CONC >53 μ m CONC TOTAAL
	0-10	10-20	20-40	40-70	70-100	100-200	200-300	300-400	
0.28	0.060	0.064	0.058		0.065	0.063	0.075		
	0.078	0.089	0.072		0.103	0.132	0.111		
	0.138	0.153	0.130		0.168	0.194	0.187		
0.33	0.095	0.074	0.112	0.109		0.124	0.104	0.129	
	0.272	0.317	0.294	0.382		0.432	0.471	0.515	
	0.368	0.391	0.406	0.491		0.556	0.575	0.644	
0.37	0.142	0.155	0.155	0.169		0.193		0.192	
	1.038	1.076	1.234	1.369		1.738		1.859	
	1.181	1.231	1.389	1.538		1.931		2.050	
0.42	0.208	0.225	0.236	0.314			0.398		
	2.847	2.709	2.812	3.599			5.118		
	3.055	2.935	3.047	3.912			5.516		

CONCENTRATIEMETINGEN (g/l) GOOT A
7.5% SLIB EEMS DOLLARD

V (m/s)	TIJD (min)										
	0-10	10-20	20-40	40-70	70-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700
0.25		0.020			0.040	0.021					
		0.015			0.010	0.013					
		0.036			0.050	0.034					
0.28		0.024				0.031					
		0.020				0.038					
		0.044				0.069					
0.31					0.037	0.040	0.042				
					0.072	0.080	0.058				
					0.110	0.120	0.100				
0.38	0.098			0.121			0.132	0.155		0.142	
	0.614			0.814			0.815	0.864		0.812	
	0.712			0.935			0.947	1.018		0.954	
0.43	0.157	0.160		0.236		0.306		0.341	0.336	0.365	0.343
	1.818	2.020		2.286		2.566		2.899	2.941	2.923	2.915
	1.975	2.180		2.522		2.871		3.240	3.278	3.287	3.258
0.46		0.380	0.389		0.415		0.488	0.532		0.577	0.824
		4.137	4.321		4.232		5.142	5.377		5.927	7.849
		4.518	4.709		4.648		5.630	5.909		6.504	8.673

CONC <53 µm
CONC >53 µm
CONC TOTAAL

CONCENTRATIEMETINGEN (g/l) GOOT A
10% SLIB EEMS DOLLARD

V (m/s)	TIJD (min)										
	0-10	10-20	20-40	40-70	70-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700
0.25				0.032		0.023					
				0.018		0.025					
				0.049		0.047					
0.29					0.027	0.036					
					0.058	0.039					
					0.085	0.076					
0.33				0.054							
				0.159							
				0.214							
0.38				0.079	0.096		0.100		0.103		0.079
				0.433	0.521		0.539		0.592		0.456
				0.512	0.617		0.639		0.695		0.535
0.43					0.108	0.122	0.135	0.149	0.163	0.153	0.163
					0.884	1.030	1.064	1.161	0.995	0.680	0.843
					0.992	1.151	1.199	1.310	1.158	0.834	1.006
0.46			0.252			0.282	0.300	0.349		0.400	0.490
			1.538			2.253	2.205	2.349		2.528	2.725
			1.790			2.535	2.505	2.698		2.927	3.215

CONC <53 µm
CONC >53 µm
CONC TOTAAL

CONCENTRATIEMETINGEN (g/l) GOOT A
18% SLIB EEMS DOLLARD

V (m/s)	TIJD (min)							CONC <53 µm CONC >53 µm CONC TOTAAL
	0-10	10-20	20-40	40-70	70-100	100-200	200-300	
0.21	0.084			0.062				
	0.054			0.019				
	0.138			0.081				
0.28					0.041	0.037		
					0.027	0.019		
					0.068	0.056		
0.33					0.046	0.046	0.042	
					0.100	0.101	0.086	
					0.146	0.146	0.128	
0.44				0.053		0.047	0.047	0.044
				0.237		0.325	0.264	0.178
				0.289		0.372	0.311	0.222
0.48						0.056		0.050
						0.317		0.216
						0.372		0.267

CONCENTRATIEMETINGEN (g/l) GOOT A
5.0% SLIB OESTERGRONDEN

V (m/s)	TIJD (min)									CONC <53 µm CONC >53 µm CONC TOTAAL
	2	5	10	20	40	60	120	180	300	
0.19	0.023	0.025	0.027	0.023		0.016	0.022	0.038	0.063	
	0.017	0.023	0.026	0.013		0.005	0.005	0.042	0.038	
	0.040	0.048	0.053	0.035		0.021	0.027	0.080	0.102	
0.23	0.062	0.072	0.072	0.078	0.112	0.127	0.137	0.166	0.155	
	0.047	0.079	0.092	0.134	0.211	0.241	0.279	0.248	0.166	
	0.109	0.151	0.164	0.212	0.323	0.368	0.417	0.415	0.321	
0.30	0.176	0.185	0.226	0.206	0.209	0.197	0.218	0.231	0.254	
	0.519	0.729	0.482	0.849	0.727	0.526	0.853	0.750	1.482	
	0.695	0.914	0.708	1.055	0.937	0.724	1.071	0.982	1.736	
0.33	0.250	0.280	0.290	0.309	0.333	0.317	0.372	0.370	0.302	
	1.686	1.659	2.183	2.848	2.629	2.182	2.489	2.977	2.440	
	1.936	1.938	2.473	3.157	2.962	2.499	2.860	3.347	2.742	

CONCENTRATIEMETINGEN (g/l) GOOT A
7.5% SLIB OESTERGRONDEN

V (m/s)	TIJD (min)								
	2	5	10	20	40	60	120	180	300
0.20	0.018	0.023	0.025	0.009	0.018	0.029	0.012	0.014	0.016
	0.046	0.042	0.020	0.038	0.002	0.017	0.004	0.005	0.009
	0.065	0.065	0.045	0.047	0.019	0.046	0.015	0.020	0.025
0.26	0.015	0.021	0.023	0.015	0.024	0.011	0.030	0.015	0.012
	0.015	0.012	0.019	0.009	0.016	0.011	0.038	0.008	0.005
	0.030	0.033	0.042	0.024	0.039	0.022	0.068	0.023	0.017
0.29	0.032	0.015	0.016	0.020	0.017	0.023	0.036	0.062	0.089
	0.035	0.014	0.013	0.014	0.024	0.042	0.059	0.116	0.171
	0.067	0.029	0.029	0.034	0.041	0.065	0.095	0.179	0.260
0.34	0.079	0.096	0.118	0.139	0.172	0.197	0.271	0.313	0.391
	0.317	0.369	0.512	0.556	0.704	0.820	1.245	1.349	1.450
	0.395	0.465	0.630	0.695	0.876	1.017	1.516	1.661	1.841
0.37	0.463	0.461	0.481	0.496	0.552	0.540	0.619	0.613	0.609
	2.853	2.478	2.814	3.328	3.136	2.943	3.799	3.027	3.632
	3.316	2.939	3.295	3.824	3.688	3.484	4.418	3.640	4.241
0.40	0.778	0.780	0.792	0.652	0.727	0.797	0.792	0.811	0.855
	6.437	6.379	5.858	6.665	7.369	7.083	5.432	6.937	6.579
	7.215	7.159	6.649	7.316	8.096	7.880	6.224	7.748	7.434
0.44	0.841	1.000	0.974	1.006	1.113	1.144	1.092	1.053	0.826
	10.315	10.240	9.530	9.970	11.125	10.510	10.323	12.391	10.008
	11.156	11.240	10.504	10.976	12.238	11.654	11.415	13.444	10.834

CONC <53 µm
CONC >53 µm
CONC TOTAAL

CONCENTRATIEMETINGEN (g/l) GOOT A
10% SLIB OESTERGRONDEN

V (m/s)	TIJD (min)								
	2	5	10	20	40	60	120	180	300
0.20	0.011	0.013	0.012	0.015	0.026	0.020	0.018	0.017	0.033
	0.006	0.000	0.002	0.010	0.013	0.006	0.005	0.012	0.027
	0.017	0.013	0.014	0.024	0.039	0.027	0.023	0.029	0.060
0.26	0.013	0.008	0.010	0.014	0.019	0.017	0.016	0.016	0.011
	0.000	0.000	0.002	0.016	0.008	0.006	0.005	0.009	0.000
	0.013	0.008	0.012	0.030	0.027	0.022	0.022	0.026	0.011
0.32	0.012	0.017	0.020	0.025	0.016	0.023	0.026	0.027	0.035
	0.008	0.014	0.024	0.010	0.019	0.019	0.030	0.014	0.038
	0.020	0.030	0.043	0.035	0.036	0.042	0.055	0.041	0.073
0.34	0.026	0.023	0.037	0.032	0.034	0.038	0.059	0.056	0.058
	0.045	0.053	0.079	0.073	0.101	0.103	0.118	0.118	0.155
	0.071	0.076	0.116	0.105	0.134	0.141	0.176	0.174	0.213
0.37	0.072	0.068	0.065	0.070	0.082	0.076	0.089	0.102	0.109
	0.293	0.332	0.333	0.340	0.354	0.333	0.435	0.469	0.513
	0.365	0.400	0.399	0.410	0.436	0.409	0.524	0.571	0.622
0.41	0.138	0.119	0.140	0.136	0.150	0.150	0.186	0.206	0.268
	0.785	0.860	0.799	0.880	0.923	1.015	1.010	1.049	1.064
	0.923	0.978	0.939	1.016	1.073	1.165	1.196	1.255	1.332
0.44	0.235	0.238	0.262	0.270	0.331	0.382	0.392	0.434	0.489
	1.737	1.431	1.446	1.826	2.090	2.038	2.673	2.777	2.533
	1.972	1.669	1.708	2.096	2.421	2.419	3.065	3.211	3.023
0.49	0.517	0.571	0.594	0.640	0.727	1.004	1.173	1.297	1.301
	3.799	4.156	4.186	4.332	5.221	6.198	8.854	9.855	8.854
	4.316	4.727	4.780	4.972	5.948	7.202	10.027	11.152	10.155

CONC <53 µm
CONC >53 µm
CONC TOTAAL

CONCENTRATIEMETINGEN (g/l) GOOT A
15% SLIB OESTERGRONDEN

V (m/s)	TIJD (min)									
	2	5	10	20	40	60	120	180	300	420
0.19	0.066	0.062	0.053	0.056	0.046	0.048	0.039	0.053	0.048	0.057
	0.076	0.083	0.034	0.043	0.038	0.069	0.025	0.046	0.019	0.033
	0.142	0.145	0.087	0.099	0.084	0.117	0.064	0.099	0.067	0.089
0.24	0.038	0.033	0.048	0.062	0.038	0.036	0.033	0.025	0.032	0.075
	0.019	0.015	0.039	0.014	0.026	0.024	0.023	0.092	0.012	0.008
	0.058	0.048	0.087	0.076	0.064	0.060	0.056	0.117	0.044	0.083
0.29	0.058	0.031	0.053	0.030	0.064	0.044	0.042	0.039	0.063	
	0.046	0.046	0.049	0.034	0.050	0.050	0.050	0.026	0.054	
	0.105	0.077	0.102	0.064	0.115	0.094	0.092	0.065	0.117	
0.35	0.055	0.079	0.061	0.057	0.063	0.067	0.068	0.058	0.084	
	0.079	0.109	0.090	0.062	0.065	0.081	0.078	0.092	0.104	
	0.134	0.188	0.151	0.119	0.128	0.148	0.145	0.150	0.189	
0.38	0.065	0.064	0.058	0.095	0.096	0.079	0.091	0.095	0.098	
	0.137	0.144	0.131	0.159	0.171	0.159	0.177	0.169	0.146	
	0.203	0.208	0.189	0.254	0.268	0.238	0.268	0.264	0.244	
0.42	0.093	0.083	0.097	0.096	0.122	0.129	0.119	0.149	0.124	
	0.280	0.144	0.231	0.290	0.354	0.296	0.333	0.430	0.396	
	0.373	0.227	0.328	0.386	0.476	0.425	0.451	0.579	0.520	
0.45	0.159	0.135	0.135	0.140	0.117	0.130	0.149	0.164	0.203	
	0.546	0.488	0.508	0.475	0.484	0.488	0.519	0.589	0.619	
	0.705	0.623	0.644	0.615	0.601	0.618	0.668	0.752	0.822	
(0.50)	0.220	0.211	0.226	0.229	0.244	0.268	0.289	0.334	0.354	
	0.839	0.818	0.803	0.870	0.940	0.953	1.063	1.138	1.121	
	1.059	1.029	1.029	1.099	1.184	1.221	1.353	1.472	1.475	

CONC <53 µm
CONC >53 µm
CONC TOTAAL

CONCENTRATIEMETINGEN (g/l) GOOT A
20% SLIB OESTERGRONDEN

V (m/s)	TIJD (min)									
	2	5	10	20	40	60	120	210	300	410
0.21	0.061	0.040	0.044	0.028	0.024	0.026	0.014	0.011	0.013	
	0.273	0.226	0.104	0.058	0.024	0.028	0.012	0.004	0.008	
	0.334	0.266	0.148	0.086	0.048	0.055	0.026	0.015	0.021	
0.24	0.020	0.022	0.029	0.012	0.009	0.014	0.033	0.035	0.020	
	0.016	0.021	0.030	0.002	0.005	0.000	0.017	0.009	0.038	
	0.036	0.043	0.059	0.014	0.015	0.014	0.051	0.043	0.058	
0.29	0.017	0.025	0.010	0.038	0.039	0.028	0.023	0.045	0.033	
	0.028	0.045	0.034	0.045	0.043	0.076	0.036	0.060	0.064	
	0.046	0.071	0.044	0.083	0.082	0.104	0.059	0.105	0.096	
0.34	0.033	0.054	0.038	0.059	0.037	0.058	0.054	0.052	0.053	
	0.101	0.126	0.132	0.153	0.173	0.181	0.174	0.217	0.192	
	0.134	0.179	0.170	0.212	0.209	0.239	0.228	0.269	0.245	
0.37	0.034	0.056		0.046	0.043	0.041	0.048	0.047	0.031	
	0.195	0.252		0.326	0.393	0.361	0.307	0.303	0.287	
	0.229	0.308		0.372	0.435	0.402	0.355	0.350	0.318	
0.41	0.057	0.053	0.042	0.071	0.063	0.075	0.074		0.067	0.053
	0.413	0.471	0.472	0.585	0.617	0.566	0.561		0.478	0.403
	0.470	0.523	0.514	0.656	0.680	0.641	0.635		0.545	0.456
0.46	0.059	0.057	0.074	0.061	0.083	0.077	0.075		0.091	0.095
	0.644	0.645	0.640	0.662	0.723	0.646	0.607		0.645	0.610
	0.703	0.701	0.714	0.723	0.806	0.722	0.682		0.737	0.706
0.51	0.104	0.114	0.117	0.113	0.126	0.141	0.160		0.166	0.187
	0.799	0.778	0.864	0.812	0.835	0.857	0.852		0.783	0.766
	0.902	0.892	0.981	0.925	0.961	0.998	1.012		0.949	0.953

CONC <53 µm
CONC >53 µm
CONC TOTAAL

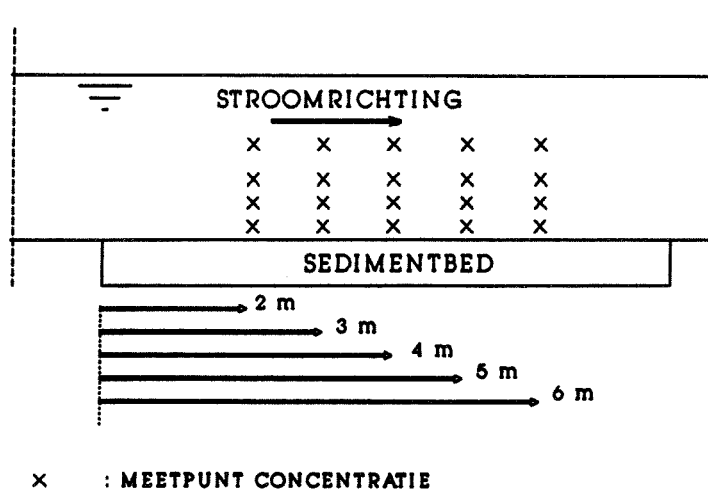
BIJLAGE C

Concentratiemetingen stroomgoot B

INHOUD BIJLAGE C

Overzicht testsectie met meetpunten zuiver zandbed	C2
Concentratiemetingen 100% zand	C2
Overzicht testsectie met meetpunten zandslibbedden	C3
Overzicht tabelindeling concentratiemetingen zandslibbedden	C3
Concentratiemetingen 20% slib Oestergrond, 80% zand (1e lading)	C4
Concentratiemetingen 20% slib Oestergrond, 80% zand (2e lading)	C7
Concentratiemetingen 15% slib Oestergrond, 85% zand (2e lading)	C8
Concentratiemetingen 10% slib Oestergrond, 90% zand (2e lading)	C9
Concentratiemetingen 5% slib Oestergrond, 95% zand (2e lading)	C10

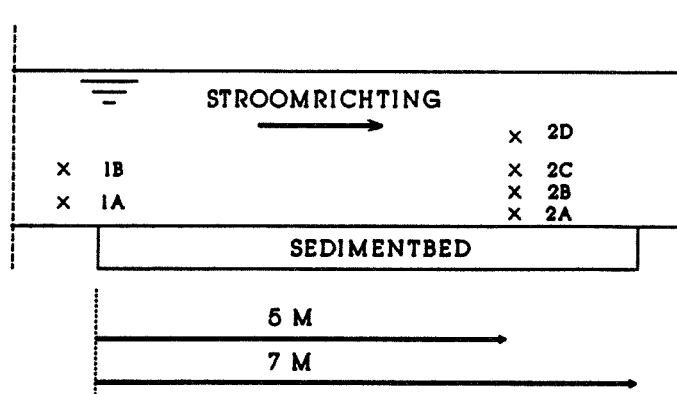
OVERZICHT TESTSECTIE MET MEETPUNTEN
ZUIVER ZANDBED



CONCENTRATIEMETING (g/l) GOOT B
ZAND

GEM. SNEL- HEID	HOOGTE BOVEN BED	AFSTAND VANAF BEGIN BED (m)				
		2	3	4	5	6
		CONC (g/l)	CONC (g/l)	CONC (g/l)	CONC (g/l)	CONC (g/l)
0.28	0.025	0.131	0.142	0.228	0.150	0.235
	0.045	0.082	0.073	0.077	0.088	0.102
	0.065	0.055	0.048	0.055	0.054	0.062
	0.105	0.022	0.025	0.028	0.029	0.028
0.325	0.025	0.210	0.535	0.239	0.261	0.273
	0.045	0.127	0.242	0.152	0.166	0.178
	0.065	0.081	0.099	0.086	0.114	0.118
	0.105	0.026	0.033	0.034	0.046	0.056
0.34	0.025	0.155	0.310	0.386	0.302	0.344
	0.045	0.088	0.159	0.275	0.193	0.213
	0.065	0.044	0.095	0.190	0.136	0.143
	0.105	0.015	0.034	0.076	0.059	0.064

OVERZICHT TESTSECTIE MET MEETPUNTEN
ZAND-SLIBCOMBINATIES



x : MEETPUNT CONCENTRATIE

OVERZICHT TABEL CONCENTRATIEMETINGEN
ZAND-SLIBCOMBINATIES

V (m/s)	SLIB	ZAND	SLIB	ZAND
	0.33	GEMIDD. SLIB CONC 1A/1B	GEMIDD. ZAND CONC 1A/1B	
	GEMIDD. SLIB CONC 2A/2B/2C/2D	ZAND CONC 2A 2B 2C 2D		
0.44				

CONCENTRATIEMETING (g/l) GOOT B
OESTERSLIB 20%

V ₁₀ (m/s)	TIJD (min)											
	0		35 -105		105 -175		175 -245		245 -315		315 -420	
	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)
0.33	0.007	0.003	0.005	0.002	0.019	0.001	0.010	0.000				
	0.028	0.003	0.012	0.002	0.012	0.000	0.019	0.000				
		0.009		0.002		0.002		0.000				
		0.002		0.001		0.004		0.000				
	0.001		0.001		0.000		0.000					
0.39	0.014	0.001	0.005	0.001			0.009	0.001	0.021	0.001	0.021	0.001
	0.010	0.000	0.021	0.002			0.020	0.002	0.012	0.001	0.011	0.001
		0.001		0.001				0.001		0.000		0.001
		0.001		0.002				0.001		0.001		0.001
	0.000		0.001				0.002		0.001		0.000	
0.45	0.015	0.001	0.030	0.002			0.010	0.000	0.011	0.000		
	0.015	0.000	0.017	0.001			0.005	0.001	0.010	0.001		
		0.001		0.001				0.001		0.000		
		0.000		0.001				0.000		0.000		
	0.001		0.001				0.000		0.001			
0.52	0.024	0.002	0.011	0.002			0.012	0.001	0.004	0.000		
	0.019	0.002	0.011	0.001			0.011	0.001	0.010	0.002		
		0.002		0.001				0.000		0.000		
		0.001		0.000				0.000		0.001		
	0.001		0.001				0.000		0.000			
0.57	0.010	0.001	0.001	0.000			0.008	0.000	0.013	0.000		
	0.008	0.001	0.008	0.000			0.018	0.001	0.016	0.001		
		0.001		0.000				0.000		0.000		
		0.000		0.000				0.001		0.001		
	0.000		0.000				0.001		0.000			
0.66	0.011	0.000	0.011	0.001			0.011	0.000	0.010	0.000	0.016	0.001
	0.014	0.001	0.011	0.001			0.012	0.001	0.014	0.001	0.017	0.001
		0.001		0.000				0.000		0.000		0.001
		0.000		0.001				0.001		0.000		0.001
	0.001		0.001				0.001		0.000		0.000	
0.69	0.022	0.002	0.012	0.000	0.019	0.001			0.017	0.002	0.006	0.000
	0.018	0.002	0.012	0.000	0.014	0.001			0.017	0.001	0.009	0.001
		0.002		0.000		0.000				0.000		0.000
		0.001		0.001		0.001				0.000		0.001
	0.000		0.001		0.001				0.000		0.000	
0.72	0.010	0.000	0.002	0.000			0.008	0.000	0.008	0.000	0.013	0.001
	0.017	0.001	0.010	0.001			0.006	0.001	0.004	0.000	0.016	0.000
		0.000		0.001				0.001		0.001		0.000
		0.001		0.000				0.000		0.001		0.000
	0.001		0.000				0.000		0.000		0.000	
0.79	0.020	0.001	0.009	0.000	0.008	0.001			0.014	0.000	0.004	0.000
	0.012	0.001	0.013	0.001	0.017	0.001			0.005	0.000	0.009	0.001
		0.001		0.000		0.000				0.002		0.000
		0.001		0.001		0.000				0.000		0.000
	0.000		0.001		0.000				0.000		0.000	

V ₁₀ (m/s)	TIJD (min)											
	0		35 -105		105 -175		175 -245		245 -315		315 -420	
	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)
0.82	0.024	0.001	0.006	0.000	0.007	0.001			0.019	0.000	0.020	0.000
	0.016	0.002	0.002	0.000	0.007	0.000			0.012	0.001	0.007	0.000
		0.000		0.000		0.000				0.000		0.000
		0.000		0.000		0.000				0.000		0.000
0.92	0.016	0.001	0.016	0.000			0.005	0.000	0.016	0.000	0.011	0.001
	0.011	0.002	0.017	0.000			0.014	0.000	0.029	0.001	0.010	0.000
		0.000		0.000				0.000		0.000		0.000
		0.001		0.001				0.001		0.001		0.000
0.97	0.009	0.000	0.007	0.000	0.011	0.000			0.008	0.000	0.017	0.000
	0.005	0.001	0.007	0.000	0.005	0.000			0.006	0.000	0.012	0.000
		0.000		0.000		0.000				0.000		0.000
		0.000		0.000		0.000				0.001		0.000
1.02	0.011	0.000	0.010	0.000			0.007	0.000	0.006	0.000	0.010	0.001
	0.010	0.000	0.009	0.000			0.003	0.001	0.010	0.000	0.015	0.001
		0.000		0.000				0.000		0.000		0.001
		0.000		0.001				0.000		0.001		0.001
1.02	0.007	0.000	0.005	0.000	0.011	0.000			0.004	0.000	0.002	0.000
	0.007	0.000	0.005	0.000	0.006	0.000			0.003	0.000	0.009	0.000
		0.000		0.000		0.000				0.000		0.001
		0.000		0.000		0.001				0.000		0.000
1.11	0.006	0.000	0.013	0.001	0.016	0.000	0.017	0.001	0.015	0.001	0.007	0.000
	0.013	0.001	0.014	0.000	0.017	0.001	0.008	0.002	0.013	0.001	0.011	0.000
		0.000		0.000		0.001		0.000		0.000		0.000
		0.002		0.001		0.001		0.000		0.001		0.001
1.19	0.011	0.001	0.001	0.000	0.008	0.000	0.012	0.000	0.003	0.001	0.007	0.000
	0.036	0.000	0.010	0.000	0.010	0.000	0.006	0.001	0.007	0.001	0.010	0.000
		0.001		0.001		0.000		0.000		0.001		0.001
		0.001		0.001		0.000		0.000		0.001		0.000
1.19	0.008	0.000	0.002	0.000	0.002	0.000			0.000	0.000	0.013	0.001
	0.003	0.001	0.005	0.000	0.003	0.000			0.002	0.000	0.013	0.001
		0.000		0.000		0.000				0.000		0.001
		0.000		0.000		0.001				0.000		0.001
1.25	0.010	0.000	0.014	0.001	0.009	0.000	0.003	0.001	0.002	0.000	0.006	0.000
	0.019	0.001	0.017	0.002	0.009	0.001	0.003	0.001	0.005	0.000	0.007	0.000
		0.000		0.002		0.000		0.000		0.000		0.000
		0.001		0.001		0.000		0.000		0.000		0.000
	0.001		0.001		0.000		0.000		0.000		0.000	

V ₁₀ (m/s)	TIJD (min)											
	0		35 -105		105 -175		175 -245		245 -315		315 -420	
	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)
1.24	0.015	0.001	0.015	0.001	0.003	0.000			0.014	0.000	0.003	0.000
	0.010	0.000	0.013	0.001	0.006	0.000			0.007	0.001	0.002	0.000
		0.000		0.001		0.000				0.001		0.000
		0.001		0.000		0.000				0.000		0.000
		0.001	0.001		0.000				0.000		0.000	
1.29	0.023	0.001	0.017	0.000			0.001	0.001	0.010	0.000	0.013	0.001
	0.018	0.002	0.023	0.002			0.003	0.000	0.004	0.001	0.009	0.001
		0.002		0.002				0.000		0.000		0.001
		0.002		0.002				0.000		0.000		0.000
		0.001	0.001		0.001		0.000		0.000		0.000	
1.40	0.012	0.001	0.013	0.000	0.010	0.000	0.023	0.000	0.020	0.001	0.046	0.002
	0.008	0.006	0.014	0.006	0.011	0.006	0.015	0.003	0.023	0.002	0.022	0.002
		0.002		0.003		0.002		0.000		0.001		0.001
		0.001		0.002		0.001		0.000		0.001		0.000
		0.000	0.001		0.001		0.000		0.001		0.000	

CONCENTRATIEMETING (g/l) GOOT B
OESTERSLIB 20% NIEUW

V ₁₀ (m/s)	TIJD (min)											
	0		75 -105		105 -175		175 -245		245 -315		315 -400	
	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)
0.62	0.014	0.003			0.020	0.001	0.022	0.001	0.021	0.001		
	0.026	0.009			0.020	0.001	0.021	0.001	0.016	0.001		
		0.006				0.002		0.001		0.001		
		0.010				0.001		0.001		0.001		
		0.005			0.001		0.001		0.001			
0.72	0.008	0.000	0.009	0.001	0.012	0.000	0.010	0.001	0.007	0.001	0.013	0.000
	0.014	0.001	0.019	0.000	0.016	0.000	0.016	0.000	0.019	0.000	0.026	0.000
		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.001
		0.000		0.000		0.000		0.000		0.001		0.001
		0.000	0.000		0.001		0.000		0.001		0.001	
0.83	0.012	0.006			0.015	0.000			0.018	0.000	0.016	0.000
	0.006	0.001			0.010	0.000			0.006	0.000	0.015	0.001
		0.000				0.001				0.000		0.001
		0.001				0.001				0.000		0.001
		0.000			0.001				0.000		0.001	
0.90	0.007	0.004			0.003	0.000			0.008	0.000	0.012	0.000
	0.012	0.002			0.004	0.000			0.007	0.000	0.007	0.000
		0.001				0.000				0.000		0.000
		0.001				0.000				0.000		0.000
		0.001			0.000				0.000		0.000	
1.02	0.010	0.000			0.006	0.000			0.014	0.000	0.012	0.000
	0.011	0.001			0.006	0.000			0.009	0.001	0.013	0.000
		0.000				0.000				0.000		0.000
		0.000				0.000				0.000		0.001
		0.000			0.000				0.001		0.001	
1.11	0.012	0.002	0.013	0.001					0.013	0.001	0.006	0.000
	0.015	0.001	0.014	0.001					0.016	0.001	0.010	0.000
		0.002		0.000						0.001		0.000
		0.001		0.001						0.001		0.000
		0.001	0.001						0.001		0.000	
1.21	0.010	0.000	0.016	0.001					0.023	0.001	0.023	0.001
	0.015	0.001	0.022	0.002					0.023	0.001	0.025	0.001
		0.001		0.000						0.001		0.001
		0.001		0.001						0.001		0.001
		0.001	0.000						0.001		0.001	
1.29	0.018	0.000	0.022	0.001					0.029	0.001	0.030	0.001
	0.023	0.001	0.025	0.001					0.030	0.002	0.032	0.000
		0.001		0.000						0.002		0.001
		0.002		0.001						0.001		0.001
		0.001	0.000						0.001		0.001	
1.37	0.029	0.001	0.035	0.001								
	0.031	0.001	0.035	0.002								
		0.001		0.002								
		0.001		0.002								
		0.001	0.002									

CONCENTRATIEMETING (G/L) GOOT B
 OESTERSLIB 15% NIEUW

V ₁₀ (m/s)	TIJD (min)							
	0		180		300		420	
	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)
0.62	0.021	0.004	0.018	0.002	0.015	0.000	0.014	0.001
	0.017	0.002	0.020	0.001	0.015	0.002	0.014	0.001
		0.001		0.001		0.001		0.001
		0.003		0.001		0.001		0.001
		0.002	0.001		0.000		0.001	
0.72	0.014	0.000	0.016	0.000	0.013	0.000	0.011	0.001
	0.015	0.001	0.015	0.001	0.015	0.002	0.016	0.003
		0.001		0.001		0.001		0.001
		0.000		0.000		0.000		0.001
		0.000	0.000		0.000		0.000	
0.81	0.010	0.000	0.010	0.000	0.010	0.000	0.010	0.000
	0.009	0.003	0.008	0.001	0.010	0.001	0.009	0.000
		0.001		0.001		0.000		0.001
		0.001		0.000		0.000		0.000
		0.000	0.000		0.000		0.000	
0.91	0.018	0.002	0.010	0.000	0.010	0.000	0.010	0.000
	0.011	0.001	0.011	0.002	0.010	0.000	0.011	0.000
		0.000		0.001		0.000		0.001
		0.000		0.000		0.000		0.000
		0.000	0.000		0.000		0.000	
1.01	0.013	0.001	0.013	0.000	0.014	0.000	0.013	0.000
	0.010	0.001	0.014	0.000	0.015	0.000	0.014	0.000
		0.001		0.000		0.001		0.000
		0.001		0.000		0.000		0.000
		0.000	0.000		0.001		0.000	
1.12	0.014	0.000	0.014	0.000	0.015	0.000	0.015	0.000
	0.014	0.001	0.012	0.000	0.014	0.000	0.015	0.001
		0.000		0.000		0.000		0.001
		0.000		0.000		0.000		0.000
		0.000	0.000		0.001		0.000	
1.21	0.013	0.000	0.026	0.001	0.031	0.001	0.036	0.001
	0.014	0.001	0.026	0.001	0.029	0.001	0.033	0.001
		0.002		0.001		0.002		0.001
		0.000		0.002		0.001		0.001
		0.001	0.001		0.000		0.001	
1.26	0.050	0.003	0.067	0.002	0.079	0.002	0.081	0.002
	0.050	0.005	0.067	0.004	0.074	0.004	0.073	0.004
		0.004		0.003		0.003		0.003
		0.004		0.001		0.002		0.005
		0.003	0.002		0.003		0.003	

CONCENTRATIEMETING (g/l) GOOT B
OESTERSLIB 10% NIEUW

V ₁₀ (m/s)	TIJD (min)							
	0		180		300		420	
	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)
0.60	0.020	0.001	0.021	0.001	0.019	0.000		
	0.021	0.003	0.022	0.001	0.022	0.001		
		0.002		0.001		0.001		
		0.008		0.001		0.000		
		0.002	0.001		0.001			
0.71	0.019	0.000	0.019	0.001	0.021	0.006	0.022	0.000
	0.021	0.005	0.022	0.001	0.021	0.003	0.021	0.001
		0.002		0.001		0.001		0.000
		0.001		0.001		0.000		0.001
		0.001		0.000		0.001		0.001
0.80	0.020	0.000	0.020	0.000	0.020	0.000	0.019	0.000
	0.019	0.003	0.020	0.001	0.022	0.002	0.021	0.001
		0.002		0.001		0.001		0.000
		0.001		0.000		0.000		0.000
		0.000		0.000		0.001		0.000
0.90	0.027	0.000	0.025	0.004	0.024	0.001	0.025	0.000
	0.026	0.008	0.025	0.003	0.025	0.001	0.025	0.001
		0.004		0.001		0.001		0.001
		0.002		0.001		0.000		0.000
		0.001		0.000		0.001		0.001
1.00	0.033	0.001	0.053	0.001	0.055	0.001	0.061	0.001
	0.032	0.021	0.052	0.012	0.057	0.003	0.059	0.004
		0.008		0.003		0.001		0.001
		0.003		0.002		0.001		0.001
		0.001		0.001		0.001		0.001
1.10	0.083	0.003	0.106	0.002	0.112	0.002		
	0.078	0.026	0.102	0.008	0.109	0.008		
		0.023		0.004		0.004		
		0.008		0.003		0.002		
		0.003		0.002		0.001		

CONCENTRATIEMETING (g/l) GOOT B
 OESTERSLIB 5% NIEUW

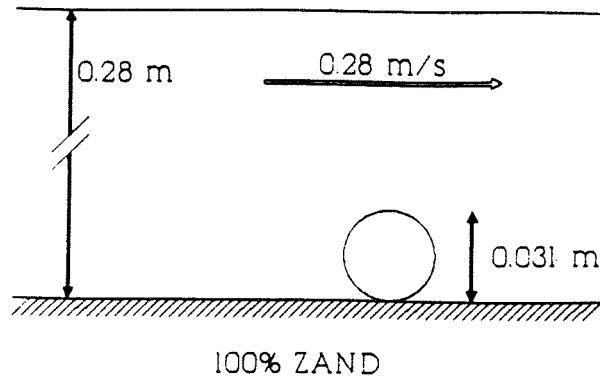
V ₁₀ (m ² /s)	TIJD (min)							
	0		180		300		420	
	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)	SLIB (g/l)	ZAND (g/l)
0.30	0.008	0.001	0.008	0.001	0.008	0.000	0.009	0.001
	0.007	0.001	0.010	0.000	0.008	0.001	0.012	0.001
		0.001		0.000		0.000		0.001
		0.001		0.003		0.000		0.001
			0.003		0.000		0.000	
0.40	0.009	0.001	0.011	0.001	0.010	0.000	0.009	0.001
	0.012	0.001	0.010	0.001	0.011	0.003	0.010	0.003
		0.000		0.001		0.001		0.001
		0.001		0.000		0.001		0.001
			0.000		0.001		0.001	
0.51	0.009	0.000	0.016	0.000	0.014	0.000	0.016	0.001
	0.011	0.130	0.014	0.014	0.016	0.003	0.016	0.003
		0.039		0.005		0.001		0.001
		0.015		0.002		0.001		0.000
			0.000		0.000		0.000	
0.60	0.012	0.001	0.025	0.000	0.035	0.000	0.036	0.000
	0.015	0.147	0.030	0.052	0.036	0.020	0.036	0.022
		0.044		0.021		0.009		0.011
		0.008		0.009		0.003		0.006
			0.002		0.001		0.002	
0.70	0.043	0.002	0.099	0.002				
	0.047	0.129	0.064	0.067				
		0.063		0.031				
		0.031		0.018				
			0.009					

BIJLAGE D

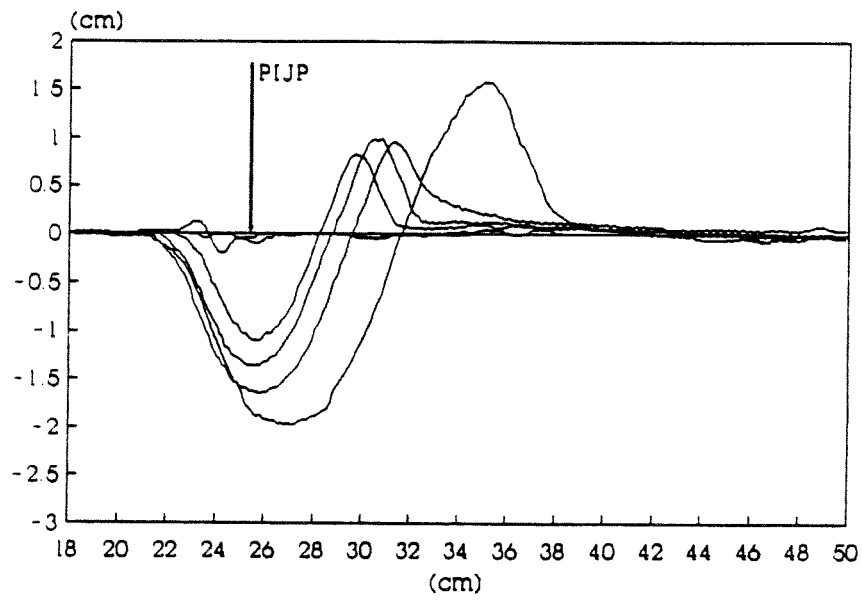
Bodemprofielmetingen stroomgoot B

OVERZICHT GEMETEN BODEMPROFIELEN

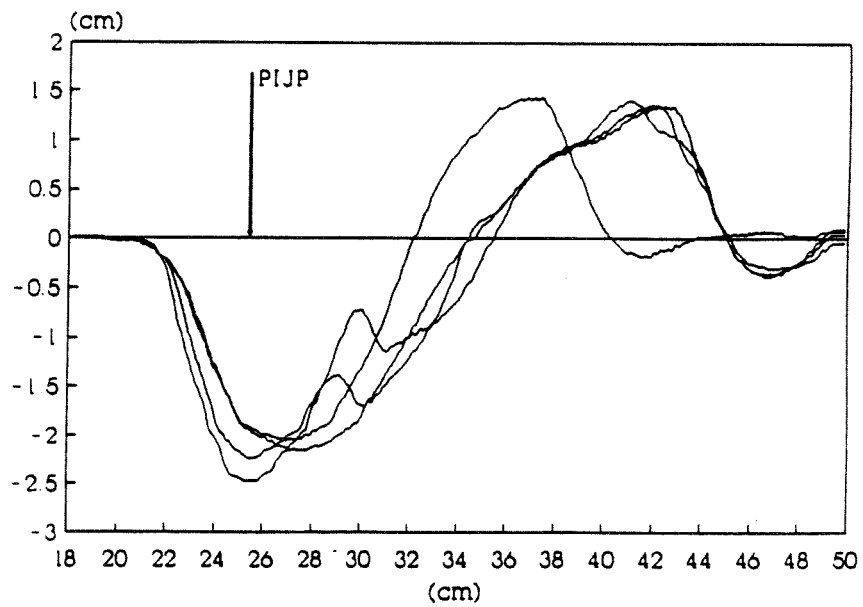
zand-slib combinatie		pijp- diameter cm	water- diepte m	functie van de tijd	functie van de snelheid	blz.
slib- perc. %	afkomst slib			stroom- snelheid m/s		
0	(zuiver zand)	3.1	0.28	0.28		D2
		6.0	0.34	0.25		D3
		3.1	0.30	0.32		D4
		6.0	0.30	0.32		D5
30	kaoliniet	3.1	0.21	0.40		D6
		3.1+vin	0.21	0.40		D7
		6.0	0.21	0.40		D8
		3.1	0.22	0.43		D9
		6.0	0.22	0.43		D10
		3.1	0.23	0.48		D11
		3.1+vin	0.23	0.48		D12
6.0	0.23	0.48		D13		
20	Oestergronden, Noordzee (eerste lading)	3.1/3.1+vin	0.24	0.52		D14
		3.1/3.1+vin	0.26	0.69		D15
		3.1/3.1+vin	0.28	0.88		D16
		3.1/3.1+vin	0.29	1.10		D17
20	Oestergronden, Noordzee (tweede lading)	3.1+vin	0.16	0.6		D18
		3.1/3.1+vin	0.18	0.7		D19
		3.1/3.1+vin	0.20	0.8		D20
		3.1	0.20	0.8		D21
		3.1/3.1+vin	0.22	0.9		D22
		3.1/3.1+vin	0.22	0.9		D23
		3.1	0.21	0.9		D24
16	Oestergronden, Noordzee (tweede lading)	3.1/3.1+vin	0.30		x	D25
10	Oestergronden, Noordzee (tweede lading)	3.1/3.1+vin	0.30		x	D26 D27 D28 D29
5	Oestergronden, Noordzee (tweede lading)	3.1/3.1+vin	0.30		x	D30 D31 D32

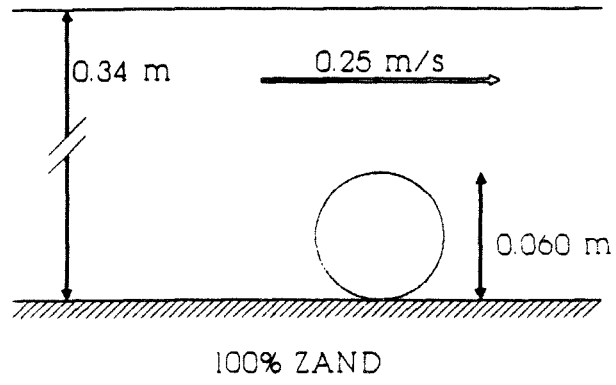


TIJD: 0, 15, 25, 35, 55, 115 min

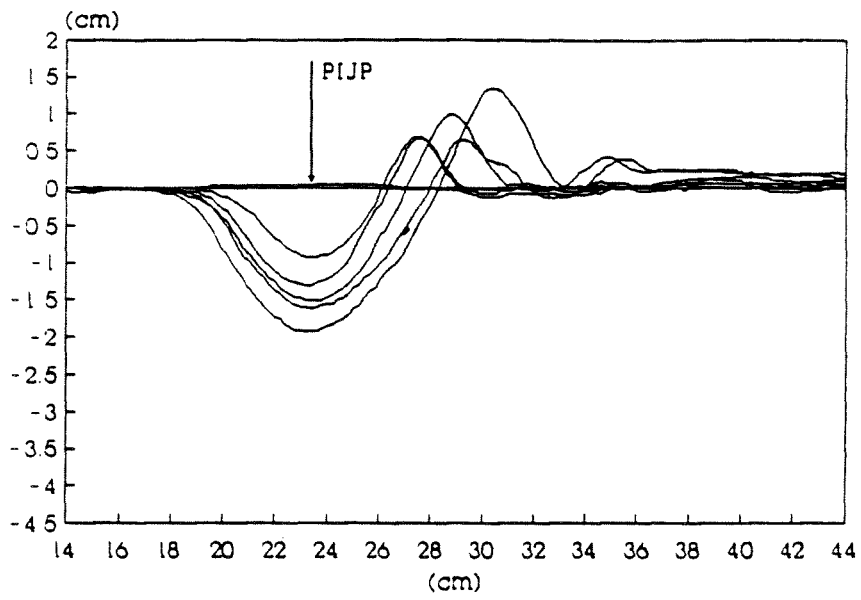


TIJD: 155, 240, 265, 370 min

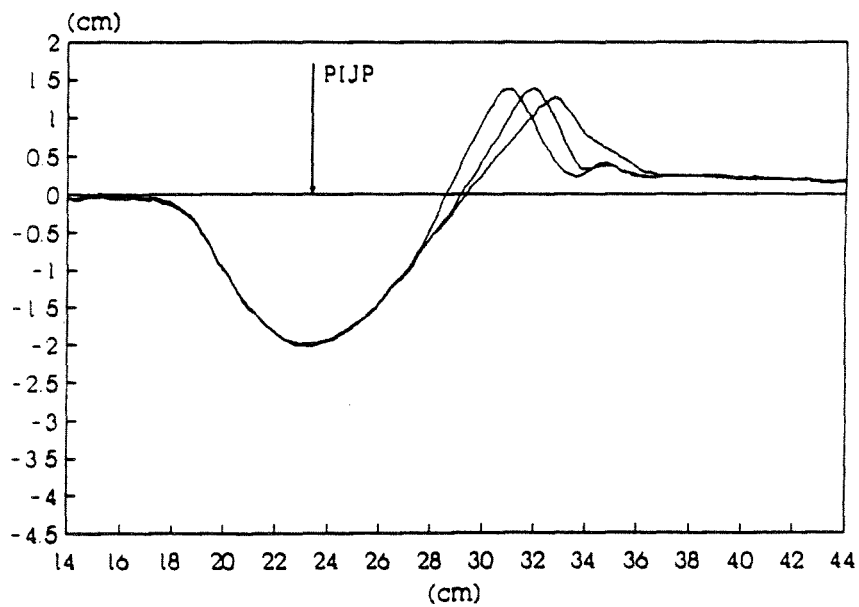


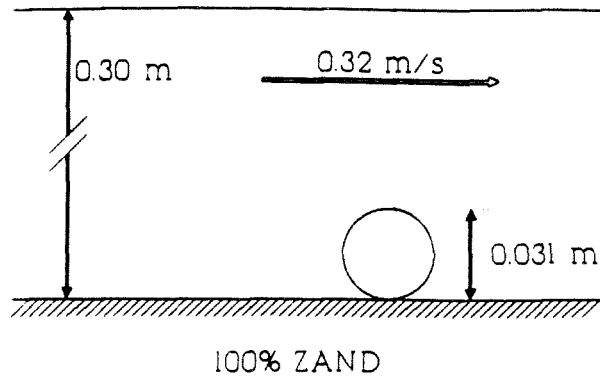


TIJD: 0, 5, 10, 20, 30, 60 min

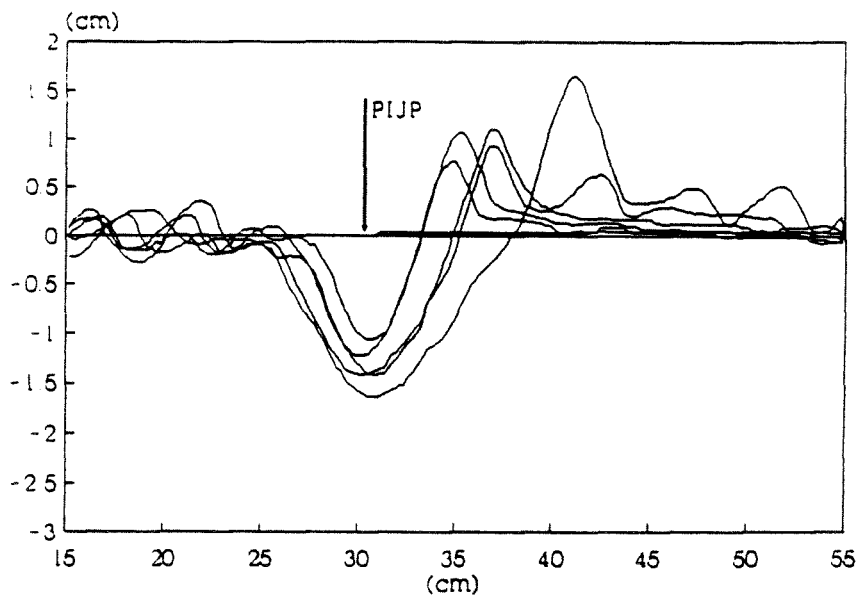


TIJD: 95, 155, 265 min

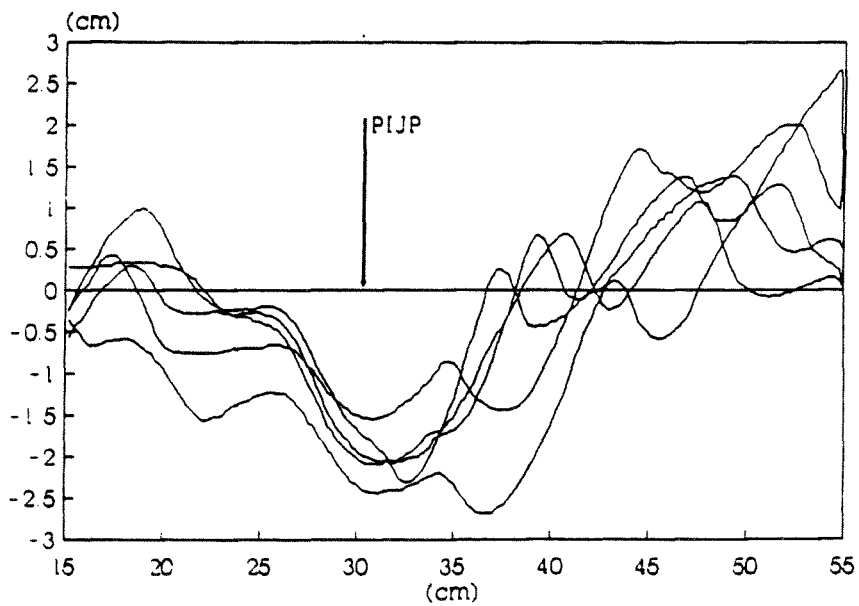


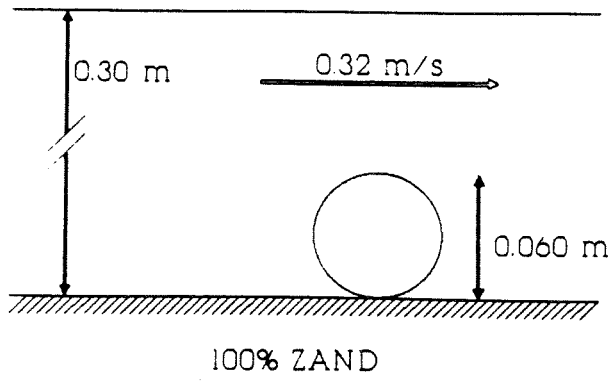


TIJD: 0, 5, 10, 20, 30, 60 min

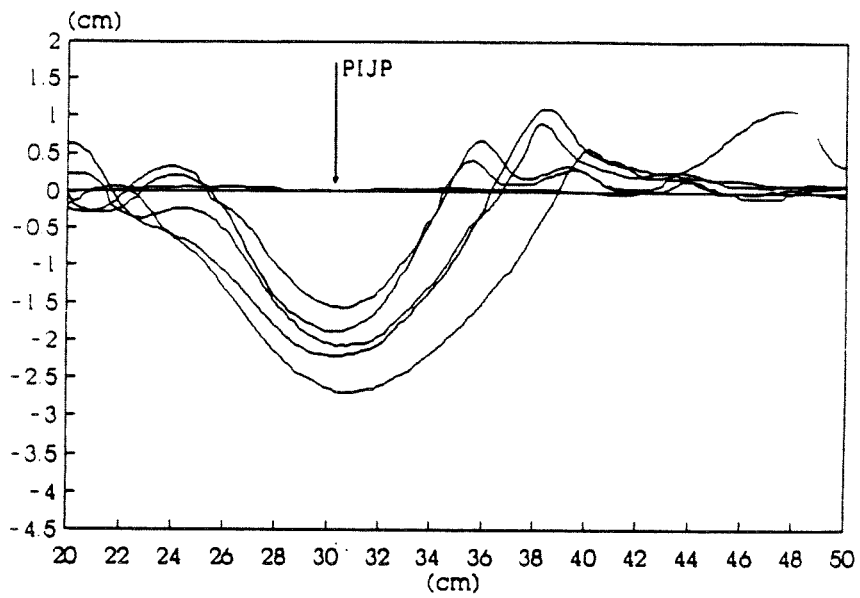


TIJD: 90, 150, 270, 390, 510 min

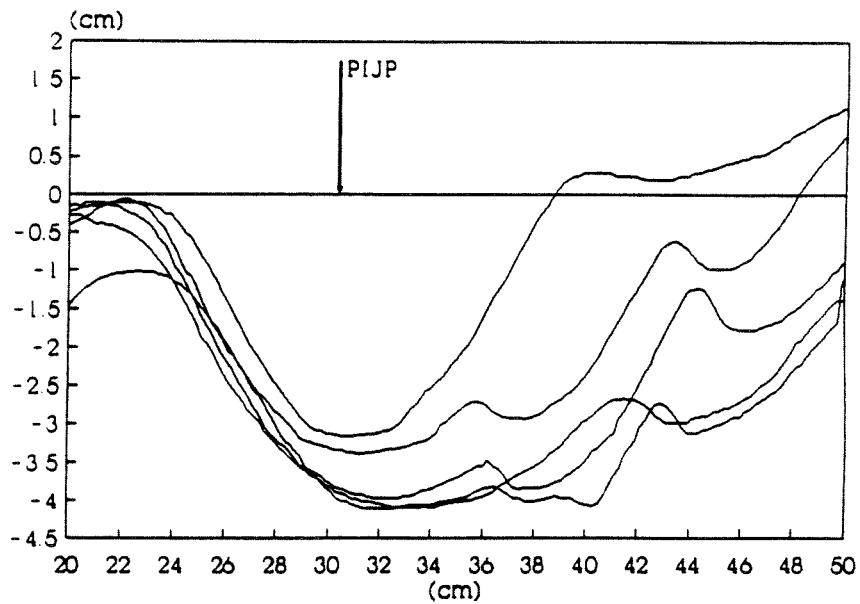


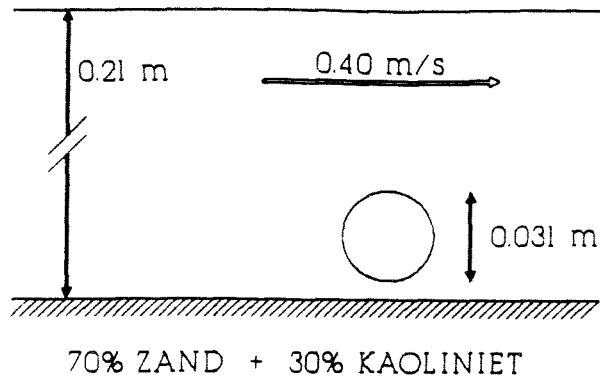


TIJD: 0, 5, 10, 20, 30, 60 min

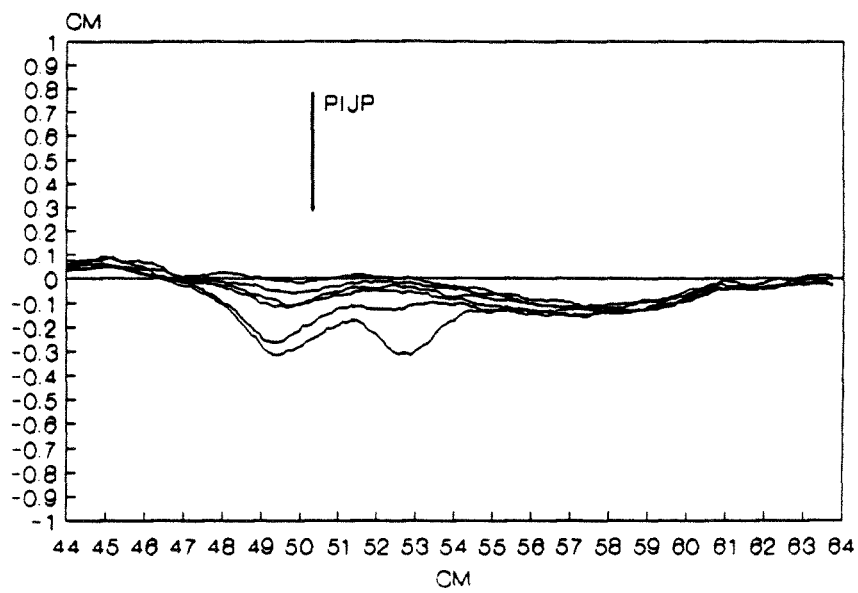


TIJD: 90, 150, 250, 350, 530 min

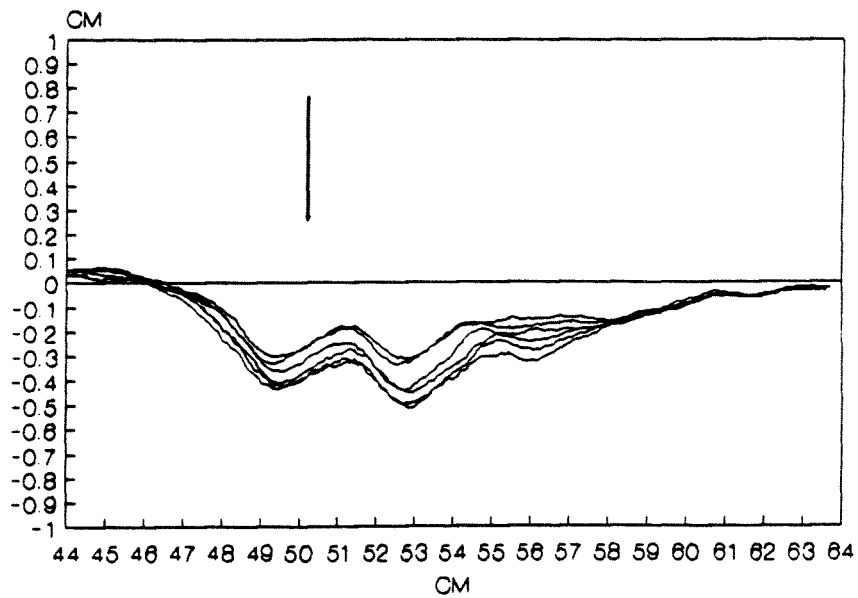


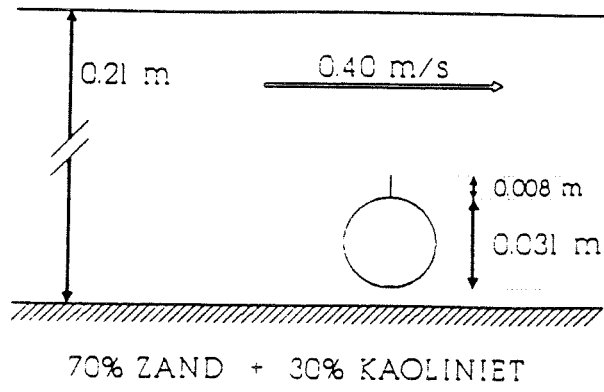


TIJD: 0, 5, 15, 30, 60, 120 MIN

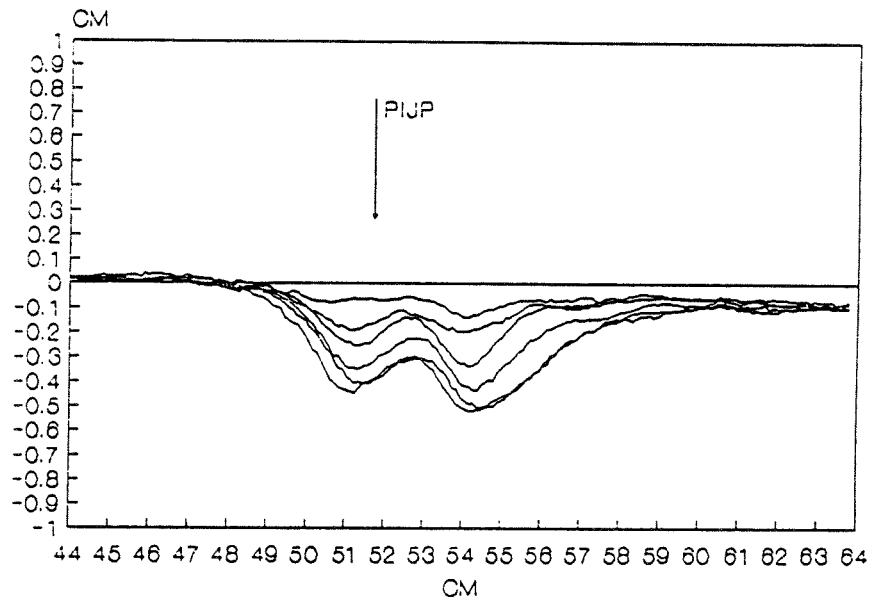


TIJD: 180, 240, 300, 360, 420, 480 min

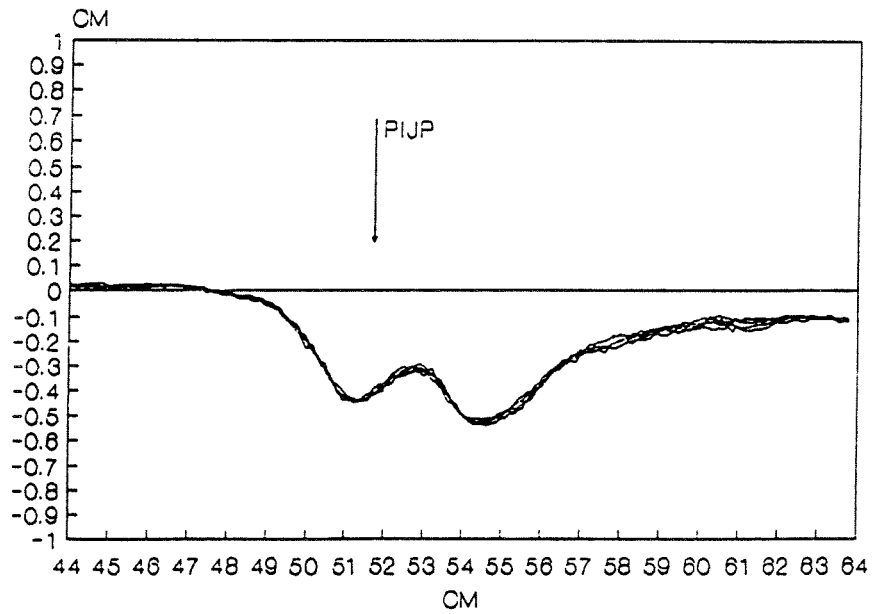


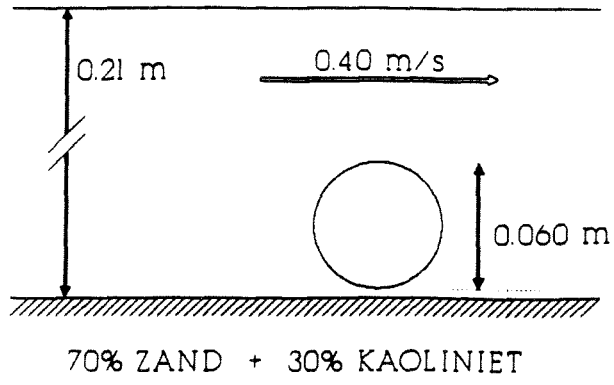


TIJD: 0, 15, 30, 60, 120, 180 min

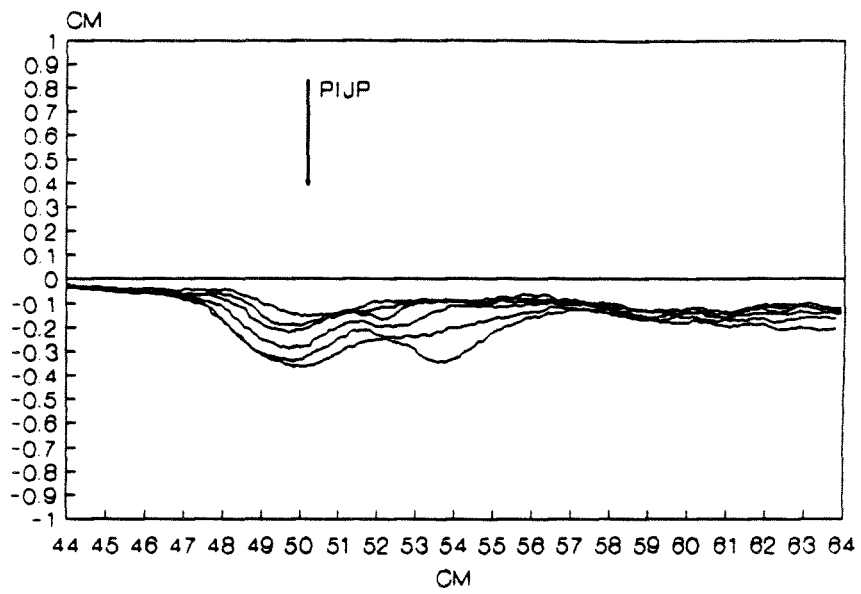


TIJD: 240, 300, 360, 420, 480, 540 min

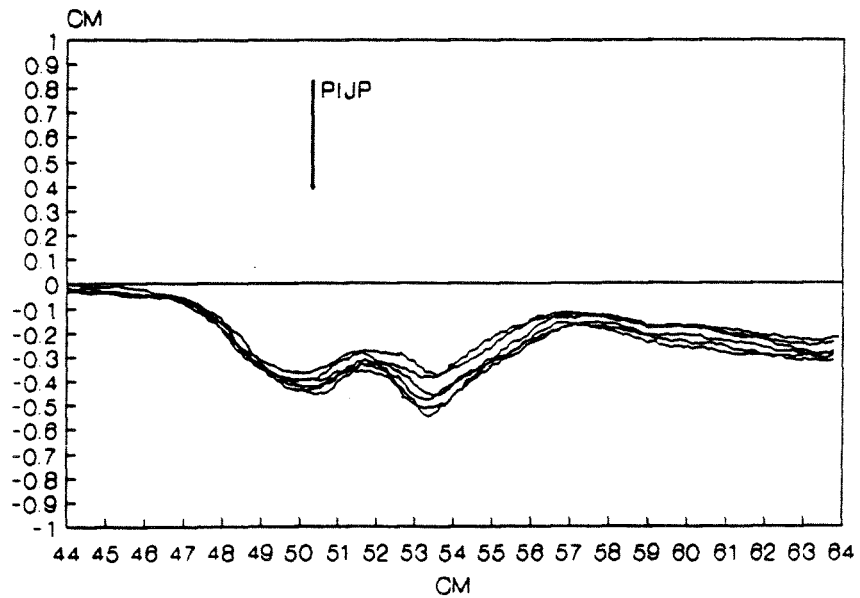


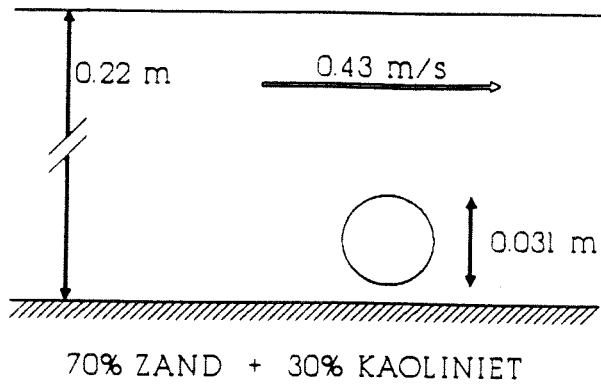


TIJD: 0, 5, 15, 30, 60, 120 min

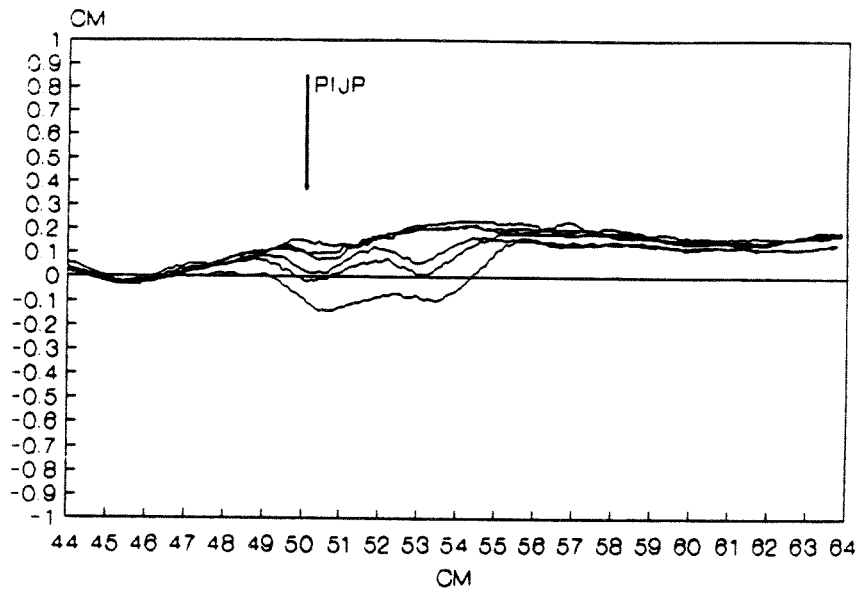


TIJD: 180, 240, 300, 360, 420, 480 min

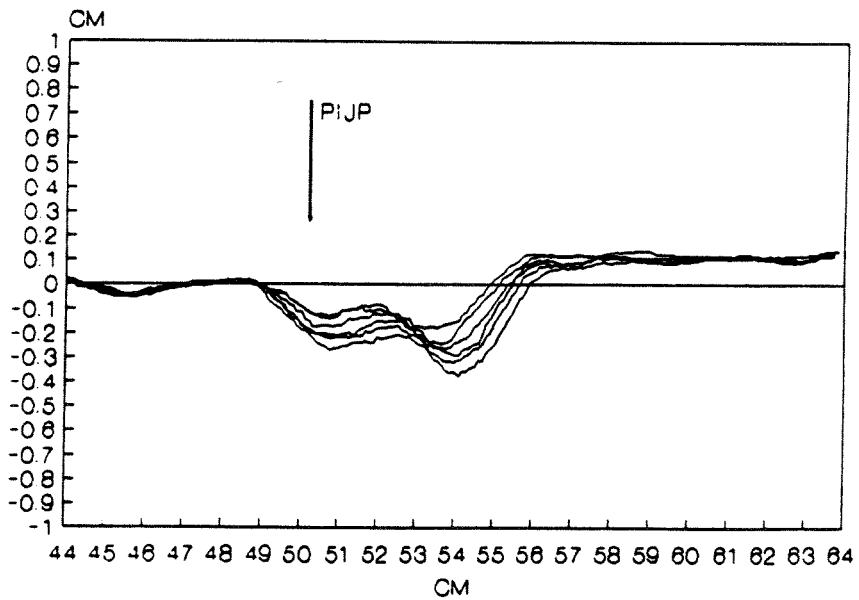


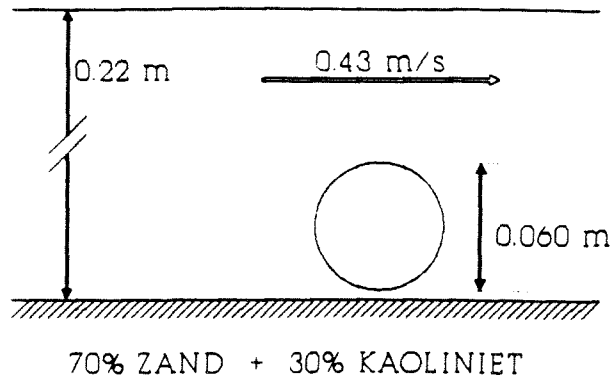


TIJD: 0, 5, 15, 30, 60, 120 min

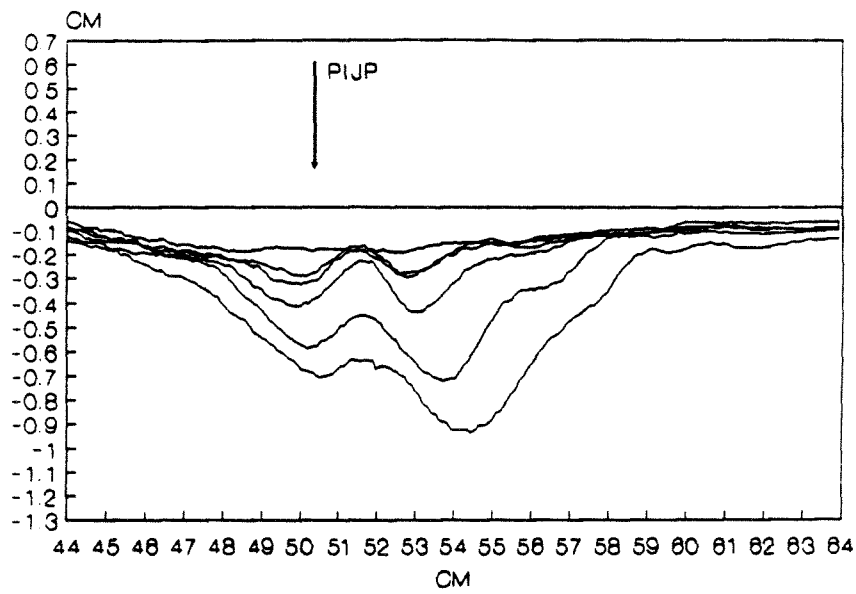


TIJD: 180, 240, 300, 360, 420, 480 min

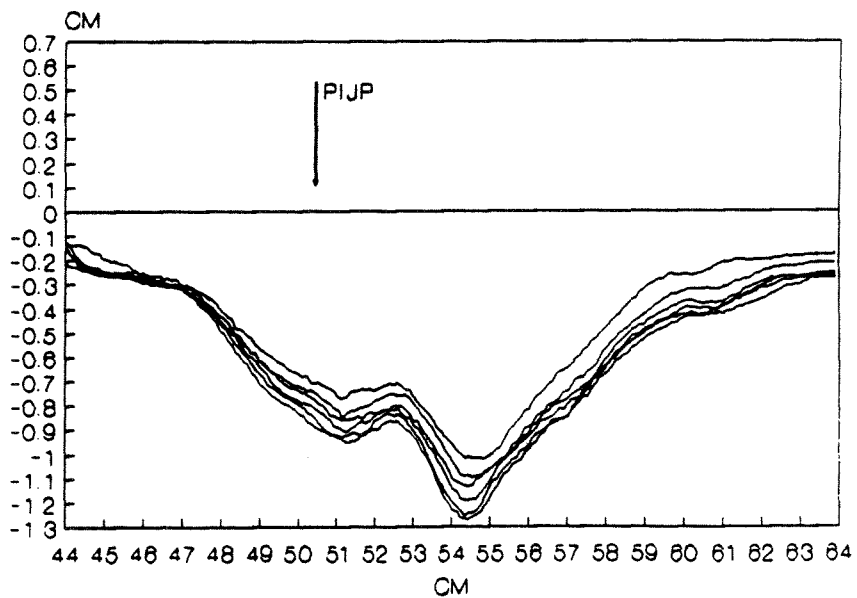


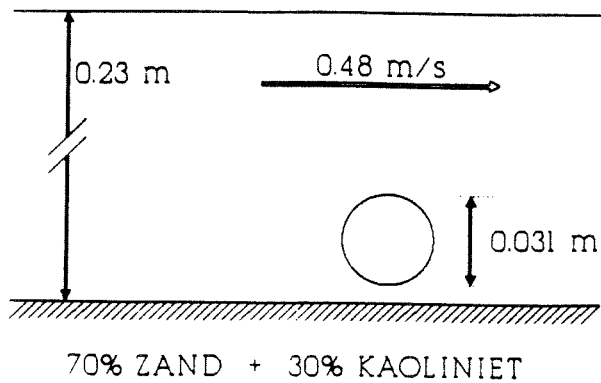


TIJD: 0, 5, 15, 30, 60, 120 min

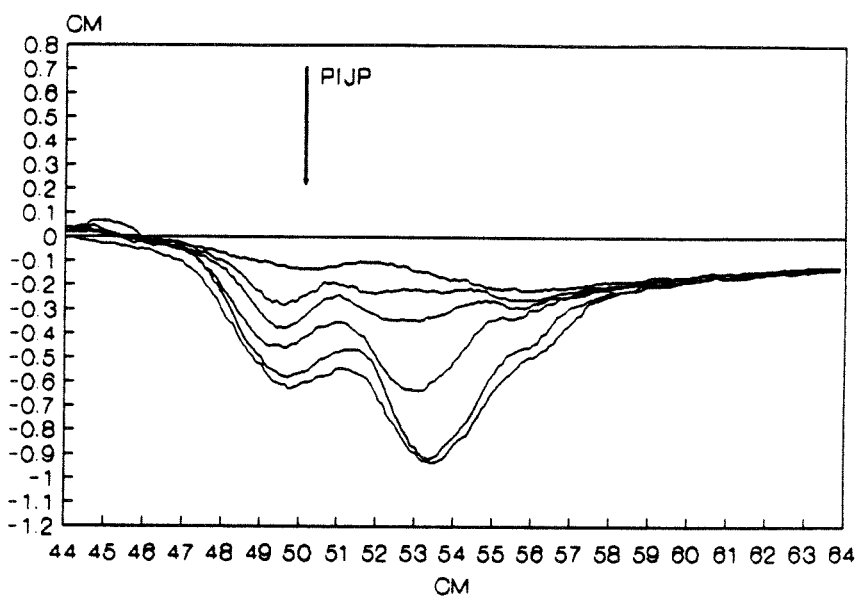


TIJD: 180, 240, 300, 360, 420, 480 min

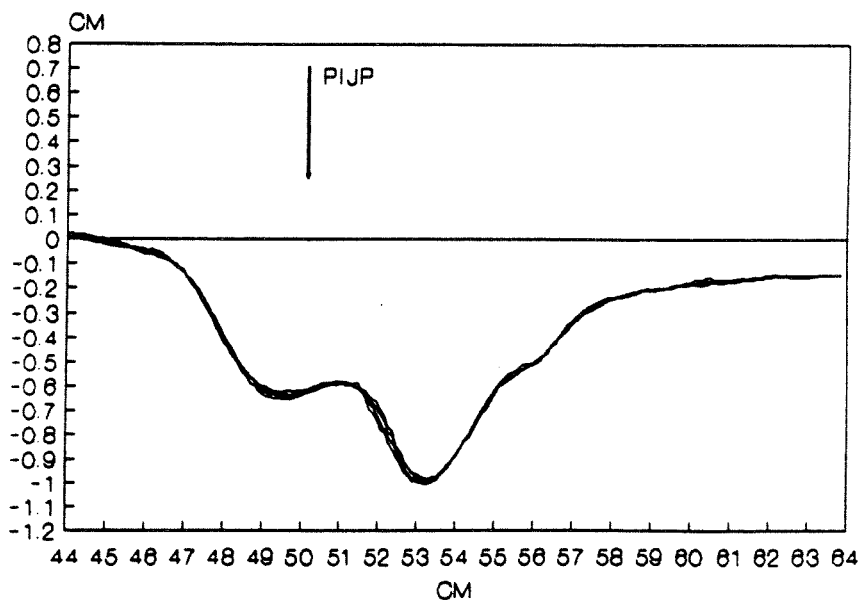


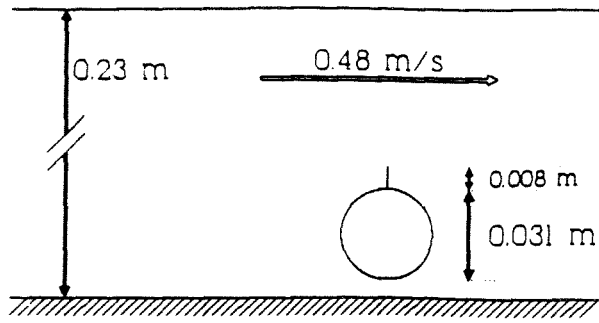


TIJD: 0, 15, 30, 60, 120, 180 min



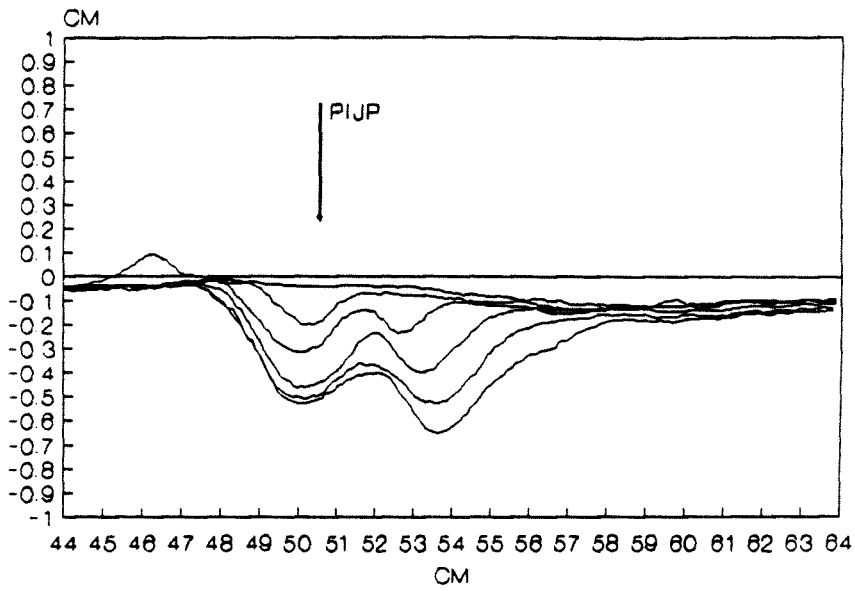
TIJD: 240, 300, 360, 420, 480 min



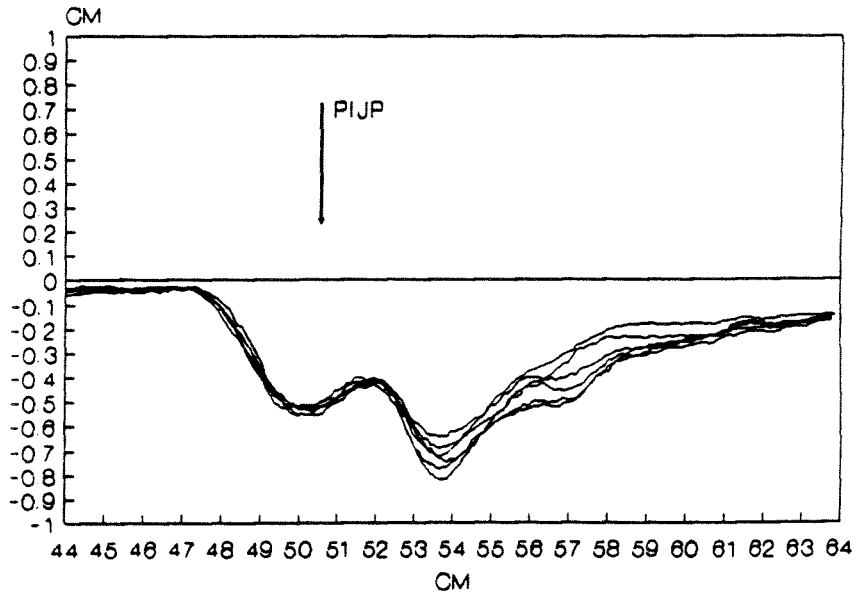


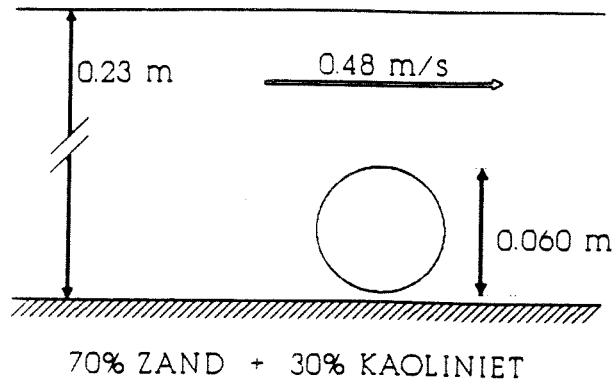
70% ZAND + 30% KAOLINIET

TIJD: 0, 15, 30, 60, 120, 180 min

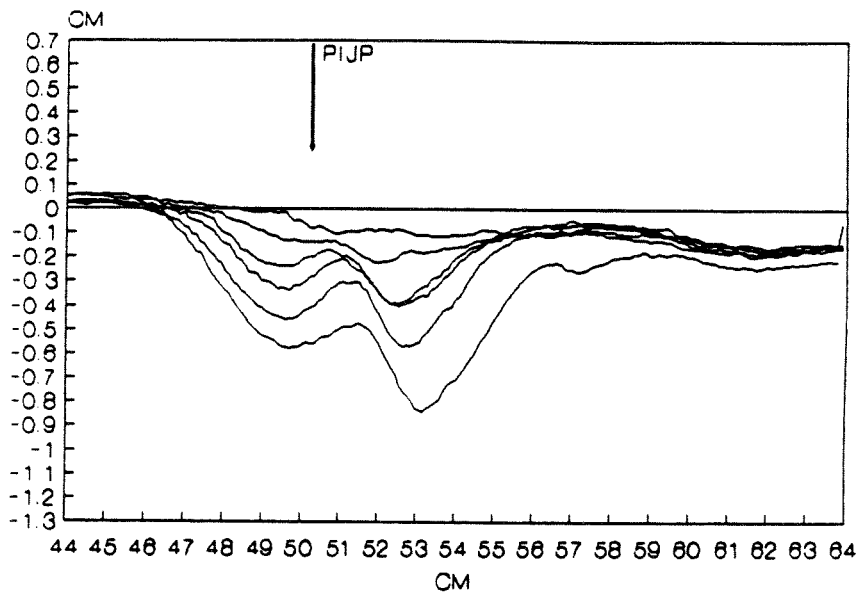


TIJD: 240, 300, 360, 420, 480, 540 min

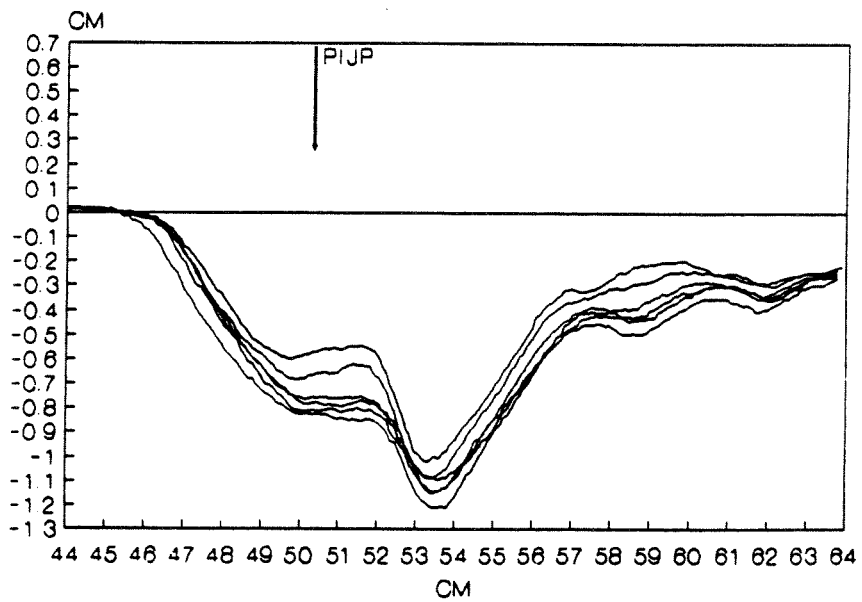


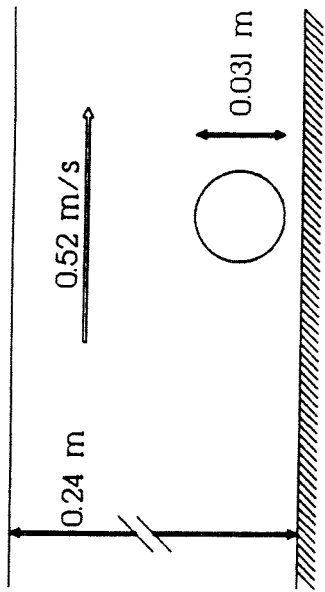


TIJD: 0, 5, 15, 30, 60, 120 min

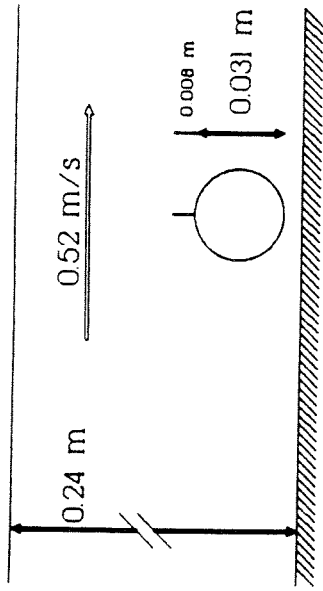
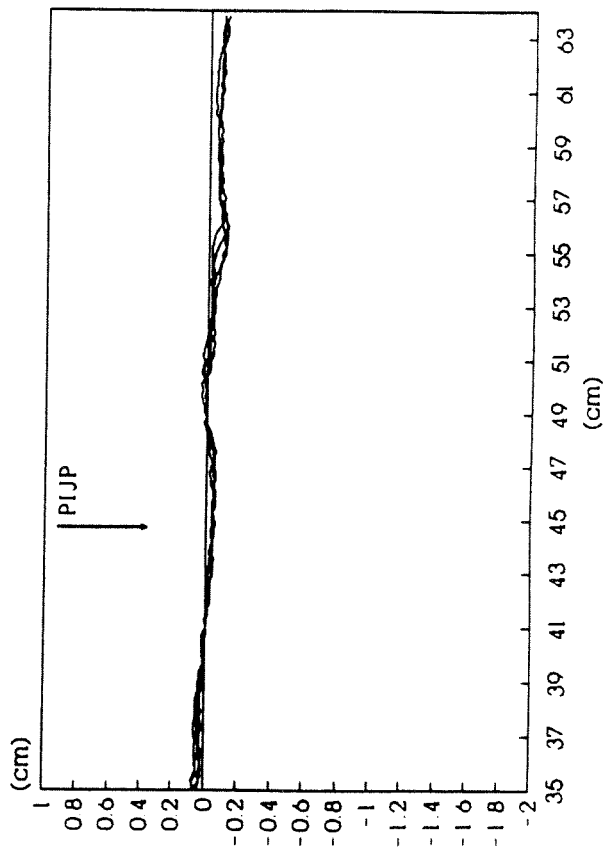


TIJD: 180, 240, 300, 360, 420, 480 min

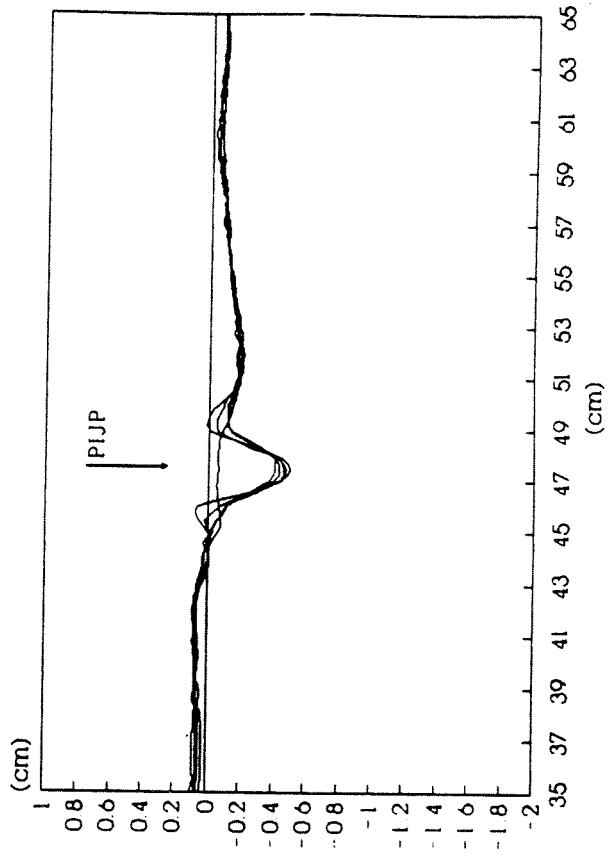


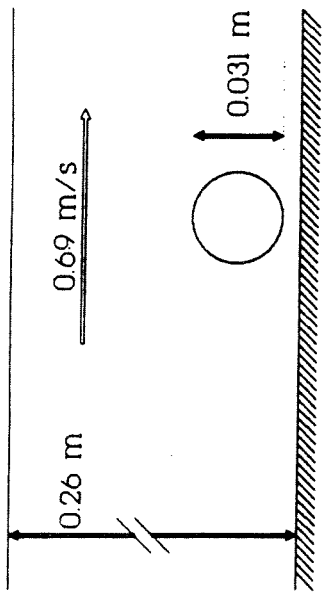


TIJD: 0, 15, 30, 45 min



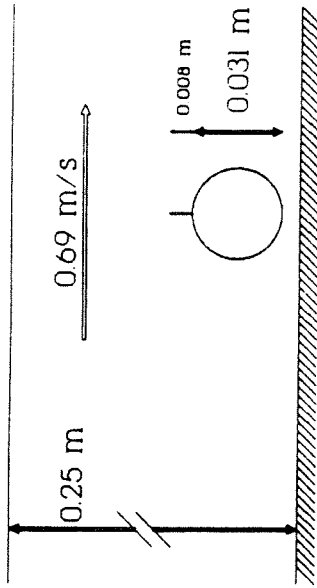
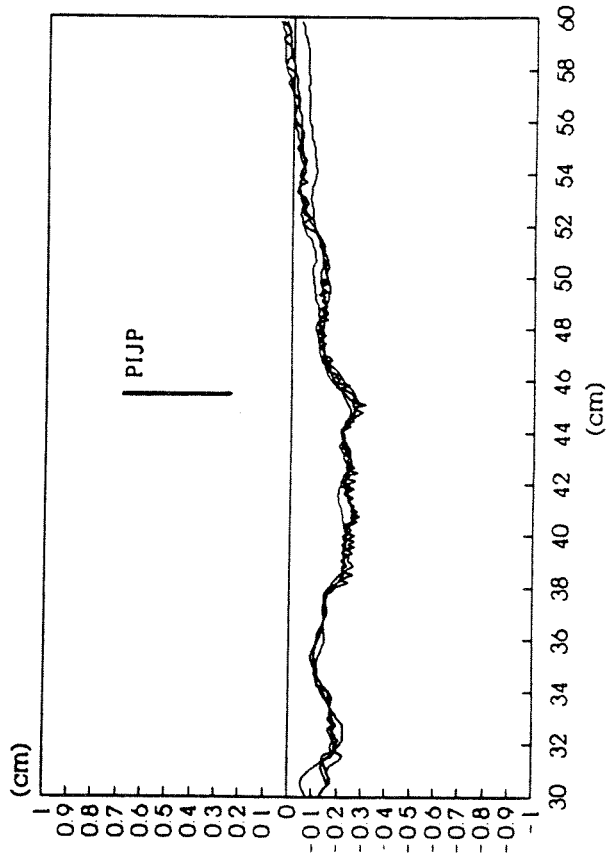
TIJD: 0, 15, 30, 45, 60, 75 min





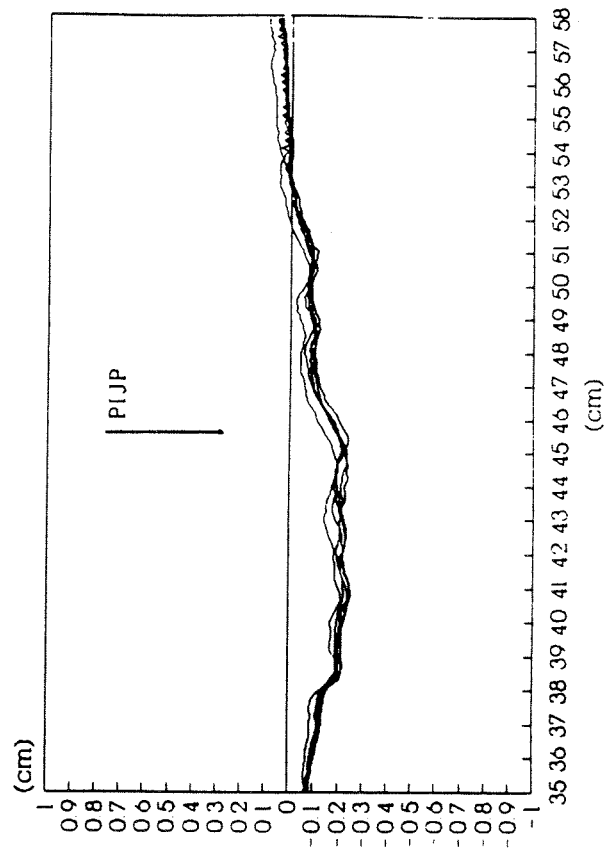
80% ZAND + 20% OESTERSLIB

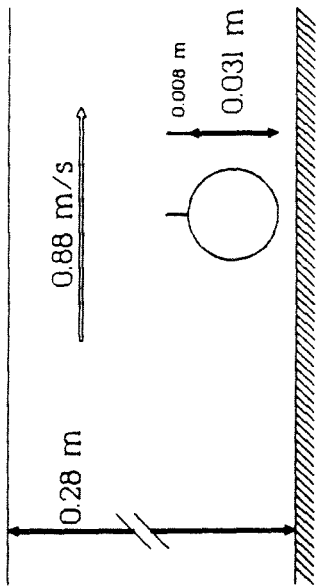
TIJD: 0, 15, 30, 45 min



80% ZAND + 20% OESTERSLIB

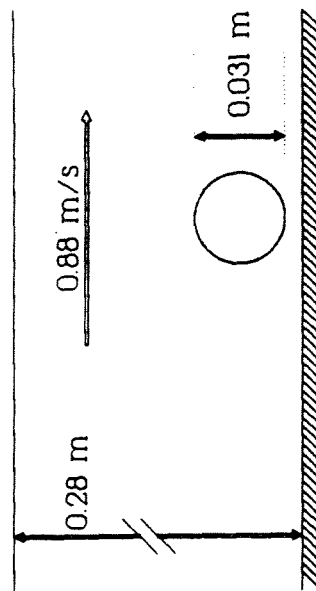
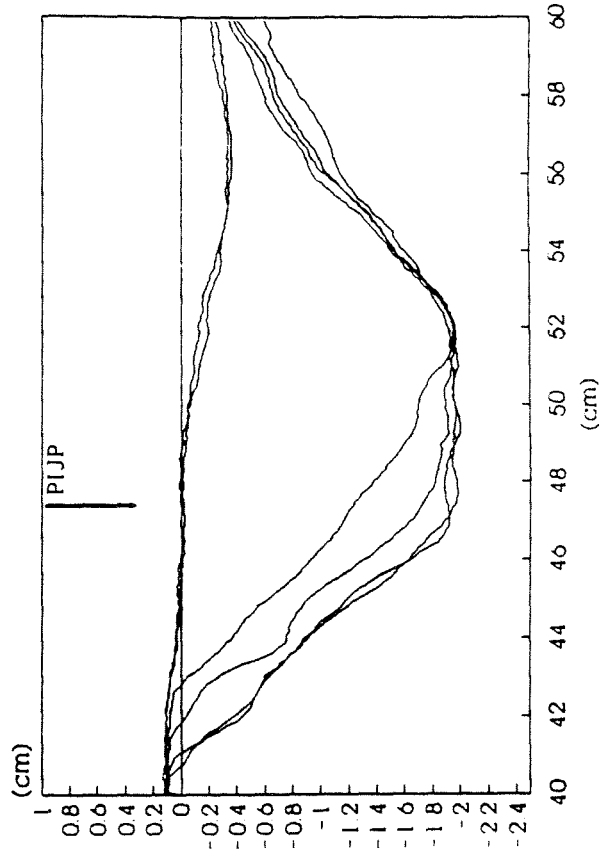
TIJD: 0, 15, 30, 45, 60, 75 min





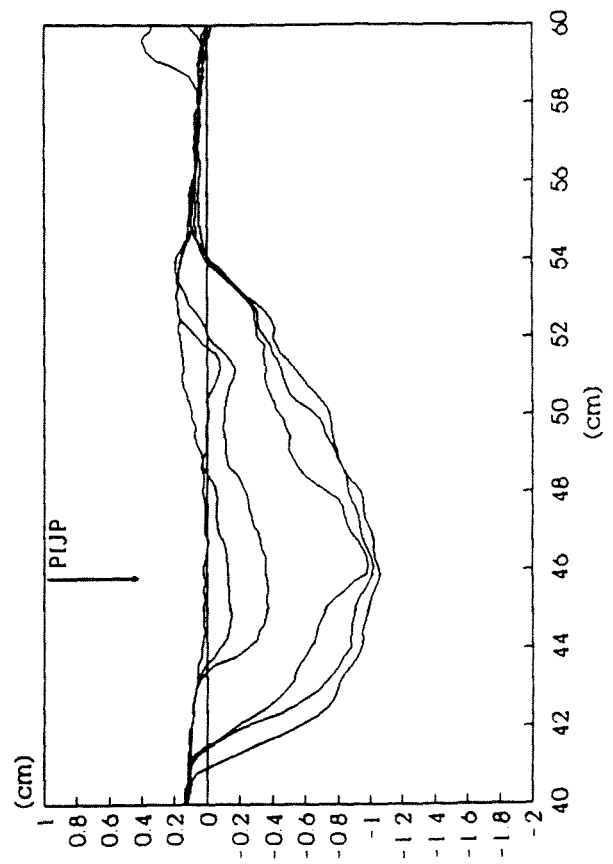
80% ZAND + 20% OESTERSLIB

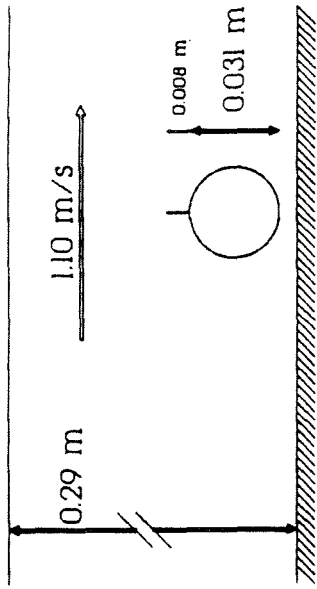
TIJD: 0, 15, 30, 45, 60, 90 min



80% ZAND + 20% OESTERSLIB

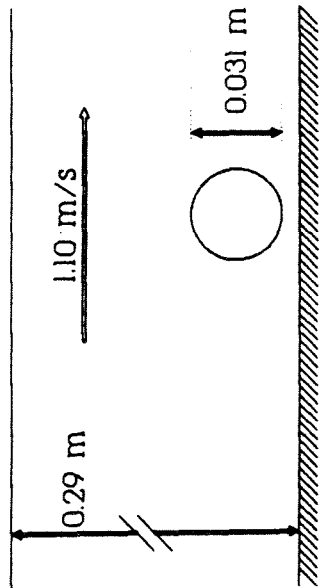
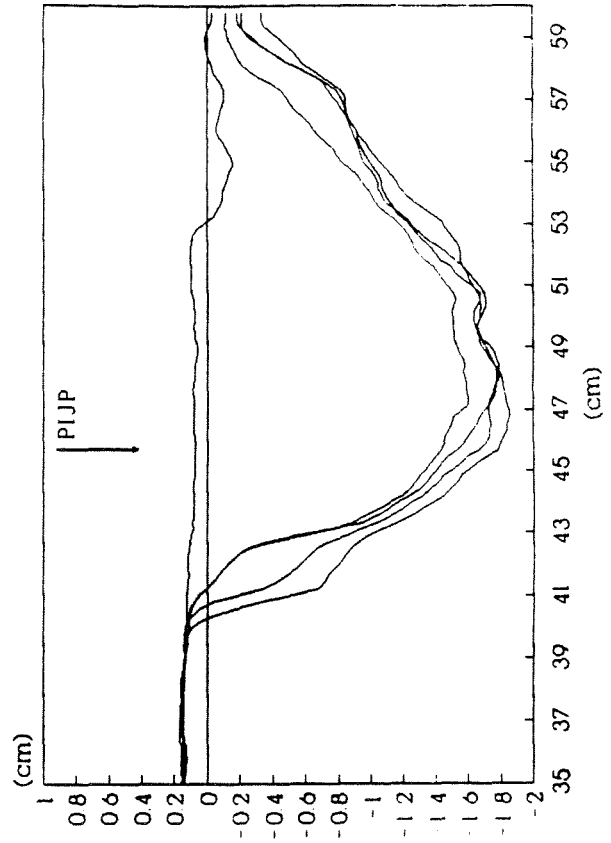
TIJD: 0, 15, 30, 45, 60, 75 min





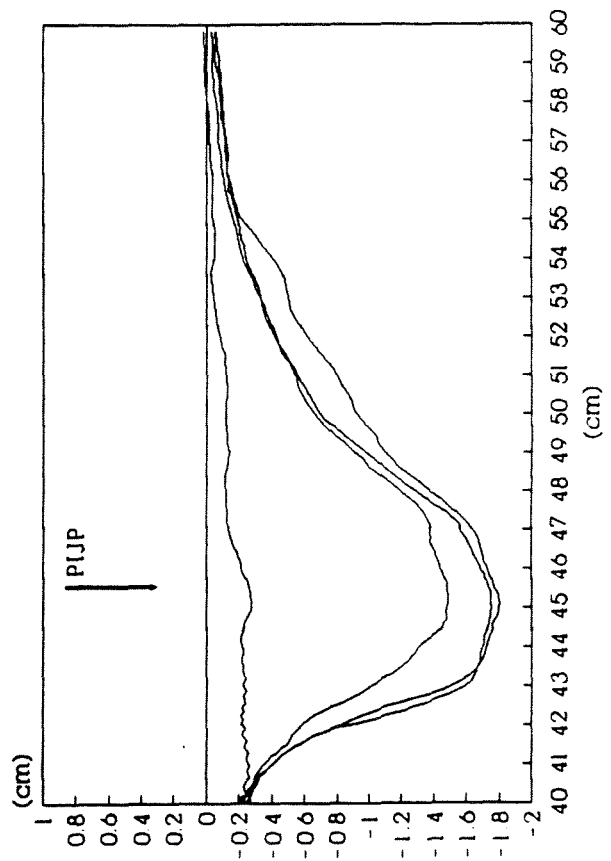
80% ZAND + 20% OESTERSLIB

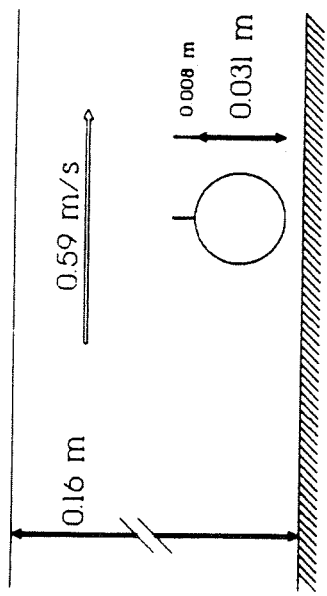
TIJD: 0, 15, 30, 45, 60 min



80% ZAND + 20% OESTERSLIB

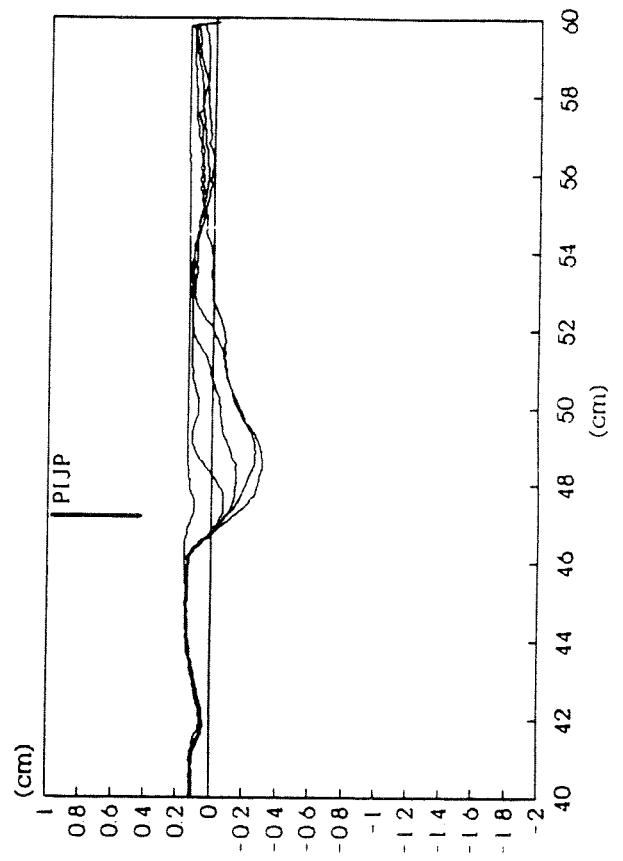
TIJD: 0, 15, 30, 45 min

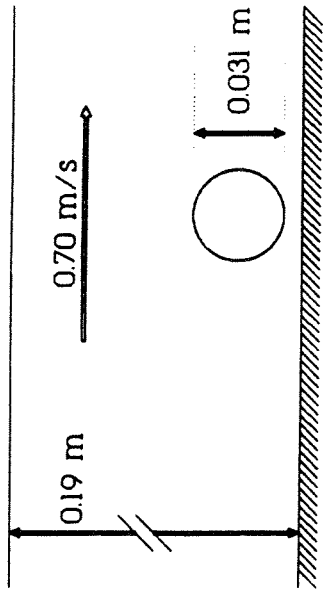




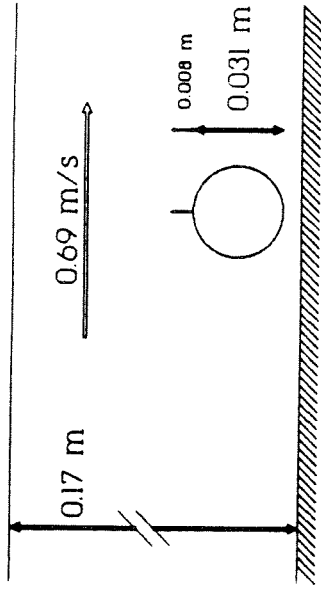
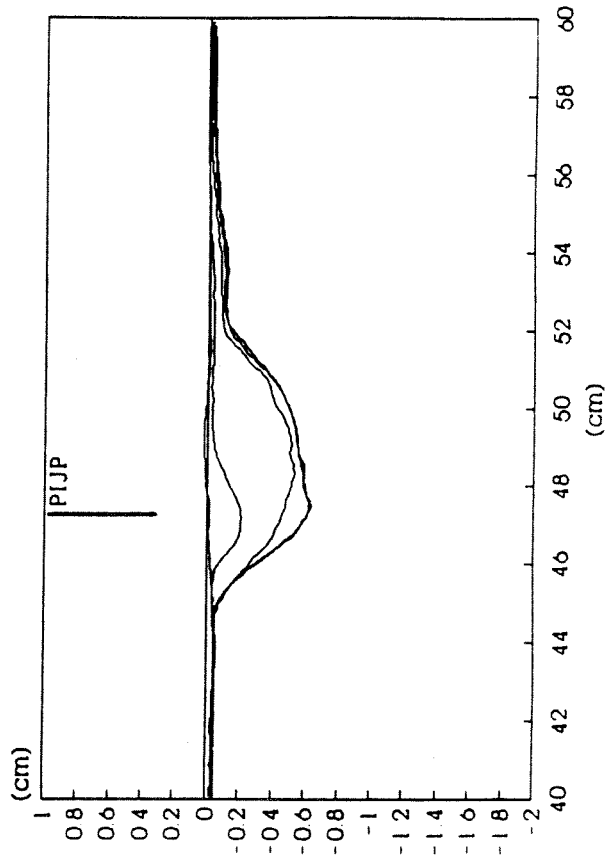
80% ZAND + 20% OESTERSLIB

TIJD: 0, 15, 30, 45, 60 min

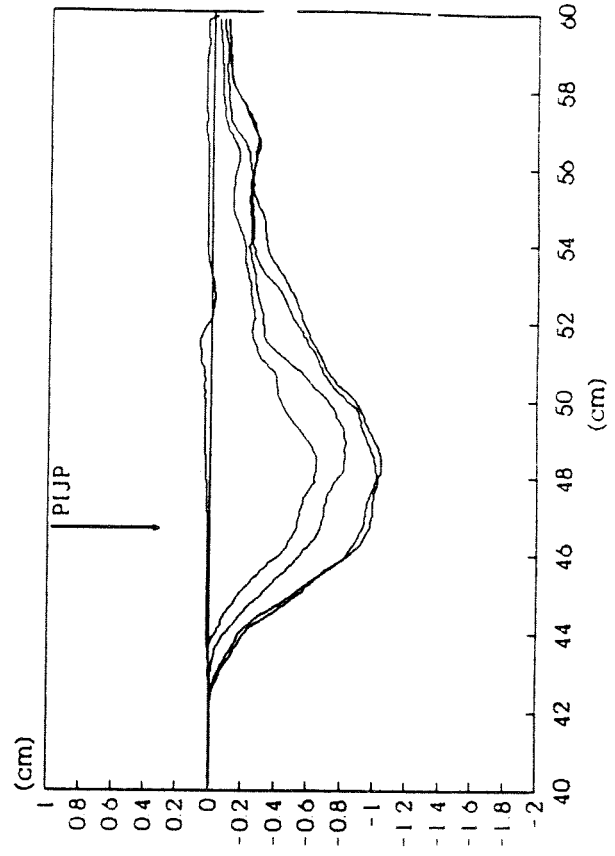


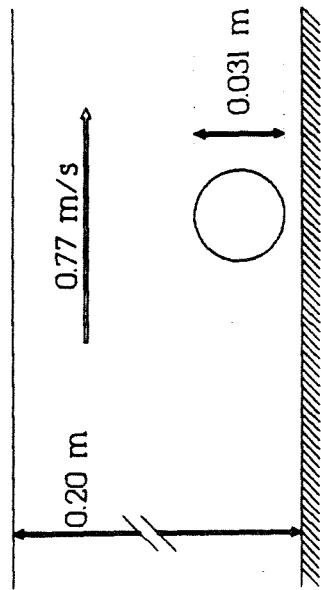


TIJD: 0, 15, 30, 45, 60 min

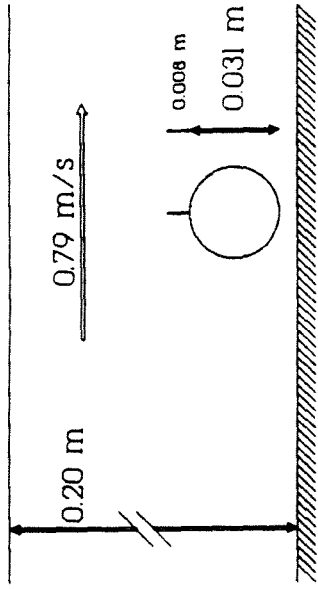


TIJD: 0, 15, 30, 45, 60 min



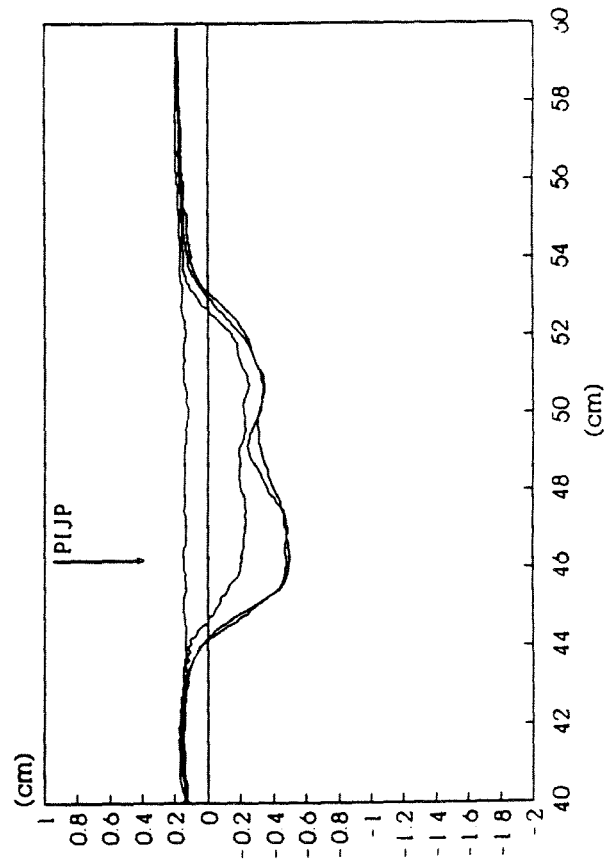


80% ZAND + 20% OESTERSLIB

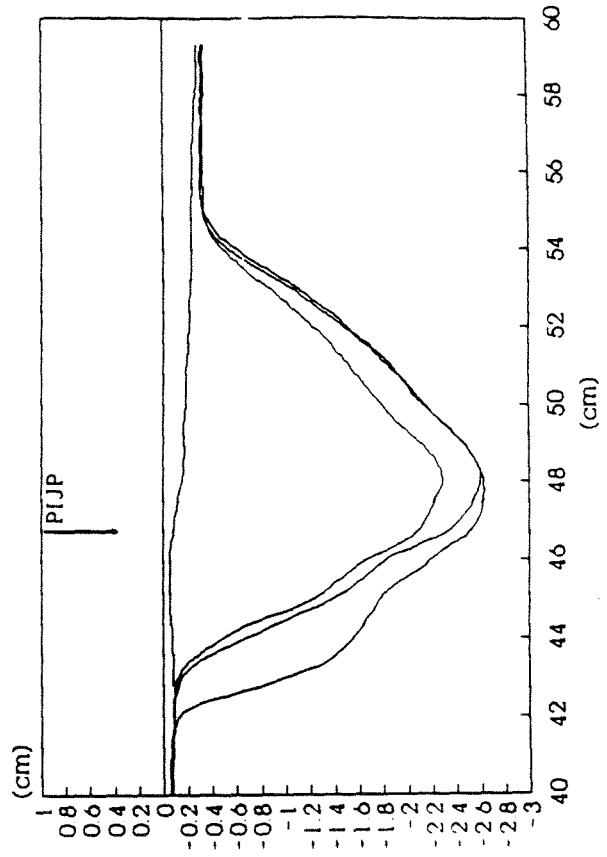


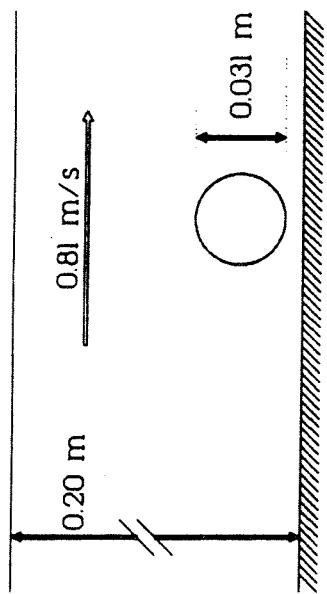
80% ZAND + 20% OESTERSLIB

TIJD: 0, 15, 30, 45 min



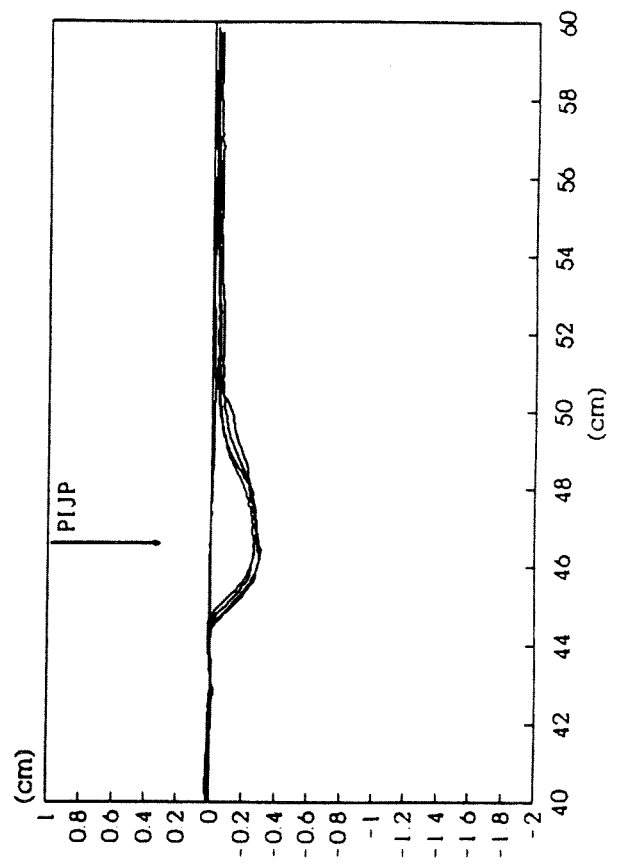
TIJD: 0, 15, 30, 45, 60 min

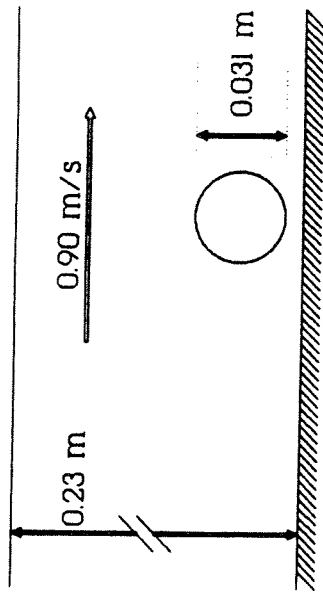




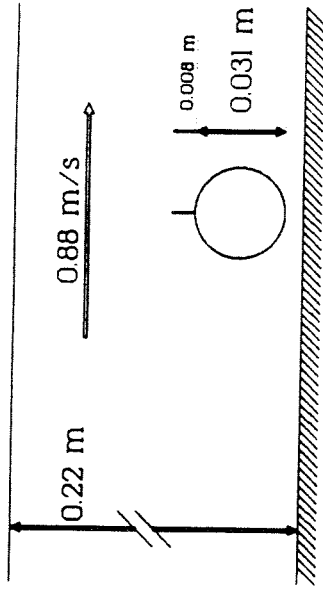
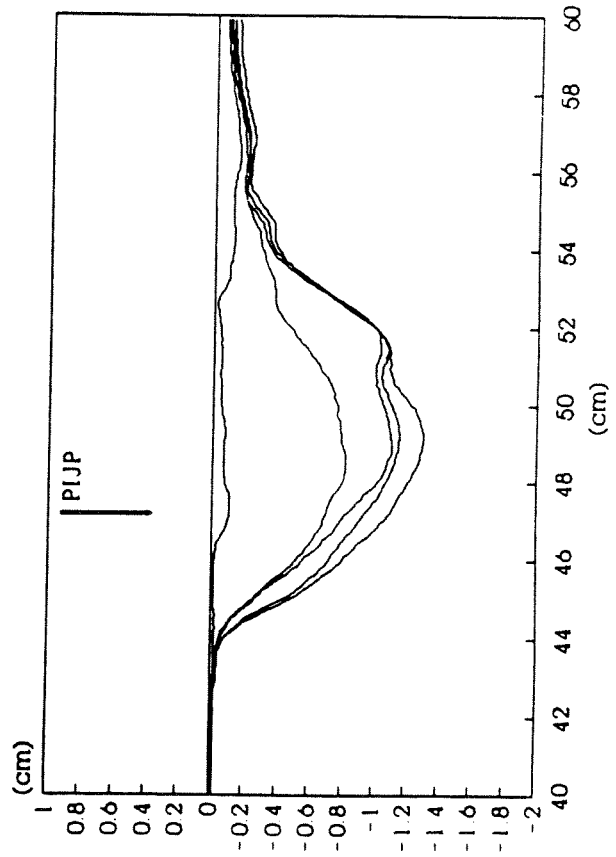
80% ZAND + 20% OESTERSLIB

TIJD: 0, 15, 30, 45, 60 min

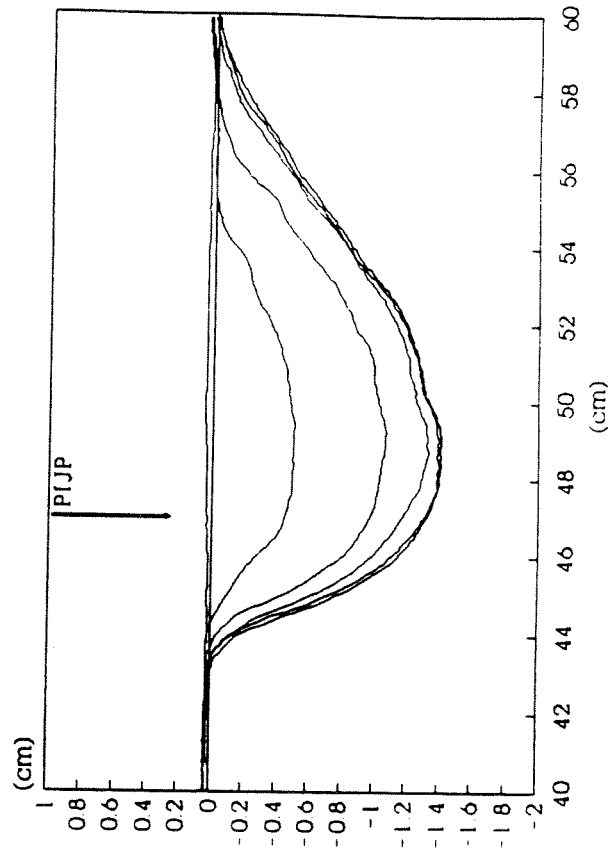


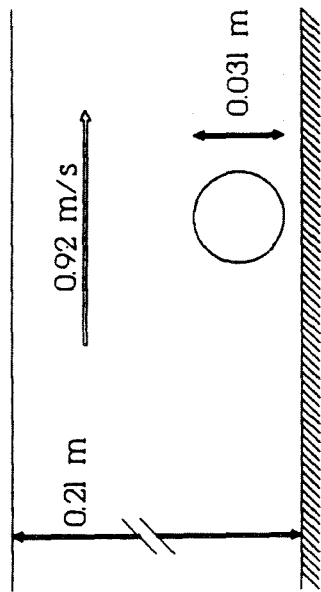


TIJD: 0, 15, 30, 45, 60 min

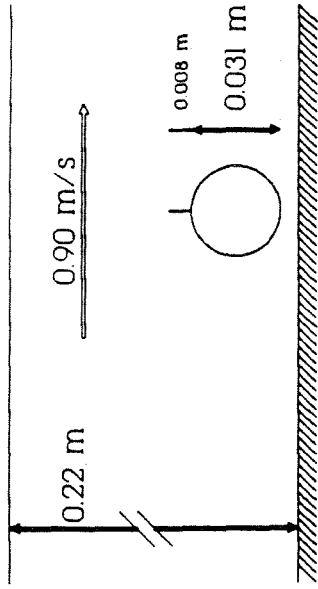


TIJD: 0, 15, 30, 60, 75, 90 min



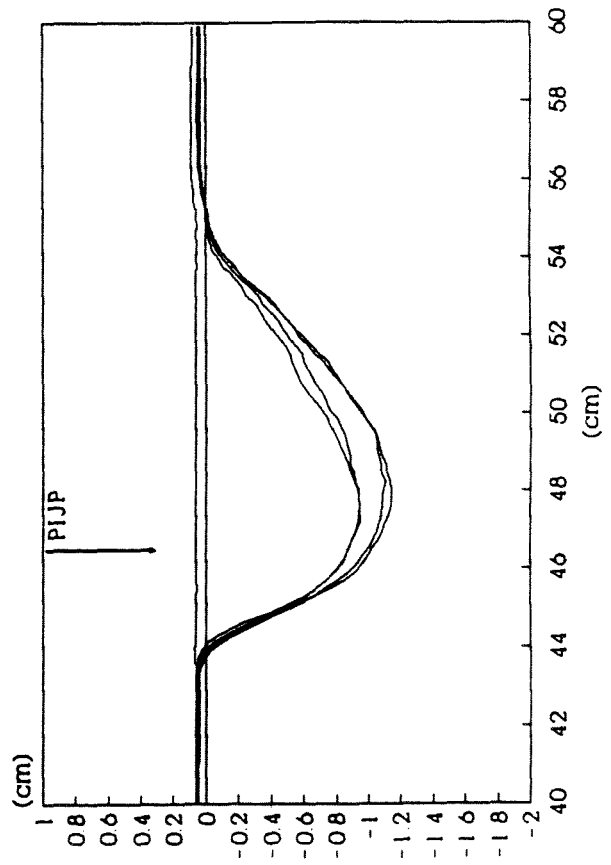


80% ZAND + 20% OESTERSLIB

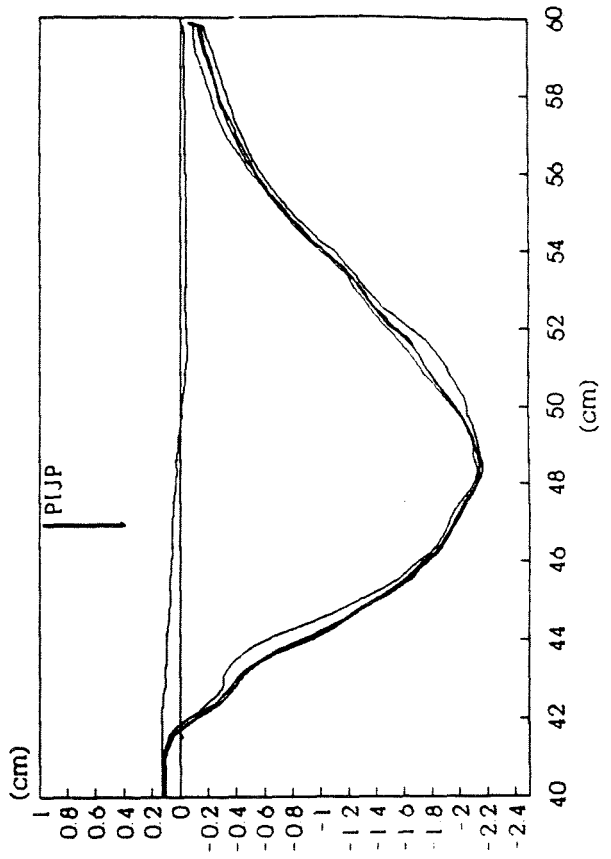


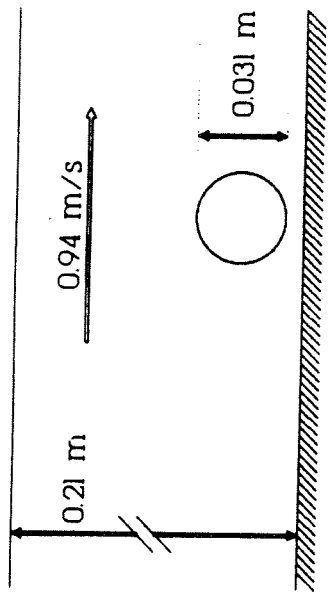
80% ZAND + 20% OESTERSLIB

TIJD: 0, 15, 30, 45, 60 min

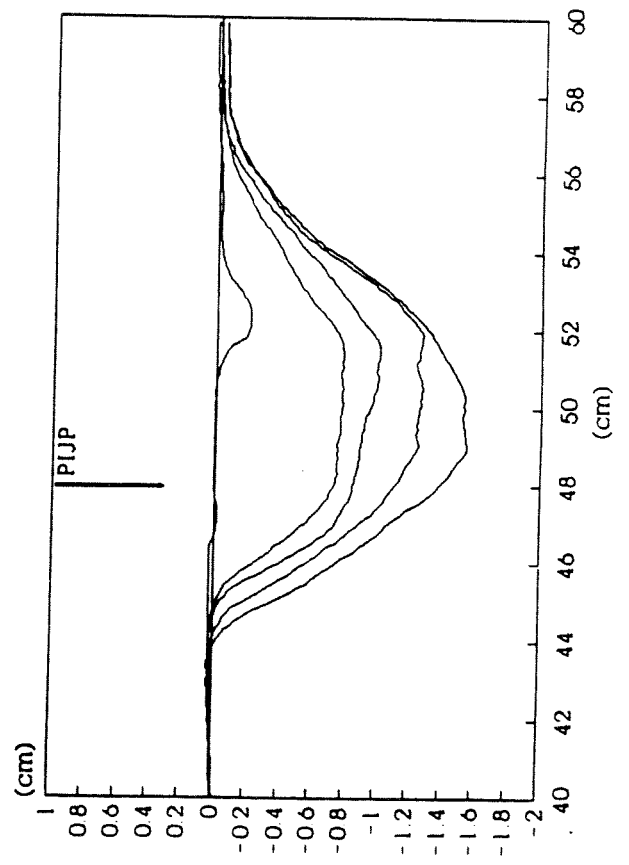


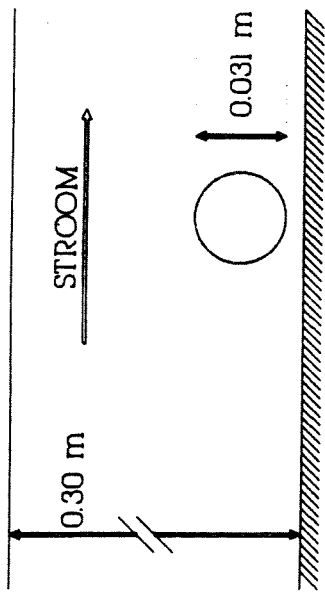
TIJD: 0, 15, 30, 45, 60 min



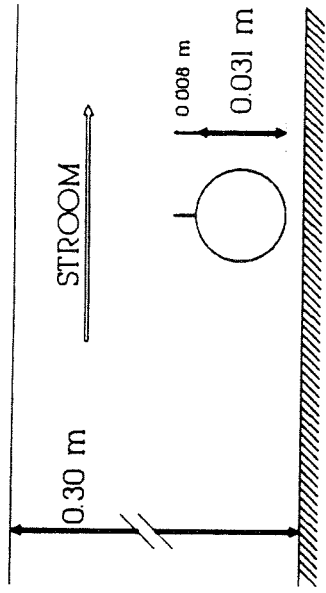
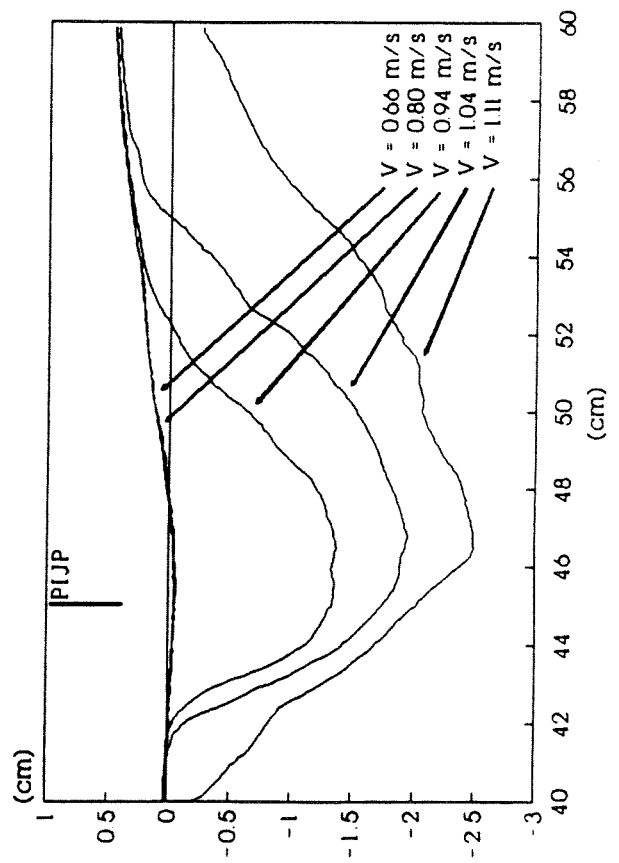


TIJD: 0, 15, 30, 45, 60 min

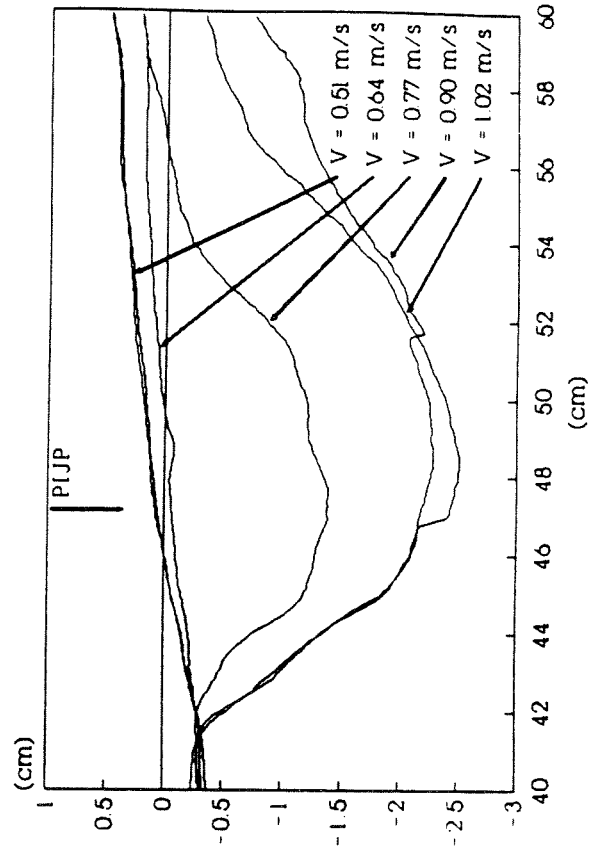


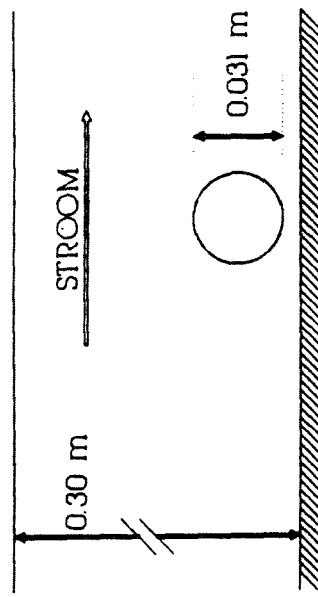


85% ZAND + 15% OESTERSLIB

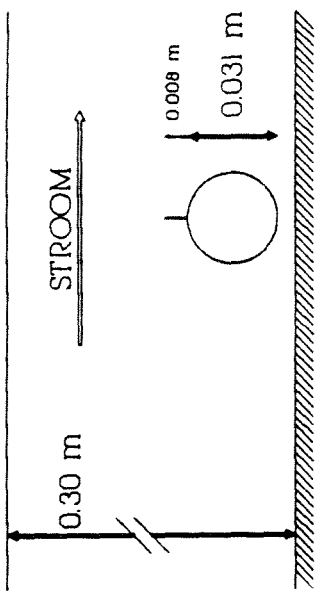
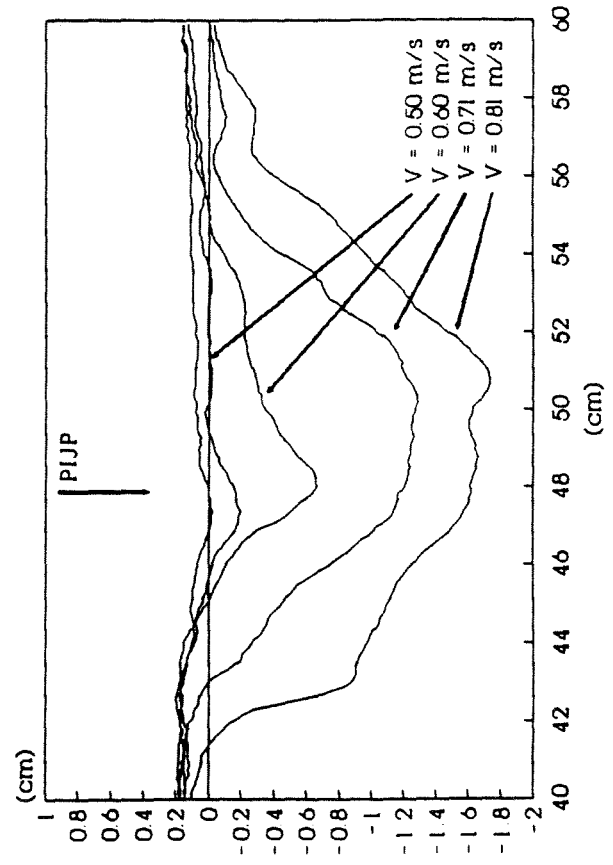


85% ZAND + 15% OESTERSLIB

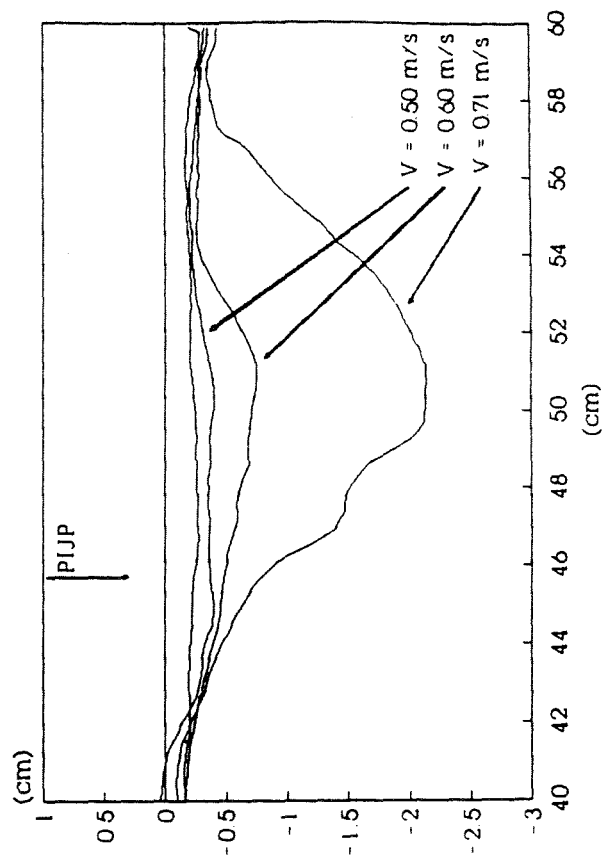


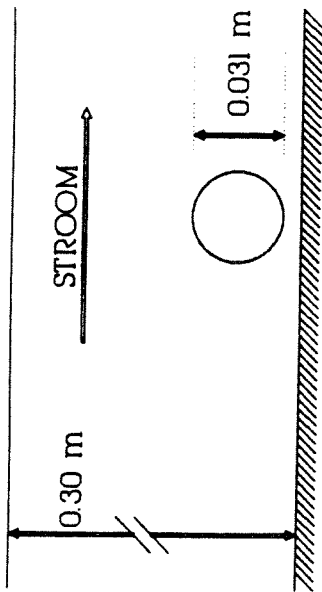


90% ZAND + 10% OESTERSLIB

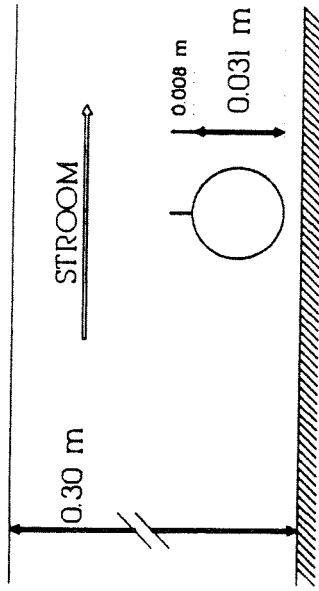
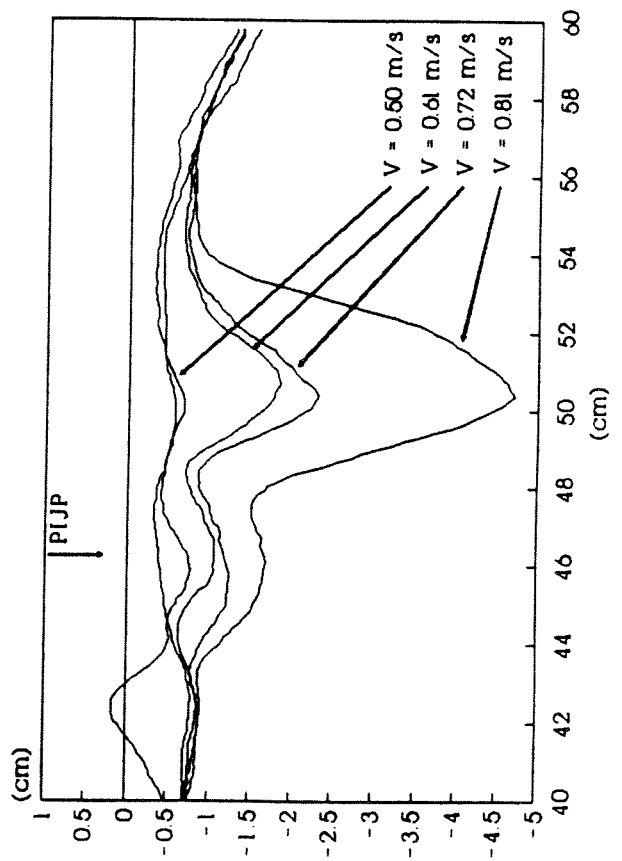


90% ZAND + 10% OESTERSLIB

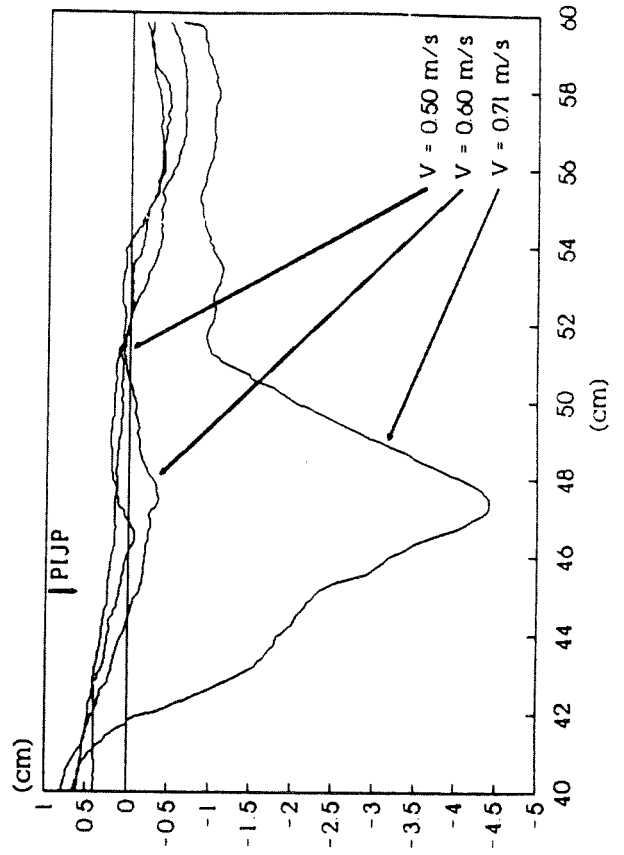


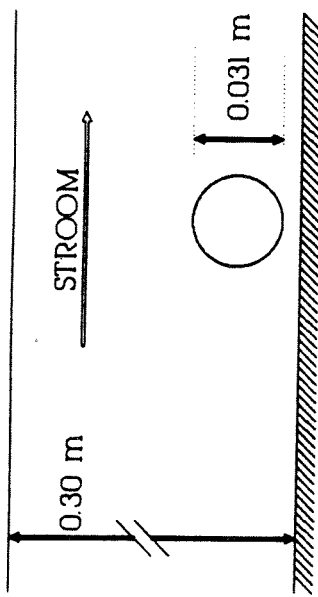


90% ZAND + 10% OESTERSLIB

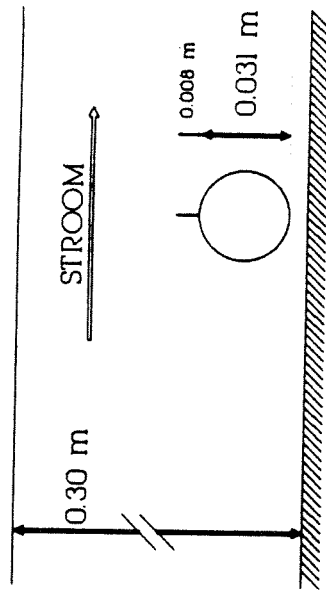
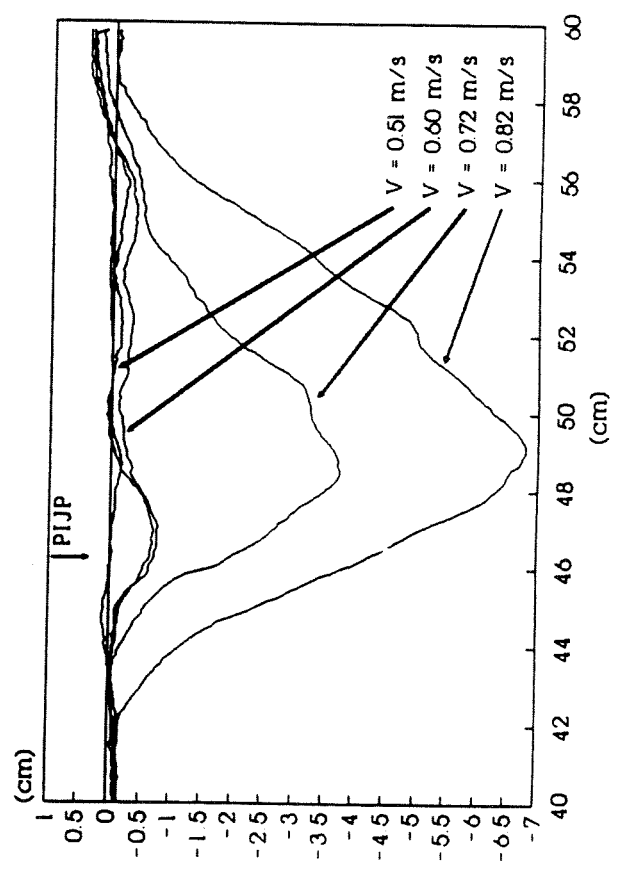


90% ZAND + 10% OESTERSLIB

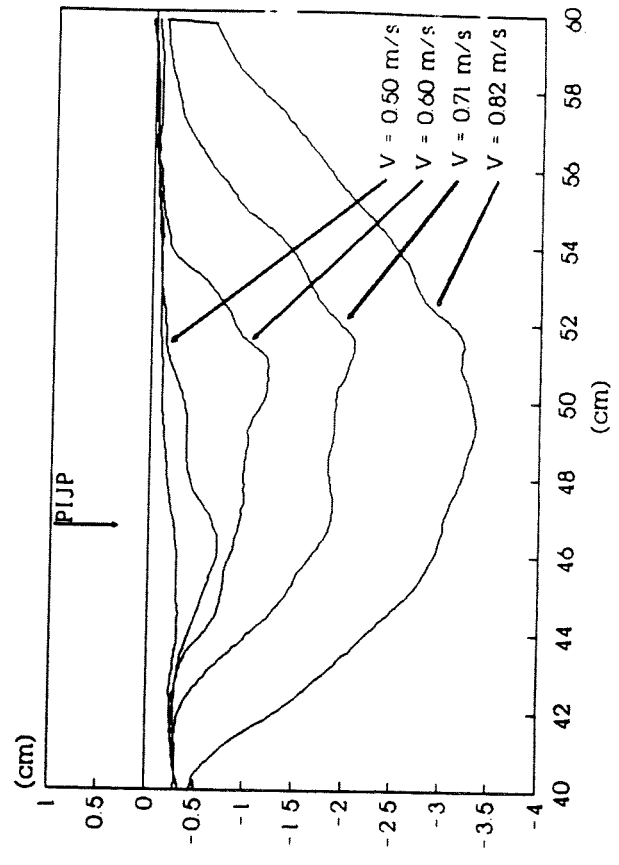


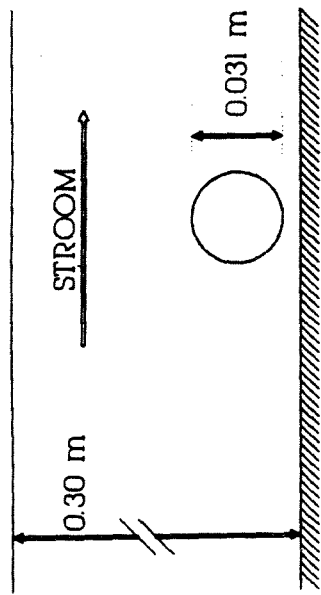


90% ZAND + 10% OESTERSLIB

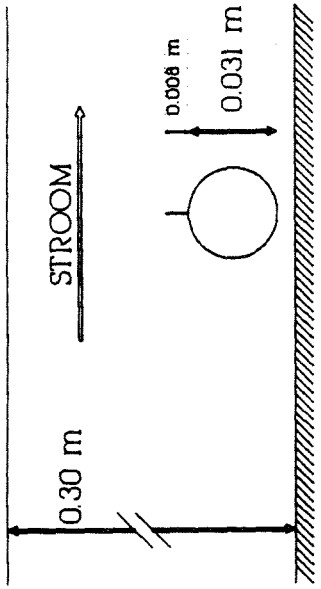
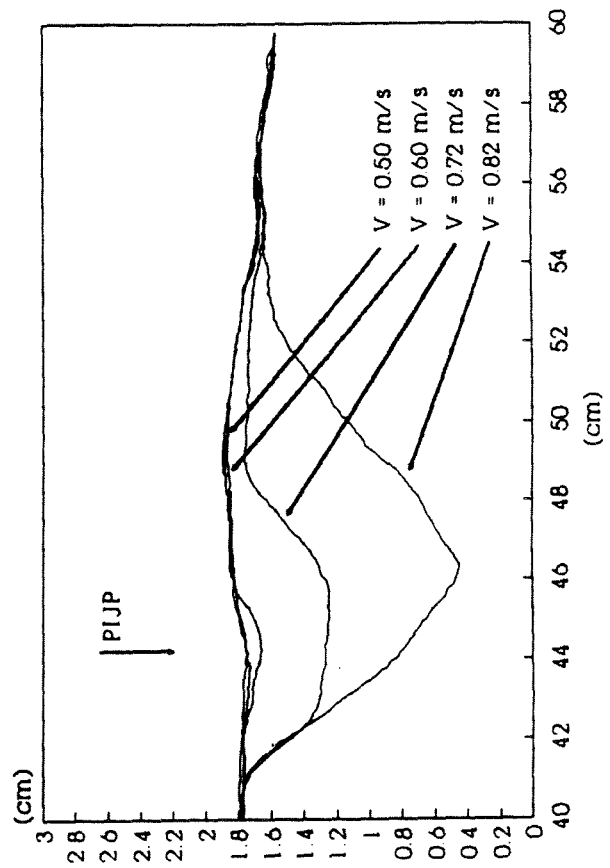


90% ZAND + 10% OESTERSLIB

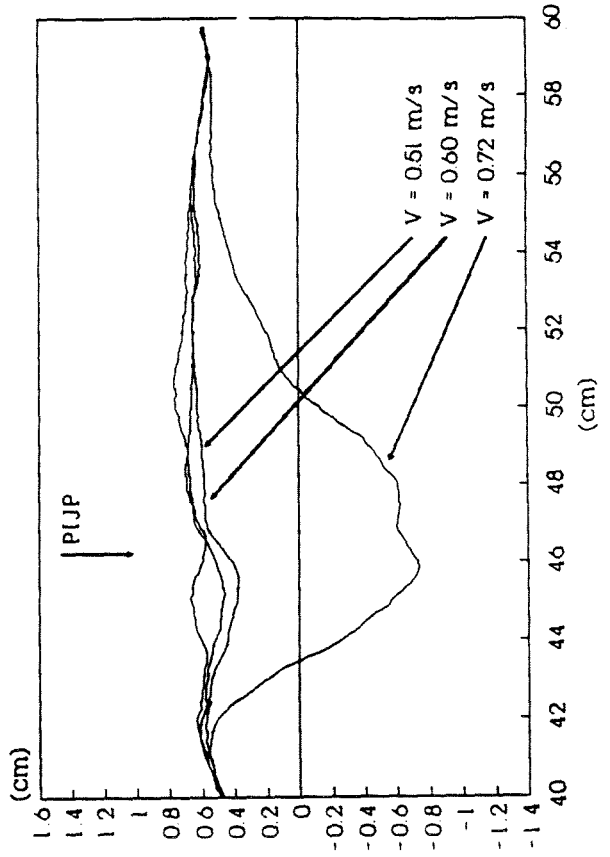


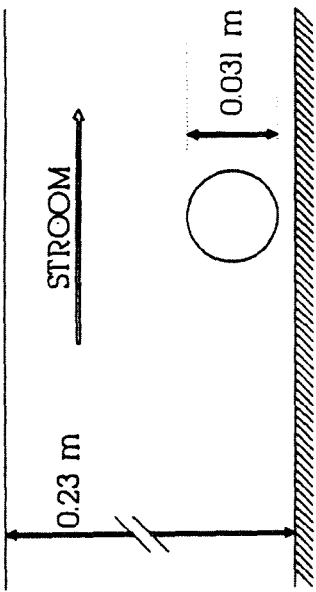


90% ZAND + 10% OESTERSLIB

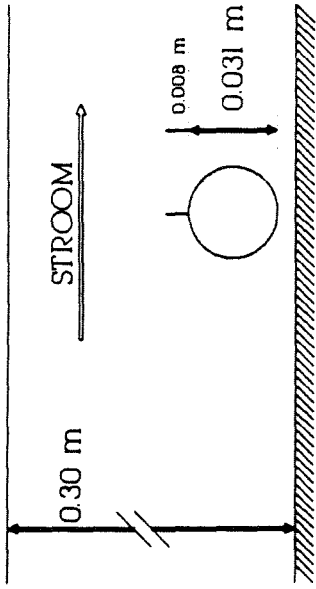
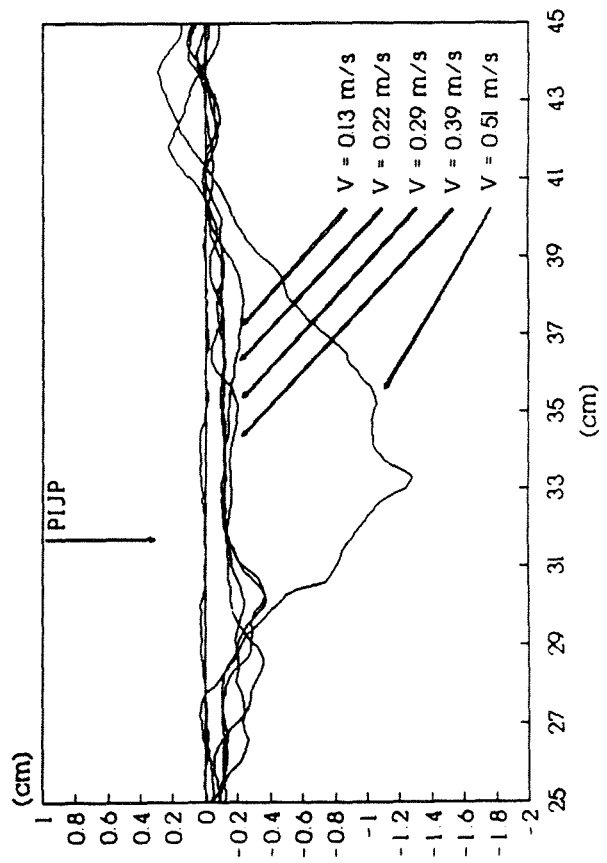


90% ZAND + 10% OESTERSLIB

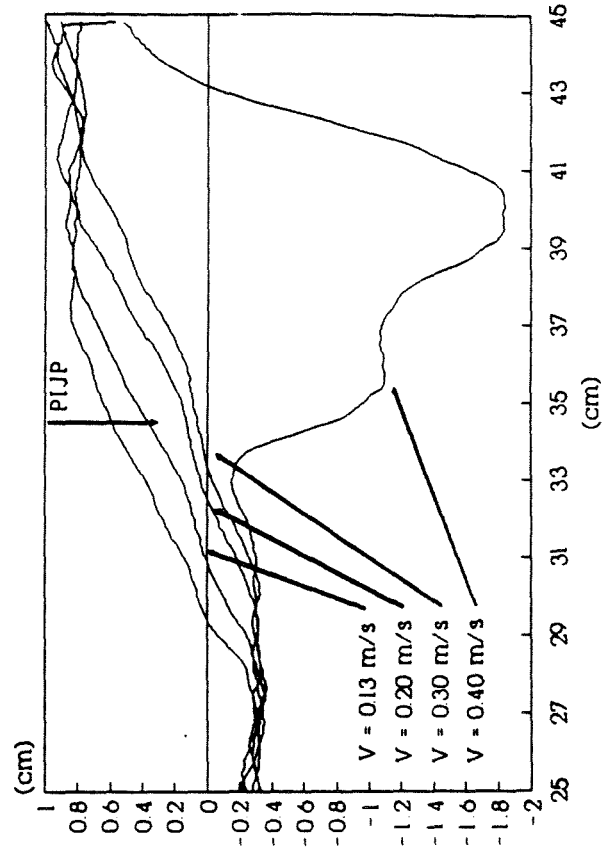


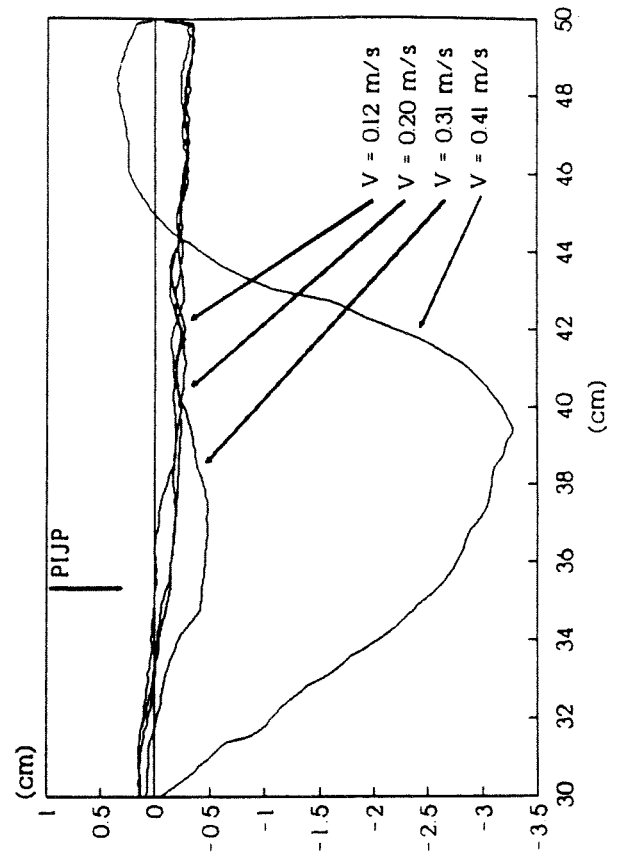
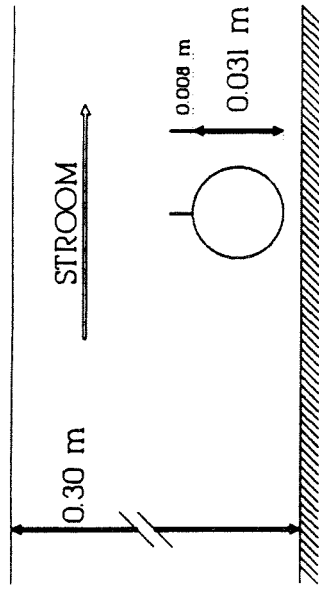
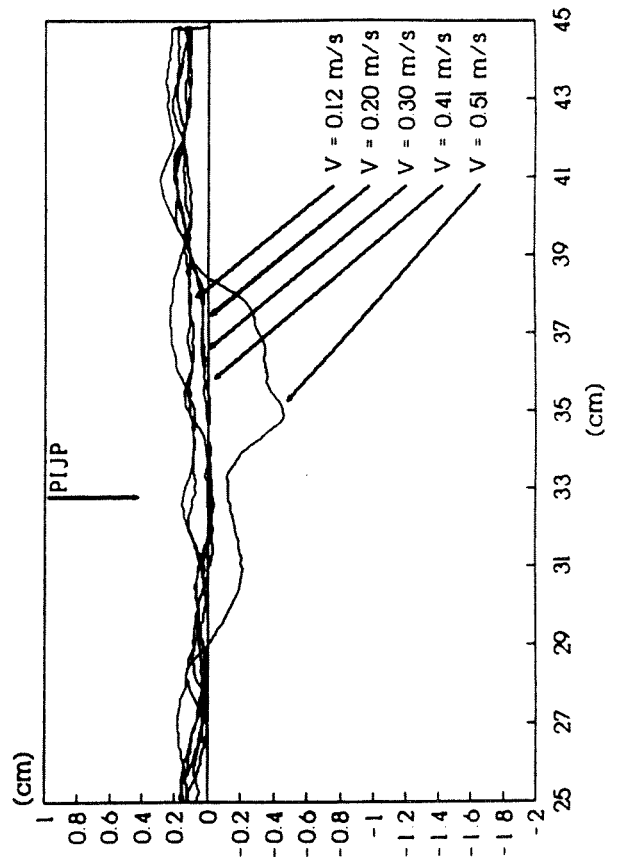
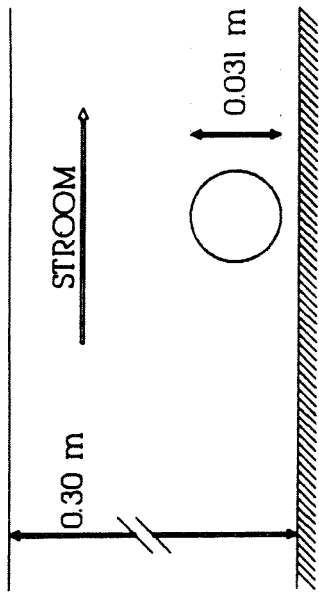


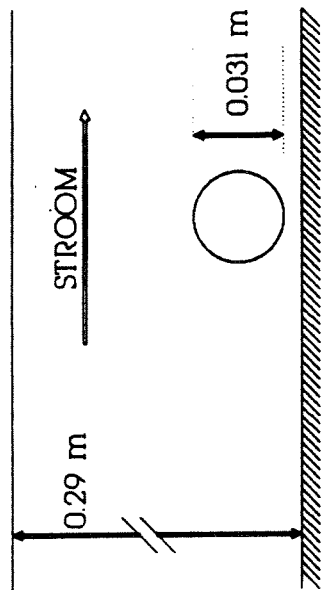
95% ZAND + 5% OESTERSLIB



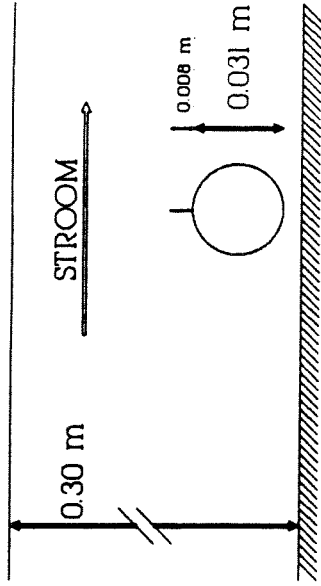
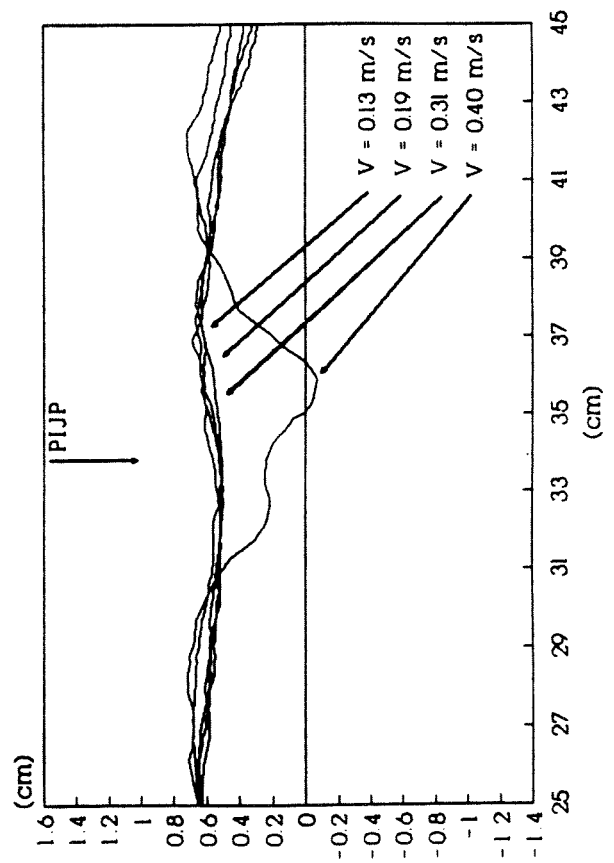
95% ZAND + 5% OESTERSLIB



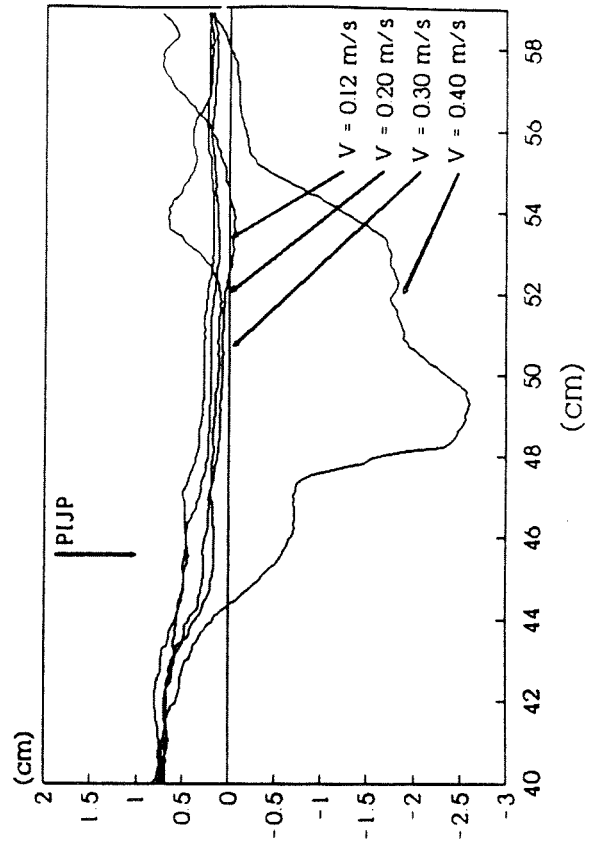




95% ZAND + 5% OESTERSLIB



95% ZAND + 5% OESTERSLIB



BIJLAGE E

Metingen stroombeeld rond pijp

1. Horizontale snelheden (V en σ_v) 3 mm boven het bed
 - gemiddelde stroomsnelheid 0.10, 0.25 en 0.50 m/s
 - opening onder de pijp 0.0, 0.4, 0.8 cm
 - pijpdiameter 3.1, 6.0, 3.1+0.8(vin) cm

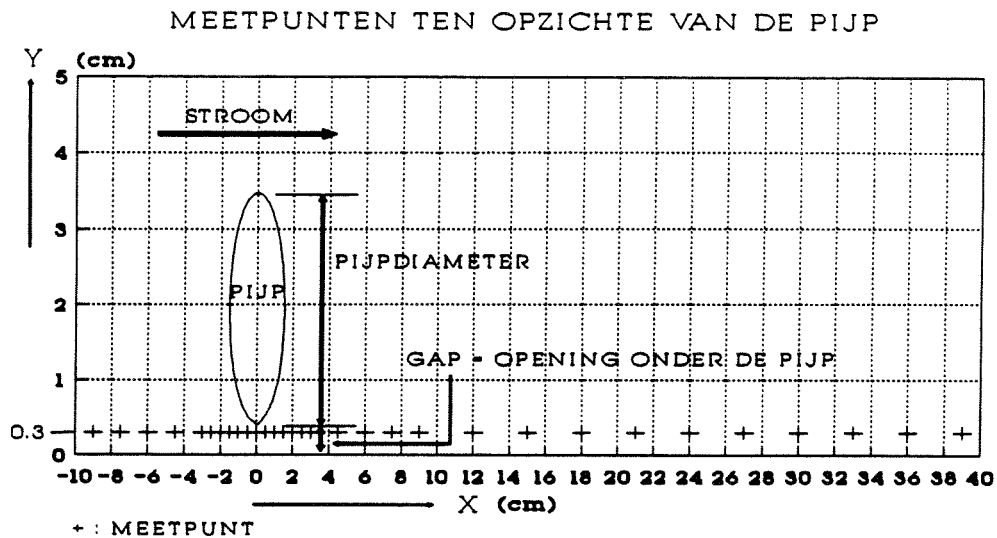
2. Snelheden (V en σ_v) in een vlak achter de pijp
 - gemiddelde stroomsnelheid 0.10, 0.25 en 0.50 m/s
 - opening onder de pijp 0.4, 0.8 cm
 - pijpdiameter 3.1, 3.1+0.8 (vin omhoog), 3.1+0.8 (vin 45° naar voren) cm

3. Horizontale snelheden (V en σ_v) 3 mm boven het bed voor verschillende standen van de vin en:
 - gemiddelde stroomsnelheid 0.10, 0.25 en 0.50 m/s
 - opening onder de pijp 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 cm
 - pijp zonder vin, pijp met vin recht omhoog, pijp met vin 45° naar voren, pijp met vin 45° naar achteren, pijp met vin 90° naar voren.

BIJLAGE E DEEL 1

Horizontale snelheden (V en σ_v) 3 mm boven het bed

Verklaring gebruikte parameters

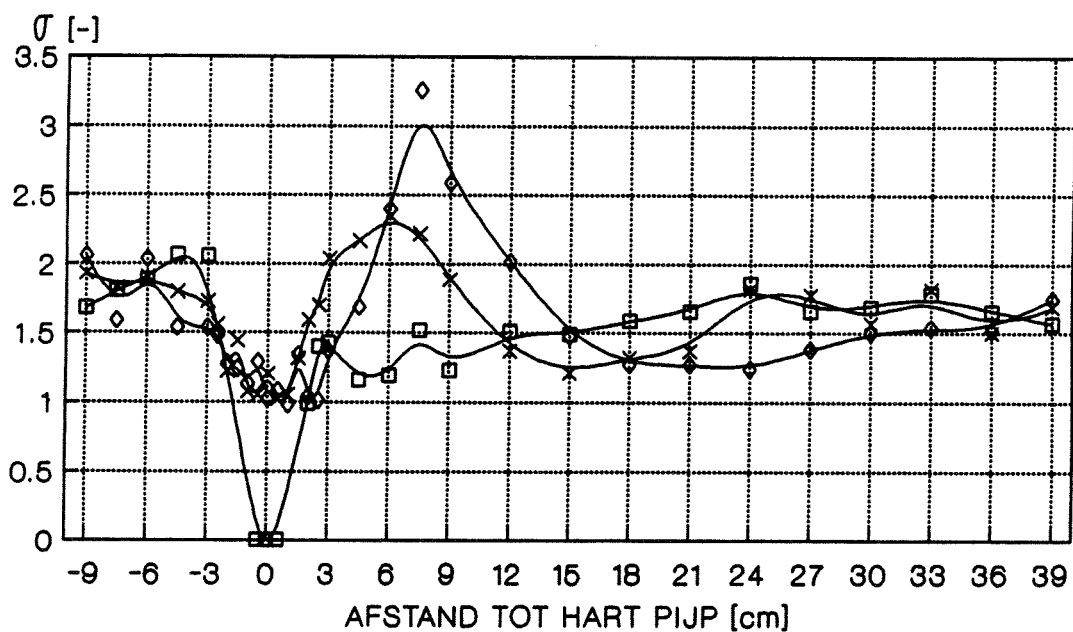
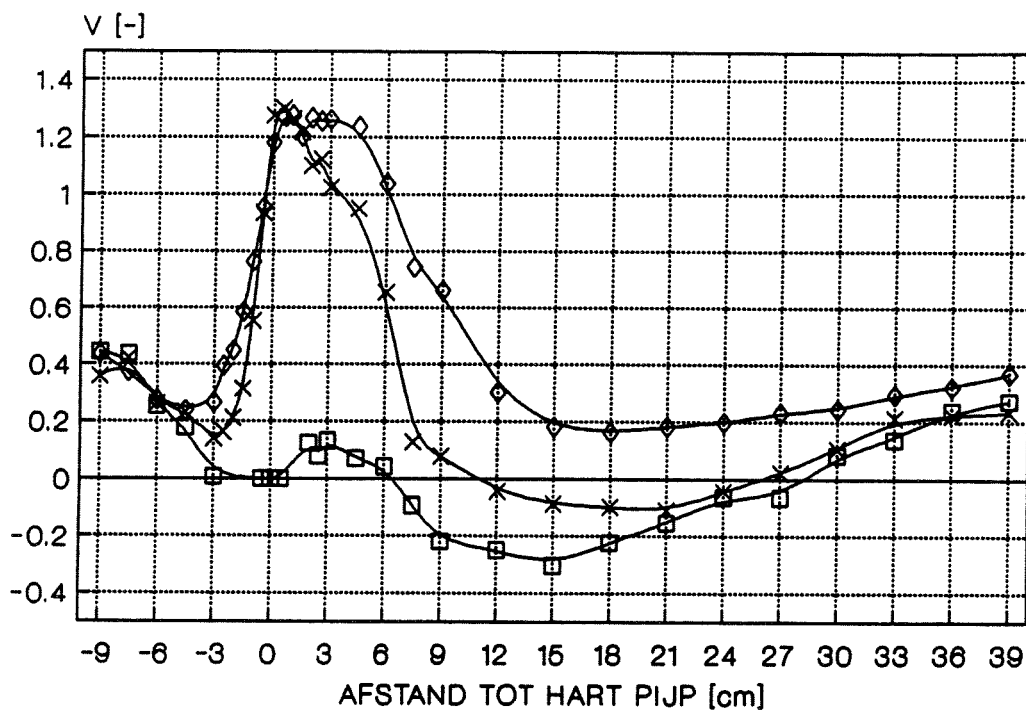


$$\text{snelheid [-]} = V_n = \frac{V_{hor}}{\bar{V}}$$

$$\sigma \text{ snelheid [-]} = \sigma_n = \frac{\sigma_{hor}}{\sigma}$$

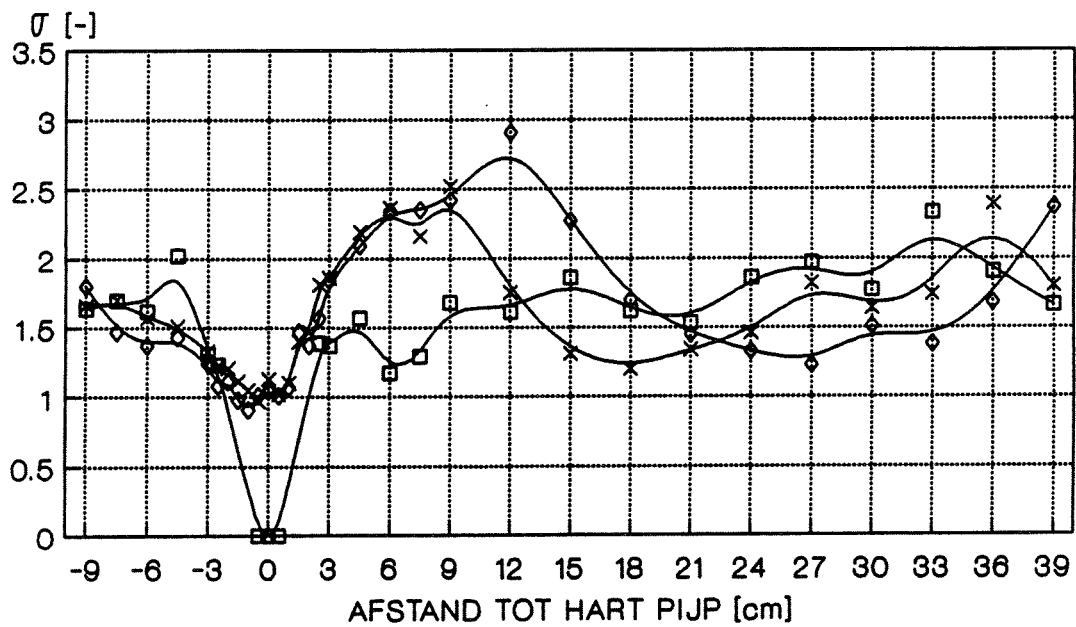
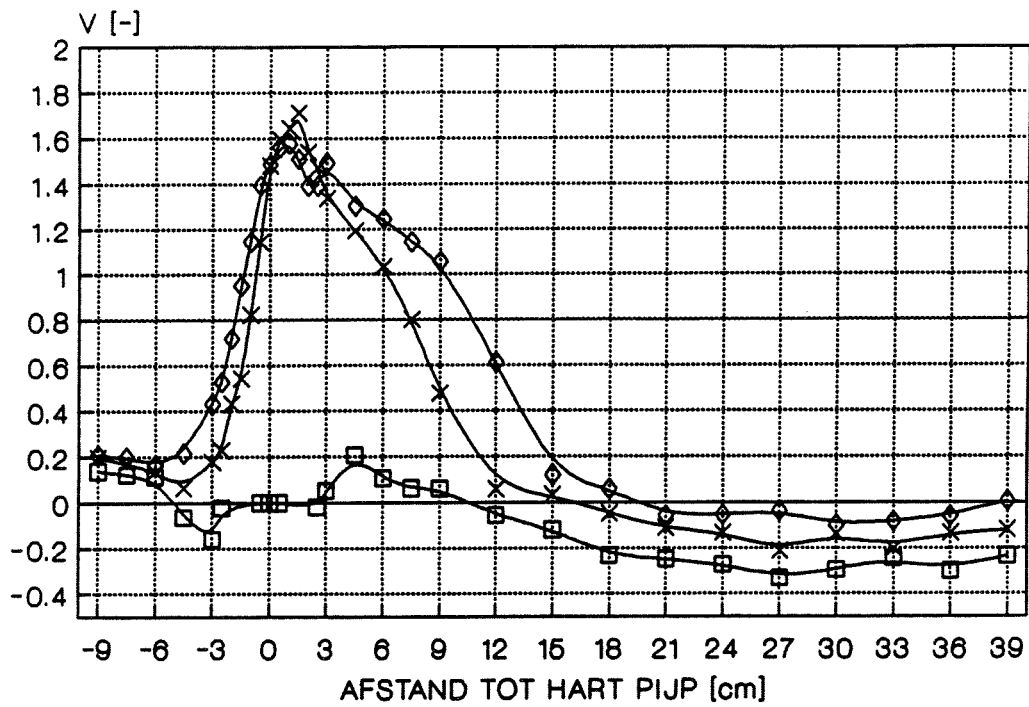
waarin	V_n	: dimensieloze stroomsnelheid
	σ_n	: dimensieloze standaardafwijking van de snelheid
	\bar{V}	: gemiddelde stroomsnelheid
	σ	: gemiddelde standaard afwijking van de snelheid
	V_{hor}	: horizontale stroomsnelheid
	σ_{hor}	: horizontale standaard afwijking van de snelheid

PIJPDIAMETER : 3.1 cm
 DEBIET : 12.0 l/s
 \bar{v} = 0.10 m/s
 σ = 0.01 m/s



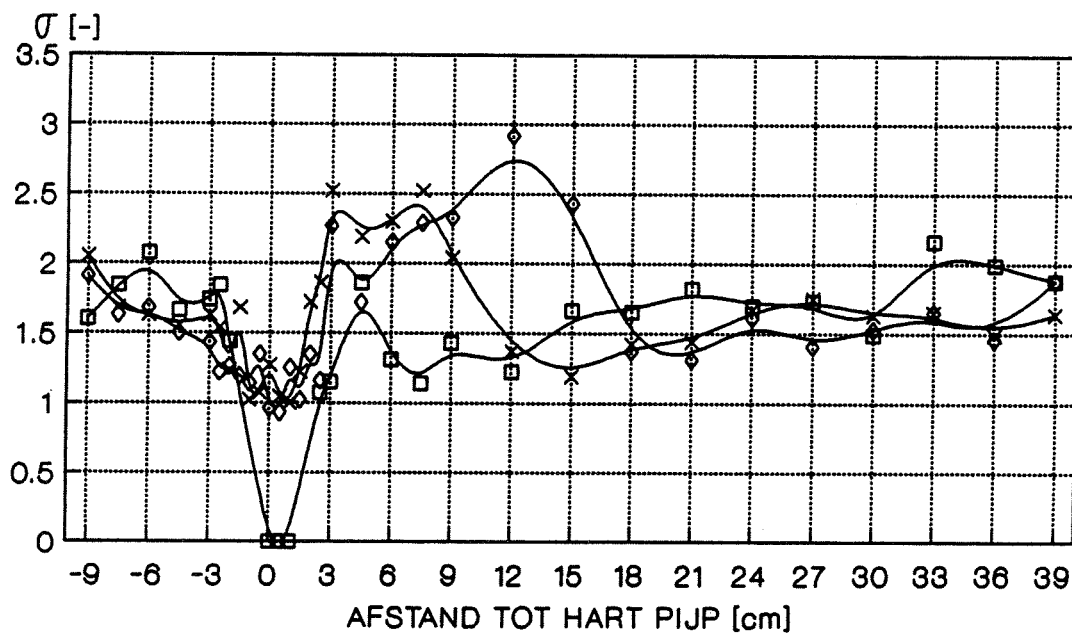
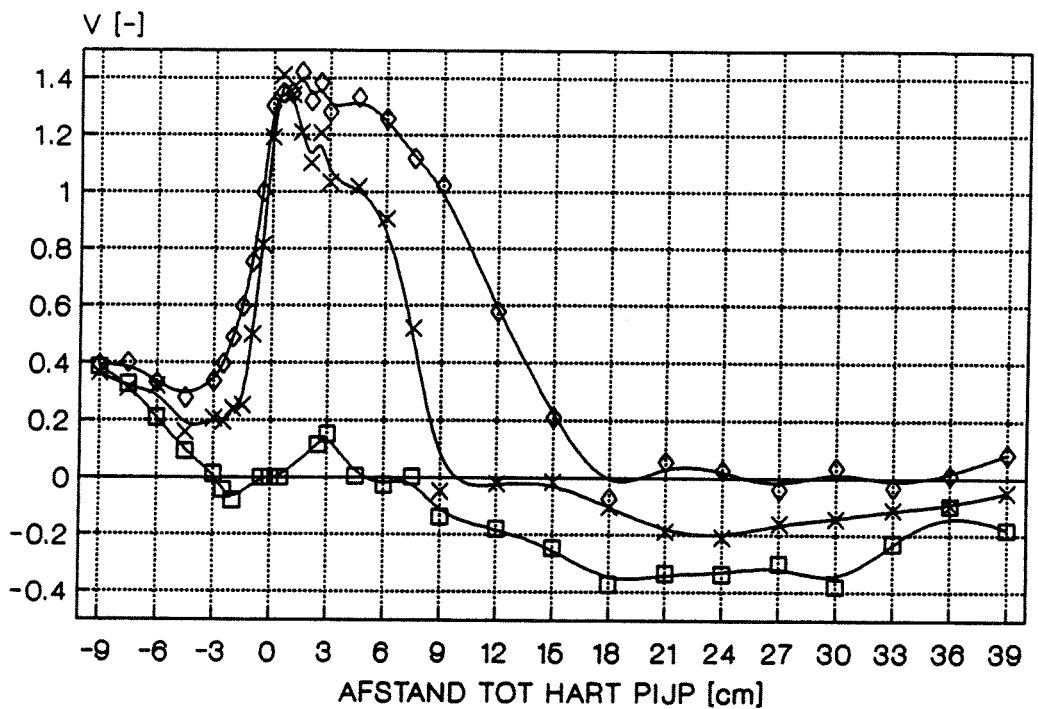
—□— SPL=0.0 cm —×— SPL=0.4 cm —◇— SPL=0.8 cm

PIJPDIAMETER : 6.0 cm
 DEBIET : 12.0 l/s
 \bar{v} = 0.10 m/s
 σ = 0.01 m/s



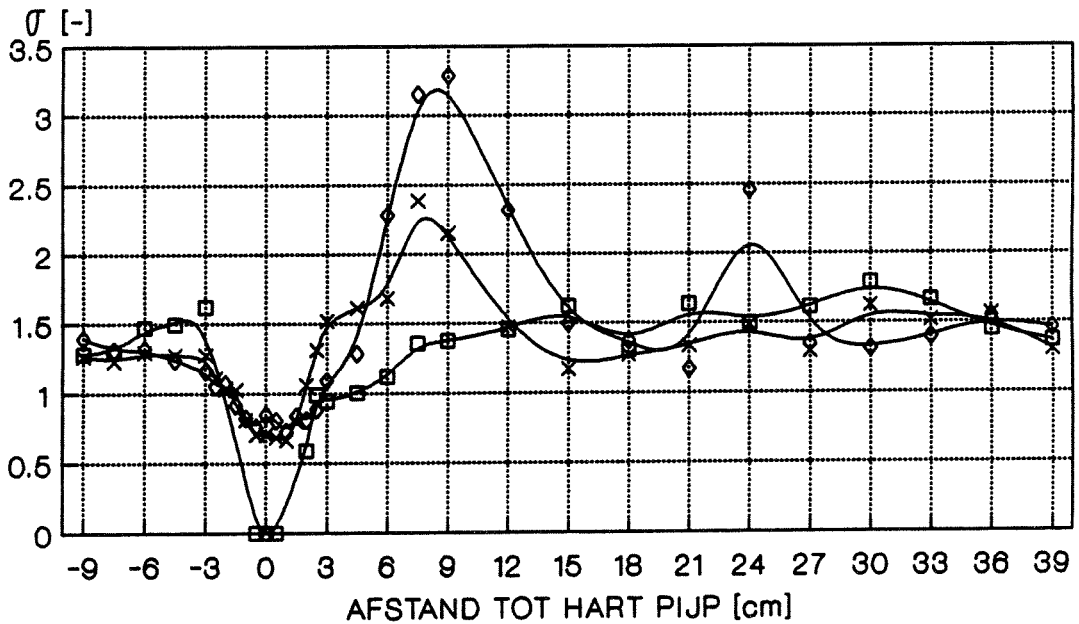
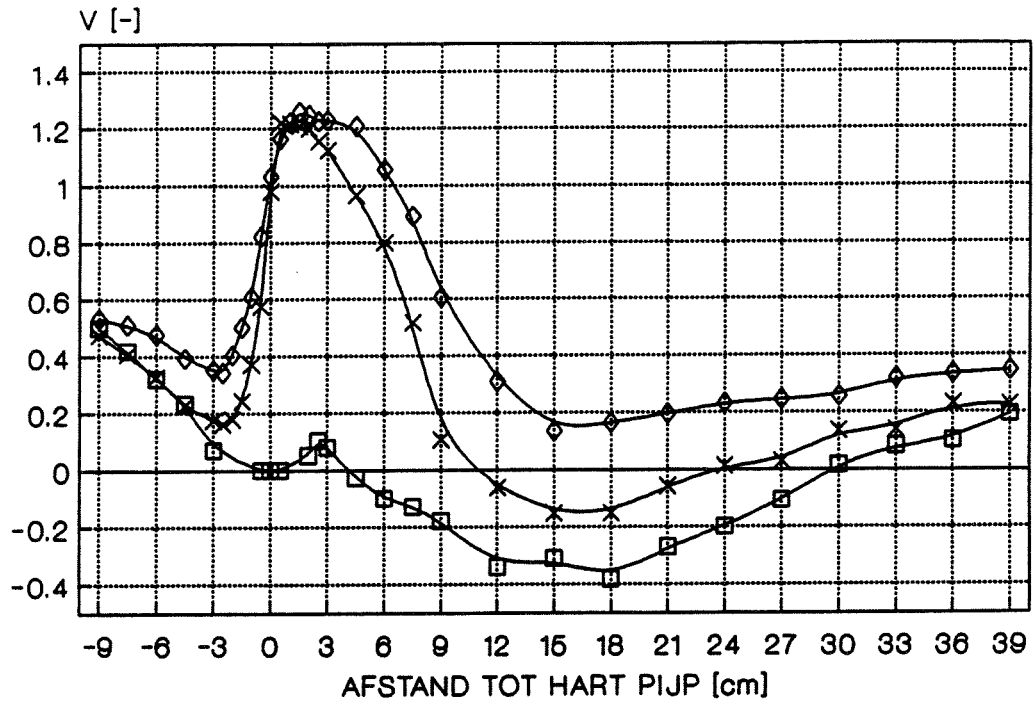
—■— SPL=0.0 cm —×— SPL=0.4 cm —◇— SPL=0.8 cm

PIJPDIAMETER : 3.1 cm + 0.8 cm VIN
 DEBIET : 12.0 l/s
 \bar{v} = 0.10 m/s
 σ = 0.01 m/s



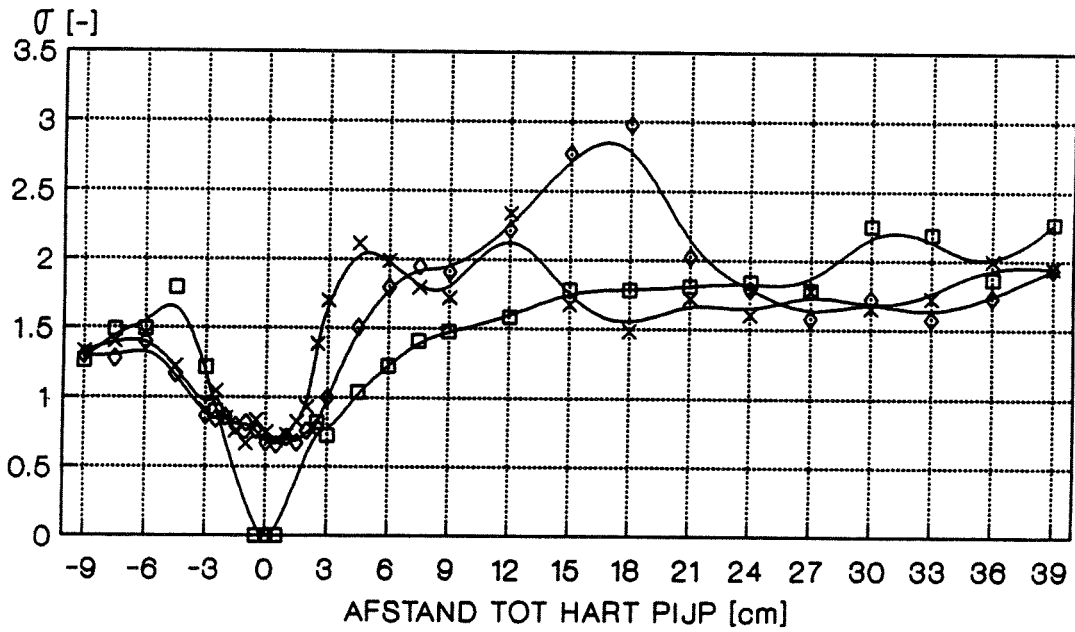
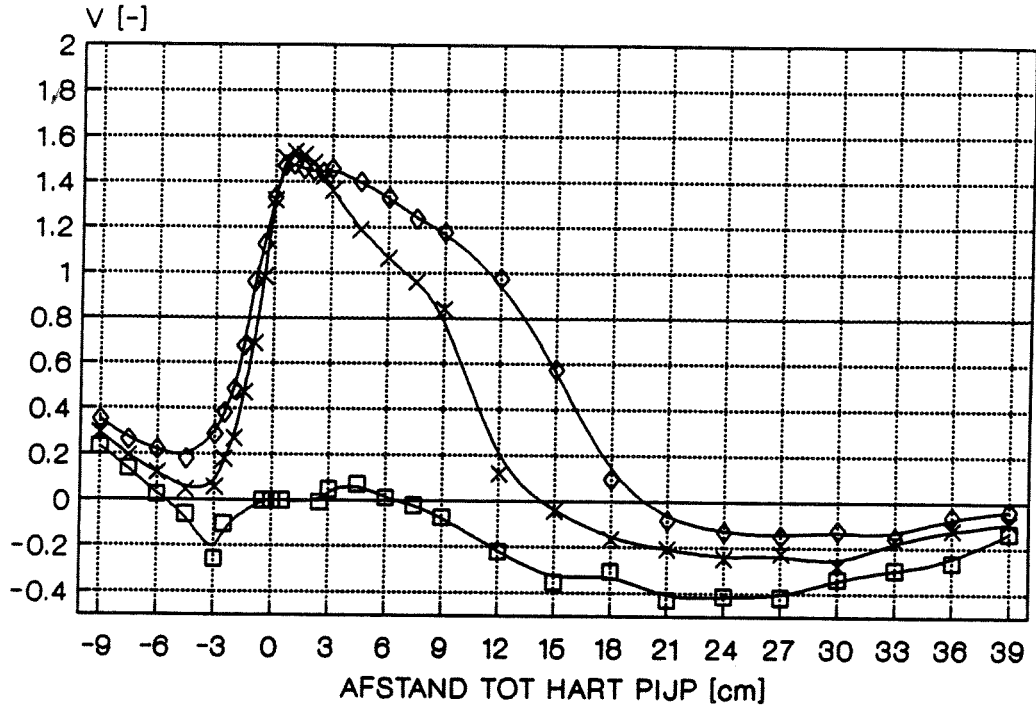
—■— SPL=0.0 cm —×— SPL=0.4 cm —◇— SPL=0.8 cm

PIJPDIAMETER : 3.1 cm
 DEBIET : 30.0 l/s
 \bar{v} = 0.25 m/s
 $\bar{\sigma}$ = 0.025 m/s



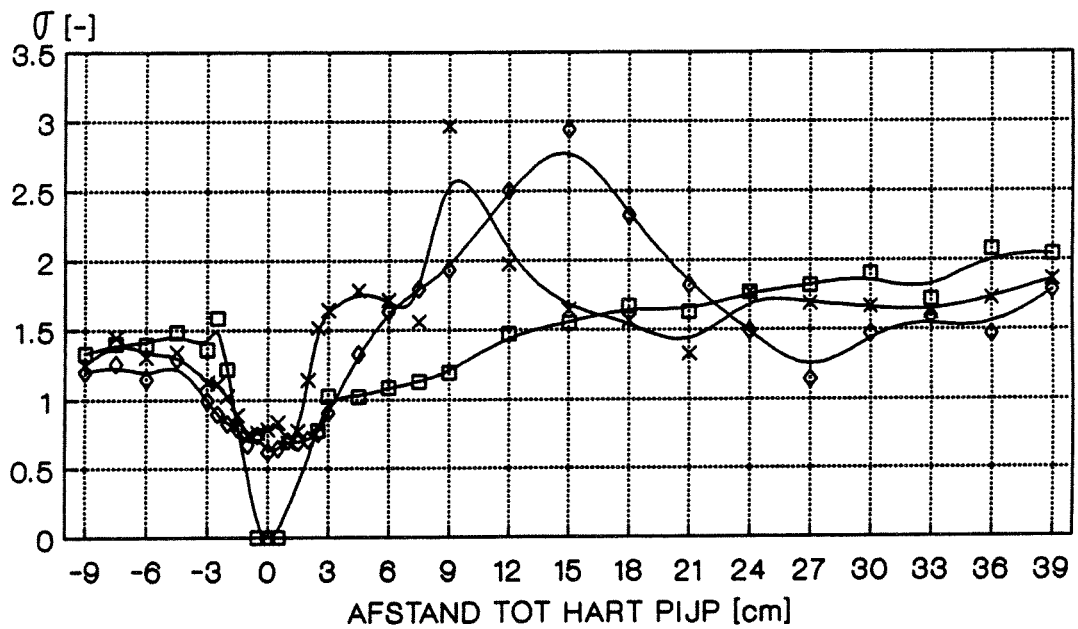
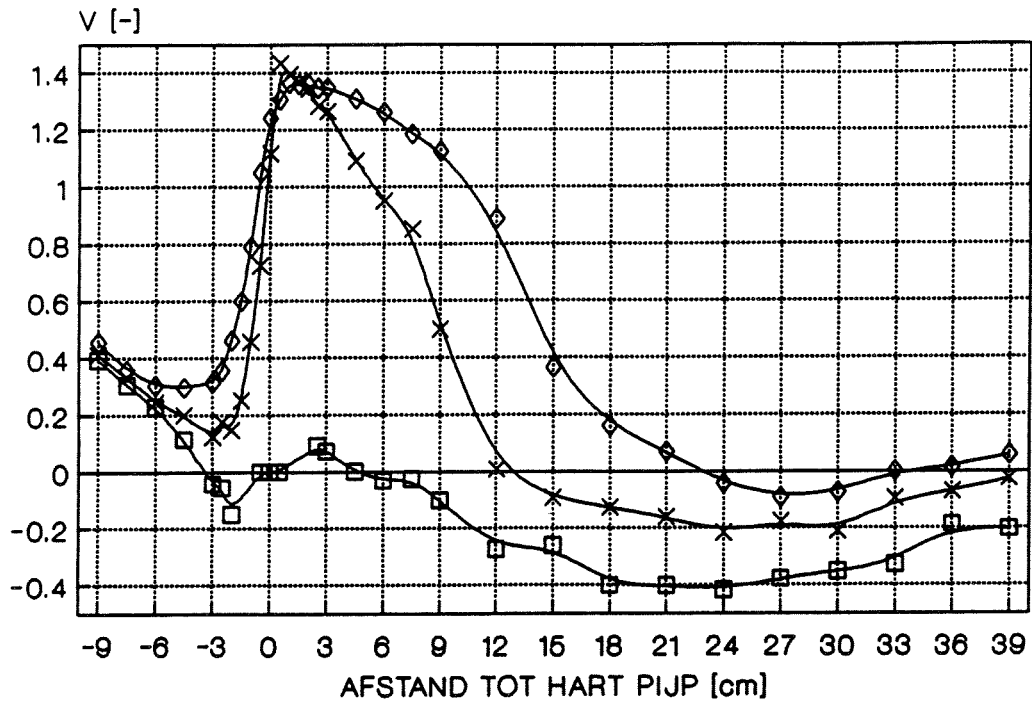
-□- SPL=0.0 cm -x- SPL=0.4 cm -◇- SPL=0.8 cm

PIJPDIAMETER : 6.0 cm
 DEBIET : 30.0 l/s
 \bar{v} = 0.25 m/s
 σ = 0.025 m/s



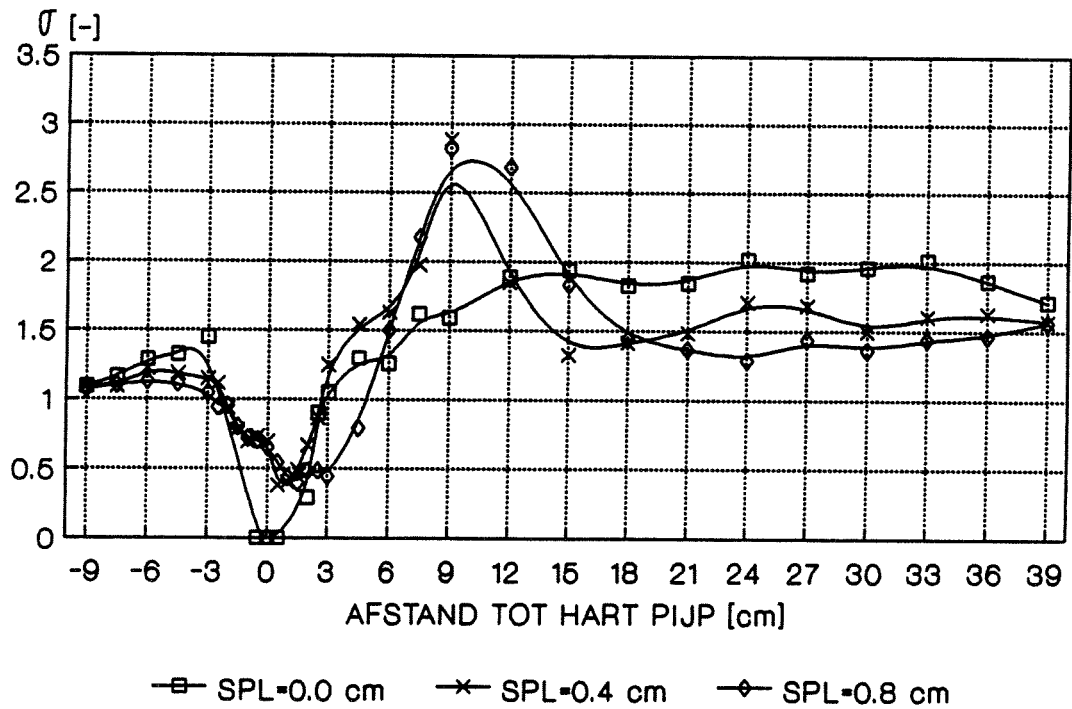
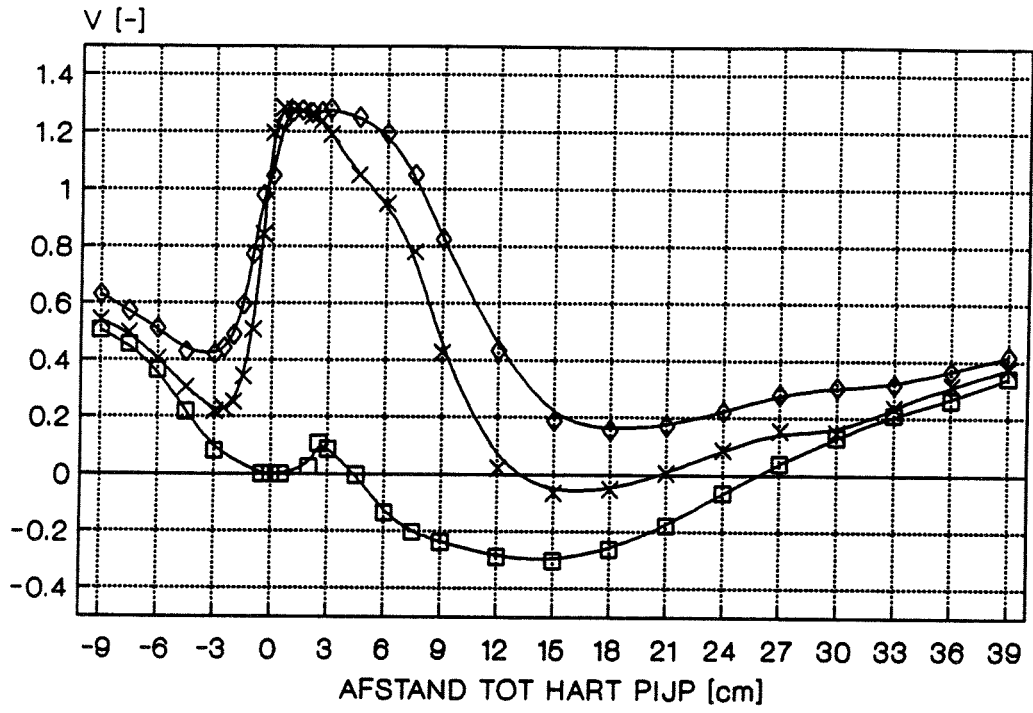
—□— SPL=0.0 cm —×— SPL=0.4 cm —◇— SPL=0.8 cm

PIJPDIAMETER : 3.1 cm + 0.8 cm VIN
 DEBIET : 30.0 l/s
 \bar{v} = 0.25 m/s
 σ = 0.025 m/s

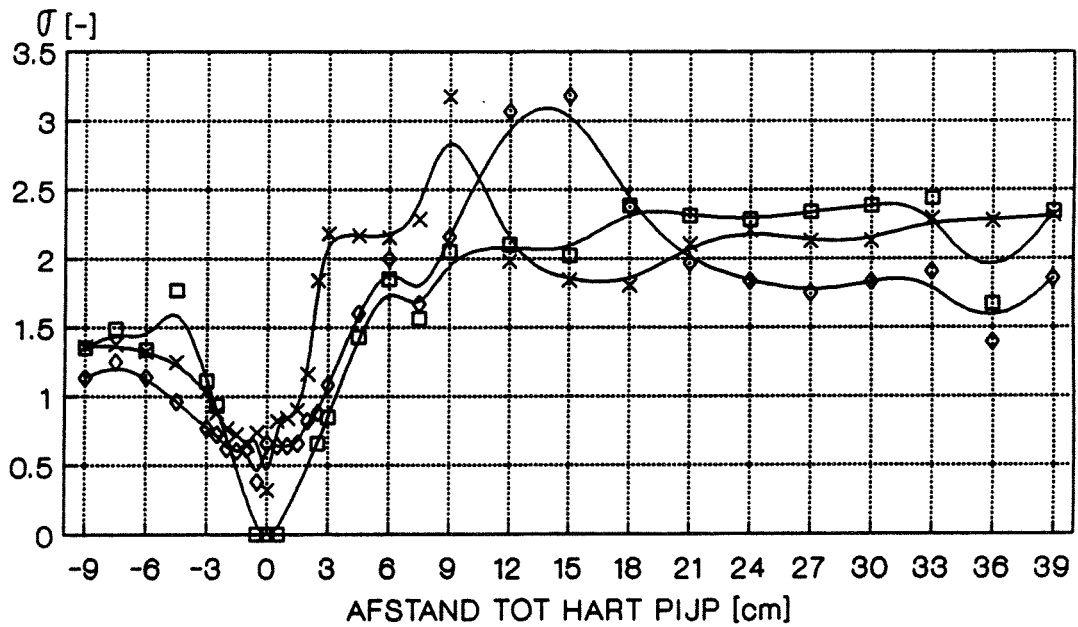
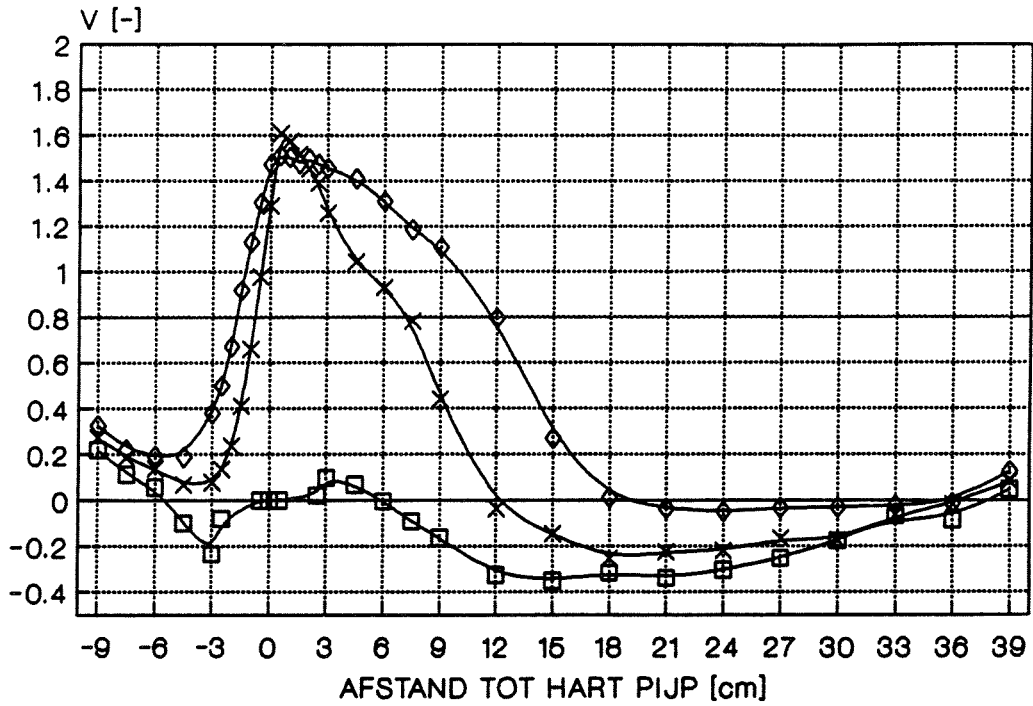


—□— SPL=0.0 cm —×— SPL=0.4 cm —◇— SPL=0.8 cm

PIJPDIAMETER : 3.1 cm
 DEBIET : 60.0 l/s
 \bar{v} = 0.50 m/s
 σ = 0.05 m/s

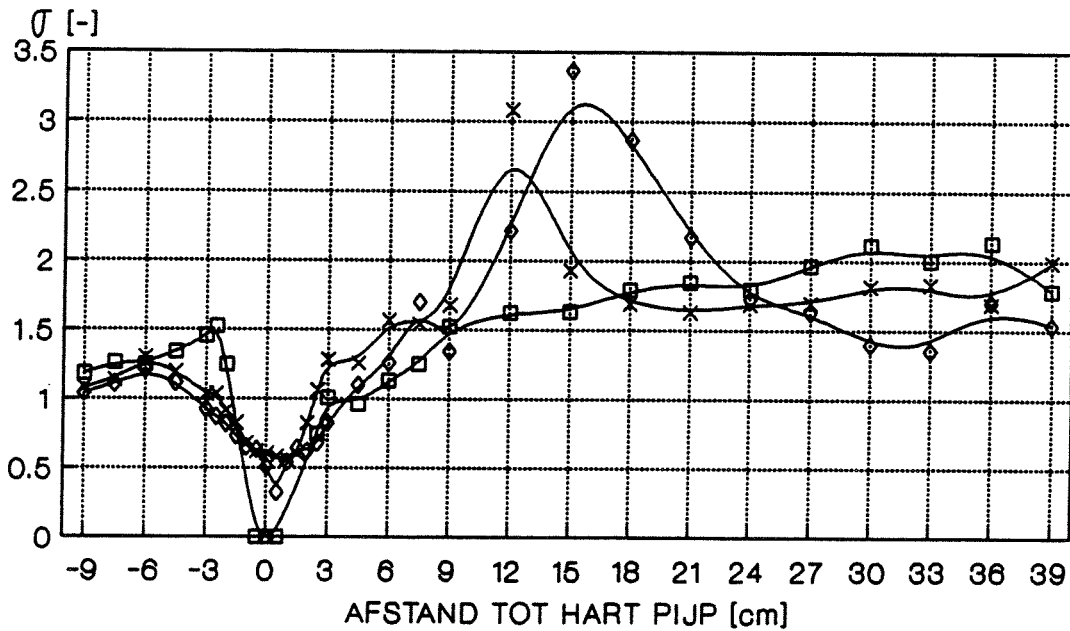
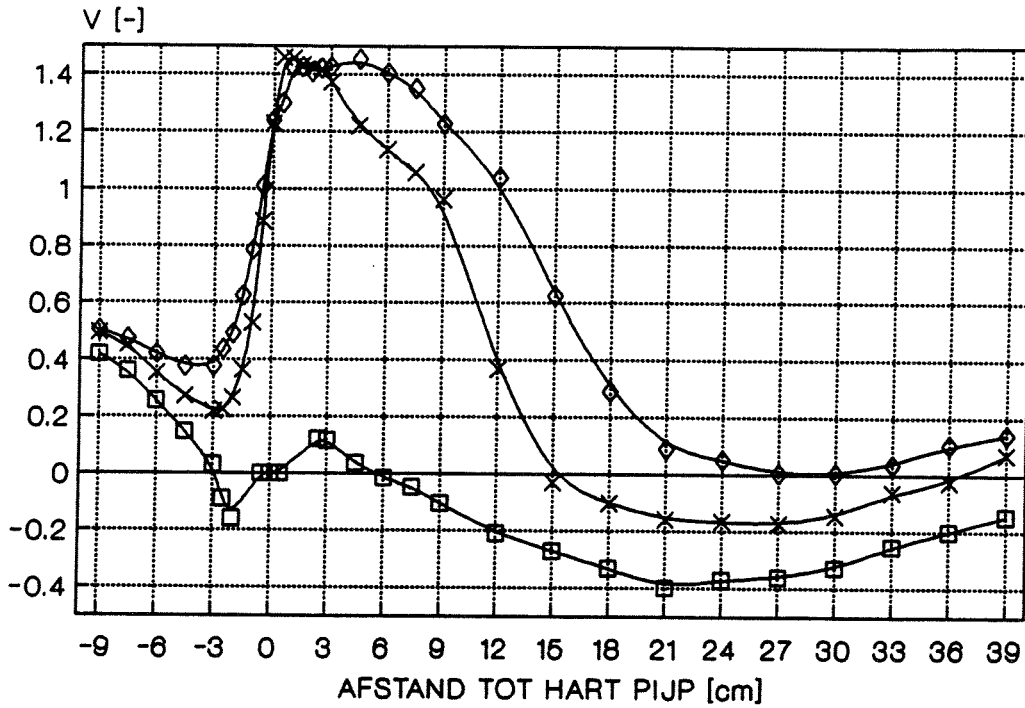


PIJPDIAMETER : 6.0 cm
 DEBIET : 60.0 l/s
 \bar{v} = 0.50 m/s
 $\bar{\sigma}$ = 0.05 m/s



—□— SPL=0.0 cm —×— SPL=0.4 cm —◇— SPL=0.8 cm

PIJPDIAMETER : 3.1 cm + 0.8 cm VIN
 DEBIET : 60.0 l/s
 \bar{v} = 0.50 m/s
 \bar{c} = 0.05 m/s



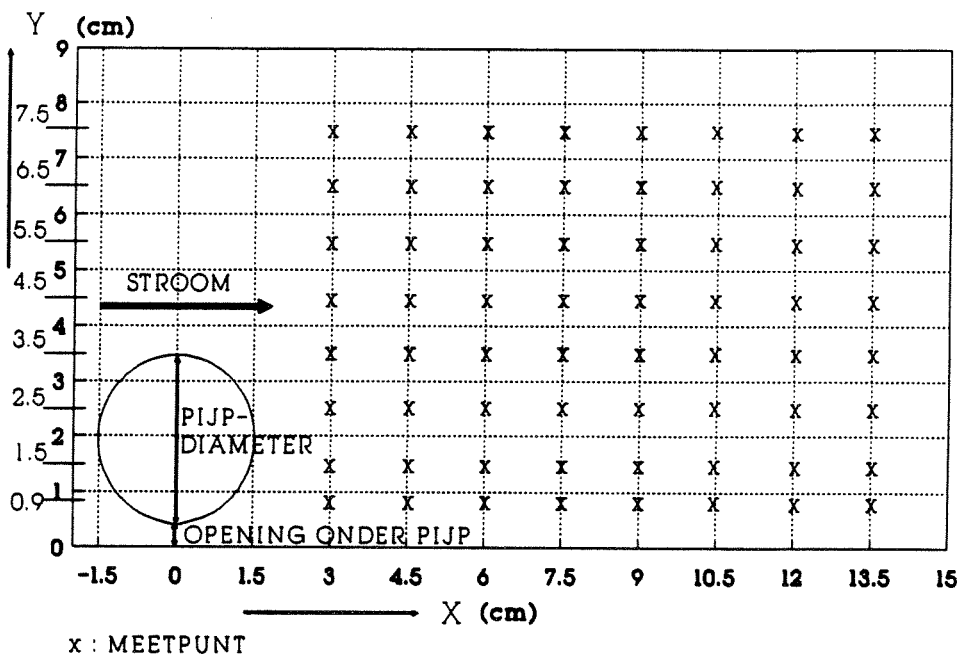
—□— SPL=0.0 cm —×— SPL=0.4 cm —◇— SPL=0.8 cm

BIJLAGE E DEEL 2

Snelheden (V en σ_v) in een vlak achter de pijp

Verklaring gebruikte parameters

MEETPUNTEN TEN OPZICHTE VAN DE PIJP



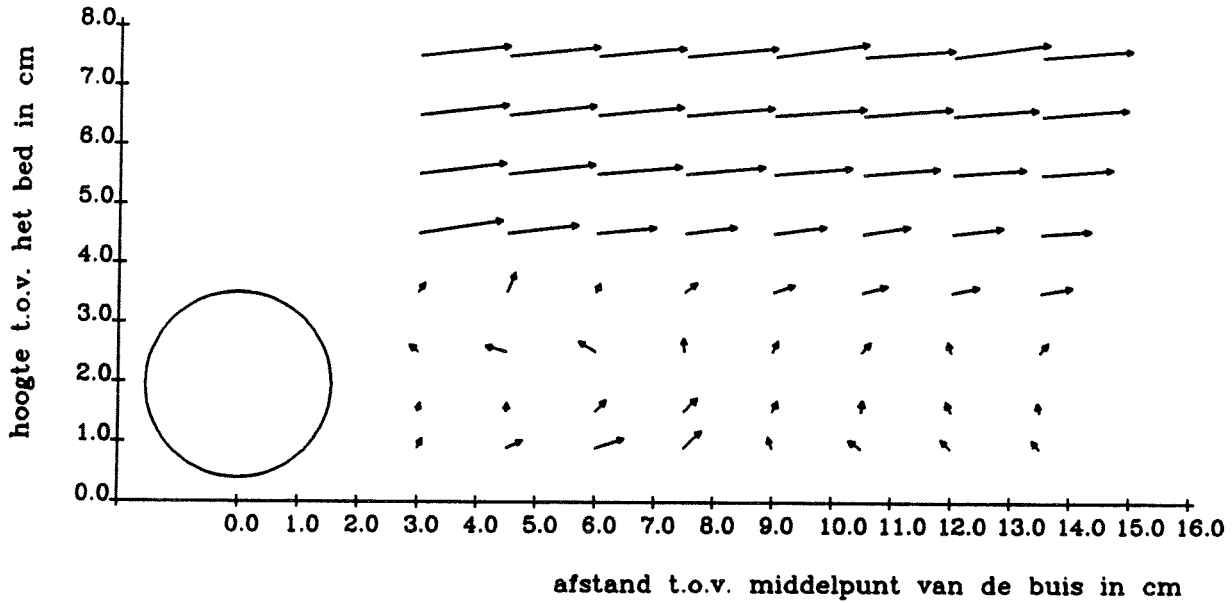
$$V_n = \sqrt{\left(\frac{V_{hor}}{\bar{V}}\right)^2 + \left(\frac{V_{ver}}{\bar{V}}\right)^2} * \frac{V_{hor}}{|V_{hor}|}$$

$$\sigma_n = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{hor}}{\bar{\sigma}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{ver}}{\bar{\sigma}}\right)^2}$$

- waarin
- V_n : dimensieloze stroomsnelheid
 - σ_n : dimensieloze standaardafwijking van de stroomsnelheid
 - \bar{V} : gemiddelde stroomsnelheid
 - $\bar{\sigma}$: gemiddelde standaardafwijking van de stroomsnelheid
 - V_{hor} : horizontale stroomsnelheid
 - V_{ver} : verticale stroomsnelheid
 - σ_{hor} : horizontale standaardafwijking van de stroomsnelheid
 - σ_{ver} : verticale standaardafwijking van de stroomsnelheid

PIJPDIAMETER: 3.1 cm
 OPENING ONDER DE PIJP: 0.4 cm
 DEBIET: 12.0 l/s
 $\bar{V} = 0.10$ m/s
 $\sigma = 0.01$ m/s

SNELHEIDSVECTOREN (1 cm ~ 0.10 m/s)

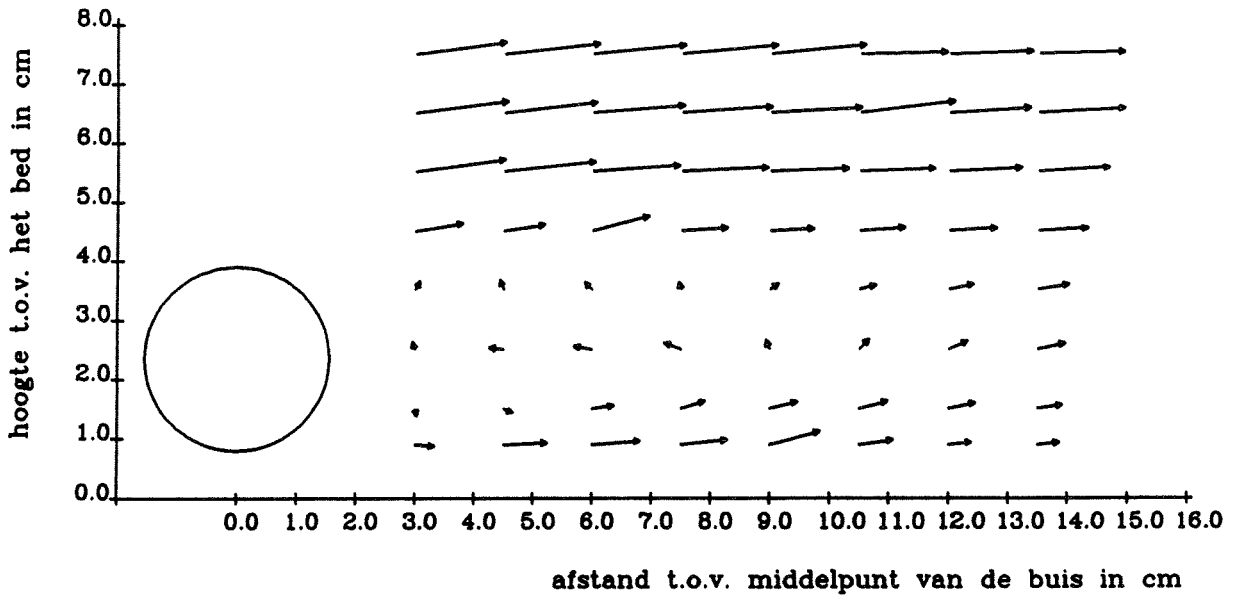


	V_n (-)							
7.5	1.41	1.43	1.39	1.44	1.48	1.42	1.52	1.40
6.5	1.40	1.38	1.36	1.39	1.44	1.38	1.33	1.34
5.5	1.37	1.37	1.33	1.24	1.21	1.18	1.13	1.09
4.5	1.33	1.09	0.91	0.77	0.79	0.70	0.76	0.73
3.5	0.10	0.26	0.07	0.17	0.29	0.33	0.38	0.44
2.5	-0.08	-0.27	-0.24	-0.14	0.11	0.13	-0.09	0.11
1.5	0.06	0.06	0.17	0.23	0.11	0.11	-0.10	-0.08
0.9	0.08	0.21	0.42	0.32	-0.10	-0.15	-0.12	-0.09
Y X-	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5

	σ_n (-)							
7.5	1.26	1.28	1.27	1.33	1.78	1.30	1.98	1.65
6.5	1.51	1.39	1.53	1.42	1.57	1.64	1.80	2.00
5.5	1.35	1.50	1.64	2.11	1.91	2.37	2.33	2.68
4.5	2.05	2.81	3.27	3.60	3.11	3.03	2.73	3.04
3.5	1.92	2.77	2.82	2.57	2.26	2.46	2.70	2.56
2.5	1.65	1.73	1.71	1.87	1.91	2.15	1.92	1.63
1.5	1.48	1.53	2.04	2.39	2.00	2.05	1.63	1.66
0.9	1.10	1.81	1.84	2.83	1.88	1.30	1.38	1.75
Y X-	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5

PIJPDIAMETER: 3.1 cm
 OPENING ONDER DE PIJP: 0.8 cm
 DEBIET: 12.0 l/s
 $\bar{v} = 0.10$ m/s
 $\bar{\sigma} = 0.01$ m/s

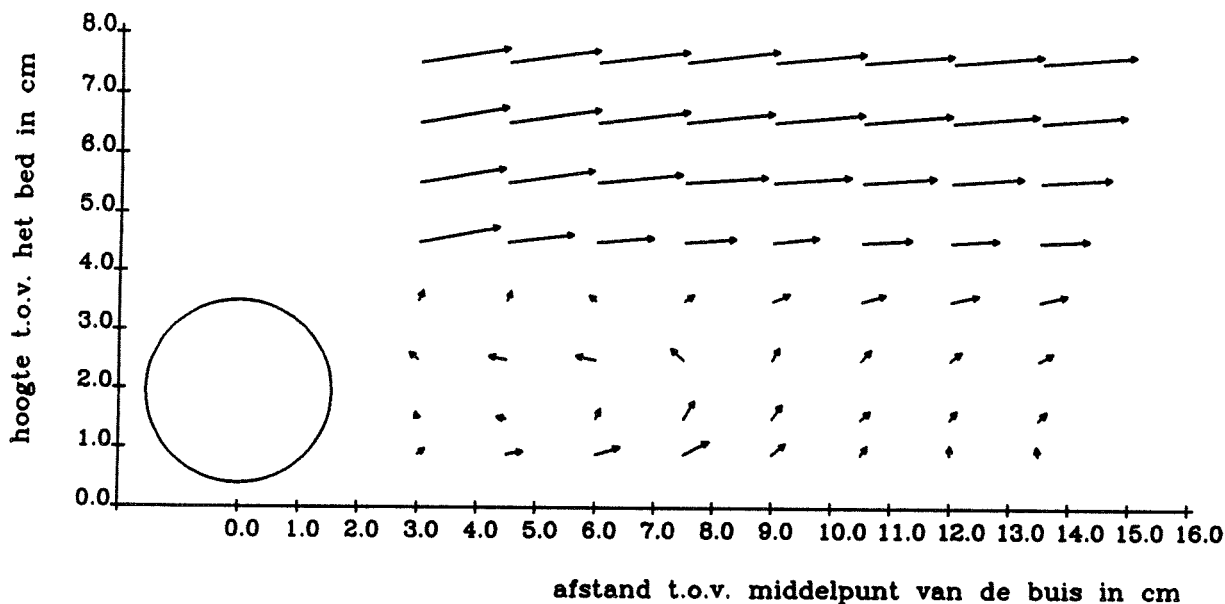
SNELHEIDSVECTOREN (1 cm ~ 0.10 m/s)



		v_n (-)							
7.5		1.44	1.52	1.47	1.51	1.49	1.36	1.29	1.33
6.5		1.47	1.48	1.45	1.43	1.42	1.50	1.26	1.34
5.5		1.43	1.46	1.38	1.36	1.21	1.16	1.12	1.08
4.5		0.71	0.60	0.89	0.68	0.63	0.66	0.70	0.73
3.5		0.08	-0.09	-0.08	-0.04	0.07	0.19	0.33	0.42
2.5		-0.04	-0.15	-0.22	-0.21	-0.07	0.14	0.25	0.37
1.5		0.03	0.08	0.29	0.33	0.39	0.40	0.37	0.32
0.9		0.24	0.65	0.73	0.69	0.78	0.49	0.30	0.28
Y X-		3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5
		σ_n (-)							
7.5		1.25	1.13	1.38	1.40	1.64	1.52	1.48	1.31
6.5		1.23	1.34	1.39	1.42	1.44	2.38	1.77	2.01
5.5		1.43	1.62	2.04	2.06	2.47	2.63	2.53	2.55
4.5		3.56	3.11	3.51	3.49	3.68	3.45	3.20	3.19
3.5		1.30	2.00	2.41	2.86	2.97	2.55	2.70	2.39
2.5		1.18	1.82	2.16	2.32	2.46	2.50	2.05	2.00
1.5		1.35	2.02	2.85	2.93	3.14	2.58	2.42	2.18
0.9		2.46	2.72	2.62	3.10	3.05	2.47	2.21	2.16
Y X-		3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5

PIJPDIAMETER: 3.1 cm
 OPENING ONDER DE PIJP: 0.4 cm
 DEBIET: 30.0 l/s
 $\bar{v} = 0.25$ m/s
 $\bar{\sigma} = 0.025$ m/s

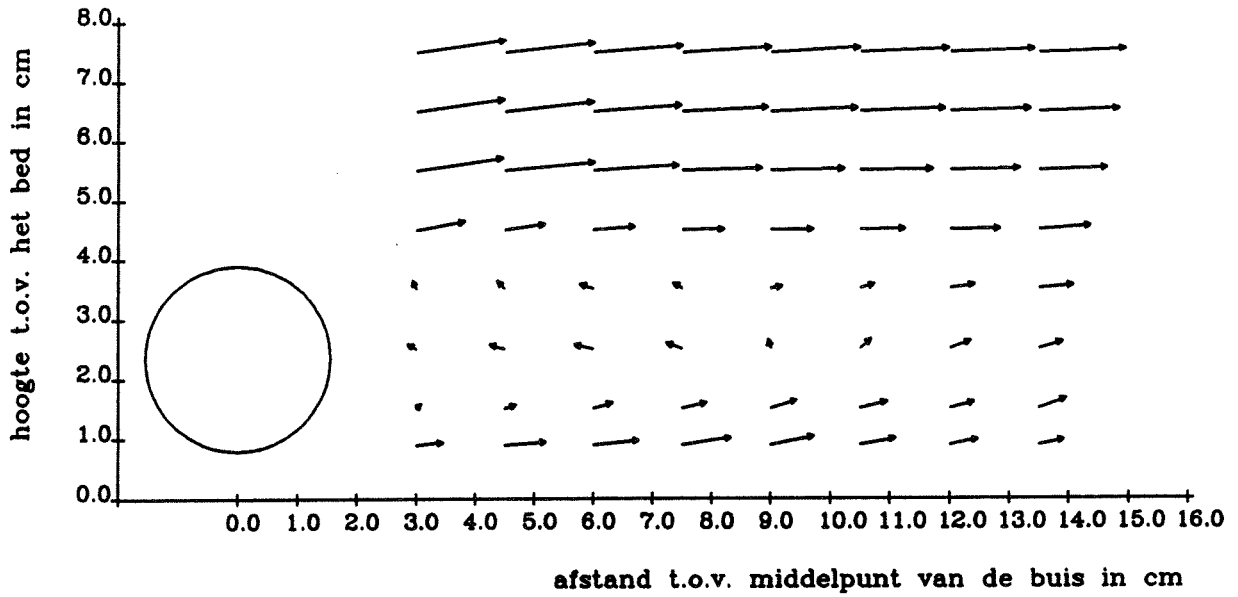
SNELHEIDSVECTOREN (1 cm ~ 0.25 m/s)



		v_n (-)							
7.5		1.42	1.44	1.45	1.47	1.43	1.41	1.41	1.46
6.5		1.41	1.47	1.46	1.40	1.42	1.40	1.34	1.32
5.5		1.36	1.37	1.36	1.30	1.21	1.14	1.11	1.08
4.5		1.29	1.02	0.88	0.77	0.68	0.75	0.71	0.72
3.5		0.10	0.09	-0.06	0.10	0.22	0.33	0.39	0.38
2.5		-0.09	-0.21	-0.24	-0.20	0.16	0.16	0.15	0.17
1.5		-0.02	-0.07	0.10	0.27	0.21	0.13	0.11	0.10
0.9		0.06	0.19	0.35	0.40	0.21	0.10	0.08	-0.07
Y X-		3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5
		σ_n (-)							
7.5		1.10	0.91	1.05	1.23	1.01	1.07	1.22	1.24
6.5		1.32	1.08	1.10	1.26	1.33	1.54	1.57	1.75
5.5		1.26	1.38	1.55	1.93	2.43	2.62	2.67	2.76
4.5		2.23	2.84	3.27	3.53	3.58	3.26	3.30	3.03
3.5		1.76	2.82	2.75	2.79	2.73	2.67	2.90	2.85
2.5		1.46	1.78	1.79	1.71	2.00	1.93	1.95	2.23
1.5		1.16	1.82	2.25	2.49	2.37	1.96	1.98	2.09
0.9		1.00	1.61	1.82	2.24	2.47	1.82	1.61	1.60
Y X-		3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5

PIJPDIAMETER: 3.1 cm
 OPENING ONDER DE PIJP: 0.8 cm
 DEBIET: 30.0 l/s
 $\bar{v} = 0.25 \text{ m/s}$
 $\sigma = 0.025 \text{ m/s}$

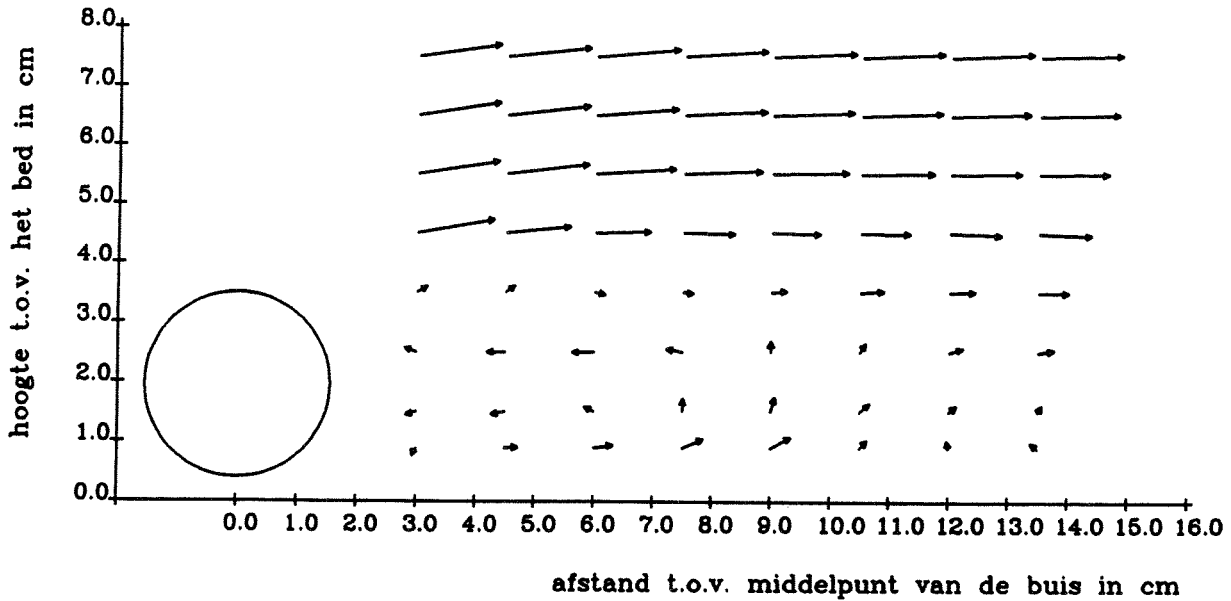
SNELHEIDSVECTOREN (1 cm ~ 0.25 m/s)



		v_n (-)							
7.5		1.42	1.42	1.40	1.40	1.39	1.37	1.31	1.33
6.5		1.40	1.41	1.39	1.35	1.35	1.31	1.24	1.24
5.5		1.38	1.43	1.34	1.25	1.14	1.11	1.07	1.04
4.5		0.73	0.58	0.61	0.61	0.61	0.65	0.74	0.76
3.5		-0.07	-0.10	-0.15	-0.08	0.10	0.15	0.32	0.47
2.5		-0.07	-0.17	-0.23	-0.18	-0.06	0.14	0.28	0.31
1.5		0.02	0.10	0.25	0.34	0.37	0.38	0.33	0.40
0.9		0.37	0.61	0.69	0.75	0.65	0.51	0.39	0.34
Y X-		3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5
		σ_n (-)							
7.5		0.94	1.02	0.96	1.29	1.26	1.16	1.40	1.30
6.5		1.11	1.19	1.23	1.29	1.59	1.77	1.98	2.17
5.5		1.12	1.24	2.16	2.42	2.84	2.76	3.16	3.00
4.5		3.49	3.69	3.63	3.78	3.86	3.71	3.53	3.53
3.5		1.21	2.13	2.51	2.73	3.09	3.11	3.11	2.92
2.5		1.47	1.68	2.12	2.26	2.58	2.79	2.73	2.63
1.5		1.28	2.20	2.93	2.92	2.98	2.69	2.42	2.14
0.9		2.03	2.54	2.73	2.66	2.87	2.62	2.23	2.23
Y X-		3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5

PIJPDIAMETER: 3.1 cm
 OPENING ONDER DE PIJP: 0.4 cm
 DEBIET: 60.0 l/s
 $\bar{v} = 0.50$ m/s
 $\sigma = 0.05$ m/s

SNELHEIDSVECTOREN (1 cm ~ 0.50 m/s)



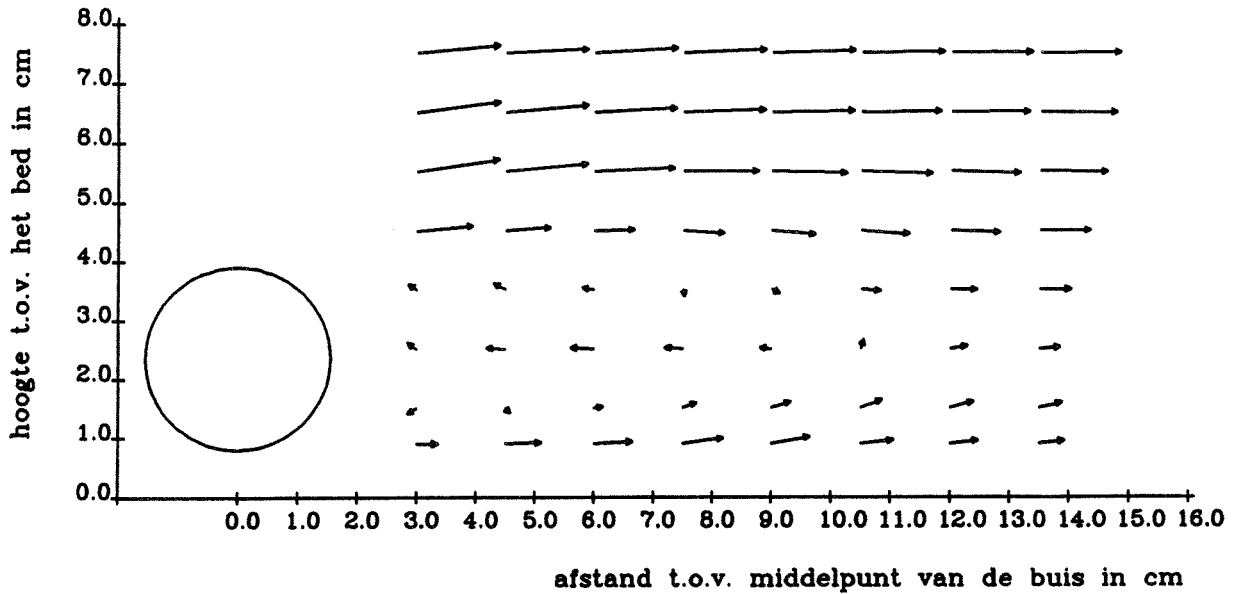
		v_n (-)							
7.5		1.29	1.30	1.31	1.30	1.30	1.28	1.28	1.27
6.5		1.30	1.30	1.29	1.29	1.27	1.26	1.23	1.23
5.5		1.28	1.30	1.26	1.23	1.18	1.13	1.10	1.06
4.5		1.22	1.00	0.85	0.77	0.72	0.73	0.77	0.78
3.5		0.10	0.09	0.09	0.08	0.16	0.30	0.34	0.41
2.5		-0.12	-0.22	-0.28	-0.19	-0.09	0.09	0.15	0.17
1.5		-0.09	-0.15	-0.08	0.13	0.17	0.13	0.07	0.04
0.9		-0.05	0.13	0.24	0.29	0.29	0.09	-0.04	-0.05

Y1	X-	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5
		σ_n (-)							
7.5		0.76	0.54	0.46	0.61	0.59	0.73	0.77	0.77
6.5		0.69	0.64	0.69	0.77	1.02	1.20	1.34	1.59
5.5		0.86	0.79	1.19	1.69	2.22	2.32	2.70	2.88
4.5		1.88	2.94	3.46	3.65	3.68	3.59	3.49	3.51
3.5		2.47	3.00	3.45	3.58	3.37	3.36	3.10	3.30
2.5		1.44	2.09	2.33	2.81	2.71	2.46	2.64	2.56
1.5		1.31	1.94	2.61	2.68	2.50	2.35	1.89	2.07
0.9		1.32	2.23	2.34	2.64	2.66	2.57	2.22	2.12

Y1	X-	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5

PIJPDIAMETER: 3.1 cm
 OPENING ONDER DE PIJP: 0.8 cm
 DEBIET: 60.0 l/s
 $\bar{V} = 0.50$ m/s
 $\bar{\sigma} = 0.05$ m/s

SNELHEIDSVECTOREN (1 cm ~ 0.50 m/s)



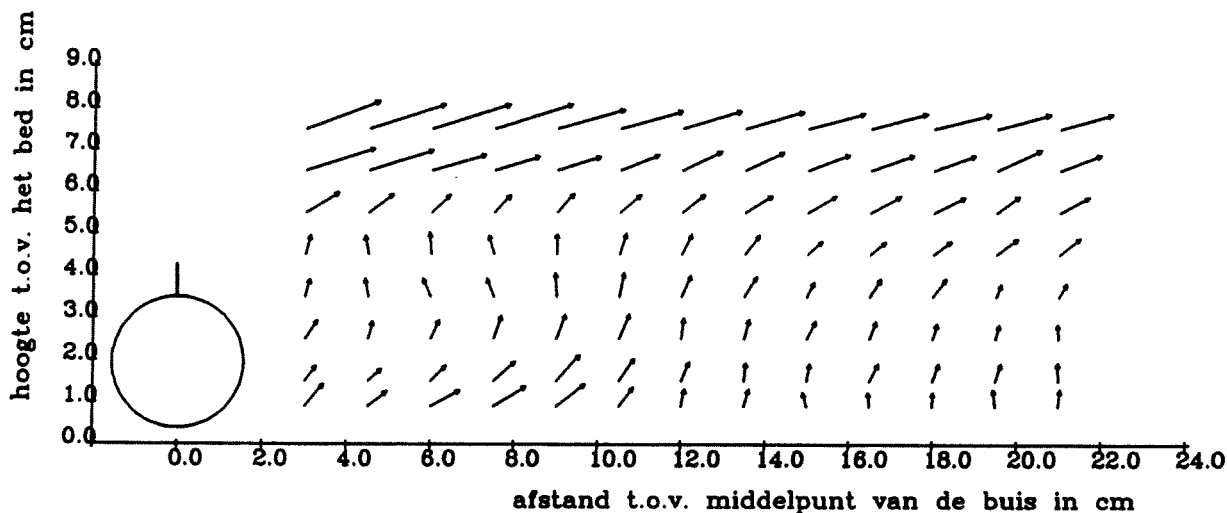
		V_n (-)							
7.5		1.30	1.30	1.30	1.29	1.29	1.27	1.25	1.24
6.5		1.31	1.30	1.29	1.28	1.27	1.24	1.21	1.19
5.5		1.30	1.30	1.26	1.17	1.16	1.09	1.07	1.03
4.5		0.85	0.66	0.58	0.60	0.64	0.71	0.73	0.75
3.5		-0.08	-0.14	-0.11	0.03	0.06	0.23	0.35	0.42
2.5		-0.09	-0.23	-0.30	-0.21	-0.10	0.07	0.20	0.25
1.5		-0.08	0.02	0.07	0.16	0.25	0.29	0.32	0.30
0.9		0.27	0.51	0.57	0.60	0.57	0.47	0.39	0.33

Y↑	X→	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5
		σ_n (-)							
7.5		0.54	0.49	0.42	0.58	0.64	0.73	0.89	1.03
6.5		0.49	0.48	0.61	0.69	0.91	1.34	1.50	1.76
5.5		0.73	0.93	1.43	2.51	2.20	2.85	2.90	3.06
4.5		3.10	3.46	3.86	4.03	3.89	3.83	3.81	3.71
3.5		1.25	2.36	3.23	3.46	3.54	3.95	3.63	3.01
2.5		1.24	1.87	2.17	2.51	3.05	3.32	2.79	2.49
1.5		1.32	2.40	3.04	3.61	3.49	3.49	2.91	2.62
0.9		2.07	2.62	2.89	3.27	3.22	2.95	2.70	2.45

Y↑	X→	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5

PIJPDIAMETER: 3.1 cm + VIN 0.8 cm
 OPENING ONDER DE PIJP: 0.4 cm
 DEBIET: 12.0 l/s
 $\bar{V} = 0.10$ m/s
 $\sigma = 0.01$ m/s

SNELHEIDSVECTOREN (1 cm ~ 0.10 m/s)

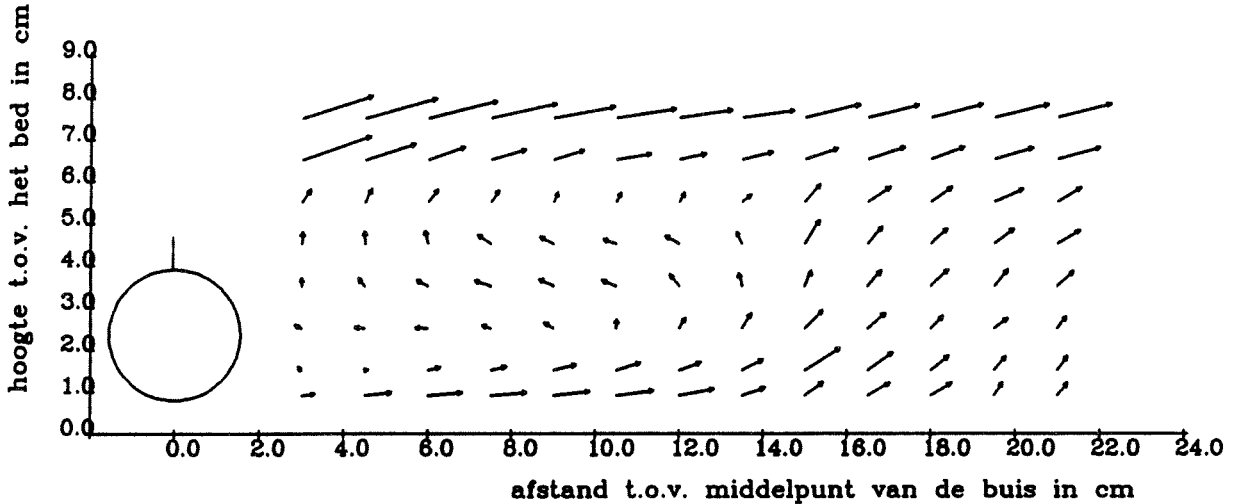


	V_n (-)												
7.5	1.76	1.81	1.84	1.83	1.56	1.45	1.35	1.34	1.30	1.28	1.29	1.21	1.18
6.5	1.63	1.51	1.24	1.03	0.98	0.91	0.93	0.92	0.96	0.99	0.95	1.06	0.94
5.5	0.83	0.64	0.52	0.47	0.50	0.56	0.59	0.66	0.68	0.71	0.73	0.56	0.69
4.5	0.39	-0.37	-0.43	-0.39	-0.40	0.43	0.44	0.48	0.38	0.38	0.44	0.53	0.52
3.5	0.34	-0.34	-0.38	-0.37	-0.47	0.49	0.46	0.46	0.30	0.40	0.44	0.24	0.28
2.5	0.44	0.34	0.39	0.48	0.53	0.54	0.40	0.38	0.39	0.35	0.29	0.27	0.28
1.5	0.37	0.35	0.42	0.60	0.74	0.56	0.40	0.36	0.34	0.38	0.37	0.35	0.36
0.9	0.60	0.50	0.71	0.83	0.78	0.48	0.35	0.35	-0.27	-0.27	0.26	-0.33	0.34
Y X-	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0

	σ_n (-)												
7.5	1.66	1.53	2.11	2.44	3.33	3.27	3.37	3.42	3.02	3.02	3.19	2.94	3.25
6.5	1.73	2.97	3.58	3.95	3.93	3.91	4.21	3.87	3.27	3.20	3.22	3.85	3.53
5.5	3.59	3.30	3.21	3.59	3.59	3.19	2.93	3.18	2.72	3.02	2.75	3.07	2.83
4.5	2.05	2.29	3.00	2.57	2.18	2.18	2.67	2.42	2.49	2.43	2.57	3.06	2.53
3.5	1.97	1.88	2.00	1.94	2.06	2.24	1.86	2.20	1.86	2.21	1.96	2.25	2.77
2.5	2.18	2.05	2.24	2.39	2.62	2.73	1.81	1.68	2.10	1.67	2.00	1.91	2.34
1.5	1.36	1.85	2.12	1.85	2.44	3.21	1.92	1.92	1.61	1.62	1.42	1.78	1.63
0.9	1.64	1.91	2.41	2.49	2.55	2.98	1.52	1.69	1.52	1.61	1.95	1.66	1.60
Y X-	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0

PIJPDIAMETER: 3.1 cm + VIN 0.8 cm
 OPENING ONDER DE PIJP: 0.8 cm
 DEBIET: 12.0 l/s
 $\bar{V} = 0.10$ m/s
 $\bar{\sigma} = 0.01$ m/s

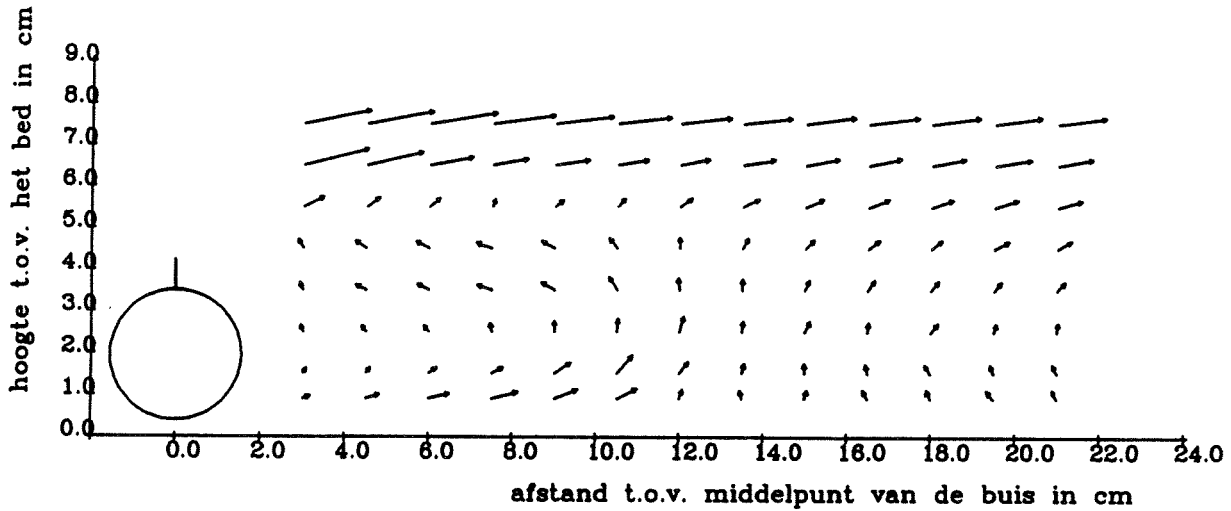
SNELHEIDSVECTOREN (1 cm ~ 0.10 m/s)



		v_n (-)												
7.5		1.66	1.67	1.59	1.50	1.39	1.33	1.17	1.14	1.23	1.13	1.15	1.20	1.18
6.5		1.63	1.16	0.83	0.77	0.66	0.74	0.55	0.65	0.73	0.82	0.73	0.85	0.93
5.5		0.28	0.26	0.28	0.24	0.16	0.15	0.16	0.18	0.46	0.53	0.50	0.65	0.53
4.5		0.20	-0.22	-0.23	-0.29	-0.28	-0.24	-0.28	-0.23	0.57	0.43	0.42	0.48	0.51
3.5		0.11	-0.15	-0.21	-0.32	-0.29	-0.27	-0.26	-0.23	0.30	0.38	0.47	0.40	0.42
2.5		-0.08	-0.14	-0.20	-0.13	-0.17	0.14	0.20	0.33	0.52	0.47	0.32	0.30	0.26
1.5		-0.03	0.01	0.22	0.30	0.47	0.52	0.46	0.47	0.90	0.64	0.45	0.34	0.32
0.9		0.24	0.55	0.74	0.77	0.79	0.81	0.75	0.49	0.45	0.52	0.48	0.28	0.31
Y X-		3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0
		σ_n (-)												
7.5		1.55	1.57	2.34	3.12	3.73	3.39	3.74	3.74	3.78	3.33	3.63	3.28	3.03
6.5		1.99	4.04	4.15	3.97	4.21	4.12	4.45	4.54	3.39	3.57	3.63	3.20	3.07
5.5		2.48	2.45	2.84	3.46	3.61	3.76	3.82	3.58	3.06	2.81	2.56	2.93	2.63
4.5		1.60	2.22	2.70	2.71	3.08	3.34	2.83	3.18	2.63	2.31	2.20	2.02	2.70
3.5		1.64	1.66	2.13	2.18	2.70	2.80	3.22	3.59	2.54	2.57	2.39	2.24	2.57
2.5		1.60	1.71	2.09	2.51	2.50	3.26	3.17	3.09	2.88	2.89	2.84	1.93	2.16
1.5		1.44	2.10	3.09	3.18	3.15	3.72	3.25	3.36	2.78	2.95	2.61	2.89	2.15
0.9		2.62	3.00	3.11	3.26	3.09	2.67	2.48	3.35	3.04	2.93	2.21	2.28	1.81
Y X-		3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0

PIJPDIAMETER: 3.1 cm + VIN 0.8 cm
 OPENING ONDER DE PIJP: 0.4 cm
 DEBIET: 30.0 l/s
 $\bar{V} = 0.25$ m/s
 $\sigma = 0.025$ m/s

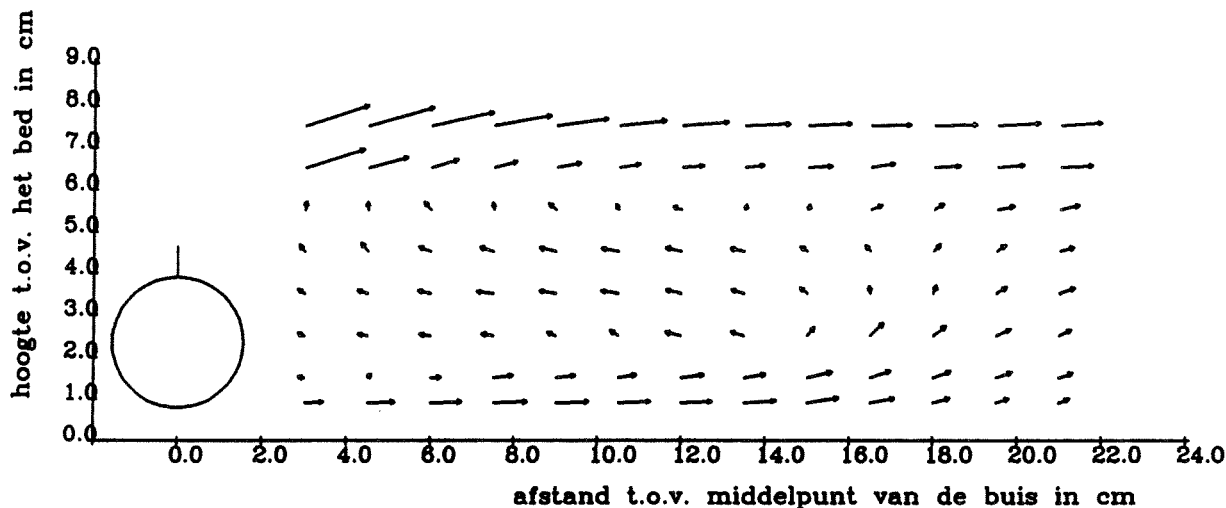
SNELHEIDSVECTOREN (1 cm ~ 0.25 m/s)



		v_n (-)												
7.5		1.52	1.51	1.52	1.40	1.29	1.18	1.11	1.07	1.08	1.10	1.05	1.01	1.04
6.5		1.50	1.28	0.96	0.76	0.72	0.65	0.61	0.68	0.71	0.69	0.72	0.78	0.73
5.5		0.44	0.28	0.23	0.11	0.17	0.18	0.25	0.33	0.38	0.42	0.45	0.48	0.49
4.5		-0.16	-0.23	-0.26	-0.30	-0.27	-0.23	0.18	0.20	0.22	0.26	0.24	0.30	0.29
3.5		-0.11	-0.18	-0.22	-0.29	-0.28	-0.28	-0.21	0.18	0.19	0.21	0.21	0.18	0.19
2.5		-0.09	-0.09	-0.09	-0.13	-0.18	0.23	0.30	0.18	0.21	0.16	0.19	0.14	0.15
1.5		0.06	0.08	0.15	0.22	0.38	0.49	0.27	0.16	-0.16	-0.15	-0.18	-0.14	-0.17
0.9		0.11	0.27	0.43	0.57	0.51	0.46	0.15	-0.13	-0.14	-0.16	-0.15	-0.18	-0.17
Y X-		3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0
		σ_n (-)												
7.5		1.00	1.15	1.61	2.24	2.86	3.59	3.37	3.35	3.20	3.19	3.05	3.37	2.92
6.5		1.57	3.10	3.31	3.70	3.91	3.75	3.88	3.66	3.29	3.23	3.16	3.36	3.39
5.5		3.01	3.18	3.53	3.61	3.56	3.55	2.98	2.96	2.74	2.93	2.54	2.80	3.22
4.5		1.61	1.89	2.32	2.36	2.77	2.17	2.18	2.28	2.11	2.43	2.55	2.58	2.63
3.5		1.66	1.81	1.93	2.21	2.21	2.09	2.09	2.98	2.20	2.37	2.53	2.54	2.44
2.5		1.39	1.78	1.90	2.09	2.53	2.33	2.35	2.35	2.63	2.03	2.67	2.18	2.41
1.5		1.27	1.79	2.02	2.20	2.39	2.86	3.04	2.68	2.03	1.74	1.89	1.71	1.83
0.9		1.52	1.64	2.26	2.38	1.86	2.82	1.72	2.14	2.03	1.71	1.65	1.99	1.92
Y X-		3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0

PIJPDIAMETER: 3.1 cm + VIN 0.8 cm
 OPENING ONDER DE PIJP: 0.8 cm
 DEBIET: 30.0 l/s
 $\bar{v} = 0.25$ m/s
 $\bar{\sigma} = 0.025$ m/s

SNELHEIDSVECTOREN (1 cm - 0.25 m/s)

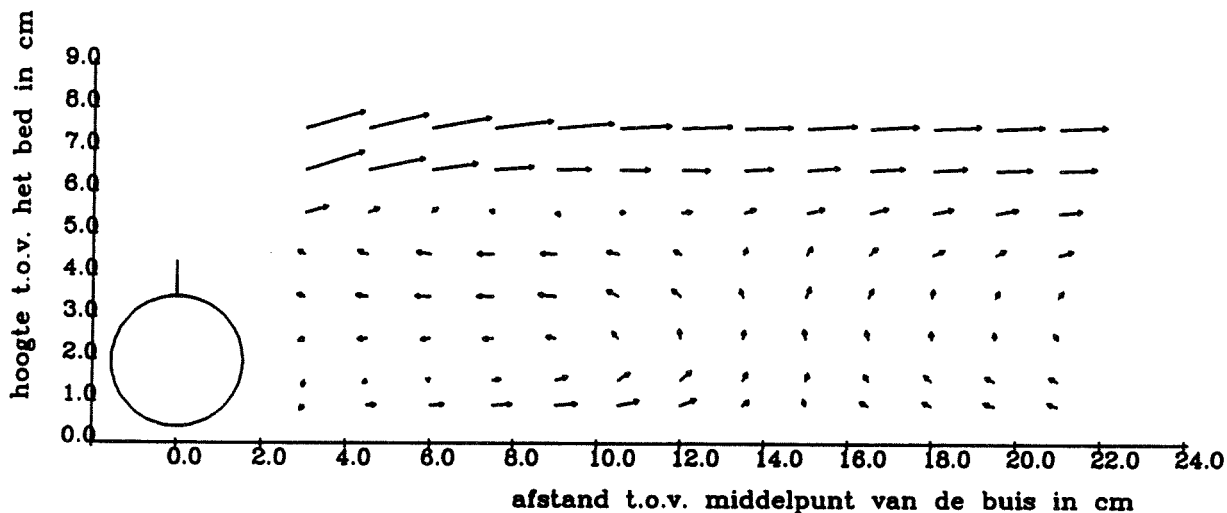


	V_n (-)												
7.5	1.49	1.53	1.42	1.28	1.14	1.03	1.01	0.97	0.93	0.85	0.91	0.90	0.88
6.5	1.38	0.89	0.58	0.48	0.49	0.42	0.42	0.37	0.48	0.47	0.52	0.54	0.67
5.5	0.12	-0.11	-0.15	-0.09	-0.15	-0.06	-0.14	0.04	0.04	0.19	0.16	0.31	0.36
4.5	-0.12	-0.17	-0.22	-0.26	-0.32	-0.33	-0.30	-0.27	-0.12	-0.10	0.13	0.16	0.25
3.5	-0.10	-0.17	-0.22	-0.32	-0.32	-0.33	-0.30	-0.24	-0.14	-0.10	0.12	0.19	0.29
2.5	-0.08	-0.14	-0.17	-0.19	-0.14	-0.14	-0.30	-0.24	0.17	0.34	0.28	0.28	0.22
1.5	-0.07	0.04	0.17	0.38	0.38	0.35	0.45	0.43	0.52	0.43	0.36	0.31	0.26
0.9	0.37	0.56	0.66	0.72	0.70	0.69	0.66	0.68	0.68	0.51	0.33	0.23	0.17
Y1 X-	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0

	σ_n (-)												
7.5	1.16	1.50	2.34	3.13	3.42	3.77	3.94	3.91	3.64	3.98	3.40	3.65	3.42
6.5	2.43	3.62	3.91	3.83	3.69	4.07	4.49	4.21	3.54	3.74	3.65	3.55	3.24
5.5	1.78	1.97	2.33	3.06	3.13	3.14	3.36	3.67	3.59	3.40	3.12	3.12	3.05
4.5	1.37	1.55	1.73	2.26	2.23	2.40	2.73	2.62	2.50	2.53	2.22	2.38	2.51
3.5	1.39	1.52	1.51	1.80	1.91	2.18	2.33	2.59	2.48	2.61	2.35	2.30	2.50
2.5	1.08	1.27	1.74	2.11	2.60	2.18	2.33	2.59	2.93	3.43	2.62	2.70	2.41
1.5	1.16	1.60	2.33	2.42	2.67	2.68	2.88	2.65	2.95	3.13	3.14	3.03	2.94
0.9	2.34	2.57	2.48	2.57	2.41	2.36	2.57	2.63	2.83	2.91	3.05	2.65	2.17
Y1 X-	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0

PIJPDIAMETER: 3.1 cm + VIN 0.8 cm
 OPENING ONDER DE PIJP: 0.4 cm
 DEBIET: 60.0 l/s
 $\bar{V} = 0.50$ m/s
 $\bar{\sigma} = 0.05$ m/s

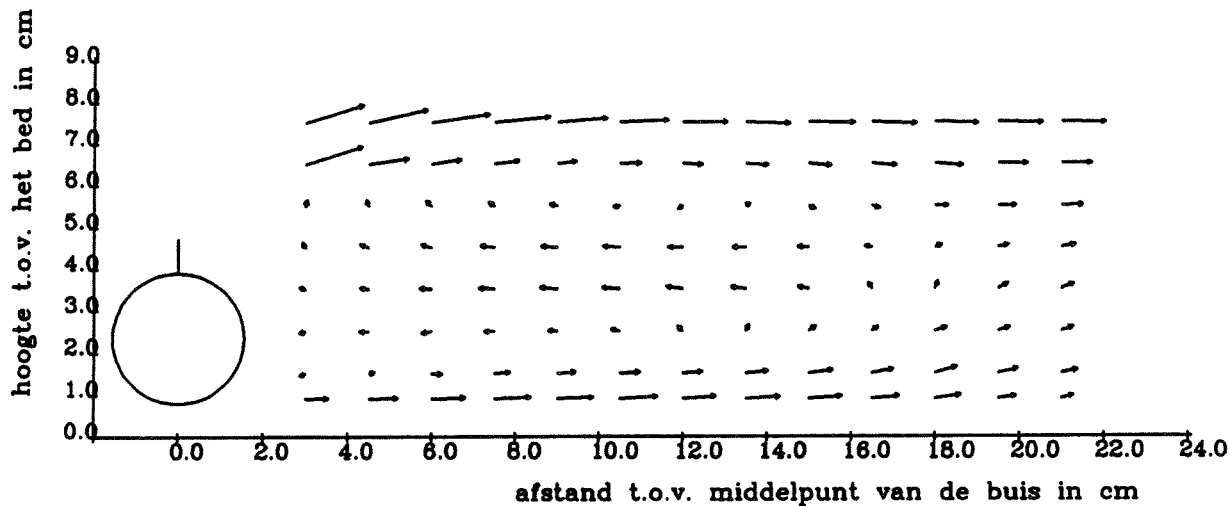
SNELHEIDSVECTOREN (1 cm ~ 0.50 m/s)



		V_n (-)												
7.5		1.35	1.34	1.32	1.28	1.24	1.12	1.08	1.03	1.06	1.03	1.02	1.01	1.00
6.5		1.36	1.27	1.01	0.84	0.70	0.62	0.56	0.57	0.66	0.71	0.70	0.73	0.76
5.5		0.46	0.18	0.09	-0.02	0.01	0.05	0.14	0.18	0.33	0.35	0.38	0.41	0.44
4.5		-0.10	-0.15	-0.25	-0.30	-0.29	-0.22	-0.11	0.08	0.14	0.16	0.20	0.16	0.25
3.5		-0.08	-0.17	-0.26	-0.30	-0.34	-0.22	-0.17	-0.11	0.16	0.12	0.11	0.08	0.09
2.5		-0.04	-0.12	-0.13	-0.14	-0.14	-0.12	-0.14	0.11	-0.15	-0.13	-0.10	-0.08	-0.08
1.5		-0.06	-0.02	-0.01	0.11	0.22	0.25	0.26	0.13	0.12	-0.11	-0.13	-0.15	-0.13
0.9		-0.04	0.14	0.26	0.38	0.44	0.44	0.33	0.12	-0.09	-0.12	-0.14	-0.16	-0.15
Y↑ X→		3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0
		σ_n (-)												
7.5		0.75	0.76	1.03	1.54	2.39	3.36	3.51	3.45	3.55	3.75	3.68	3.73	3.49
6.5		0.99	1.77	3.29	3.69	4.09	4.30	4.34	4.40	4.34	4.44	4.19	4.15	4.06
5.5		2.99	2.91	3.31	3.93	4.01	3.98	3.80	3.79	3.72	3.59	3.96	4.16	4.00
4.5		1.43	1.91	2.35	2.92	2.83	2.96	2.61	2.64	2.78	3.23	3.12	3.17	3.57
3.5		1.51	1.67	1.88	2.14	2.29	2.29	2.17	2.19	2.66	2.58	2.66	2.95	2.84
2.5		1.29	1.55	1.88	1.83	2.31	2.28	2.47	2.61	2.36	2.50	2.65	2.62	2.61
1.5		1.00	1.44	1.76	2.16	2.27	2.69	3.05	3.01	2.77	2.32	2.27	2.00	2.06
0.9		0.90	1.82	2.13	2.35	2.27	2.57	3.16	3.48	2.47	1.77	2.00	1.68	1.97
Y↑ X→		3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0

PIJPDIAMETER: 3.1 cm + VIN 0.8 cm
 OPENING ONDER DE PIJP: 0.8 cm
 DEBIET: 60.0 l/s
 $\bar{v} = 0.50$ m/s
 $\bar{\sigma} = 0.05$ m/s

SNELHEIDSVECTOREN (1 cm ~ 0.50 m/s)

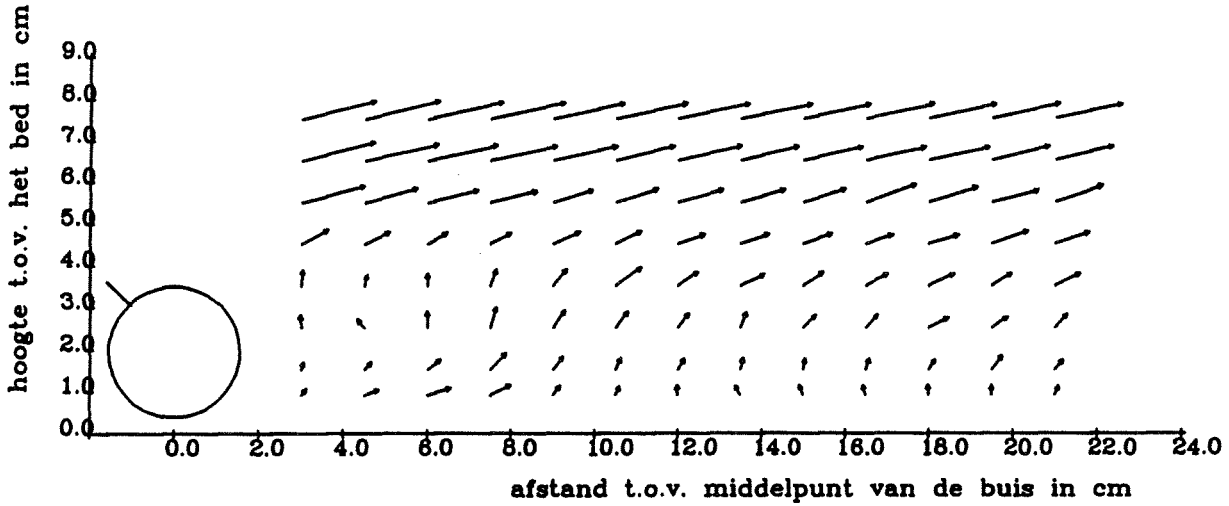


	v_n (-)												
7.5	1.34	1.34	1.29	1.22	1.10	1.05	0.96	0.95	0.98	0.95	0.91	0.94	0.93
6.5	1.32	0.86	0.62	0.50	0.37	0.40	0.37	0.44	0.43	0.48	0.55	0.58	0.61
5.5	0.08	-0.08	-0.09	-0.07	-0.10	-0.07	-0.05	0.02	0.07	0.10	0.20	0.31	0.40
4.5	-0.06	-0.13	-0.17	-0.23	-0.29	-0.31	-0.26	-0.23	-0.17	-0.09	0.07	0.14	0.23
3.5	-0.06	-0.11	-0.19	-0.27	-0.32	-0.33	-0.31	-0.26	-0.17	-0.08	0.10	0.16	0.21
2.5	-0.05	-0.12	-0.15	-0.15	-0.13	-0.12	-0.08	0.08	0.10	0.09	0.20	0.19	0.20
1.5	-0.05	0.06	0.16	0.29	0.35	0.39	0.38	0.43	0.48	0.42	0.45	0.38	0.29
0.9	0.45	0.61	0.71	0.78	0.78	0.81	0.70	0.73	0.70	0.56	0.53	0.33	0.20
Y X-	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0

	σ_n (-)												
7.5	0.79	1.00	1.37	2.18	3.10	3.25	3.86	3.94	3.78	3.72	3.90	3.71	3.60
6.5	1.52	3.20	3.38	3.48	4.10	4.18	4.60	4.61	4.48	4.59	4.37	4.42	4.54
5.5	1.78	1.87	2.33	2.67	3.50	3.73	3.95	4.10	3.72	3.69	3.54	3.52	3.36
4.5	1.37	1.60	1.92	2.21	2.60	2.67	2.95	3.27	3.27	2.96	3.24	3.12	2.68
3.5	1.44	1.67	1.70	2.11	2.31	2.33	2.66	3.06	2.38	2.66	2.95	2.77	2.75
2.5	1.24	1.47	1.95	2.18	2.71	3.07	3.19	3.38	2.95	2.73	2.80	2.64	2.50
1.5	1.07	1.77	2.36	2.80	3.12	3.27	3.38	3.31	2.89	3.21	3.20	3.26	2.82
0.9	2.42	2.65	2.79	2.87	2.75	2.89	3.14	2.99	2.97	2.76	3.09	3.16	2.67
Y X-	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0

PIJPDIAMETER: 3.1 cm + VIN 0.8 cm 45° naar voren gericht
 OPENING ONDER DE PIJP: 0.4 cm
 DEBIET: 12.0 l/s
 \bar{V} = 0.10 m/s
 \bar{a} = 0.01 m/s

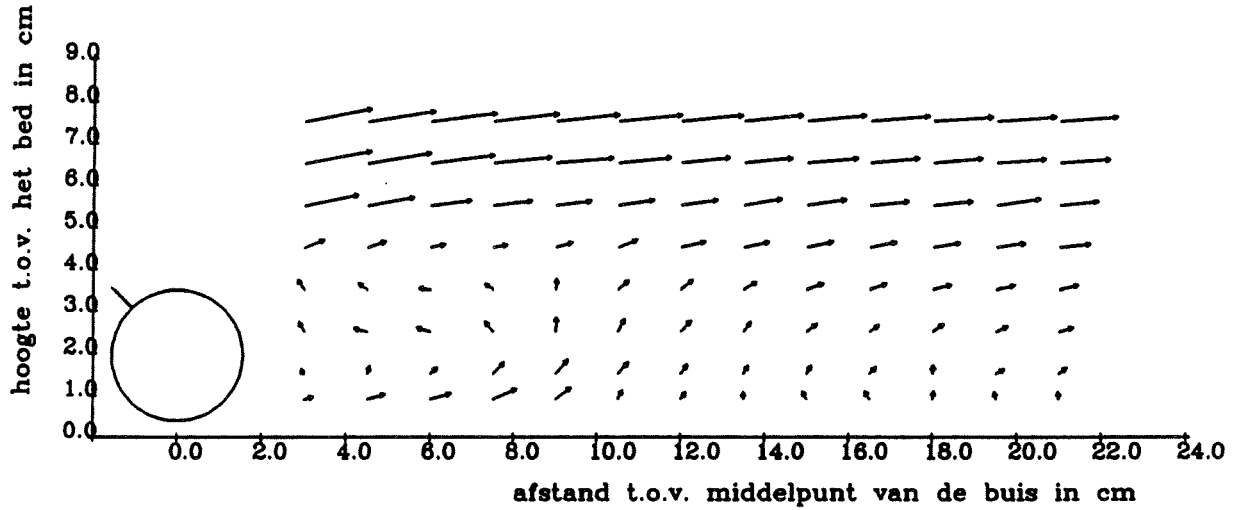
SNELHEIDSVECTOREN (1 cm ~ 0.50 m/s)



		V_n (-)												
7.5		1.71	1.73	1.74	1.72	1.64	1.65	1.63	1.63	1.53	1.54	1.51	1.52	1.50
6.5		1.69	1.69	1.60	1.52	1.46	1.35	1.46	1.32	1.35	1.34	1.36	1.28	1.29
5.5		1.47	1.21	1.15	1.05	0.91	0.97	1.03	1.01	0.97	1.16	1.11	1.03	1.08
4.5		0.63	0.57	0.45	0.47	0.61	0.59	0.59	0.63	0.63	0.58	0.64	0.81	0.75
3.5		0.31	0.19	0.21	0.32	0.42	0.66	0.48	0.53	0.48	0.49	0.57	0.45	0.56
2.5		-0.23	-0.18	-0.31	0.42	0.41	0.39	0.34	0.31	0.33	0.32	0.42	0.36	0.34
1.5		0.11	0.16	0.30	0.46	0.30	0.22	0.22	0.20	0.18	0.19	0.19	0.33	0.22
0.9		0.11	0.29	0.50	0.46	0.19	0.15	-0.15	-0.17	-0.17	-0.16	-0.16	-0.15	0.16
Y1	X→	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0
		a_n (-)												
7.5		1.23	1.33	1.43	1.45	1.78	1.84	2.12	2.38	2.42	2.35	2.50	2.49	2.50
6.5		1.61	1.87	2.37	2.71	2.91	2.88	3.17	3.01	2.99	2.88	2.89	2.92	2.72
5.5		3.24	3.54	3.67	4.12	3.92	3.55	3.55	3.34	3.61	3.34	3.51	3.43	3.78
4.5		3.82	3.86	3.87	3.63	3.53	3.24	3.20	3.07	3.20	3.57	3.23	4.10	3.37
3.5		2.53	2.89	3.06	2.70	2.79	3.05	2.98	3.06	3.14	3.02	2.96	2.92	3.60
2.5		1.99	2.64	3.45	3.02	2.37	2.36	2.13	1.99	2.47	2.50	2.94	2.86	2.73
1.5		1.77	2.32	2.48	2.55	2.54	1.93	1.93	1.98	1.83	2.01	2.06	2.87	2.41
0.9		1.77	2.32	2.43	2.86	2.27	2.25	1.35	1.37	1.59	1.73	1.91	2.10	2.38
Y1	X→	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0

PIJPDIAETER: 3.1 cm + VIN 0.8 cm 45° naar voren gericht
 OPENING ONDER DE PIJP: 0.4 cm
 DEBIET: 30.0 l/s
 $\bar{V} = 0.25$ m/s
 $\bar{\sigma} = 0.025$ m/s

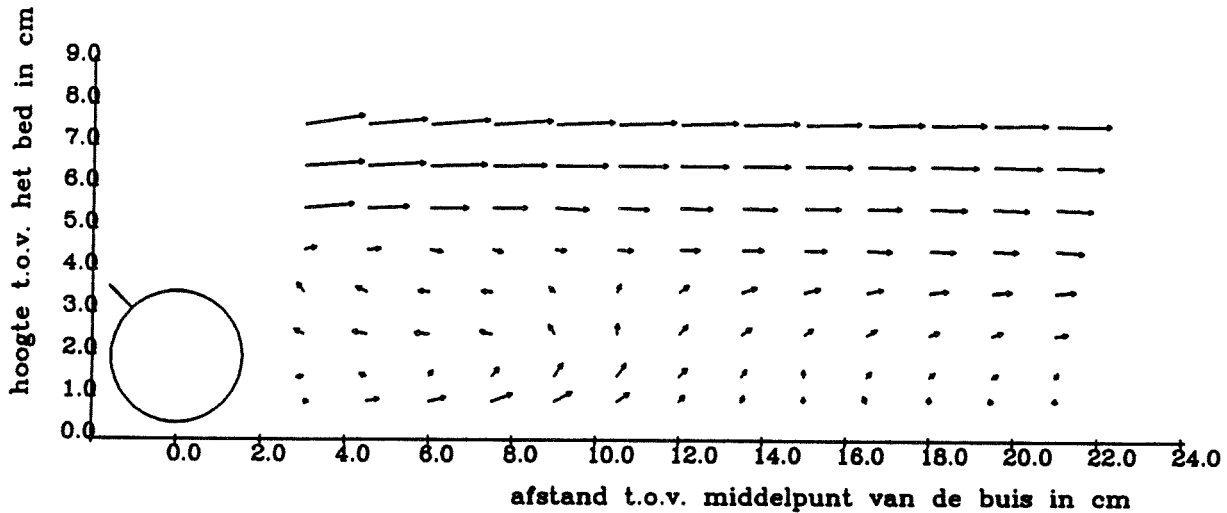
SNELHEIDSVECTOREN (1 cm ~ 0.50 m/s)



		V_n (-)												
7.5		1.52	1.51	1.47	1.45	1.41	1.41	1.36	1.29	1.28	1.29	1.29	1.29	1.26
6.5		1.52	1.43	1.43	1.29	1.28	1.15	1.06	1.04	1.10	1.05	1.05	1.05	1.08
5.5		1.21	1.02	0.89	0.82	0.75	0.75	0.77	0.80	0.83	0.81	0.82	0.94	0.79
4.5		0.42	0.36	0.26	0.24	0.32	0.38	0.49	0.52	0.52	0.53	0.54	0.57	0.61
3.5		-0.20	-0.17	-0.18	-0.16	0.17	0.23	0.26	0.26	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36
2.5		-0.17	-0.23	-0.23	-0.21	0.26	0.24	0.25	0.19	0.20	0.17	0.20	0.20	0.24
1.5		-0.04	0.11	0.13	0.28	0.35	0.27	0.18	0.13	0.13	0.12	0.11	0.13	0.14
0.9		0.14	0.35	0.42	0.53	0.37	0.16	0.12	0.09	-0.12	-0.13	0.11	-0.10	-0.09
Y X-		3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0
		σ_n (-)												
7.5		1.19	1.35	1.48	1.65	1.78	1.89	2.21	2.75	2.40	2.63	2.54	2.69	2.85
6.5		1.45	2.19	2.42	2.77	3.10	3.48	3.42	3.37	3.35	3.36	3.23	3.23	3.05
5.5		3.44	3.79	3.91	4.02	4.20	3.86	3.64	3.73	3.43	3.41	3.61	3.32	3.37
4.5		3.13	4.13	4.13	3.87	3.83	3.52	3.25	3.13	3.30	3.24	3.30	3.24	3.52
3.5		2.07	2.67	2.96	3.22	2.88	2.96	2.57	2.85	2.97	2.89	2.97	3.09	3.19
2.5		1.81	2.13	2.56	2.83	2.54	2.43	2.40	2.23	2.40	2.68	2.64	3.04	3.20
1.5		1.49	2.46	2.87	2.93	2.75	2.55	2.18	1.89	2.01	2.20	2.06	2.29	2.39
0.9		1.96	2.54	2.91	2.77	2.70	2.64	1.99	1.70	1.47	1.77	2.00	1.66	2.01
Y X-		3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0

PIJPDIAMETER: 3.1 cm + VIN 0.8 cm 45° naar voren gericht
 OPENING ONDER DE PIJP: 0.4 cm
 DEBIET: 60.0 l/s
 $\bar{V} = 0.50$ m/s
 $\bar{\sigma} = 0.05$ m/s

SNELHEIDSVECTOREN (1 cm ~ 0.50 m/s)



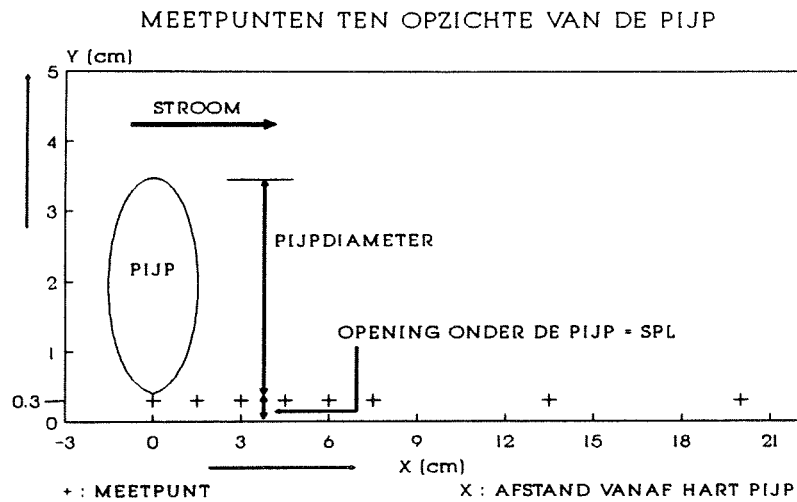
	V_n (-)												
7.5	1.31	1.31	1.30	1.30	1.28	1.27	1.25	1.22	1.21	1.19	1.18	1.15	1.17
6.5	1.30	1.27	1.23	1.17	1.13	1.08	1.03	1.01	1.01	1.00	1.01	1.02	0.99
5.5	1.08	0.89	0.81	0.72	0.68	0.64	0.67	0.71	0.74	0.70	0.75	0.74	0.75
4.5	0.20	0.22	0.21	0.15	0.16	0.27	0.37	0.40	0.42	0.48	0.49	0.49	0.56
3.5	-0.16	-0.17	-0.17	-0.16	-0.08	0.11	0.17	0.26	0.29	0.29	0.34	0.35	0.36
2.5	-0.14	-0.24	-0.25	-0.19	-0.16	0.16	0.20	0.18	0.17	0.17	0.16	0.17	0.21
1.5	-0.06	-0.06	0.07	0.18	0.27	0.28	0.18	0.13	0.10	0.09	0.08	0.09	0.06
0.9	0.05	0.24	0.34	0.45	0.39	0.28	0.12	0.09	-0.06	-0.08	0.07	-0.04	0.05
Y1 X-	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0

	σ_n (-)												
7.5	0.71	0.53	0.75	0.81	1.05	1.41	1.83	1.91	2.11	2.27	2.45	2.57	2.29
6.5	0.57	1.12	1.52	2.22	2.34	2.66	2.82	2.99	3.00	2.95	2.91	2.88	3.06
5.5	2.79	3.20	3.57	3.63	3.84	3.81	3.55	3.46	3.29	3.13	3.06	3.13	3.04
4.5	2.77	3.49	3.89	3.85	3.93	3.68	3.64	3.35	3.23	3.26	3.43	3.45	3.45
3.5	1.92	2.67	3.08	3.23	3.29	3.22	2.92	3.14	3.01	3.13	3.23	3.24	3.44
2.5	1.74	2.16	2.60	2.73	2.75	2.56	2.58	2.35	2.61	2.48	2.76	2.78	2.85
1.5	1.51	2.52	3.17	3.41	3.15	2.99	2.69	2.29	2.12	2.18	2.48	2.27	2.44
0.9	1.90	2.90	3.20	3.10	2.90	3.06	2.61	2.19	1.64	1.78	1.98	1.79	2.00
Y1 X-	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0

BIJLAGE E DEEL 3

Horizontale snelheden (V en σ_v) 3 mm boven het bed
voor verschillende standen van de vin

Verklaring gebruikte parameters:

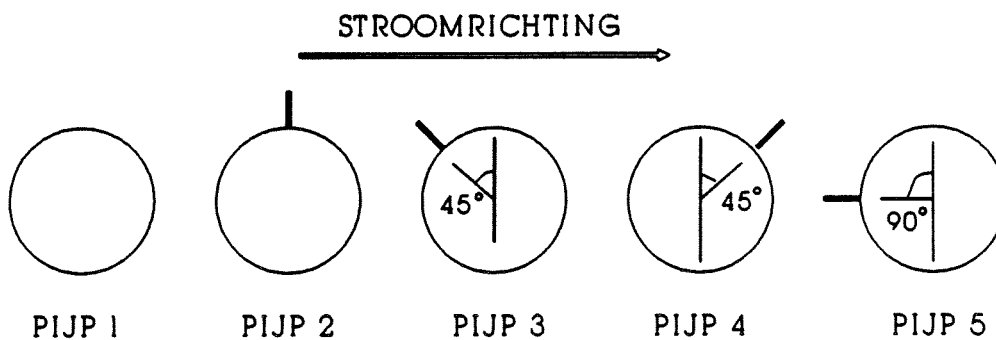


$$V [-] : V_n = \frac{V_{hor}}{\bar{V}}$$

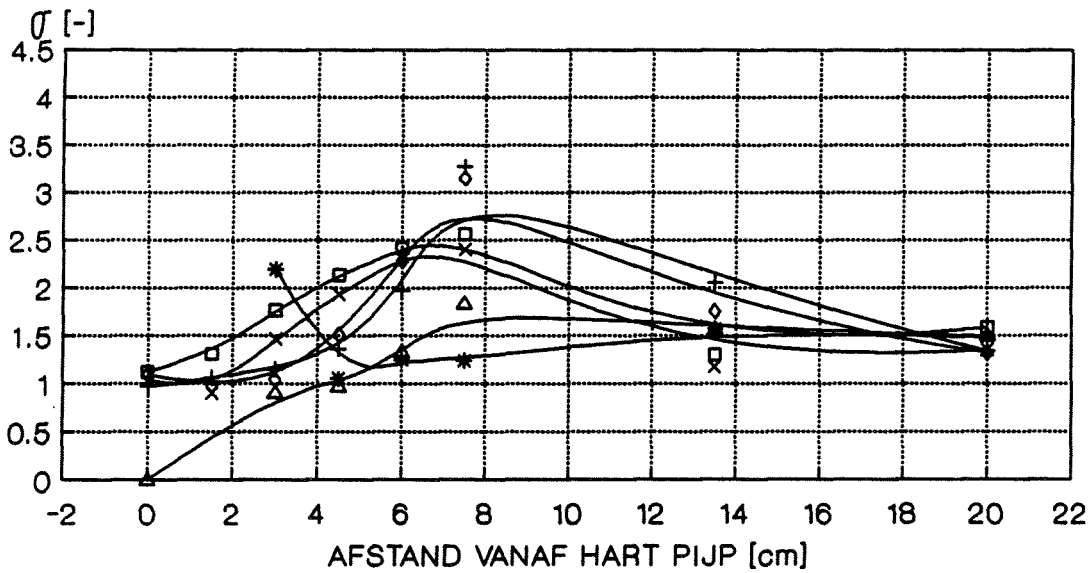
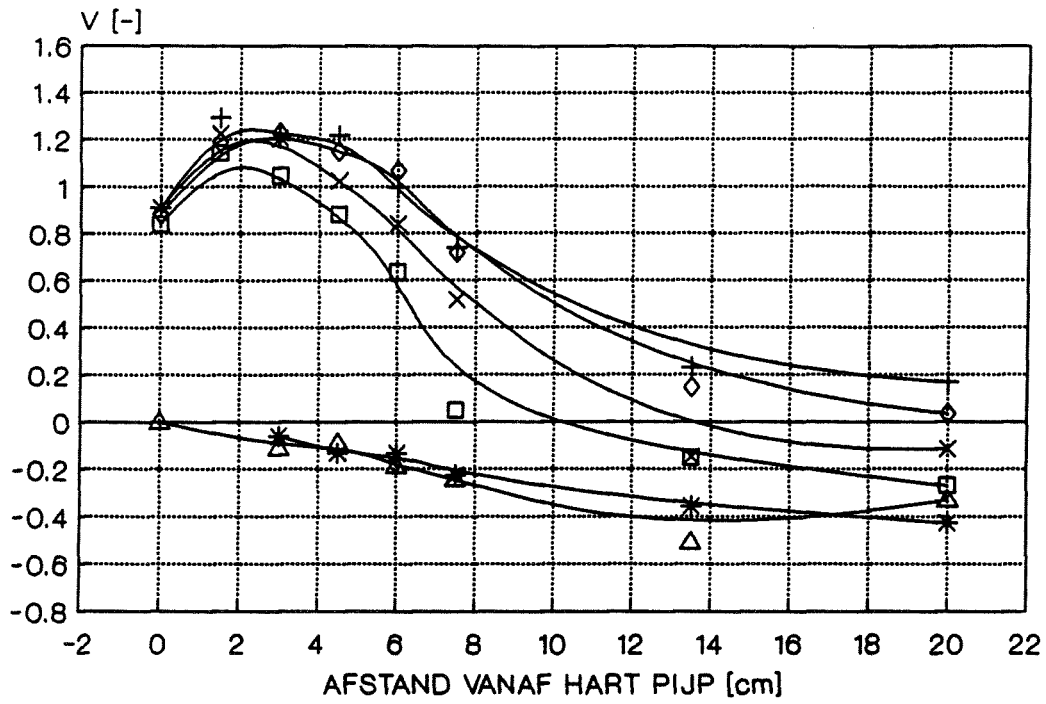
$$\sigma [-] : \sigma_n = \frac{\sigma_{hor}}{\sigma}$$

- waarin
- V_n : dimensieloze stroomsnelheid
 - σ_n : dimensieloze standaardafwijking van de snelheid
 - \bar{V} : gemiddelde stroomsnelheid
 - σ : gemiddelde standaardafwijking van de snelheid
 - V_{hor} : horizontale stroomsnelheid
 - σ_{hor} : horizontale standaardafwijking van de snelheid

Gebruikte pijpjes:

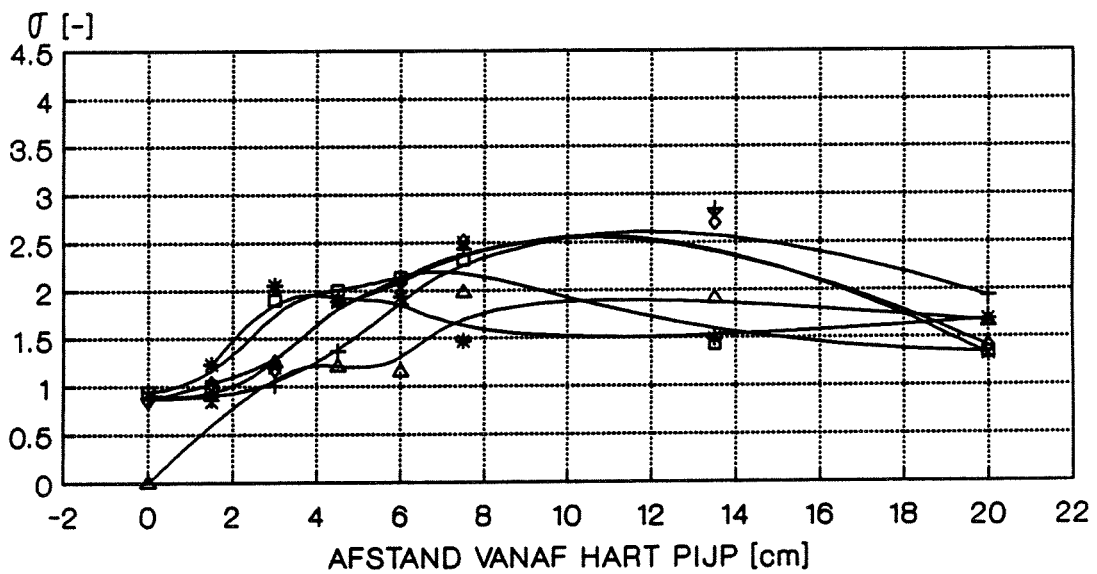
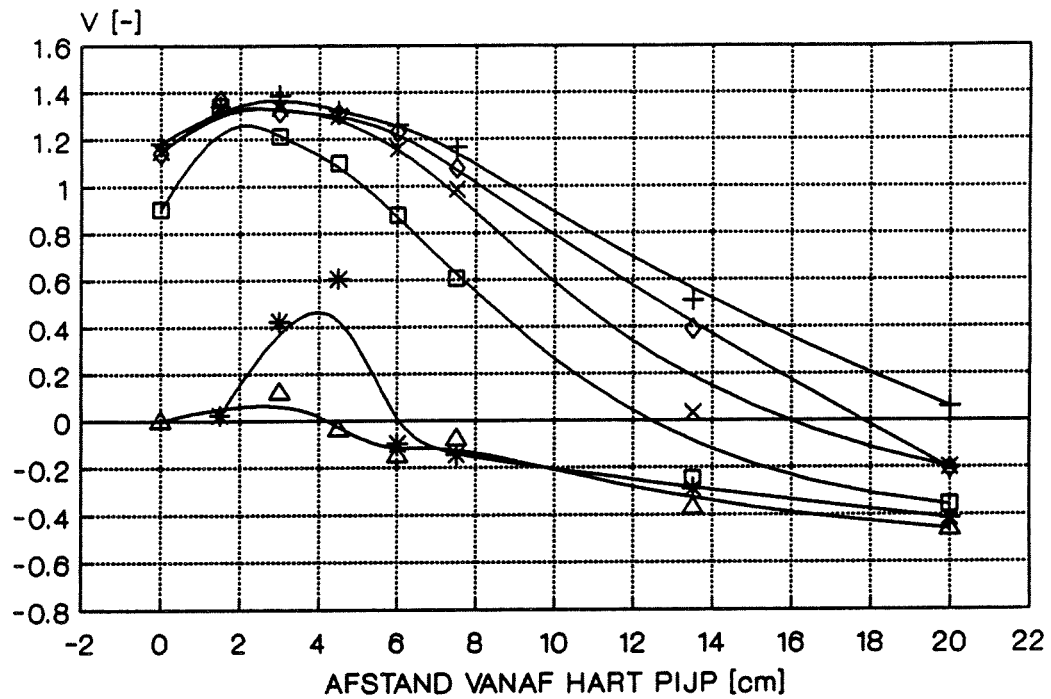


PIJP : 1
 DEBIET : 12 l/s
 \bar{v} = 0.10 m/s
 σ = 0.01 m/s



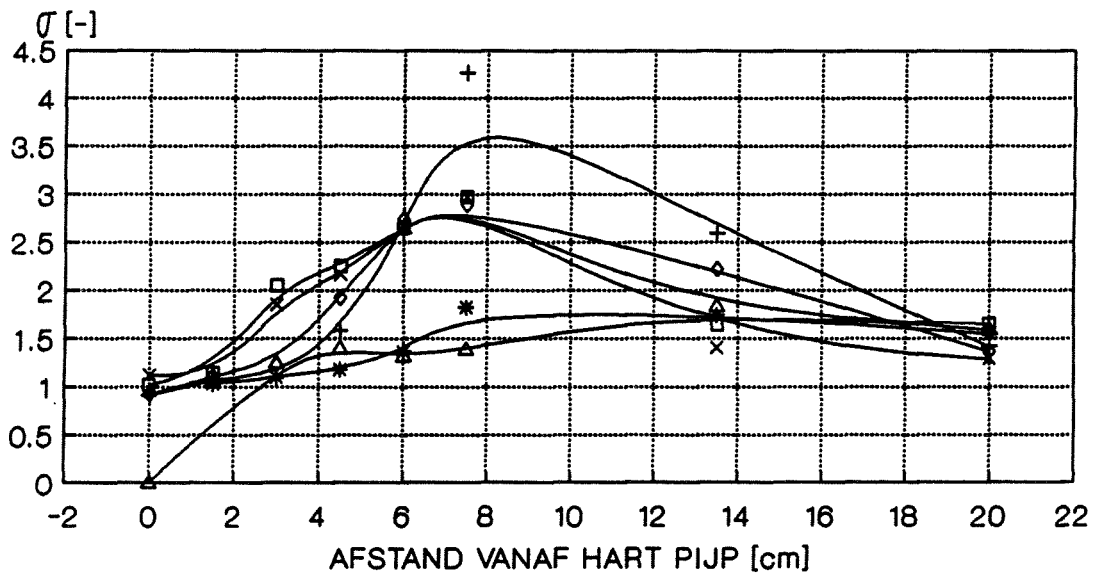
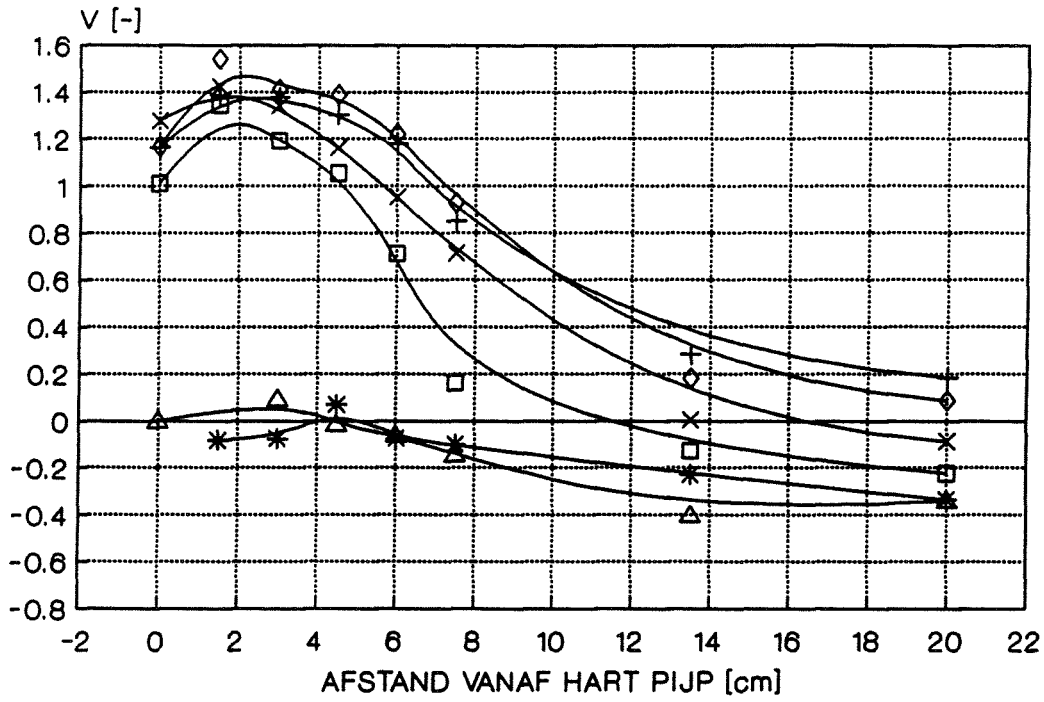
—△— SPL=0 cm —*— SPL=0.2 cm —□— SPL=0.4 cm
 —×— SPL=0.6 cm —◇— SPL=0.8 cm —+— SPL=1.0 cm

PIJP : 2
 DEBIET : 12 l/s
 \bar{V} = 0.10 m/s
 σ = 0.01 m/s



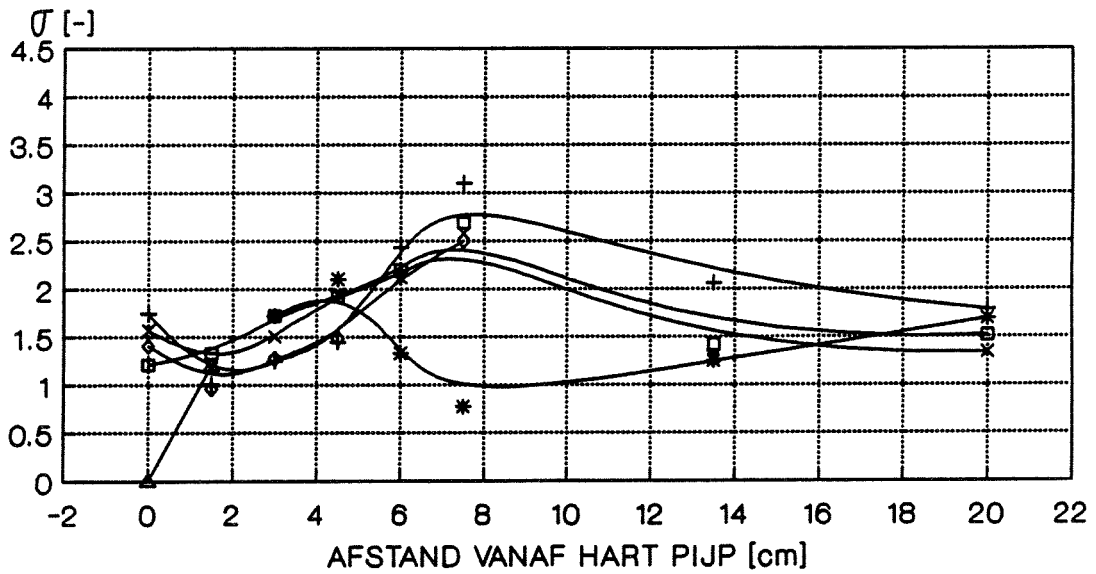
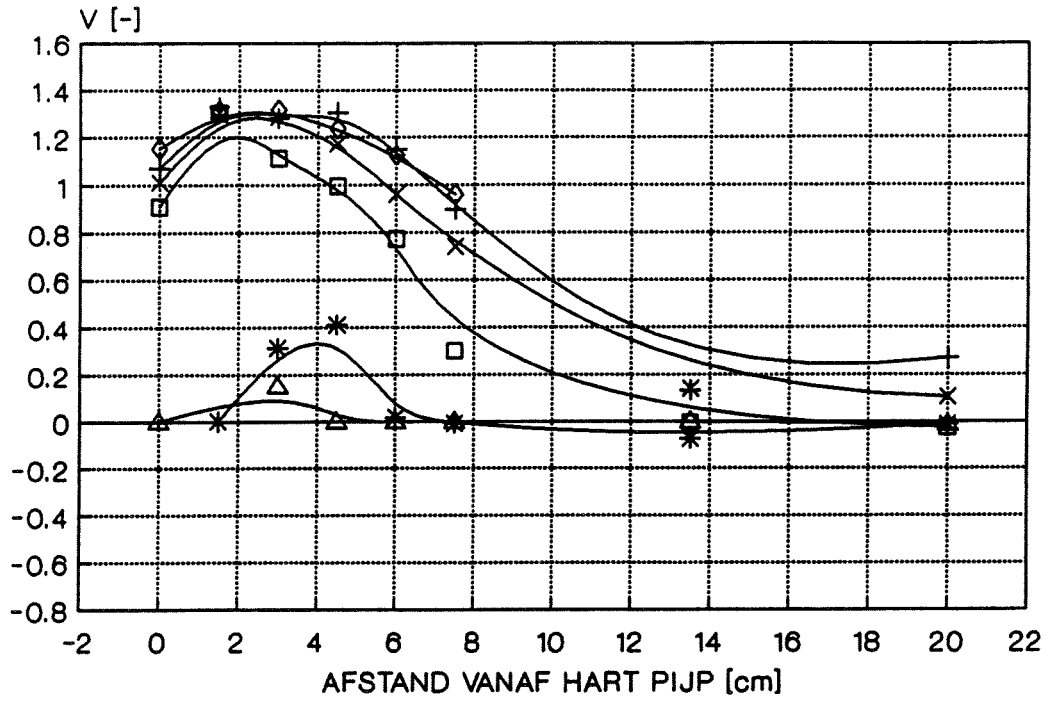
—▲— SPL=0 cm —*— SPL=0.2 cm —□— SPL=0.4 cm
 —×— SPL=0.6 cm —◇— SPL=0.8 cm —+— SPL=1.0 cm

PIJP : 3
 DEBIET : 12 l/s
 \bar{v} = 0.10 m/s
 $\bar{\sigma}$ = 0.01 m/s



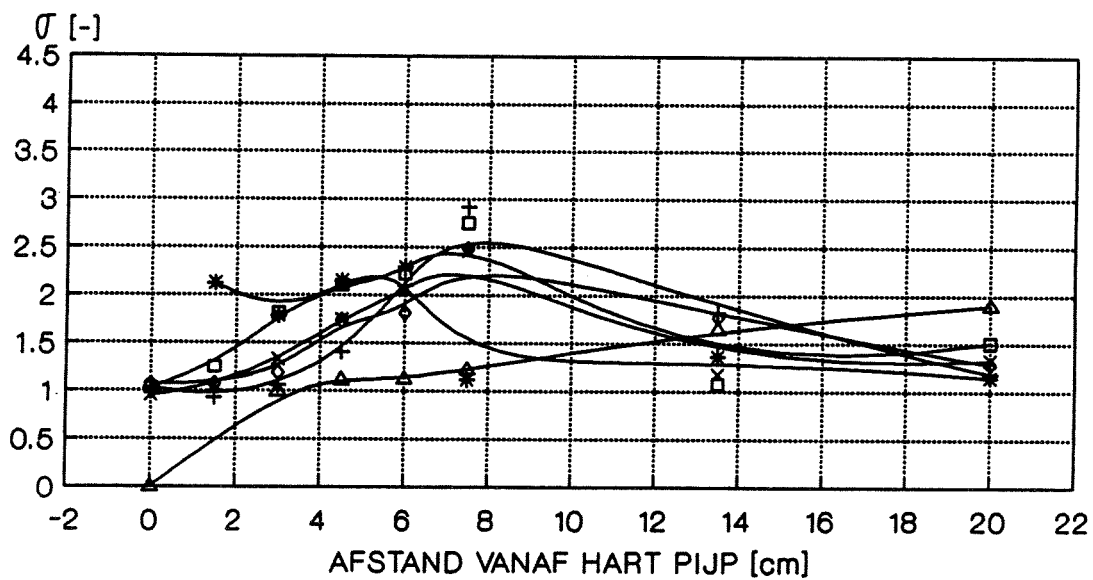
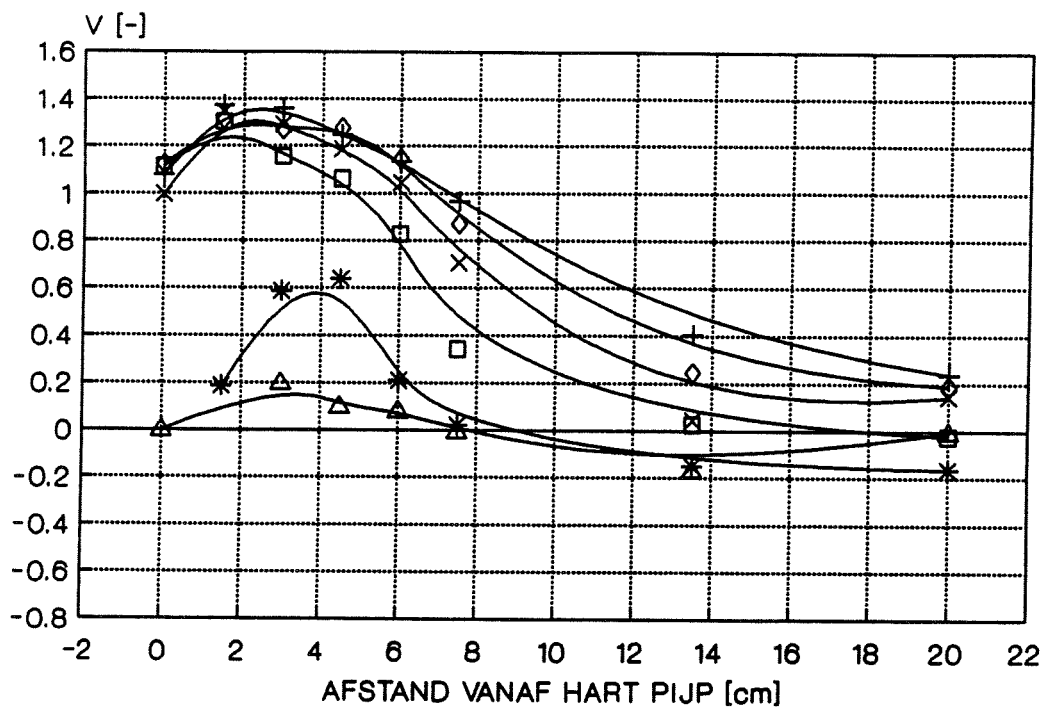
—△—	SPL=0 cm	—*—	SPL=0.2 cm	—□—	SPL=0.4 cm
—x—	SPL=0.6 cm	—◇—	SPL=0.8 cm	—+—	SPL=1.0 cm

PIJP : 4
 DEBIET : 12 l/s
 \bar{V} = 0.10 m/s
 σ = 0.01 m/s



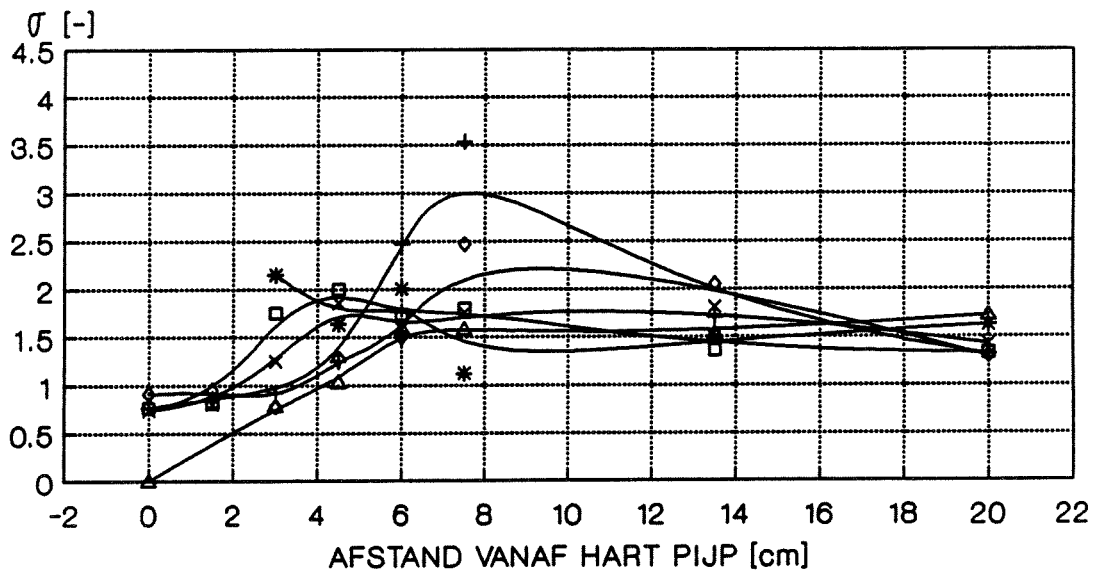
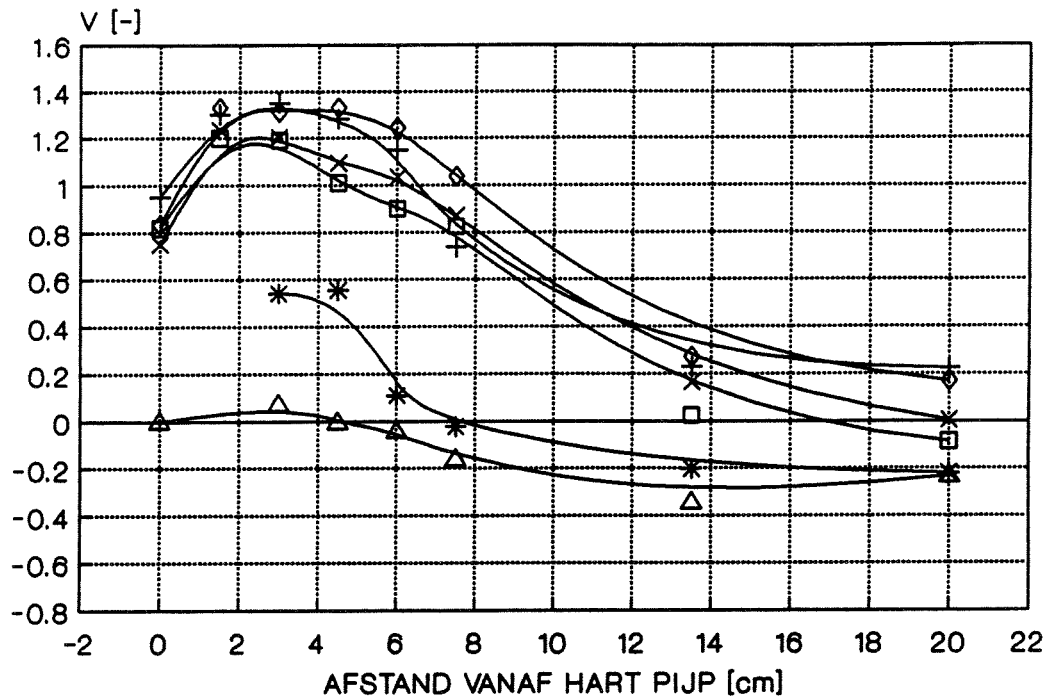
—△— SPL=0 cm —*— SPL=0.2 cm —□— SPL=0.4 cm
 —x— SPL=0.6 cm —◇— SPL=0.8 cm —+— SPL=1.0 cm

PIJP : 5
 DEBIET : 12 l/s
 \bar{v} = 0.10 m/s
 $\bar{\sigma}$ = 0.01 m/s



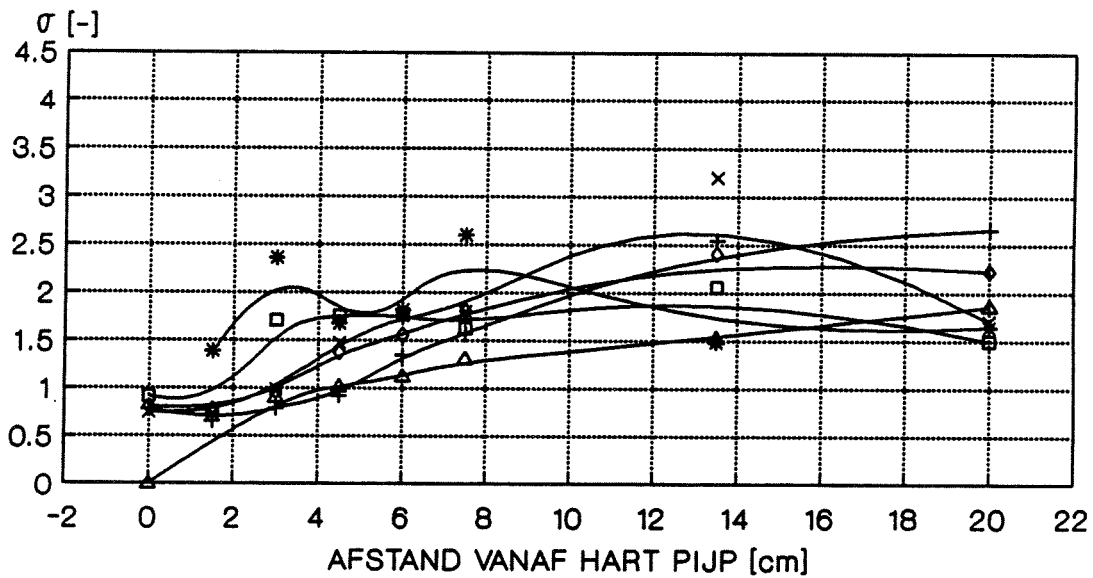
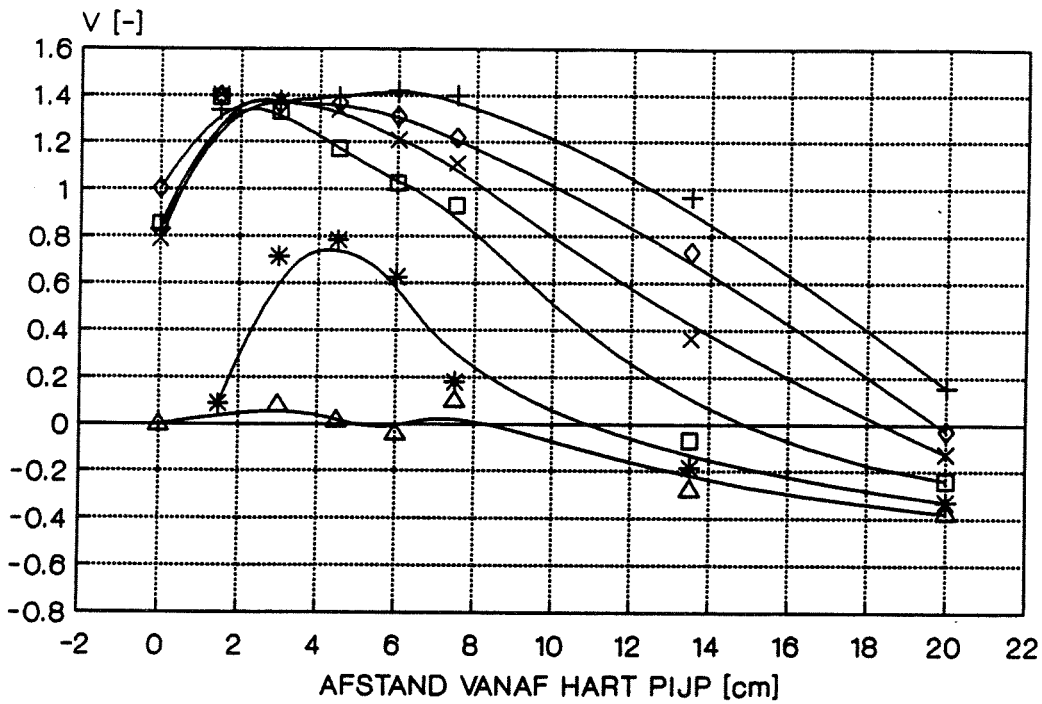
▲ SPL=0 cm * SPL=0.2 cm ◻ SPL=0.4 cm
 × SPL=0.6 cm ◊ SPL=0.8 cm + SPL=1.0 cm

PIJP : 1
 DEBIET : 30 l/s
 \bar{v} = 0.25 m/s
 $\bar{\sigma}$ = 0.025 m/s



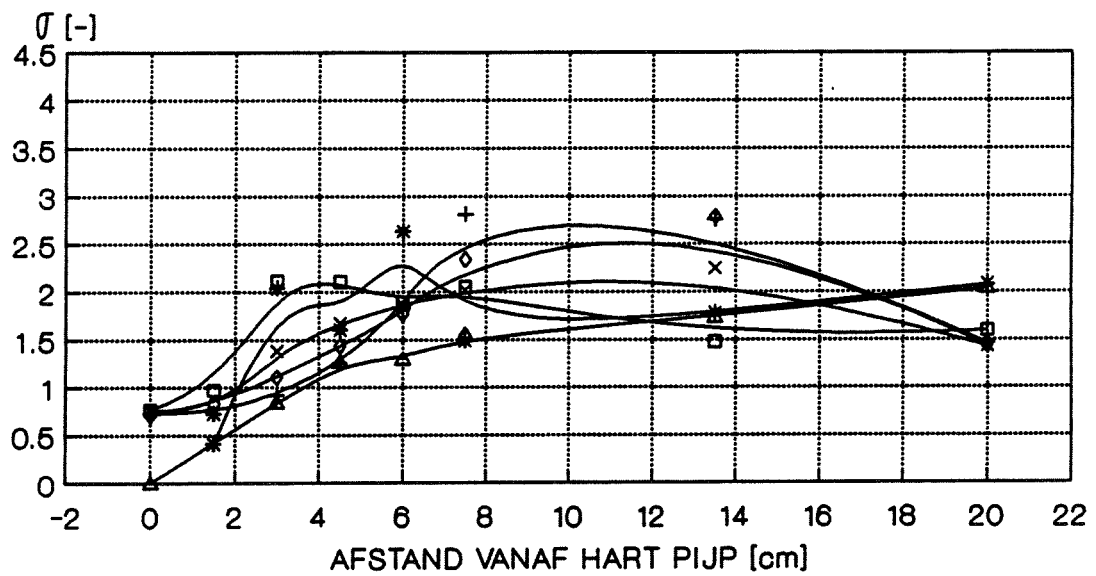
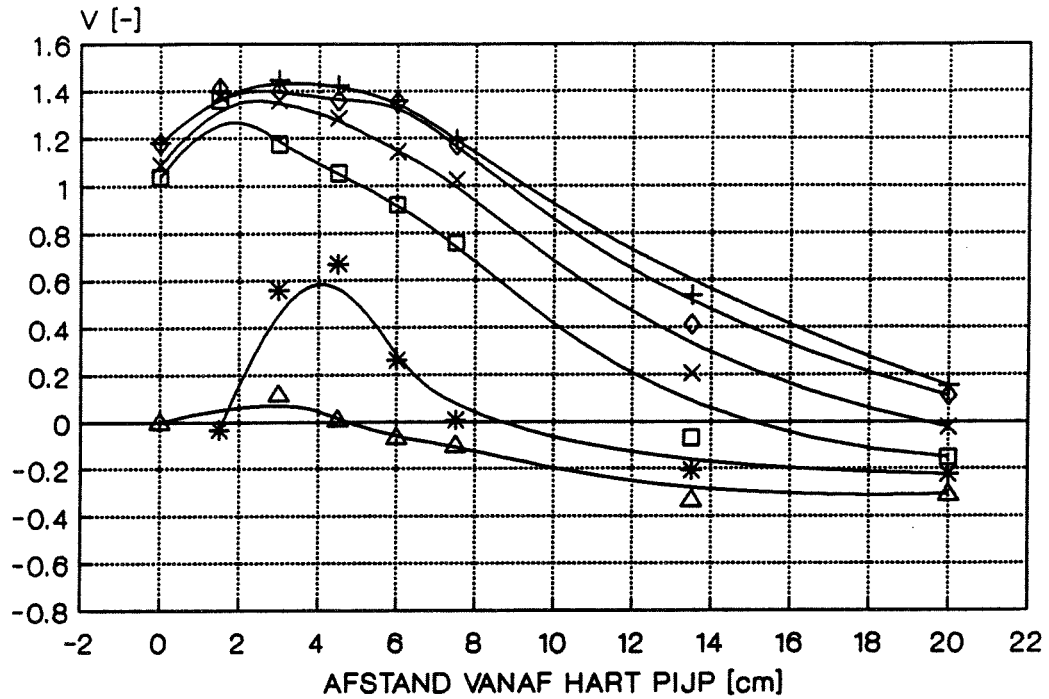
—△— SPL=0 cm —*— SPL=0.2 cm —□— SPL=0.4 cm
 —x— SPL=0.6 cm —◇— SPL=0.8 cm —+— SPL=1.0 cm

PIJP : 2
 DEBIET : 30 l/s
 \bar{v} = 0.25 m/s
 σ = 0.025 m/s



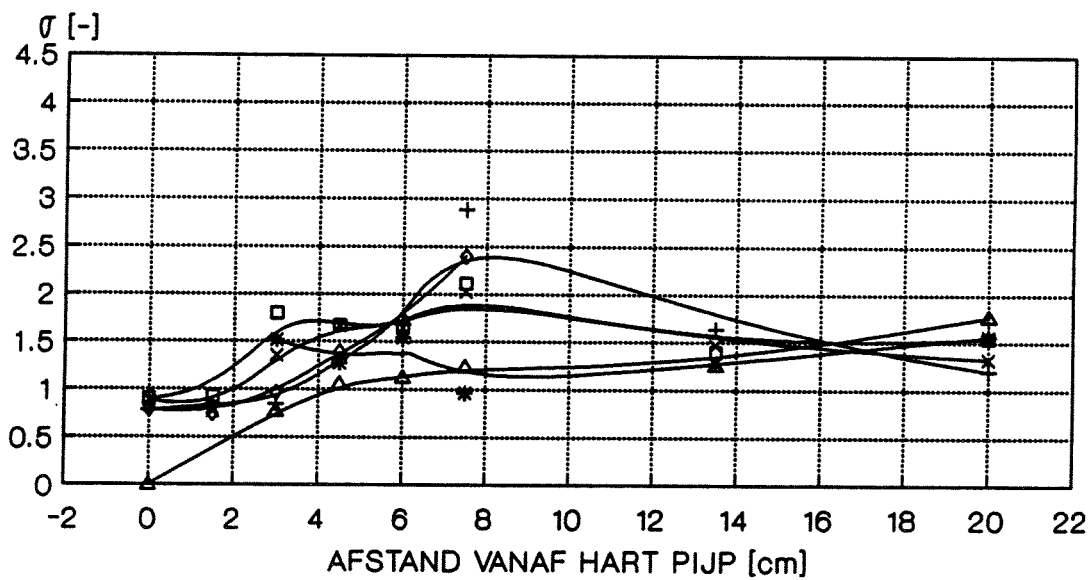
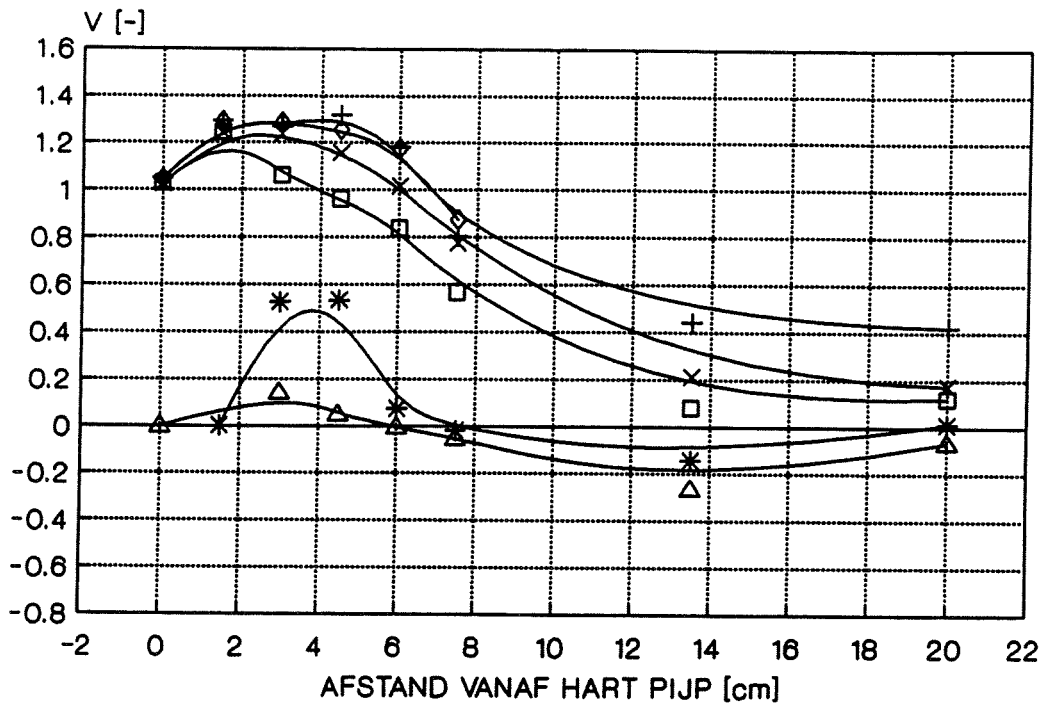
—△— SPL=0 cm —*— SPL=0.2 cm —□— SPL=0.4 cm
 —×— SPL=0.6 cm —◇— SPL=0.8 cm —+— SPL=1.0 cm

PIJP : 3
 DEBIET : 30 l/s
 \bar{v} = 0.25 m/s
 $\bar{\sigma}$ = 0.025 m/s



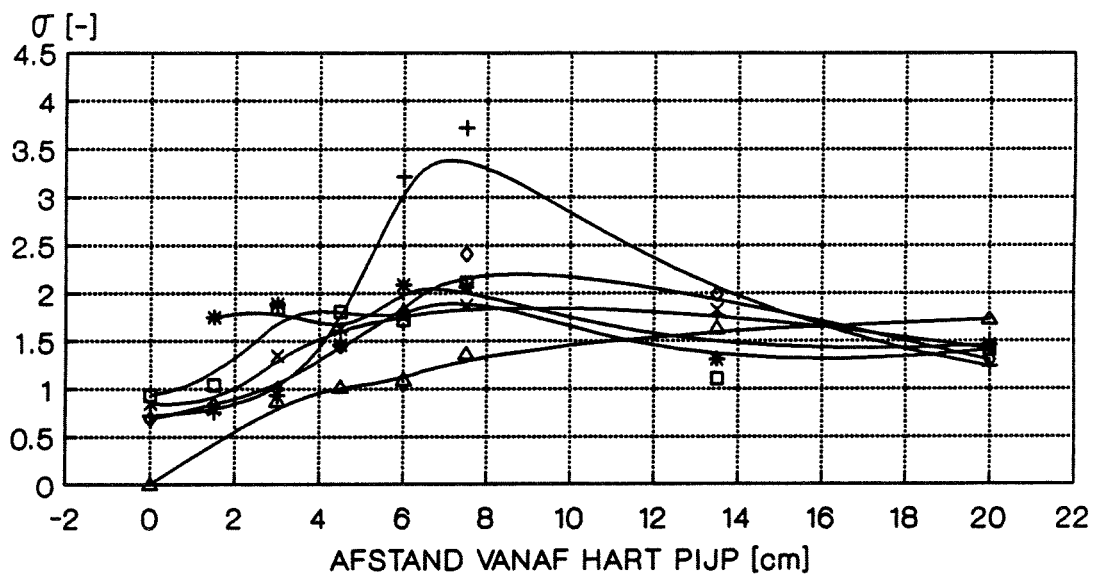
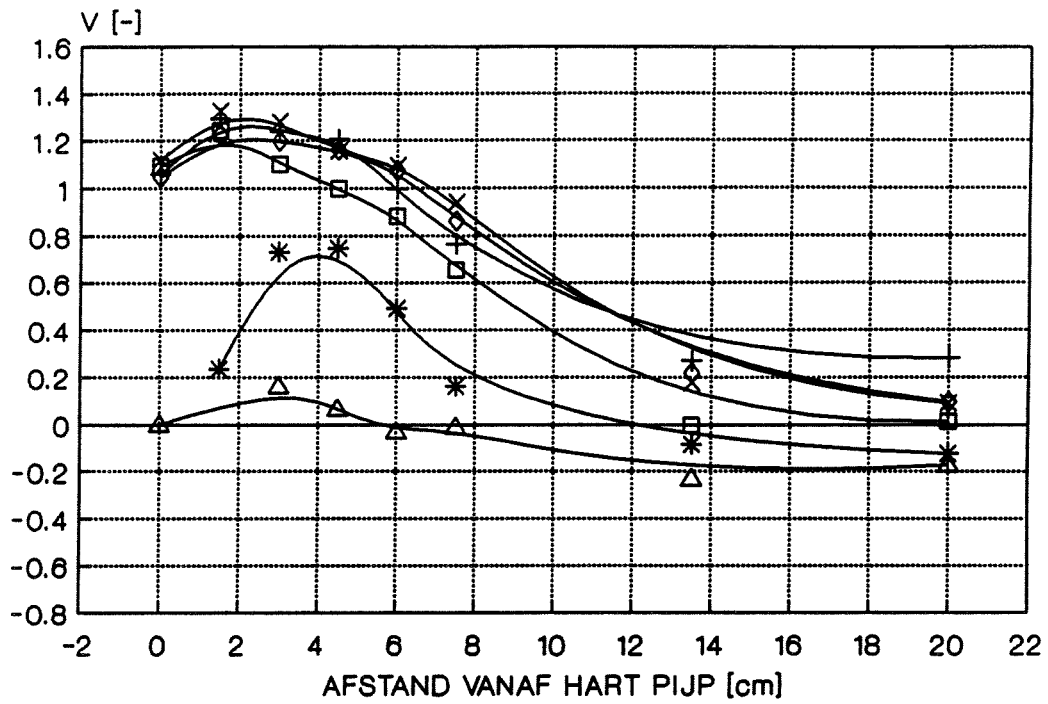
—▲— SPL=0 cm —*— SPL=0.2 cm —□— SPL=0.4 cm
 —x— SPL=0.6 cm —◇— SPL=0.8 cm —+— SPL=1.0 cm

PIJP : 4
 DEBIET : 30 l/s
 \bar{v} = 0.25 m/s
 $\bar{\sigma}$ = 0.025 m/s



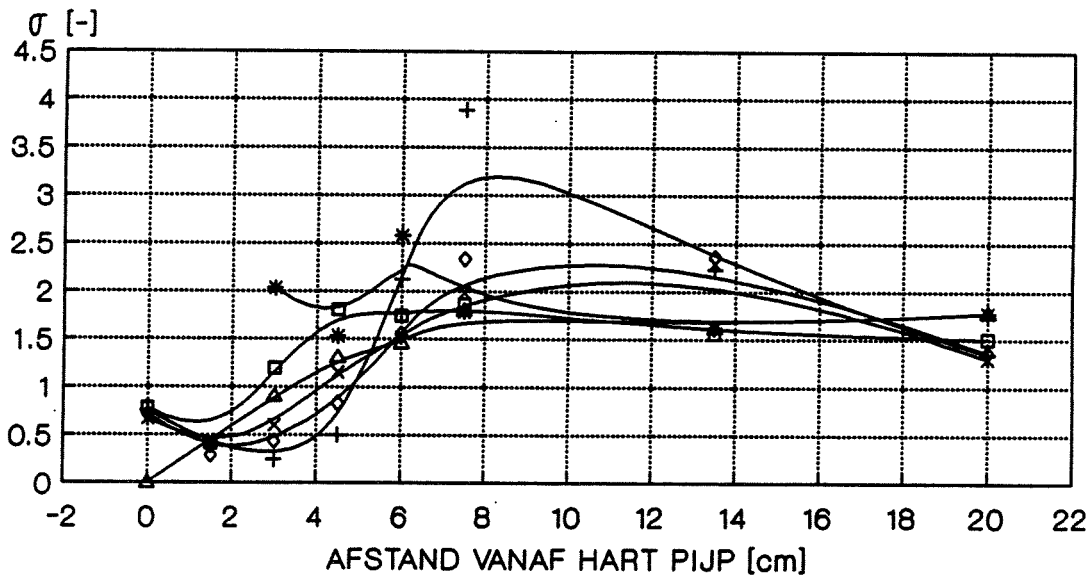
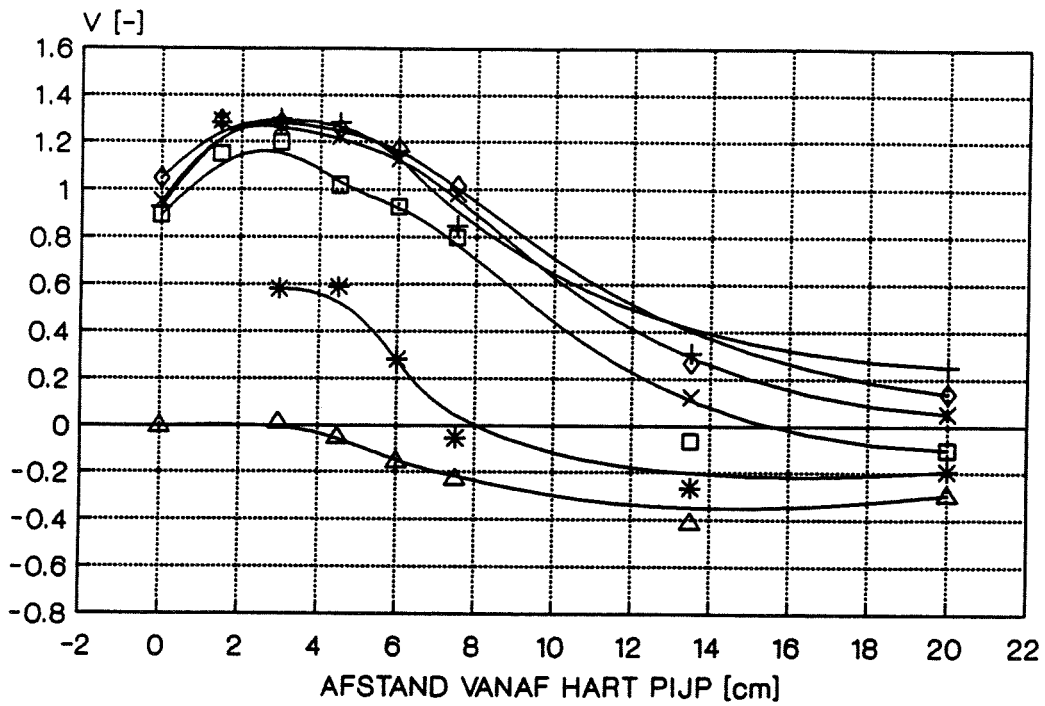
—△— SPL=0 cm *— SPL=0.2 cm —□— SPL=0.4 cm
 —*— SPL=0.6 cm —◇— SPL=0.8 cm —+— SPL=1.0 cm

PIJP : 5
 DEBIET : 30 l/s
 \bar{V} = 0.25 m/s
 σ = 0.025 m/s



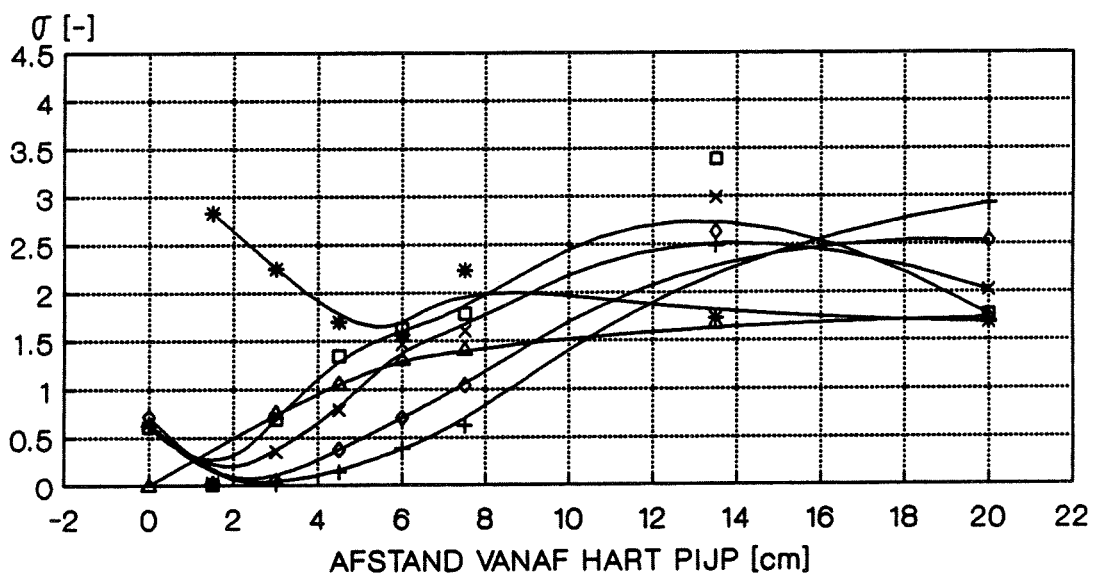
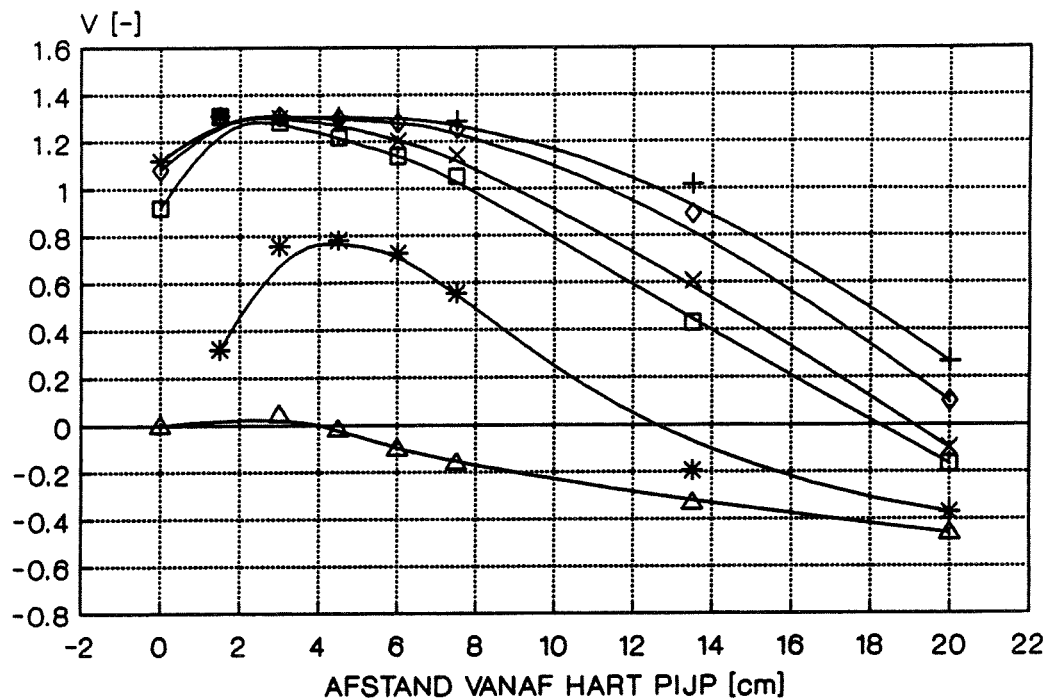
—△— SPL=0 cm —*— SPL=0.2 cm —□— SPL=0.4 cm
 —×— SPL=0.6 cm —◇— SPL=0.8 cm —+— SPL=1.0 cm

PIJP : 1
 DEBIET : 60 l/s
 \bar{v} = 0.50 m/s
 $\bar{\sigma}$ = 0.05 m/s



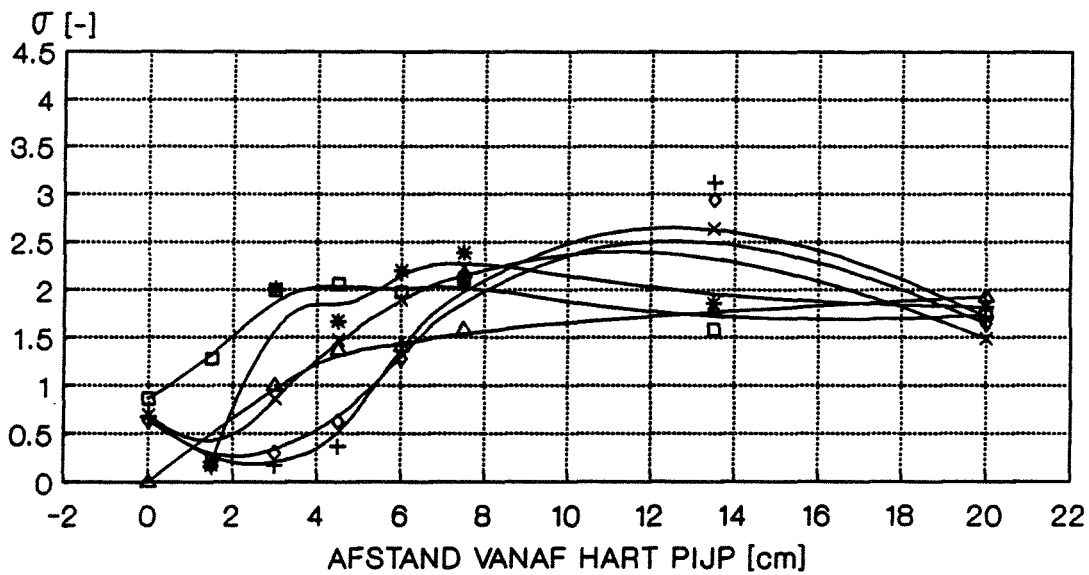
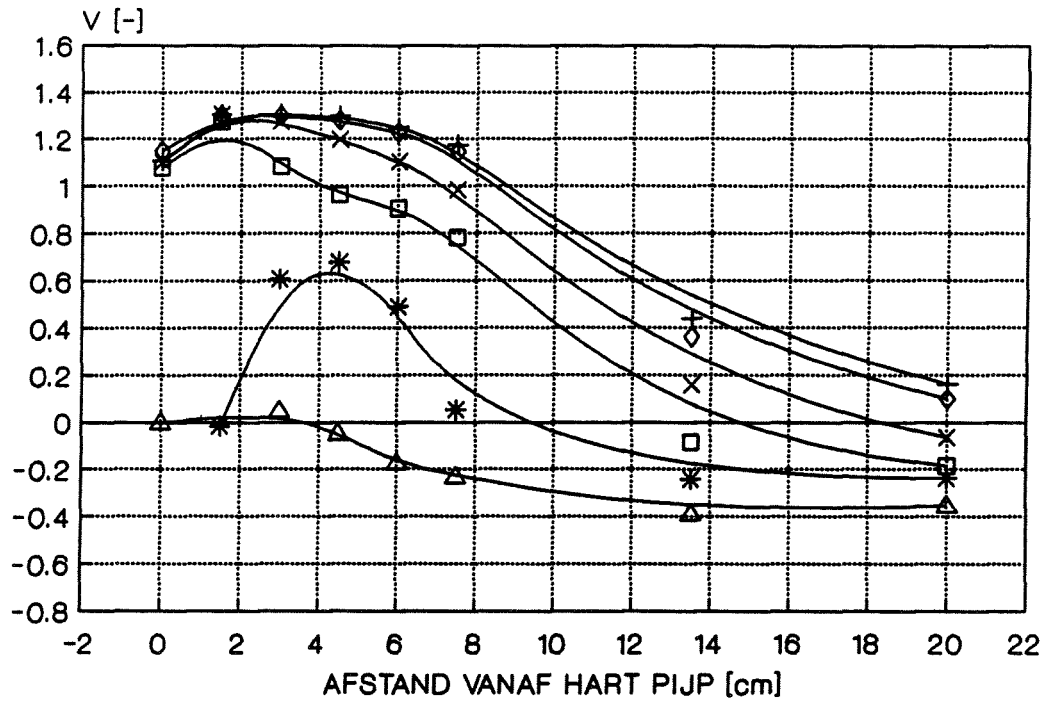
—△— SPL=0 cm	—*— SPL=0.2 cm	—□— SPL=0.4 cm
—×— SPL=0.6 cm	—◇— SPL=0.8 cm	—+— SPL=1.0 cm

PIJP : 2
 DEBIET : 60 l/s
 \bar{V} = 0.50 m/s
 $\bar{\sigma}$ = 0.05 m/s



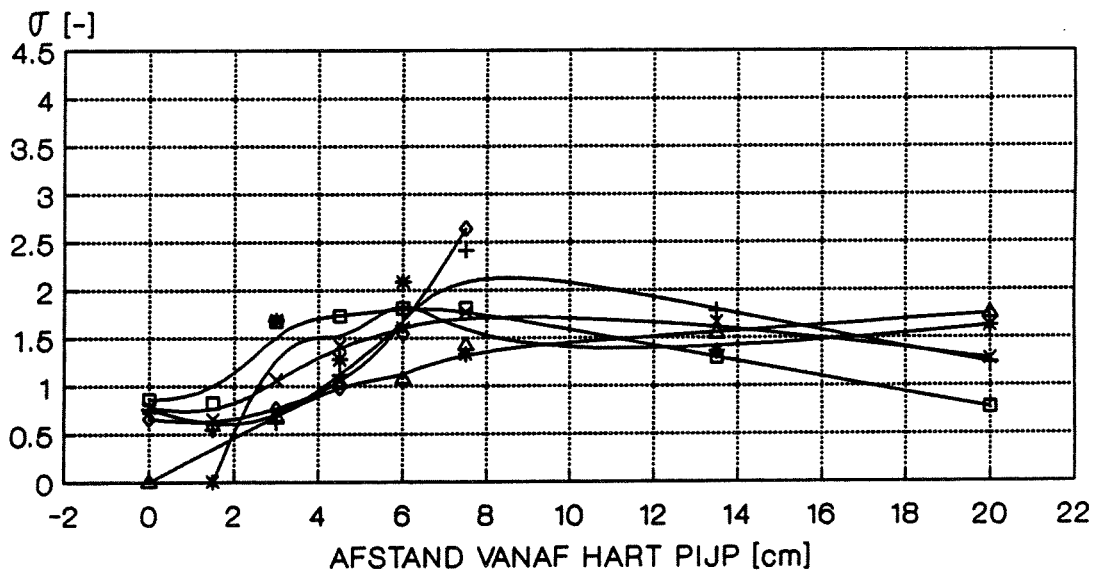
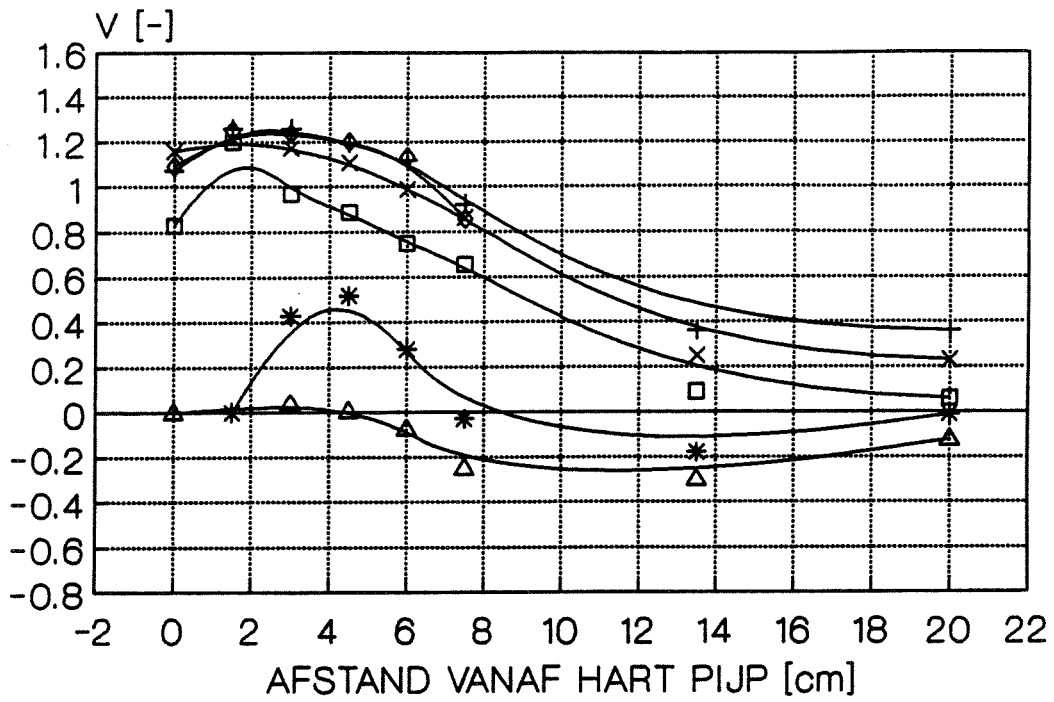
—▲— SPL=0 cm —*— SPL=0.2 cm —□— SPL=0.4 cm
 —x— SPL=0.6 cm —◇— SPL=0.8 cm —+— SPL=1.0 cm

PIJP : 3
 DEBIET : 60 l/s
 \bar{v} = 0.50 m/s
 $\bar{\sigma}$ = 0.05 m/s



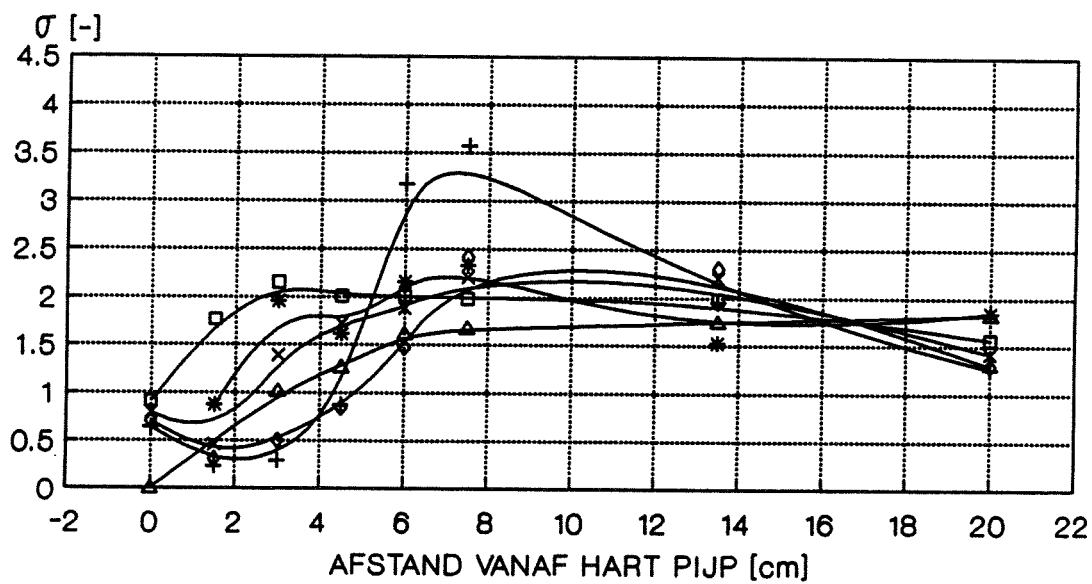
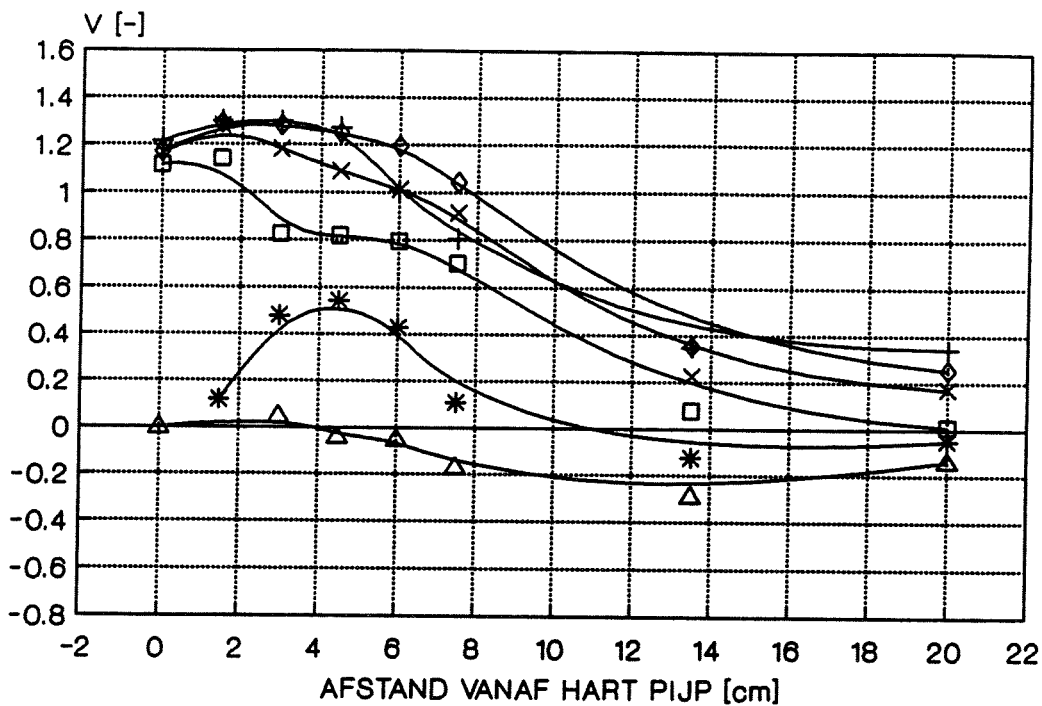
—▲— SPL=0 cm	—*— SPL=0.2 cm	—□— SPL=0.4 cm
—x— SPL=0.6 cm	—◇— SPL=0.8 cm	—+— SPL=1.0 cm

PIJP : 4
 DEBIET : 60 l/s
 \bar{v} = 0.50 m/s
 $\bar{\sigma}$ = 0.05 m/s



—▲— SPL=0 cm *— SPL=0.2 cm —■— SPL=0.4 cm
 —×— SPL=0.6 cm —◇— SPL=0.8 cm —+— SPL=1.0 cm

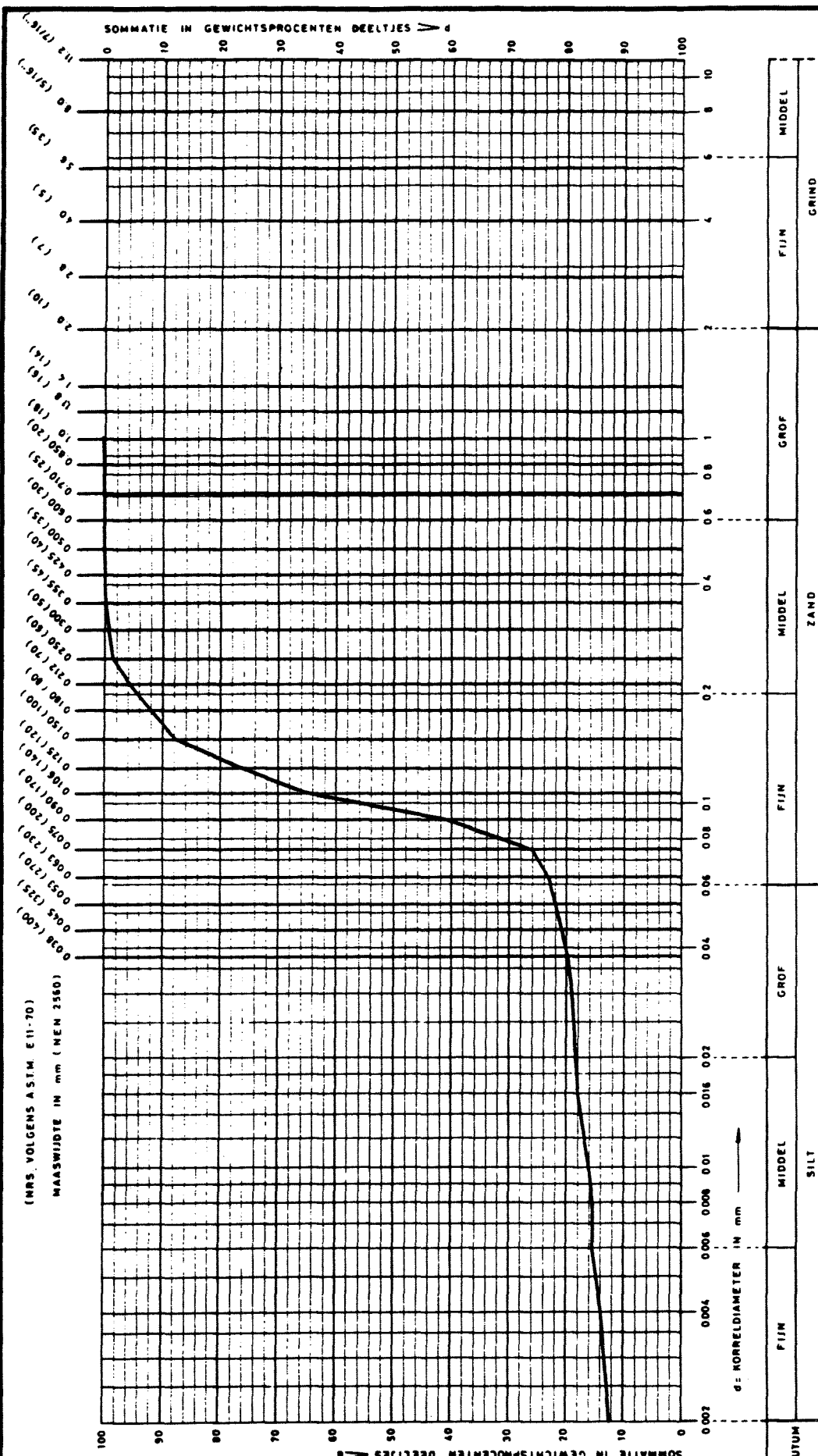
PIJP : 5
 DEBIET : 60 l/s
 \bar{v} = 0.50 m/s
 $\bar{\sigma}$ = 0.05 m/s



—▲— SPL=0 cm —*— SPL=0.2 cm —□— SPL=0.4 cm
 —x— SPL=0.6 cm —◇— SPL=0.8 cm —+— SPL=1.0 cm

BIJLAGE F

Zeefkromme zand-slibmengsel Oestergronden



BORING	MONSTER	DIEPTE IN m TOV N.A.P.
	1	

GRONDMECHANICA DELFT

Postbus 69, 2600 AB Delft
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21
Telex 38234 soil nl

89-06-10

CO - 309250

KORRELVERDELINGSDIAGRAM

BIJL.

get
gec
form
A4