

**Wind-, golf-, en stromingsgeïnduceerd
sedimenttransport in kribvakken langs
de Waal**

Kribvakmetingen Druten/Ochten juli 1996 tot april 1997

Roger Lenders
Bas van Maren
Jan-Willem Mol

Juni 1998
ICG 98.10



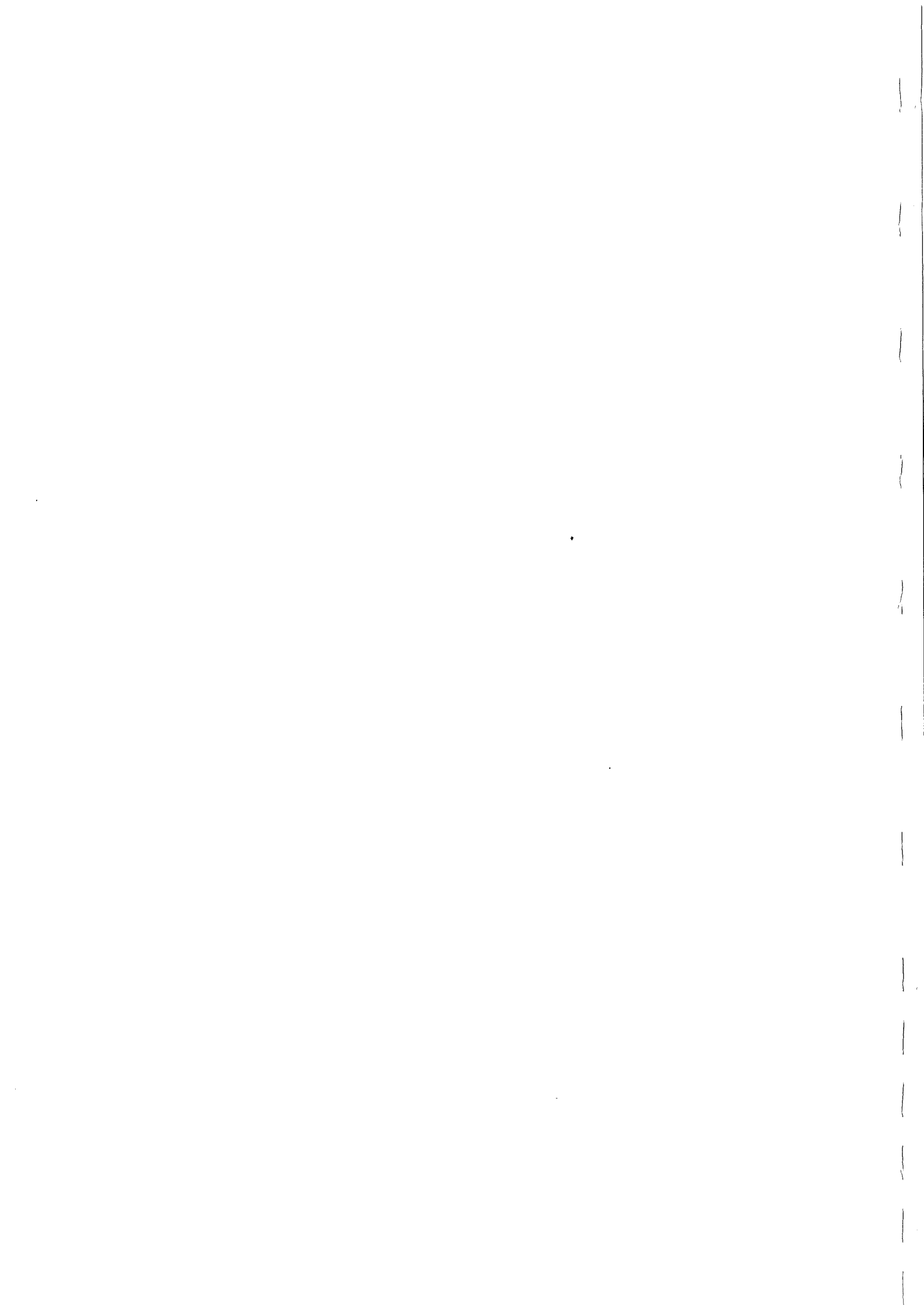
Wind-, golf-, en stromingsgeïnduceerd sedimenttransport in
kribvakken langs de Waal

Kribvakmetingen Druten/Ochten juli 1996 tot april 1997

Roger Lenders
Bas van Maren
Jan-Willem Mol

Juni 1998

Vakgroep Fysische Geografie
Universiteit Utrecht
Heidelberglaan 2
3584 CS Utrecht



Voorwoord

De voorliggende rapportage heeft betrekking op een onderzoek naar de sedimenthuishouding van een viertal kribvakken langs de Waal. Het onderzoek betreft een studie naar de hydrodynamische invloed van scheepvaart op de sedimenthuishouding en de invloed van eolisch zandtransport op de sedimenthuishouding in vier kribvakken langs de Waal. Het onderzoek is in samenwerking met het RIZA, het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling uitgevoerd. De fluviatiele metingen zijn uitgevoerd in juni en juli 1996. Het eolisch meetprogramma is uitgevoerd in de periode juli 1996 tot april 1997.

Onze dank gaat uit naar Dr. J.H. van den Berg, Drs. N.M. Kruyt en Dr. A. Kroon (allen Universiteit Utrecht) en Dr. W.B.M. ten Brinke (RIZA) voor hun stimulerende begeleiding en leerzame discussies. Verder worden bedankt: De bemanning van het meetschip de 'Conrad', voor hun hulp tijdens het uitvoeren van metingen; het personeel van het Fysisch Geografisch Laboratorium van de Universiteit Utrecht, voor de tijd en moeite die er in het oplossen van problemen van technische of materiële aard is gestoken; S.M. Arens (Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde, Universiteit van Amsterdam), voor het in bruikleen geven van zandvangers; G. Sterk (Vakgroep Tropische Cultuurtechniek, Landbouwniversiteit Wageningen), voor het in bruikleen geven van een saltifoon; en M.G. Kleinhans vakgroep Fysische Geografie, Universiteit Utrecht), voor het geven van adviezen tijdens en na de experimenten met de valkolom.

INHOUD

VOORWOORD	1
INHOUD	3
LIJST VAN FIGUREN.....	7
LIJST VAN TABELLEN.....	11
LIJST VAN BIJLAGEN.....	13
1 INLEIDING	15
1.1 Probleemstelling	16
1.2 Doelstelling.....	16
1.3 Meetlokatie.....	17
1.4 Meetomstandigheden	18
1.5 Literatuur.....	20
2 METHODIEK	21
2.1 Meetprotocol en meetinstrumenten fluviaatiele metingen	21
2.1.1 Instrumentatie	21
2.1.2 Meetprotocol	23
2.1.3 Opname scheepspassages.....	24
2.1.4 De analyse van de tijdreeksen.....	25
2.2 Meetprotocol en meetinstrumenten eolische metingen	26
2.2.1 Instrumentatie	26
2.2.2 Meetprotocol	28
2.3 Bepaling van de morfologie van het gebied	32
2.3.1 Bepaling van de morfologie.....	32
2.3.2 De interpolatie van de waterpasmetingen	32
2.3.3 De interpolatie van de echolodngen.....	32
2.4 Bepaling van de korrelgrootte van het gebied	33
2.5 Literatuur.....	34
3 DE OPGEWEKTE BODEMSCHUIFSPANNINGEN	36

3.1 Inleiding	36
3.1.1 Inleiding	36
3.1.2 Probleemstelling	36
3.1.3 De doelstelling	36
3.2 Het literatuuronderzoek en de onderzoeksvragen	37
3.2.1 Het Literatuuronderzoek	37
3.2.2 Hypothesen en onderzoeksvragen.....	41
3.2.2.1 Eerste hypothese	41
3.2.2.2 Tweede hypothese.....	41
3.3 Methodiek	43
3.3.1 Het berekenen van de bodemschuifspanning.....	43
3.3.1.1 Het bepalen van de T_0 situatie.....	43
3.3.1.2 De totale bodemschuifspanning.....	43
3.3.1.3 De bodemschuifspanning ontstaan door stroming	44
3.3.1.4 De bodemschuifspanning ontstaan door golven	49
3.3.2 Het karakteriseren van de schepen.....	52
3.4 Resultaten	53
3.4.1 De morfologie van het gebied.....	53
3.4.1.1 De morfologie tijdens de meetcampagne.....	53
3.4.1.2 Morfologische veranderingen	53
3.4.2 De karakteristieken van de korrelgrootte in het gebied	54
3.4.3 De bodemschuifspanning.....	55
3.4.3.1 De bodemschuifspanning tijdens de T_0 situatie	55
3.4.3.2 De bodemschuifspanning tijdens de passage van een schip	57
3.4.3.3 Welke scheepskarakteristieken bepalen de grootte van de bodemschuifspanning?.....	63
3.4.3.4 Wat is het aandeel van de golven in de totale bodemschuifspanning?	66
3.4.3.5 De toename richting de oever van de bodemschuifspanning ontstaan door secundaire golven	68
3.4.3.6 De bodemschuifspanning tijdens de passage van meerdere schepen achter elkaar	69
3.4.3.7 Vindt er in een bepaalde richting sedimenttransport plaats tijdens de passage van een schip ?	73
3.5 Discussie	74
3.6 Conclusies	77
3.6.1 Algemene conclusies.....	77
3.6.2 Conclusies met betrekking tot de hypothesen en onderzoeksvragen.....	79
3.6.2.1 Conclusie met betrekking tot de eerste hypothese	79
3.6.2.2 Conclusie met betrekking tot de tweede hypothese	79
3.7 Literatuur	80
4 STROMINGSPATROON EN SEDIMENTTRANSPORT	81
4.1 Inleiding	81
4.2 Literatuuronderzoek	82
4.2.1 Stromingspatroon	82
4.2.1.1 Stroming als gevolg van de rivierafvoer	82
4.2.1.2 De primaire scheepsgolf.....	83
4.2.2 Secundaire scheepsgolven en windgolven.....	87

4.2.3 Water- en sedimentbeweging in het kribvak.....	89
4.2.3.1 Bodemerosie	89
4.2.3.2 Oevererosie	90
4.2.3.3 Aanzanding van het kribvak	90
4.2.3.4 Scheepsinvloed	90
4.2.4 Hypothesen	91
4.3 Methodiek	92
4.3.1 Stromingspatroon.....	92
4.3.2 Berekening van het transport	93
4.3.3 Ruimtelijk erosie- en sedimentatie patroon	94
4.3.4 Toetsing hypothesen	95
4.4 Resultaten.....	97
4.4.1 Bodemligging.....	97
4.4.2 Natuurlijke rivierafvoer.....	98
4.4.2.1 Stromingspatroon zonder scheepvaart	98
4.4.2.2 Transport zonder scheepvaart	101
4.4.3 Scheepvaart	103
4.4.3.1 Patroon van stroming tijdens scheepspassages	103
4.4.3.2 Transportbanen van meerdere scheepspassages.....	104
4.4.3.3 Scheepskenmerken.....	110
4.4.4 Fouten bespreking.....	113
4.5 Discussie	115
4.5.1 Stromingspatroon en transportpaden	115
4.5.2 Invloed scheepvaart.....	116
4.5.2.1 Stromingspatroon tijdens scheepspassages	116
4.5.2.2 Invloed scheepskenmerken	116
4.5.2.3 Transport ten gevolge van schepen.....	117
4.5.2.4 Erosie en sedimentatie in de kribvakken.....	117
4.5.2.5 Kribvakgeometrie	118
4.6 Conclusie	120
4.7 Literatuurlijst	122
5 EOLISCH ZANDTRANSPORT	123
5.1 Inleiding	123
5.2 Theorie eolisch zandtransport.....	123
5.2.1 Inleiding	123
5.2.2 Wijze van eolisch zandtransport	123
5.2.3 Luchtstromen, schuifspanning en bodemruwheid	124
5.2.4 Kritische schuifspanningssnelheid.....	126
5.2.5 Schuifspanningssnelheid tijdens zandbeweging	127
5.2.6 Zandtransport door saltatie.....	128
5.2.7 Zandtransport over bodem	129
5.2.8 Totale zandtransport door wind	130
5.2.9 Zandtransport door een meetraai.....	131

5.2.10 Correctie voor invangbreedte en efficiëntie zandvanglers	133
5.3 Methodiek	134
5.3.1 Algemeen	134
5.3.2 Verband tussen windsnelheid en hoeveelheid zandtransport.....	135
5.3.3 Langperiodische waarnemingen van windsnelheid en -richting	135
5.3.4 Ruimtelijke vertaalslag naar de gehele Waal	136
5.4 Resultaten.....	138
5.4.1 Windsnelheidsprofiel boven kribvakstrand	138
5.4.2 Vochtgehalte kribvakstrand	138
5.4.3 Gemeten zandtransport	138
5.4.4 Berekend zandtransport.....	140
5.4.5 Langperiodisch windklimaat.....	142
5.4.6 Vertaalslag naar de gehele Waal	144
5.4.6.1 Verband tussen waterstand en strandoppervlak in het onderzoeksgebied	144
5.4.6.2 Oriëntatie, morfometrie en oppervlak kribvakstranden	145
5.4.6.3 Representativiteit kribvakken onderzoeksgebied.....	145
5.4.6.4 Verband tussen waterstand en strandoppervlak/strandbreedte.....	146
5.4.6.5 Jaarlijks zandverlies uit kribvakken langs de Waal	146
5.5 Discussie	148
5.5.1 Windsnelheidsprofiel boven kribvakstrand	148
5.5.2 Vochtgehalte kribvakstrand	148
5.5.3 Gemeten zandtransport	148
5.5.4 Berekend zandtransport.....	149
5.5.5 Langperiodisch windklimaat.....	149
5.5.6 Vertaalslag naar de gehele Waal	150
5.5.6.1 Verband tussen waterstand en strandoppervlak in het onderzoeksgebied	150
5.5.6.2 Oriëntatie, morfometrie en oppervlak kribvakstranden	150
5.5.6.3 Representativiteit kribvakken onderzoeksgebied.....	150
5.5.6.4 Verband tussen waterstand en strandoppervlak/strandbreedte.....	150
5.5.6.5 Jaarlijks zandverlies uit kribvakken langs de Waal	151
5.6 Conclusies.....	152
5.7 Aanbevelingen.....	152
5.8 Literatuur.....	153
6 ALGEMENE CONCLUSIES	155
BIJLAGEN.....	156

Lijst van figuren

Figuur 1.3.1: Locatie van het meetgebied en de vier bestudeerde kribvakken.....	17
Figuur 1.4.1: Dagelijkse Rijnafvoer bij Lobith van januari tot en met september 1996.	18
Figuur 1.4.2: Waterstanden tijdens meetdagen.....	18
Figuur 1.4.3: Windsnelheid tijdens meetdagen	19
Figuur 1.4.4: Windrichting tijdens meetdagen	19
Figuur 2.1.1: Schematische weergave van het grote frame.	21
Figuur 2.1.2: Schematische weergave miniframe.....	22
Figuur 2.1.3: Lokaties van het grote frame en de 4 lokaties van de 2 kleine frames.	24
Figuur 2.2.1: Anemometeropstelling.....	26
Figuur 2.2.2: Windsnelheids- en richtingemeter op 10m hoogte	27
Figuur 2.2.3: Voor- en zijaanzicht saltifoon.....	27
Figuur 2.2.4: Zijaanzicht zandvanger	28
Figuur 2.2.5: Locaties meetinstrumenten kribvak 1 aan zuidoever.....	30
Figuur 2.2.6: Locaties meetinstrumenten kribvak 3 aan noordoever.....	31
Figuur 3.2.1: Componenten van de waterbeweging en hun golfverschijnselen	38
Figuur 3.2.2: De verandering van de golfvoortplantingsrichting van de secundaire golven..	39
Figuur 3.3.1: Het werkelijke snelheidsprofiel en het logaritmische snelheidsprofiel.....	44
Figuur 3.3.2: De gevoeligheidsanalyse voor $\tau_{b,c}$	47
Figuur 3.3.3: De resultante snelheid	48
Figuur 3.3.4: Stroomsnelheden onder een korte golf.....	49
Figuur 3.3.5: De gevoeligheid van $\tau_{b,w}$, de periode van de golf en de bodemruwheid.	50
Figuur 3.4.1: De waterbeweging tijdens de burst van 24-6 van 11.00.00 tot 11.35.00 uur....	54
Figuur 3.4.2: Het OBS signaal tijdens de burst van 24-6 van 11.00.00 tot 11.35.00 uur.....	55
Figuur 3.4.3: De bodemschuifspanning ontstaan door stroming tijdens de T_0 situatie	55
Figuur 3.4.4: De bodemschuifspanning ontstaan door golven tijdens de T_0 situatie.....	55
Figuur 3.4.5: De bodemschuifspanning ontstaan door stroming en golven tijdens de T_0 situatie.....	56
Figuur 3.4.6: De waterbeweging tijdens de burst van 24-6 van 13.00.00 tot 13.35.00 uur....	57
Figuur 3.4.7: Het OBS signaal tijdens de burst van 24-6 van 13.00.00 tot 13.35.00 uur.....	57
Figuur 3.4.8: De bodemschuifspanning ontstaan door stroming	58
Figuur 3.4.9: De bodemschuifspanning ontstaan door golven	58
Figuur 3.4.10: De bodemschuifspanning ontstaan door stroming en golven	58
Figuur 3.4.11: De berekende bodemschuifspanningen tijdens scheepspassages, inclusief de T_0 situatie.....	60
Figuur 3.4.12: De berekende bodemschuifspanningen tijdens scheepspassages, exclusief de T_0 situatie.....	61
Figuur 3.4.13: Het verband tussen de bodemschuifspanning scheepskarakteristieken.	63
Figuur 3.4.14: De relatie tussen de scheepskarakteristieken en de bodemschuifspanning....	64
Figuur 3.4.15: De verhouding tussen de bodemschuifspanning ontstaan door stroming en door golven bij het rivierframe.	65
Figuur 3.4.16: De verhouding tussen de bodemschuifspanning ontstaan door stroming en door golven bij het oeverframe.	65
Figuur 3.4.17: De bodemschuifspanning ontstaan door secundaire scheepsgolven.....	67
Figuur 3.4.18: De toename richting de oever van de bodemschuifspanning ontstaan door golven.	68
Figuur 3.4.19: De scatterplot van de orbitaalbeweging	69

Figuur 3.4.20: De scatterplot van de orbitaalbeweging tijdens de passage van een duwbak .	69
Figuur 3.4.21: De scatterplot van de orbitaalbeweging tijdens de passage van een aantal schepen.....	69
Figuur 3.4.22: Het OBS signaal van de burst op 24 juni van 12.00.00 tot 12.35.00	70
Figuur 3.4.23: De vergelijking van een individuele passage van een schip en de passage van een schip in een groep.....	71
Figuur 4.2.1: Theoretisch stroombeeld in een groot kribvak met twee neren..	81
Figuur 4.2.2: Waterbeweging als gevolg van het primaire golfsysteem.....	82
Figuur 4.2.3: Stroombeeld in een groot kribvak tijdens opvarende duwstelpassage.....	83
Figuur 4.2.4: Hypothetisch stroombeeld in een groot kribvak tijdens afvarende duwstelpassage.....	85
Figuur 4.2.5: Secundaire scheepsgolven.....	86
Figuur 4.2.6: Afbuiging van de golfrichting door de stromingsrichting.	87
Figuur 4.3.1: Verticale verdeling van de snelheid, concentratie en transport.....	92
Figuur 4.4.1: Meetburst van 24 juni, 11 uur.	98
Figuur 4.4.2: Meetburst van 24 juni, 13 uur.	99
Figuur 4.4.3: Stromingspatroon in een groot kribvak, zuidoever.....	104
Figuur 4.4.4: Stromingspatroon in een klein kribvak, zuidoever..	105
Figuur 4.4.5: Stromingspatroon in een groot kribvak, noordoever..	105
Figuur 4.4.6: Invloed van een opvarend en een afvarend duwstel op het stromingspatroon op een groot kribvak, zuidoever.	106
Figuur 4.4.7: Invloed van een opvarend en een afvarend duwstel op het stromingspatroon op een klein kribvak, zuidoever.....	107
Figuur 4.4.8: Invloed van een opvarend en een afvarend duwstel op het stromingspatroon op een groot kribvak, noordoever.....	108
Figuur 4.4.9: Invloed scheepstype op de toename van het sedimenttransport.....	110
Figuur 4.4.10: Invloed snelheid op de toename van het sedimenttransport.	109
Figuur 4.4.11: Invloed diepgang schepen op de toename van het sedimenttransport.	110
Figuur 4.4.12: Invloed vaar afstand uit de oever op de toename van het sedimenttransport.	110
Figuur 4.4.13: Scheepsgeïnduceerde toename sedimenttransport tijdens de meetcampagne.	111
Figuur 4.4.14: Scheepsgeïnduceerde verandering van richting sedimenttransport tijdens de meetcampagne.	111
Figuur 4.4.15: Mogelijke fout in schatting gemiddelde.	113
Figuur 5.2.1: Verticale windsnelheidsverdeling	123
Figuur 5.2.2: Verandering windsnelheidsverticalen onder invloed van zandtransport	126
Figuur 5.2.3: Schema baan salterende korrel.....	127
Figuur 5.2.4 :Verband tussen windkracht en de waarde van E_0	131
Figuur 5.2.5 : Berekend verband tussen strijklengte en de verzadiging van de transportverticaal	131
Figuur 5.2.6: Efficiëntie zandvangers.....	132
Figuur 5.3.1: Positie meetraai	133
Figuur 5.3.2: Bestudeerd traject Waal	135
Figuur 5.3.3: Maandgemiddelde waterstand bij Tiel over de periode 1960-1994.....	136
Figuur 5.3.4: Invloed kribben op zandverlies	136
Figuur 5.4.1: Windsnelheidsprofiel voor meetdag 02/07/'96.....	137
Figuur 5.4.2: Verband tussen strijklengte en de verzadiging van de transportverticaal	138
Figuur 5.4.3: Verband tussen saltatieflux en hoeveelheid ingevangen zand	138
Figuur 5.4.4: Verband tussen windsnelheid en de saltatieflux	139

Figuur 5.4.5: Verband tussen ingevangen hoeveelheid zand en invanghoogte	139
Figuur 5.4.6: Verband tussen het gemeten en berekend transport.....	140
Figuur 5.4.7: Verdeling van de windsnelheid en -richting in De Bilt	141
Figuur 5.4.8: Verband tussen windsnelheid in De Bilt en windsnelheid in het meetgebied	142
Figuur 5.4.9: Verband tussen standoppervlak en waterstand in het onderzoeksgebied.....	143
Figuur 5.4.10: Verband tussen waterstand en strandoppervlak en tussen waterstand en strandbreedte voor gehele Waal.....	145
Figuur 5.4.11: Zandverlies uit kribvakken langs de Waal per windsterkte en windrichting	146

Lijst van tabellen

Tabel 1.4.1: Weersomstandigheden tijdens meetdagen.....	19
Tabel 2.1.1: Meetlocaties van het grote frame.....	23
Tabel 2.1.2: Vaarposities.....	24
Tabel 2.1.3: Scheepstypen.....	25
Tabel 2.2.1: Gegevens betreffende datum, lokatie, en duur meetprogramma.....	28
Tabel 3.3.1: De verschillende type schepen en hun karakteristieken.....	52
Tabel 3.4.1: De karakteristieken van de bodemonmonsters en het zand in het rivierwater.....	54
Tabel 3.4.2: De bodemschuifspanning tijdens de T_0 situatie de kritieke bodemschuifspanning per kribvak.....	57
Tabel 3.4.3: Het aandeel van de bodemschuifspanning ontstaan door scheepsgolven in de totale bodemschuifspanning per kribvak per miniframe.....	67
Tabel 4.4.1: T_0 situatie kribvak 1 en 2.....	98
Tabel 4.4.2: T_0 situatie kribvak 3 en 4.....	101
Tabel 5.2.1: Waarden E_0	132
Tabel 5.3.1: Schaal van windsnelheden.....	135
Tabel 5.4.1: Gemiddelde vochtgehalten voor de verschillende meetdagen.....	138
Tabel 5.4.2: Hoeveelheid ingevangen zand, gecorrigeerd voor invangbreedte en efficiëntie.....	138
Tabel 5.4.3: Berekende potentiële zandtransporten.....	141
Tabel 5.4.4: Berekende potentiële zandtransporten voor verschillende windkrachten.....	142
Tabel 5.4.5: Jaargemiddelde frequentieverdeling van windrichting en windsnelheid in meetgebied.....	144
Tabel 5.4.6: Jaarlijks zandtransport bij verschillende windrichting.....	141
Tabel 5.4.7: Jaarlijks zandtransport door meetraai.....	141

}
}
}
}
}
}
}
}
}
}
}
}
}

Lijst van bijlagen

Hoofdstuk 2:

Bijlage 2.1: Calibratie van de OBS sensoren van de miniframes

Bijlage 2.2: Interpolatie methoden, geostatistiek

Hoofdstuk 3:

Bijlage 3.1: De hoogtekaarten van de vier bestudeerde kribvakken

Bijlage 3.2: De frakties van de zevenstet ter bepaling van de korrelgrootte

Bijlage 3.3: De verschilkaarten van kribvak 1, 2 en 3

Bijlage 3.4: De resultaten van de korrelgrootteanalyse

Bijlage 3.5: De resultaten van de berekeningen uitgevoerd op de dataset van kribvak 1 en 2

Bijlage 3.6: De resultaten van de berekeningen uitgevoerd op de dataset van kribvak 3 en 4

Bijlage 3.7: de resultaten van de berekeningen uitgevoerd op de passage van een groep schepen en op individuele passages

Bijlage 3.8: De verschillende bestudeerde type schepen en hun karakteristieken

Hoofdstuk 4:

Bijlage 4.1: Frameposities en korrelgroottes

Bijlage 4.2: Kaarten

Bijlage 4.3: Stromingsbeeld en transportbanen zonder scheepvaart

Bijlage 4.4: Invloed scheepvaart op transport en stroming

Bijlage 4.5: Transportvectoren en scheepskenmerken

Bijlage 4.6: Relatie scheepskenmerken en sedimenttransport

Hoofdstuk 5:

Bijlage 5.1: Windsnelheidsprofielen

Bijlage 5.2: Verband tussen saltatieflux en windsnelheid op 0.18m

Bijlage 5.3: Verband tussen ingevangen hoeveelheid zand en invanghoogte

Geheel:

Appendix 1: Gebruikte symbolen

Appendix 2: Gebruikte software



1 Inleiding

Een natuurlijke rivierloop is aan een hoge mate van ruimtelijke en temporele verandering onderhevig, in de vorm van sedimentatie in de binnenbochten en erosie in de buitenbochten. Om dit tegen te gaan worden kribben aangelegd. Ook in de Waal is dit het geval. Kribben zijn steenlichamen loodrecht op de hoofdstroom van de rivier, zodat de stroomdraad wordt vastgelegd. Door concentratie van de hoofdstroom tussen de kribben kan de rivier de oevers niet meer rechtstreeks eroderen. In plaats daarvan wordt door de kribben zand ingevangen als gevolg van vertraging van de stroomsnelheid in het kribvak. Tussen de kribben is een steil hellend zandstrand ontstaan. De aanwezigheid van dit zandstrand heeft tot gevolg dat de energie van de golven is gedissipeerd waardoor de erosieve werking ervan op de oevers afneemt.

De breedte van dit zandstrand ligt in de Waal in de orde van enkele tientallen meters. Aan de rivierkant gaat dit strand via een steilrand over in de hoofdgeul van de rivier, welke een gemiddelde waterdiepte van zes meter heeft. Aan de oeverzijde gaat het zandstrand over in de begroeiing van de uiterwaarden. Het zandstrand vormt dus de overgang tussen de rivier en haar oevers. Scheepvaart heeft tijdens lage afvoeren een belangrijke invloed op erosie- en sedimentatieprocessen op dit zandlichaam. De overgang van het zandstrand naar begroeiing is een dynamisch evenwicht tussen enerzijds zandafzetting tijdens hoge afvoeren en verstuiwing van zand tijdens lage afvoeren, en anderzijds de mogelijkheid van planten om zich te vestigen. Deze mogelijkheid wordt weer bepaald door de mate van oevererosie.

De laatste jaren is er een steeds grotere belangstelling voor bescherming van natuurgebieden en het herstel daarvan. Dit geldt ook voor de Nederlandse riviergebieden. Aangezien de kribvakken de overgang vormen tussen de rivier en haar oevers spelen deze een sleutelrol in een mogelijk herstel van de natuurlijke vegetatie en morfologie van de oevers. Vandaar dat er studies worden uitgevoerd naar de sedimentbewegingen in kribvakken. De beste manier om inzicht te krijgen in de sedimentbewegingen is door deze in het veld te meten.

Door het RIZA in Arnhem is een meetcampagne opgesteld om het inzicht in de sedimenthuishouding van een kribvak te vergroten. Door Dr. W.B.M. Ten Brinke werd een onderzoeksvoorstel geformuleerd betreffende de sedimenthuishouding van kribvakken langs de Waal (Ten Brinke, 1996^a). Dit onderzoeksvoorstel heeft geleid tot een meetprogramma met veldmetingen in de kribvakken langs de Waal (Ten Brinke, 1996^b).

Binnen dit meetprogramma bestond voor drie doktoraal studenten Fysische Geografie de mogelijkheid om drie afstudeerprojecten uit te voeren. Twee opdrachten betroffen een studie naar de hydrodynamische invloed van scheepvaart op de sedimenthuishouding in vier kribvakken langs de Waal. Door R.J.M. Lenders is een studie uitgevoerd naar de opgewekte bodemschuifspanningen tijdens scheepspassages. Door D.S. van Maren is een studie uitgevoerd naar het ruimtelijke patroon van de sedimentbeweging binnen een kribvak tijdens een passage van een schip. De derde opdracht betrof een studie naar het eolisch zandtransport in een viertal kribvakken langs de Waal. Dit onderzoek is uitgevoerd door J.W. Mol.

In hoofdstuk 1 zullen de probleemstelling, de doelstelling, de meetlocatie en de meetomstandigheden van dit onderzoek aan bod komen. Hoofdstuk 2 behandelt de toegepaste methodiek en hoofdstuk 3, 4 en 5 geven de resultaten weer van de drie doctoraalonderzoeken. In hoofdstuk 6 worden de algemene conclusies met betrekking tot de sedimenthuishouding in

kribvakken behandeld. Aan het eind van elk hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de literatuur waarnaar in de tekst is verwezen.

1.1 Probleemstelling

In verscheidene kribvakken langs de Nederlandse rivieren is erosie van de bodem in kribvakken geconstateerd (Kruyt, 1997). Het verlies van sediment kan de volgende oorzaken hebben:

- een toename van de scheepsgeïnduceerde hydraulische belasting,
- zandverlies door eolisch zandtransport.

Aangezien de afgelopen tien jaar alleen laboratoriumstudies en computerberekeningen zijn uitgevoerd, werden veldmetingen noodzakelijk geacht om het inzicht te vergroten.

1.2 Doelstelling

Door ten Brinke (1996^a) werd een onderzoeksvorstel geschreven waarin de aanpak van onderzoek naar de sedimentbewegingen in kribvakken zijn geformuleerd. Conform dit voorstel zijn veldmetingen uitgevoerd langs een recht deel van de Waal. De doelstelling van dit projekt luidde:

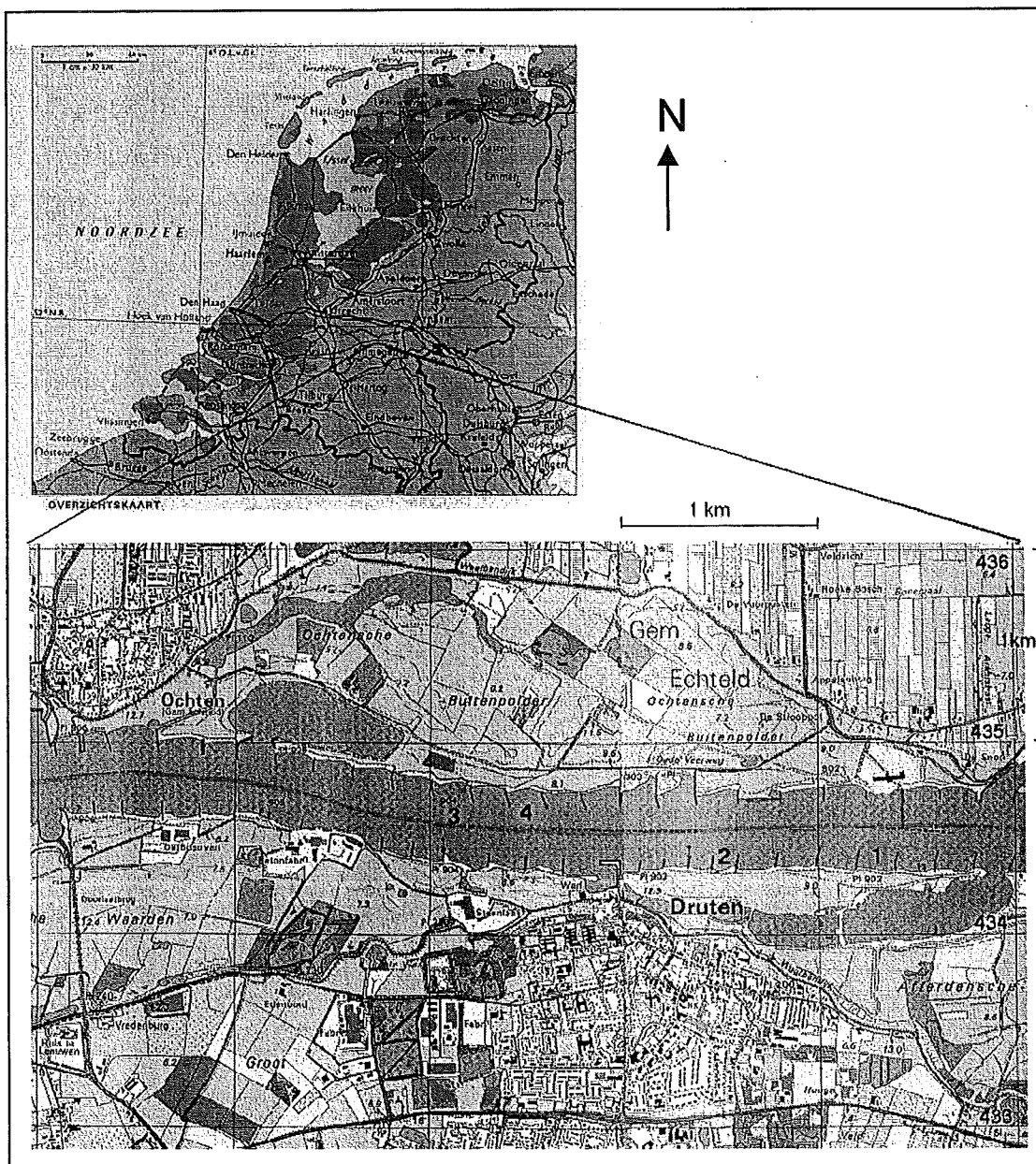
De kwantificering van de temporele variatie in de netto aan-/afvoer van sediment naar/uit de kribvakken, de analyse van processen en factoren die de sedimentbeweging sturen, en de modellering van de sedimenthuishouding van kribvakken door parametrisatie van causale verbanden.

Sturende processen hierbij zijn (1) waterbeweging door de combinatie van natuurlijke rivierafvoer en schepen, (2) de golfwerking van zowel wind als sloopgolven, (3) de autonome daling van de rivierbodern, en (4) de verstuiwing van zand naar omliggende begroeiing. Sturende factoren zijn (5) de kribvakgeometrie, (6) sedimenteigenschappen, en (7) de aanvoer van sediment.

Het onderzoek moet de kennis omtrent de sedimenthuishouding van een kribvak vergroten met als uiteindelijk doel het opstellen van een sedimentbudget voor kribvakken langs de Waal.

1.3 Meetlokatie

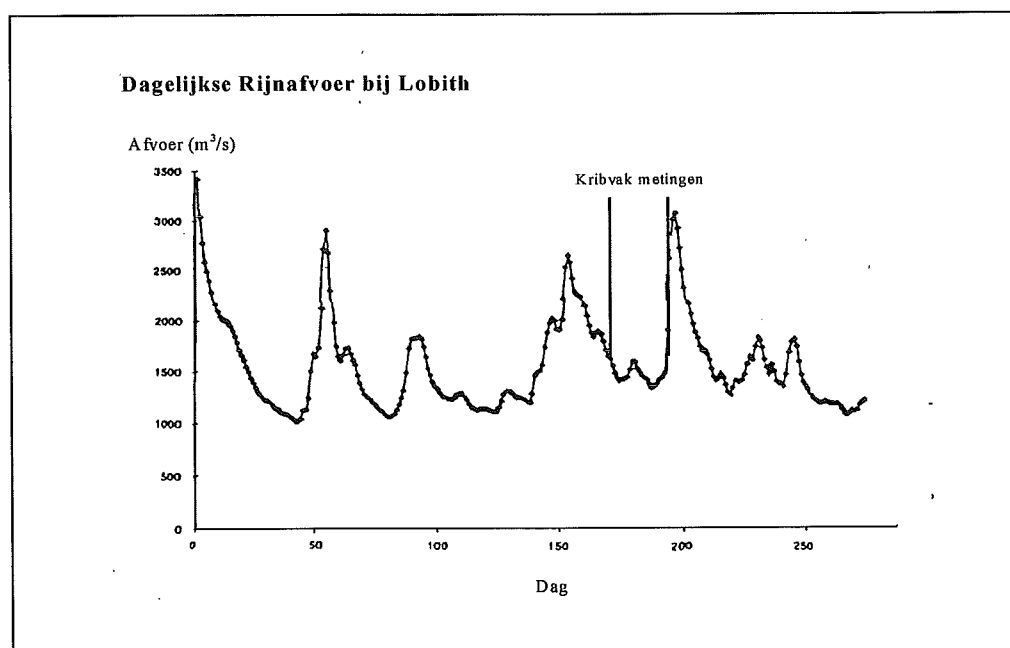
Het veldonderzoek is uitgevoerd in 4 kribvakken langs de Waal. Het meetgebied is een recht gedeelte van de Waal tussen Tiel en Nijmegen, zie figuur 1.3.1 bovenste kaart. Om de verschillende stromingscondities tussen de noord- en zuidoever te kwantificeren zijn 2 kribvakken aan de noordoever bij Ochten gesitueerd en 2 kribvakken aan de zuidoever bij Druten, zie figuur 1.3.1 onderste kaart. Nummering van de kribvakken geeft de meetvolgorde in weken weer. Kribvak 1, 3 en 4 hebben ieder een lengte van ± 200 m, en kribvak 2 van ± 130 m. Verschillen in stromingscondities als gevolg van de kribvakgrootte kunnen hiermee gekwantificeerd worden. Een kribvak van 130 m kan in de Waal als een klein kribvak beschouwd worden, een kribvak van 200 m als groot.



Figuur 1.3.1: de locatie van het meetgebied en de locatie van de vier bestudeerde kribvakken.

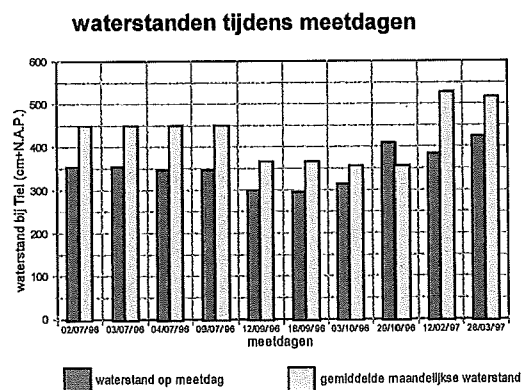
1.4 Meetomstandigheden

Metingen zijn uitgevoerd tussen 17 juni en 12 juli 1996. Gedurende deze periode is 1 kribvak per week gemeten. Zoals uit fig. 1.4.1. blijkt kan de afvoer tijdens deze periode als vrijwel constant beschouwd worden. Alleen op de laatste meetdag is tijdens een duidelijk hogere afvoer gemeten. Wel is het mogelijk dat aan het begin van de meetcampagne effecten van de daarvoor opgetreden hoge afvoergolf nog meespelen. Dit geldt voornamelijk voor sedimentconcentraties in de slibfractie (wash load). De gemiddelde afvoer bij Lobith was tijdens de meetcampagne $1500 \text{ m}^3/\text{s}$, tegenover een jaargemiddelde afvoer van $2300 \text{ m}^3/\text{s}$. De metingen zijn dus tijdens een betrekkelijke lage waterstand uitgevoerd. De temperatuur lag tijdens de hele meetcampagne vrij constant rond $15 \text{ }^\circ\text{C}$.



Figuur 1.4.1: de dagelijkse Rijnafvoer bij Lobith van januari tot en met september 1996.

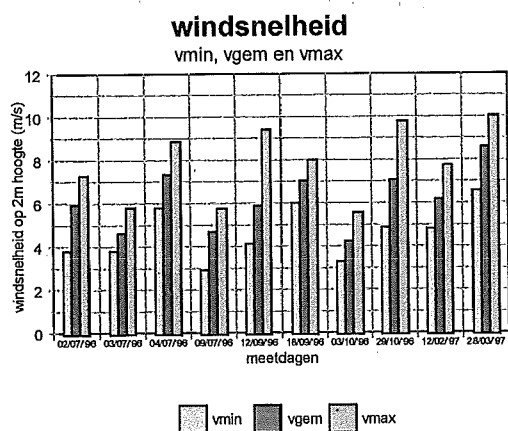
De eolische meetcampagne is verlengd tot 28 maart 1997. De waterstanden op ieder van de meetdagen zijn in figuur 1.4.2 weergegeven. Tevens zijn in de figuur de maand-gemiddelde waterstanden voor de maanden waarin gemeten is opgenomen, zoals die berekend zijn uit de maandgemiddelde afvoer over de periode 1960 tot 1994. Uit de figuur valt af te leiden dat, met uitzondering van meetdag 29/10/'96, de waterstanden tijdens de meetdagen lager zijn dan de gemiddelde maandelijkse waterstand.



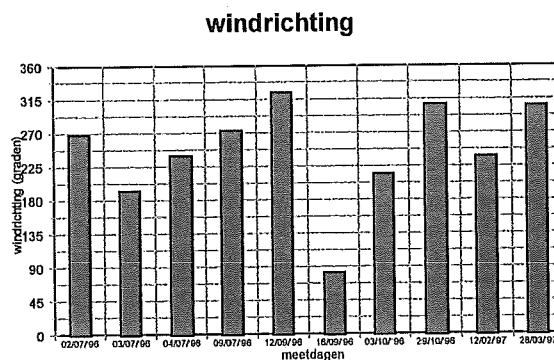
Figuur 1.4.2 waterstanden tijdens meetdagen en gemiddelde maandelijkse waterstanden

In figuur 1.4.3 staat voor ieder van de meetperioden op de verschillende meetdagen de minimum windsnelheid, de maximum windsnelheid en de gemiddelde windsnelheid

weergegeven. Alle windsnelheden zijn gemeten op 2 meter boven het kribvakstrand. In figuur 1.4.4 staat voor ieder van de meetdagen de gemiddelde windrichting weergegeven.



Figuur 1.4.3 Windsnelheid tijdens meetdagen



Figuur 1.4.4 Windrichting tijdens meetdagen

Uit figuur 1.4.3 valt af te leiden dat op ieder van de meetdagen windvlagen zijn voorgekomen. Verder is in de figuur te zien dat de gemiddelde windsnelheid op 2 m hoogte varieert van 4.2 m/s op meetdag 03/10/96 tot 8.6 m/s op meetdag 28/03/97, wat overeenkomt met respectievelijk windsterkten van 3 tot 6 Beaufort. Uit figuur 1.4.4 valt af te leiden dat voor de windrichtingen op de meetdagen geldt dat tijdens het merendeel van de meetdagen een westelijke wind voorkomt. Alleen op meetdag 18/09/96 komt de wind uit oostelijke richting. In tabel 1.4.1 staan voor iedere meetdag de weersomstandigheden omschreven

datum	weersomstandigheden
02/07/96	15°C, van 11:00 tot 12:00 overwegend droog met af en toe een korte regenbui, vanaf ± 12:30 constante regen. Westenwind, 4 Beaufort.
03/07/96	16°C, bewolkt maar droog weer, zodat de wind de bovenlaag van het natte strand langzaam droog blaast. Wind uit het zuid-zuidwesten, 4 Beaufort.
04/07/96	17°C, droog weer, strand nog nat van regenbuien van afgelopen nacht. Vanaf 15:30 bewolking maar geen buien. Zuidwestenwind, 5 Beaufort.
09/07/96	17°C, bewolkt maar droog weer. Westenwind, 4 Beaufort.
12/09/96	15°C, bewolkt en buigig weer met om 12:30 en 13:30 zware regenbuien van ± 10 minuten lang. Noordwestenwind, 4 Beaufort.
18/09/96	15°C, droog weer. Oostenwind, 5 Beaufort.
03/10/96	15°C, wisselvallig weer met af en toe miezerige regen, het strand is nog nat van regenval van de afgelopen dagen. Zuidwestenwind, 3 Beaufort
29/10/96	11°C, constante regen. West-noordwestelijke wind, 5 Beaufort
12/02/97	9°C, wisselvallig weer met af en toe een bui. West-zuidwestelijke wind, 4 Beaufort
28/03/97	10°C, overwegend nat weer, met af en toe een droge periode. West-noordwestelijke wind, 6 Beaufort.

Tabel 1.4.1 Weersomstandigheden tijdens de meetdagen

Uit de tabel is af te leiden dat op zes meetdagen regen is gevallen tijdens de uitvoering van het meetprogramma, en dat op twee meetdagen het kribvakstrand tijdens de meting nog nat is als gevolg van regenval vóór de meetperiode. Op twee meetdagen is het strand droog en valt er tijdens de meting geen regen.

1.5 Literatuur

- Brinke, W.B.M. ten, 1996a. Sedimenthuishouding kribvakken. Projectplan 1996. Werkdocument RIZA 96.037X, 13pp.
- Brinke, W.B.M. ten, 1996b. Onderzoeksvoorstel sedimenthuishouding kribvakken. Werkdocument RIZA 96.099X, 26pp.
- Kruyt, N.M., 1997. Kribvakmetingen Druten/Ochten. Variaties tussen meetsignalen op hoofdlijnen. IMAU R97-03.

2 Methodiek

2.1 Meetprotocol en meetinstrumenten fluviaatiele metingen

2.1.1 Instrumentatie

Tijdens de meetcampagne is met 3 meetframes gewerkt. Meetframes zijn driehoekige metaalconstructies waaraan meetapparatuur bevestigd is. Tijdens de meetcampagne is gebruikt gemaakt van twee soorten frames, nl.:

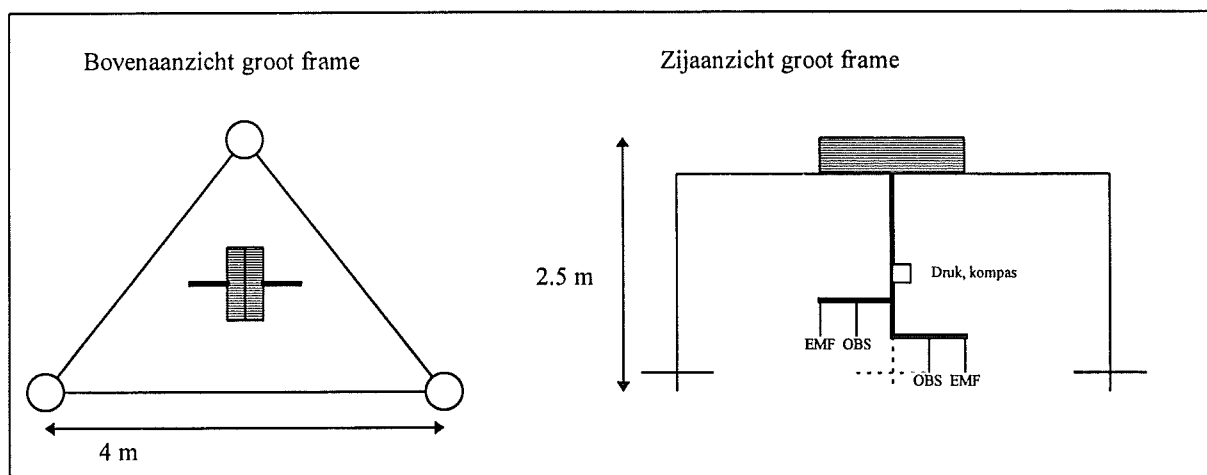
1 Groot meetframe

Dit meetframe is in staat om autonoom metingen te verrichten. De afmetingen zijn ± 4 bij 4 m met een hoogte van 2,5 m, zie figuur 2.1.1. Dit frame is in staat om bij hoge stroomsnelheden metingen te verrichten.

Op het frame zijn de volgende instrumenten geplaatst:

- 2 OBS sensoren (op 0.085 en 0.335 m boven de bodem)
(resp. nr. 382 en 383)
- 2 EMF sensoren (op 0.085 en 0.340 m boven de bodem)
(resp. nr. D157 en D158)
- 1 druk sensor (op 0.43 m boven de bodem)
(Keller PA-26W-PL8369.1-0.6 SN W1924 0,6 bar)
- 1 flux-gate kompas en tiltmeter (R1)

De positie van het meetframe is bepaald door vanaf het schip de afstand van het frame tot de kribkop te schatten.



Figuur 2.1.1: schematische weergave van het grote frame.

2 Miniframes

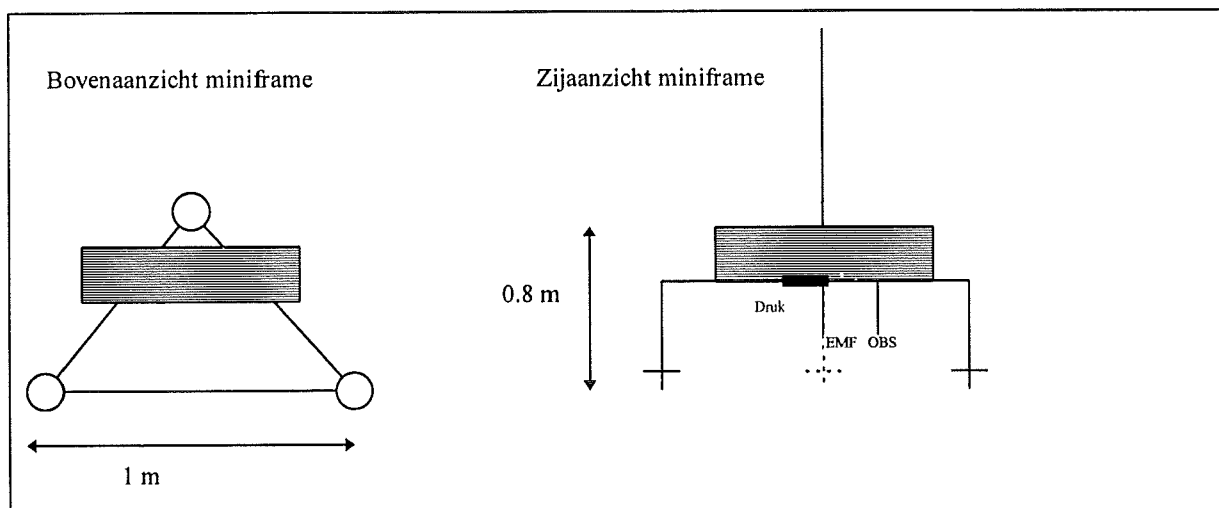
De voor de meetcampagne gebruikte miniframes kunnen niet autonoom draaien maar werden gevoed vanaf een meetschip van de Directie Oost Nederland, "de Conrad". Aan het begin van een meting zijn deze meetframes in het water geplaatst, en na afloop weer op het dek getakeld. De frames hebben een grootte van ± 1 bij 1 m, met een hoogte van 0.5 m, zie figuur 2.1.2. De frames zijn met loodblokken verzwaard tot 35 kg (oeverframe, frame nr. 1) en 65 kg (rivierframe, frame nr. 2).

Ze zijn uitgerust met de volgende instrumentatie:

- 1 OBS sensor (op 0.10 m boven de bodem)
(mf1: 395, mf2: 396)
- 1 EMF sensor (op 0.10 m boven de bodem)
(mf1: D290, mf2: D291)
- 1 druksensor (op 0.50 m boven de bodem)
(mf1: Keller PA-26/8369.1-0.3 SN6791 300mbar,
mf2: Keller PA-26/8369.1-0.3 SN6812 300mbar)

Tijdens twee meetdagen is op het rivierframe ook een onderwatercamera bevestigd. Hiermee kon visueel de sedimentbeweging gevolgd worden, en synchroon vergeleken met meetresultaten van de OBS, EMF en druksensor.

De positie en oriëntatie van de miniframes wordt bepaald door middel van waterpassen en hoekmeting. Op de miniframes is een staak bevestigd met daarop 2 pinnetjes. Deze staak stak boven het water uit. Vanaf de oever kon op deze staak ingeschoten worden met een waterpas en een kompas, waarna d.m.v. voorwaartse insnijding de positie van het frame bepaald werd. De oriëntatie van de miniframes is bepaald door op de staak in te schieten wanneer de 2 pinnetjes in 1 lijn staan. Hieruit is berekend wat de oriëntatie van het meetframe ten opzichte van het noorden was.



Figuur 2.1.2: schematische weergave miniframe.

Meetsensoren

Met de OBS (Optical Back Scatter) wordt de troebelheid van het water gemeten. De meting is gebaseerd op terugkaatsing van licht door sedimentdeeltjes. Uit de mate van terugkaatsing wordt de troebelheid bepaald. Via een regressie werd dit troebelheid signaal omgezet naar een zandconcentratie. In het laboratorium van de vakgroep Fysische Geografie is een calibratiecurve opgesteld waarbij het met de OBS gemeten stroom signaal is omgezet in een maat voor de sediment concentratie. De OBS is echter zeer gevoelig voor slib. De invloed van slib, meegevoerd als wash load, is in de calibratie curve van het laboratorium niet meegenomen. Voor de miniframes is dit opgelost door in het veld pompmonsters te nemen waarmee de in het laboratorium van de faculteit Fysische Geografie bepaalde calibratiecurve is gecorrigeerd. Deze ijkprocedure wordt beschreven in bijlage 2.1. Ijking van de OBS van het grote frame is gebeurd door aan te nemen dat er op het meetnivo van de bovenste OBS geen zand werd getransporteerd, en dat de slibconcentratie op beide hoogten hetzelfde was.

De zandconcentratie in de onderste OBS is dan het verschil van de sedimentconcentratie van de bovenste OBS en die van de onderste OBS. De zandconcentratie wordt uitgedrukt in g/l.

Met de EMF wordt de stroomsnelheid in twee richtingen, loodrecht op elkaar, gemeten. Hierbij wordt door het langsstromende water het electromagnetische veld rond de EMF verstoord. Dit wordt omgezet in een stroomsignaal. Dit stroomsignaal is omgezet naar een stroomsnelheid door lineaire regressie met een door het WL opgezette calibratiecurve.

Na calibratie zijn de X- en Y richtingen van de stroomsnelheid als volgt: een positieve X-snelheid is naar de vaargeul van de rivier toe gericht. Een positieve Y-snelheid is stroomopwaarts gericht. De snelheid wordt uitgedrukt in m/s.

De druksensor meet de druk boven de sensor. Met behulp van kennis van de luchtdruk tijdens de meting en de dichtheid van het water kon hieruit de waterdiepte berekend worden. Deze wordt uitgedrukt in m.

2.1.2 Meetprotocol

De metingen in de vier kribvakken vonden plaats van 17 juni tot 12 juli. Het grote frame bevond zich ongeveer één week in ieder kribvak om metingen uit te voeren, zie tabel 2.1.1.

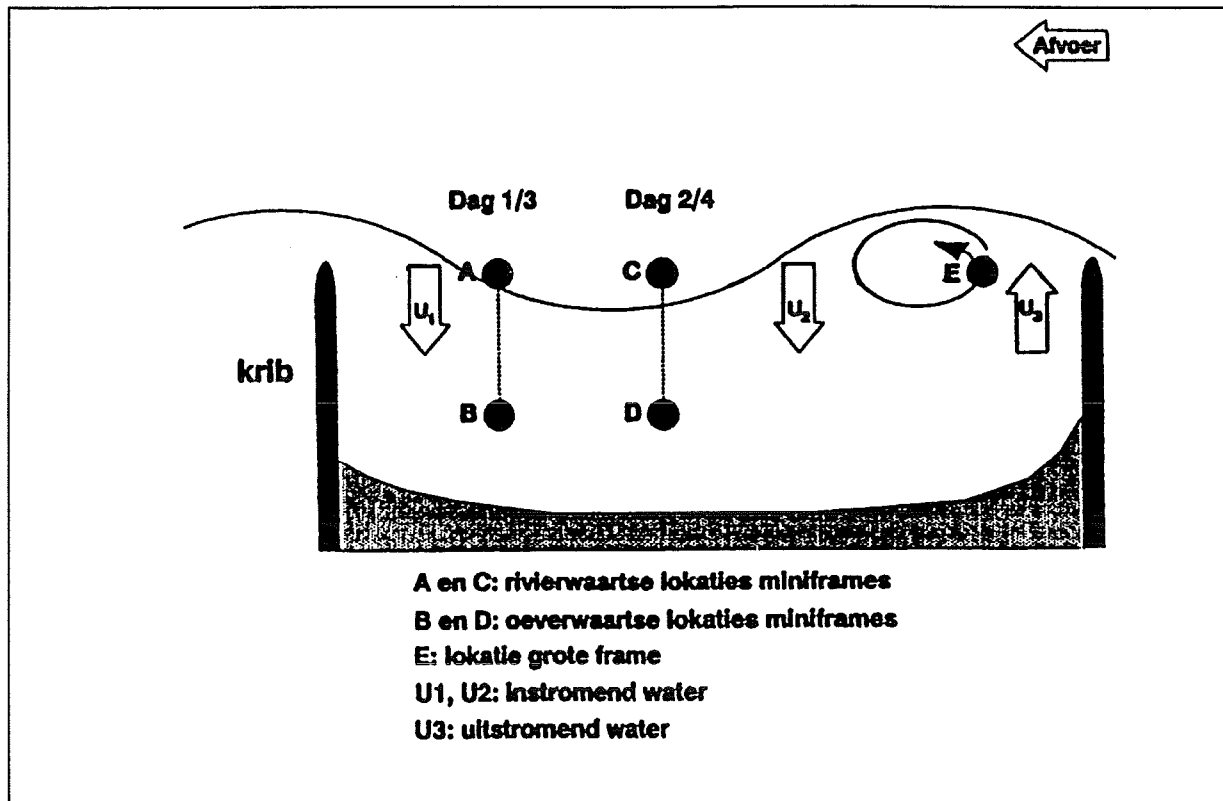
	Periode	Oever	Kribafstand
Kribvak 1	17 t/m 21 juni	zuidoever	250 m
Kribvak 2	21 t/m 27 juni	zuidoever	130 m
Kribvak 3	27 juni t/m 4 juli	noordoever	200 m
Kribvak 4	4 t/m 12 juli	noordoever	200 m

Tabel 2.1.1: de meetlocaties van het grote frame.

Per meetweek werd in ieder kribvak een vast meetprotocol afgewerkt. Het grote frame werd in de uitstroomopening van het kribvak geplaatst, en bleef daar gedurende de gehele week staan. De twee kleine frames werden iedere dag in een lijn loodrecht op de oever geplaatst. De eerste en derde dag op positie A en B, de tweede en vierde dag op positie C en D, zie figuur 2.1.3. De lokatie en de oriëntatie van de kleine frames werd handmatig met behulp van een waterpasinstrument vanaf de kant ingemeten. Hierbij werd de methode van de voorwaartse insnijding toegepast, (Alberda,1981). Daarnaast werd de lokatie ook bepaald met behulp van het DGPS systeem dat aanwezig was op het meetschip van Directie Oost Nederland "de Conrad".

Met de kleine frames werden 4, 5 of 6 meetperioden per dag uitgevoerd. Eén meetperiode, een zogenaamde "burst", heeft een duur van 35 minuten. Het grote frame voerde 24 bursts per dag uit. De metingen van de drie frames verliepen synchroon. Ze werden bij iedere burst precies op het hele uur gestart. De frequentie van de metingen in een burst bedroeg bij het grote frame en bij de kleine frames respectievelijk 2 en 4 Hz. De reden voor dit verschil in meetfrequentie is gelegen in het feit dat met de kleine frames stroming én golven werden gemeten, en met het grote frame alleen stroming.

Een van de twee miniframe, het oeverframe, is aan de oeverzijde van het kribvak geplaatst. Het rivierframe werd aan de rivierzijde geplaatst. De frameposities zijn opgenomen in bijlage 3.1 en 4.1.



Figuur 2.1.3: schematische weergave van een kribvak met de locatie van het grote frame en de 4 lokaties van de 2 kleine frames. N.B.: de dagindeling geldt voor meetweek 2, 3 en 4. Tijdens meetweek 1 werden op dag 1 en 3 de twee kleine frames op positie C en D geplaatst en op dag 2 en 4 op positie A en B, (Ten Brinke, 1996).

2.1.3 Opname scheepspassages

Tijdens de meetcampagne zijn scheepskarakteristieken opgenomen van passerende schepen. De volgende scheepskarakteristieken zijn geschat:

- De lengte en breedte van de schepen. Vaak stonden deze gegevens op het schip vermeld. Wanneer dit niet het geval is werden deze maten geschat. De fout in de schatting van de lengte bedraagt maximaal 5 meter, de fout in schatting van de breedte is maximaal 1 meter.
- De diepgang van de schepen. Genoteerd is of de schepen vol, halfvol of niet beladen waren. Aan de hand hiervan, en met kennis van de scheepstypen, was het mogelijk de diepgang van het schip te achterhalen.
- De vaarpositie op de Waal. De positie is geschat in termen van noordoever, zuidoever en rivieras, en later omgerekend naar afstand uit de oever. Wanneer noordoever = 0 m en zuidoever = 250 m, komen de positietermen overeen met de volgende afstanden:

Positie	Zz	Z	Zas/AsZ	As	Nas/AsN	N	Nn
Afstand	210	170	150	125	100	80	40

Tabel 2.1.2: vaarposities

De schattingsfout in meters kan maximaal 25 meter bedragen.

De volgende scheepskarakteristieken zijn exact bepaald:

- Op- of afvaart.
- De tijd tussen voor- en achterstevan. Aan de hand hiervan, en met de scheepslengte, kan de snelheid van het schip berekend worden. De fout in tijdsaflezing bedroeg maximaal 2 seconden.

Aan de hand van de scheepskarakteristieken konden de passages ingedeeld worden in scheepsklassen. Elke klasse is weergegeven met een nummer, welke in de tabellen met scheepskarakteristieken is terug te vinden. Deze indeling is als volgt:

Scheepstype		maximale lengte (m)	maximale breedte (m)
1	4-Baks duwvaart	180	22.8
2	Koppelverband	180	11.5
3	Rijnschip	86-110	12
4	Kanaalschip	67-85	11.5
5	Dortmunder	55-67	8.2
6	Kempenaar	50-55	6.6
7	Spits	38-50	5.05
8	Coaster	variabel (± 100)	variabel (± 12)
9	Overige (baggerschip etc.)	variabel	variabel
10	2- Baksduwvaart	180	11.4
11	3- Baksduwvaart	180	22.8

Tabel 2.1.3: scheepstypen

2.1.4 De analyse van de tijdreeksen

Iedere "burst" werd er een tijdreeks van 35 minuten gemeten. Deze tijdreeks werd opgeslagen in het Campell Final Storage Format. Deze data werden omgezet in een R4-format, waarna ze gekalibreerd werden met behulp van de kalibratieformules. Daarna werden de data gevalideerd. Hierbij werden alle "spikes" en "missing values" gerepareerd. Spikes zijn incidentele pieken waarvoor geen fysische verklaring is. Deze werden bij het EMS en druk signaal "gerepareerd" door middel van lineaire interpolatie met behulp van de omliggende datapunten. Bij het OBS signaal zijn alle spikes vervangen door de waarde 8 g/l, dit is het maximale bereik van de sensor.

In dit onderzoek gelden de volgende conventies wat betreft de data:

- de stroomsnelheid wordt uitgedrukt in m/s;
- een positieve X-snelheid (transversaal) is voor zowel de Noord- als de zuidoever naar de vaargeul van de rivier toegericht;
- een positieve Y-snelheid (longitudinaal) is voor beide rivieroeveren stroomopwaarts gericht, dus naar het oosten;
- de concentratie wordt uitgedrukt in g/l;
- de waterstand wordt uitgedrukt in m;
- de begrippen stroomopwaarts en stroomafwaarts zijn gerelateerd aan de stroomrichting van de hoofdgeul in de Waal, (Kruyt,1997).

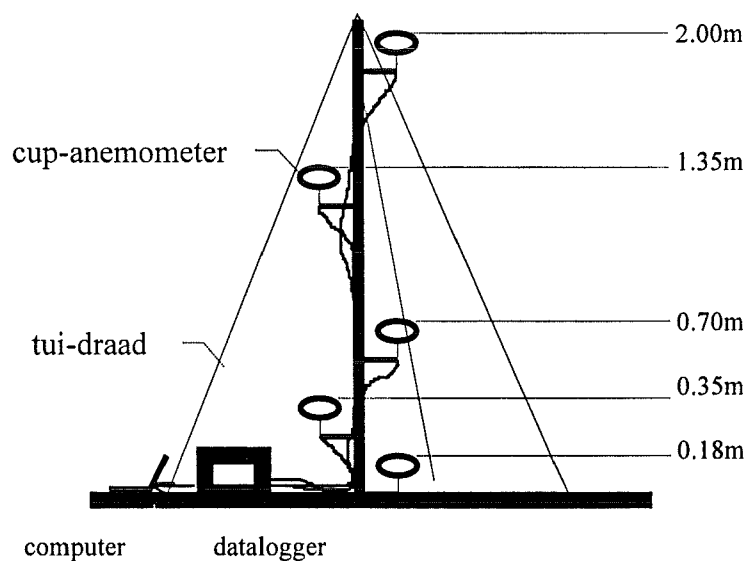
2.2 Meetprotocol en meetinstrumenten eolische metingen

2.2.1 Instrumentatie

De eolische veldmetingen zijn gedeeltelijk verricht door een automatische opstelling. De automatische opstelling bestond uit een mast met 5 windsnelheidsmeters op verschillende hoogten, een mast met een windsnelheids- en richtingmeter op 10 meter hoogte boven maaiveld, en een acoustische zandtransportmeter. Voor de besturing, controle en tijdelijke opslag van de gegevens van de twee masten en de zandtransportmeter zijn drie dataloggers gebruikt, die met behulp van een computer uitgelezen kunnen worden. De meting van de hoeveelheid zandtransport is handmatig verricht. Het zand dat over een kribvakstrand getransporteerd wordt, is ingevangen met behulp van zandvangsers. Bij de uitvoering van het meetprogramma is steeds dezelfde opstelling van de verschillende meetinstrumenten gebruikt, waarbij zodanig rekening met de wind is gehouden dat bij wind uit noordelijke richtingen in het kribvak aan de zuidoever is gemeten, en bij wind uit zuidelijke richtingen in het kribvak aan de noordoever. De reden hiervoor was dat eolisch zandverlies uit een kribvak plaatsvindt door zandtransport van het strand naar de omliggende begroeiing waar het wordt ingevangen.

Anemometeropstelling

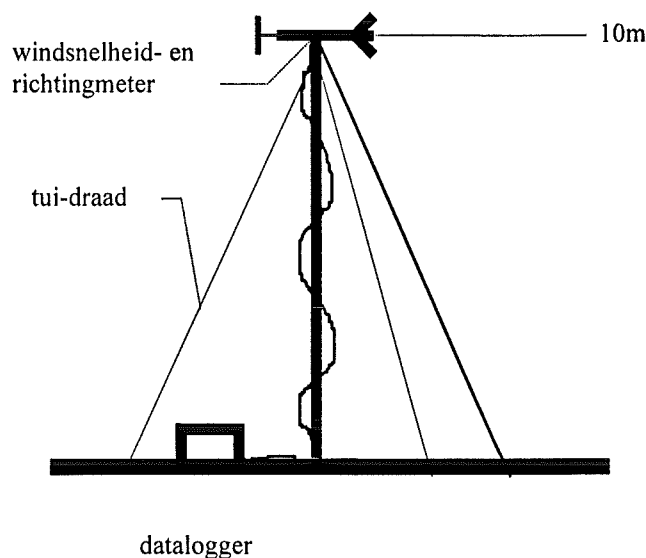
Het windsnelheidsprofiel op het kribvakstrand is gemeten met behulp van een vijftal cup-anemometers op 0.18 m, 0.35 m, 0.70 m, 1.35 m, en 2.00 m hoogte boven het strand (zie figuur 2.2.1). Een cup-anemometer bestaat uit een systeem van drie holle, conische cups die elk door middel van een stangetje aan een verticale as zijn bevestigd. Door de vorm van de cups heeft de bolle kant minder luchtweerstand dan de holle kant. Hierdoor zal een horizontale luchtstroming, ongeacht de stromingsrichting, ervoor zorgen dat het systeem gaat draaien. Het verband tussen de omwentelingssnelheid en windsnelheid in m/s, is verwerkt in het computerprogramma ANEMO (M.C.G. van Maarseveen, Fysisch Geografisch Laboratorium, Universiteit Utrecht). Door een datalogger wordt per vijf minuten de gemiddelde windsnelheid in meter per seconde, voor de vijf anemometers opgeslagen. Na een meetperiode kan de data met behulp van een computer worden uitgelezen.



Figuur 2.2.1 Anemometeropstelling

Windsnelheids- en richtingmeter op 10m hoogte

De windsnelheid en windrichting is op 10 meter hoogte boven het maaiveld gemeten (zie figuur 2.2.2), zodat de gegevens van het meetgebied vergeleken konden worden met KNMI-gegevens die ook op 10 meter boven het maaiveld gemeten worden. De windrichting is van belang voor het bepalen van de richting van het zandtransport, en de strijklengte. De windsnelheids- en richtingmeter heeft gedurende de gehele veldwerkperiode gemeten op de noordoever tegenover kribvak 1 aan de zuidoever. Voor elke tien minuten is door het computerprogramma ANEMO2 (M.C.G. van Maarseveen, Fysisch Geografisch Laboratorium, Universiteit Utrecht) de gemiddelde windsnelheid en windrichting opgeslagen in een datalogger.

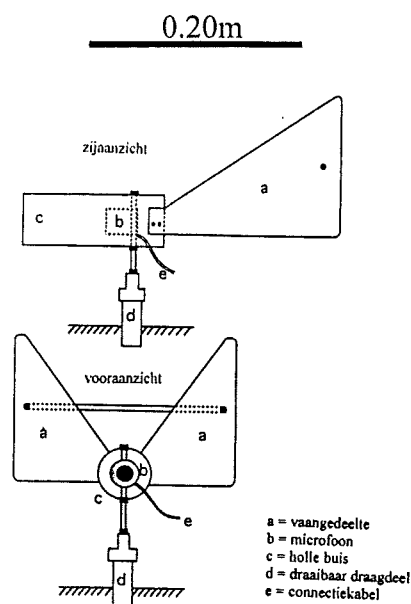


Figuur 2.2.2 Windsnelheids- en richtingmeter op 10m hoogte

Saltifoon

Het salterend zandtransport is onder meer gemeten met behulp van een zogenaamde saltifoon. Deze bestaat uit een microfoon en uit een vaan-gedeelte voor de richting op de wind (zie figuur 2.2.3). De microfoon registreert tikjes van botsende zandkorrels. De hoeveelheid tikken wordt bepaald door de mate van verstuiving. Gedurende het meetprogramma wordt het aantal tikken per seconde door het programma SALT (D.B. van Dam, Fysisch Geografisch Laboratorium, Universiteit Utrecht)

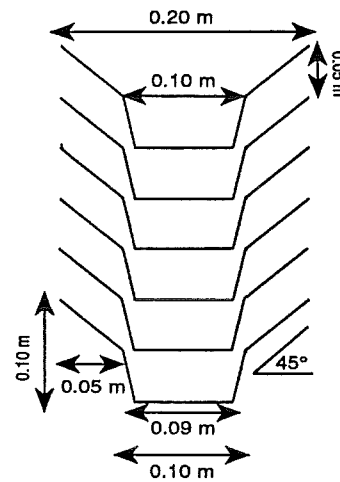
berekend en in een datalogger opgeslagen. Na de meetperiode kan de data met behulp van een veldcomputer worden uitgelezen.



Figuur 2.2.3 Voor- en zijaanzicht saltifoon (Sterk et al., 1996)

Zandvangers

Het zandtransport is tevens gemeten door het stuivende zand gedurende een bepaalde periode in te vangen en daarna het gewicht van het ingevangen zand te bepalen. Hiervoor zijn omnidirectionele verticale zandvangers gebruikt (zie figuur 2.2.4). Het zand wordt ingevangen op verschillende hoogten, zodat naast de totale hoeveelheid verplaatst zand, ook een indruk wordt verkregen van de verdeling van de hoeveelheid zand met de hoogte. Het salterende zandtransport is gemeten op 0.0m, 0.05m, 0.10m, 0.15m, 0.20m, en 0.25m hoogte. Het kruipende zandtransport is gemeten in de onderste zandvanger, die in het strand is ingegraven (hoogte 0.0m). De zandvangers zijn opgebouwd uit trechter-vormige bakjes met een konisch invangedeelte (doorsnede 0.2m) en een enigszins conisch opvangedeelte (doorsnede 0.1m). Het hoogteverschil tussen de bakjes is 0.05m zodat het zand feitelijk wordt ingevangen in een kolom die bestaat uit zes kleine kolommetjes met ieder een breedte van 0.01m en een hoogte van 0.05m. De hoek van het invangedeel met de horizontaal bedraagt 45° , waardoor een groot deel van het inkomende zand in het onderliggende bakje zal sedimenteren. Het opvangedeel loopt taps toe, zodat tussen de boven elkaar geplaatste bakjes een ruimte overblijft waardoor het ingevangen zand in het opvangedeelte sedimenteert.



Figuur 2.2.4 Zijaanzicht zandvanger
(Arens & Van der Lee, 1995)

2.2.2 Meetprotocol

Het eolisch veldonderzoek is verricht in de periode juni 1996 tot april 1997 in kribvak 1 aan de zuidoever en kribvak 3 aan de noordoever (zie figuur 1.3.1). Gedurende de eerste 4 weken is op 4 dagen een meting is verricht. In de hierop volgende 8 maanden zijn nog een negental metingen verricht. Op twee dagen is de meetprocedure één of meerdere malen herhaald, omdat de zandtransporten op die dagen zodanig hoog waren dat de zandvangers tijdens het meetprogramma geleegd moesten worden, waarna ze vervolgens weer geplaatst zijn. De duur van de veldmetingen varieert van 1 uur tot 5 uur. De windrichting en -snelheid zijn gedurende de hele periode juni 1996 tot april 1997 continu gemeten op 10m hoogte.

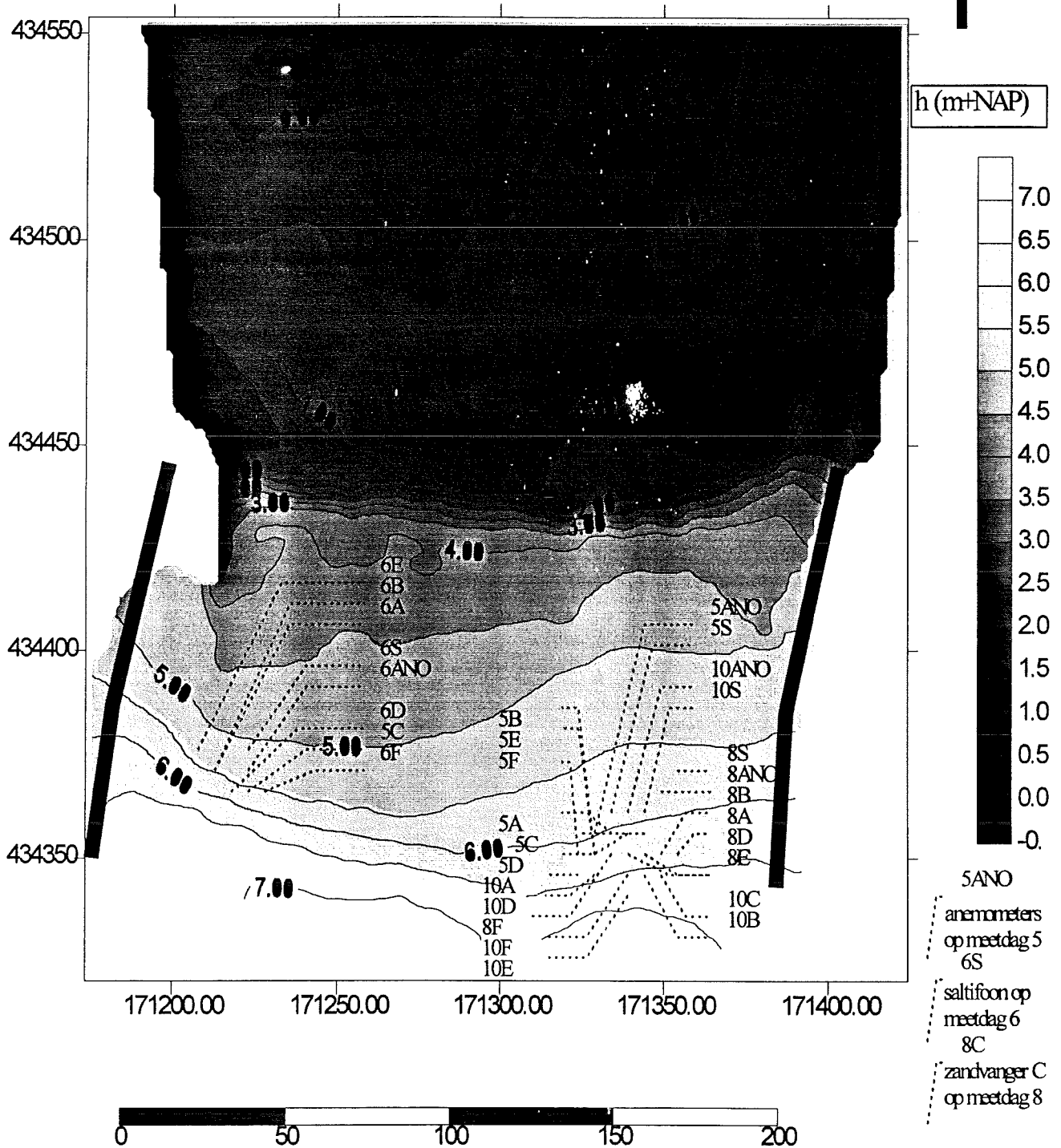
De meetdagen zijn terug te vinden in tabel 2.2.1. In de tabel is ook de duur van de metingen vermeld en in welk kribvak de metingen zijn verricht.

meetdag	1	2	3	4	5	6	6	6	7	8	9	10	10
datum	02/07/'96	03/07/'96	04/07/'96	09/07/'96	12/09/'96	18/09/'96	18/09/'96	18/09/'96	03/10/'96	29/10/'96	12/02/'97	28/03/'97	28/03/'97
kribvak	3	3	3	3	1	1	1	1	3	1	3	1	1
duur meting	11:00-14:30	11:00-14:30	12:00-16:45	11:00-14:30	11:15-15:45	11:55-12:55	13:35-14:35	15:10-15:55	11:15-15:15	12:15-16:15	11:45-14:45	13:50-14:30	14:45-15:25

Tabel 2.2.1 Gegevens betreffende datum, lokatie, en duur meetprogramma

Het meetprogramma is uitgevoerd met behulp van de anemometeropstelling, de saltifoon en de zandvangers. De locaties waarop de meetinstrumenten zich op de verschillende meetdagen bevonden, zijn weergegeven in de figuren 2.2.5 en 2.2.6.

Hoogtekaart kribvak 1 zuidoever



Figuur 2.2.5 Locaties meetinstrumenten kribvak 1 aan zuidoever

2.4 Bepaling van de korrelgrootte van het gebied

Om de karakteristieken van de korrelgrootte in de vier kribvakken te kunnen bepalen is een zevental bodemmonsters per kribvak genomen. De monster zijn op willekeurige lokaties verdeeld over het kribvak genomen, om een goed beeld te krijgen van de gemiddelde korrelgrootte per kribvak. De bodemmonsters zijn met behulp van een zevenzet verdeeld in verschillende frakties, zie bijlage 3.2. Aangezien het gewicht in iedere fraktie bekend is na het zeven, kunnen de volgende korrelgroottekenmerken de d_{10} , d_{35} , d_{50} , d_{65} en de d_{90} bepaald worden. Het was niet nodig om een slibanalyse op de bodemmonsters uit te voeren, omdat de fraktie kleiner dan $2 \mu\text{m}$ te verwaarlozen was.

Ook is er nog een monster genomen van het suspensief sediment voorkomend in het water. Met behulp van een gaasje met een diameter van $50 \mu\text{m}$, is de fraktie groter dan $50 \mu\text{m}$ uit het water gefilterd. Dit gaasje is aan de onderkant aan een cilinder bevestigd en deze cilinder is een honderdtal keer door het rivierwater gehaald totdat er voldoende monster op het gaasje aanwezig was. Ook van dit monster is de d_{10} , d_{35} , d_{50} , d_{65} en de d_{90} bepaald.

2.5 Literatuur

- Alberda, J.E., 1981. Inleiding landmeetkunde. Delftse Uitgevers Maatschappij, 517 pp.
- Brinke, W.B.M. ten, 1996b. Onderzoeksvoorstel sedimenthuishouding kribvakken. Werkdocument RIZA 96.099X, 26pp.
- Kruyt, N.M., 1997. Kribvakmetingen Druten/Ochten. Variaties tussen meetsignalen op hoofdlijnen. IMAU R97-03.
- Arens, S.M. & Lee, G.E.M. van der, 1995. Saltation sandtraps for the measurement of aeolian transport into the foredunes. *Soil Technology*, 61-74
- Sterk, G., Jacobs, A, & Van Boxel, J.H., 1996. The effect of turbulent flow structures on saltation sand transport in the atmospheric boundary layer. *Earth surface processes and landforms*.



3 De opgewekte bodemschuifspanningen

(Doctoraalonderzoek Roger Lenders)

3.1 Inleiding

3.1.1 Inleiding

De studie beschreven in hoofdstuk 3 van dit rapport betreft een studie naar het aandeel van de korte golven opgewekt door een schip in de totale sediment beweging. Er werd onderzocht hoe groot het aandeel is van de korte golven opgewekt door een schip ten opzichte van de stroming opgewekt door een schip in de totale bodemschuifspanning.

In paragraaf 3.2 worden de resultaten voortkomend uit het literatuuronderzoek behandeld. De hieruit voortkomende hypothesen en onderzoeksvragen zijn ook in deze paragraaf opgenomen. Paragraaf 3.3 behandelt de toegepaste methodiek en formules. Vervolgens zullen de onderzoeksresultaten in paragraaf 3.4 besproken worden. In paragraaf 3.5 en 3.6 zijn respectievelijk de discussie en de conclusies opgenomen.

3.1.2 Probleemstelling

In verscheidene kribvakken langs de Nederlandse rivieren is erosie van de bodem in kribvakken geconstateerd. Een van de mogelijke oorzaken is de geïnduceerde hydraulische belasting door scheepvaart.

Om een goed beeld te krijgen van de erosie van de kribvakbodem, is een veldonderzoek uitgevoerd. Door de resultaten van dit veldonderzoek te analyseren, kan een uitspraak gedaan worden over het begin van beweging van het sediment in de kribvakken.

In het veldonderzoek worden de ruimtelijke en temporele veranderingen van bodemschuifspanningen tijdens een scheepspassage nagegaan. Hierbij gaat de aandacht vooral uit naar de omstandigheden waarbij sedimenttransport optreedt als functie van scheepskarakteristieken. De veranderingen kunnen van dien aard zijn, dat kritieke bodemschuifspanningen worden overschreden.

3.1.3 De doelstelling

De doelstelling van dit doctoraalonderzoek is de volgende:

het bepalen van de bodemschuifspanning opgewekt door stromingen en golven veroorzaakt tijdens een scheepspassage. Voor ieder bestudeerd scheepstype wordt een maat voor de opgewekte hydraulische belasting gegeven. Ook wordt bestudeerd hoe het begin van beweging afhankelijk is van de morfologie van het kribvak.

3.2 Het literatuuronderzoek en de onderzoeksvragen

3.2.1 Het Literatuuronderzoek

De scheepsgeïnduceerde stroming en golfwerking is al nader bestudeerd aan de hand van laboratoriumstudies en computerberekeningen. Van de kennis die hieruit voortkomt volgt hieronder een korte samenvatting. De scheepsgeïnduceerde waterbeweging bestaat uit de volgende drie componenten:

- de primaire golf;
- secundaire golven;
- de schroefstraal.

De primaire golf geeft de zuiging weer, dit is een lange golf die langzaam uitdempt en zorgt voor een toename in de stroming. De primaire golf kan als volgt worden opgedeeld:

- de frontgolf, voorste begrenzing van de waterspiegeldaling;
- waterspiegeldaling aan weerszijden van het schip;
- de haalgolf, de achterste begrenzing van de waterspiegeldaling;
- de retourstroom aan weerszijden en onder het schip in de richting tegengesteld aan de vaarrichting van het schip;
- de volgstroom, de stroming achter het schip met een stroomrichting gelijk aan de vaarrichting.

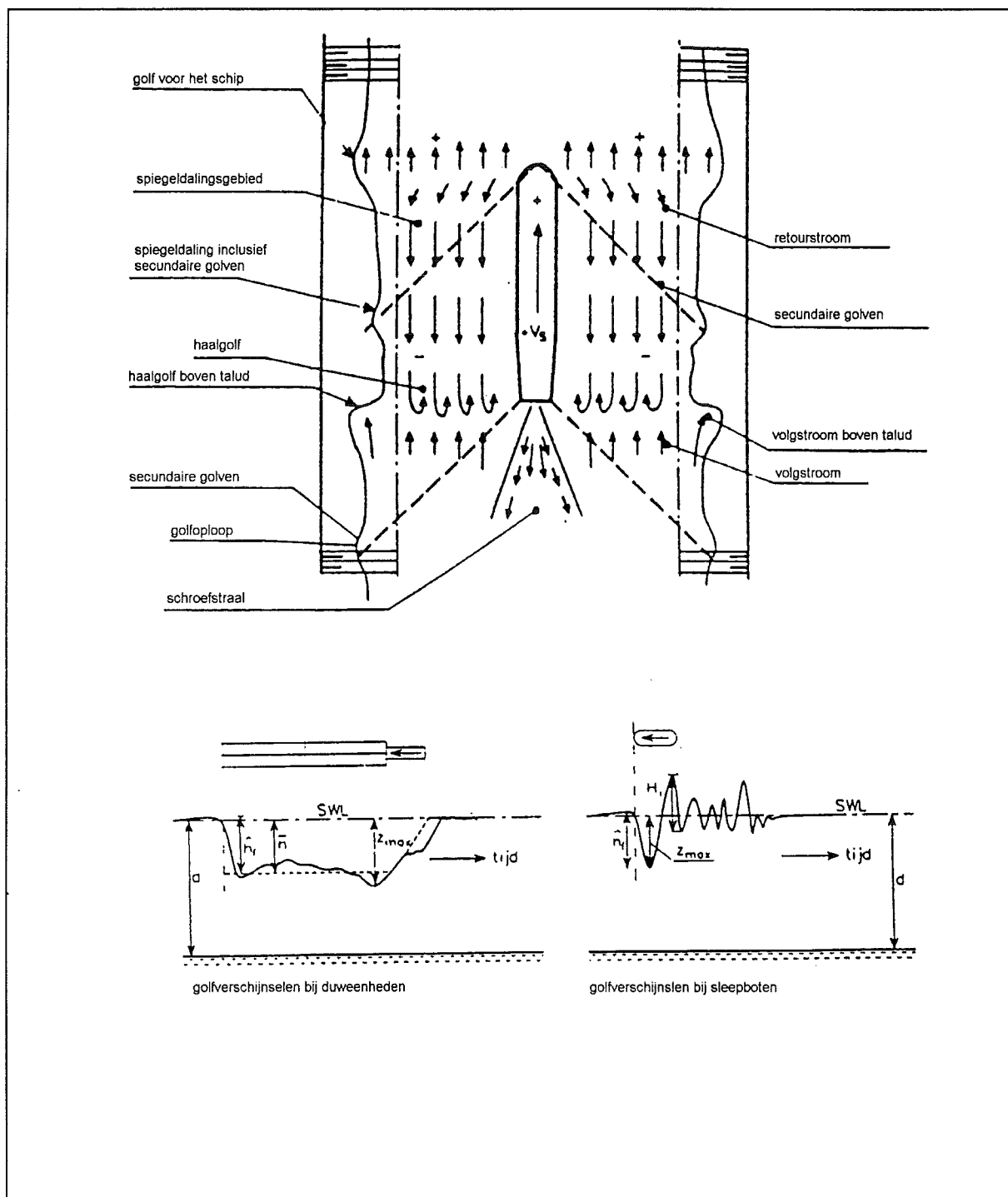
Voor een illustratie van de verschillende componenten van de primaire golf, zie figuur 3.2.1.

De secundaire golven zijn de korte golven die naast en vlak achter een schip ontstaan. Het secundaire golfsysteem wordt veroorzaakt door discontinuïteiten in de waterspiegel langs de romp van het schip. Deze discontinuïteiten veroorzaken een drukgradient waardoor er een golfpatroon ontstaat, (Sorensen, 1966; WL, 1986). In het kribvak is de waterdiepte kleiner dan in de rivier. Hierdoor veranderen de golven van karakter en zijn te beschouwen als ondiep watergolven. Wanneer de orbitaalbeweging tot op de bodem reikt treedt er "shoaling" op. De golfsnelheid neemt af door de bodemwrijving. Aangezien de golfperiode constant blijft neemt de golflengte af en de golfhoogte toe. De golfhoogte en -lengte veranderen dus door "shoaling", (Termes, et al., 1991). De golfvoortplantingsrichting verandert bij het binnenlopen van het kribvak door refractie, zie figuur 3.2.2. Refractie is het afbuigen van de golfkammen ten gevolg van verschillen in voortplantingssnelheid langs de kam, (Termes, et al., 1991). Het deel van de golfkam dat zich nog in dieper water bevindt heeft een grotere golfsnelheid en nadert sneller de oever. De golfkammen zullen bijdraaien in een richting evenwijdig aan de oever, (Kroon, 1995). Zie figuur 3.2.2.

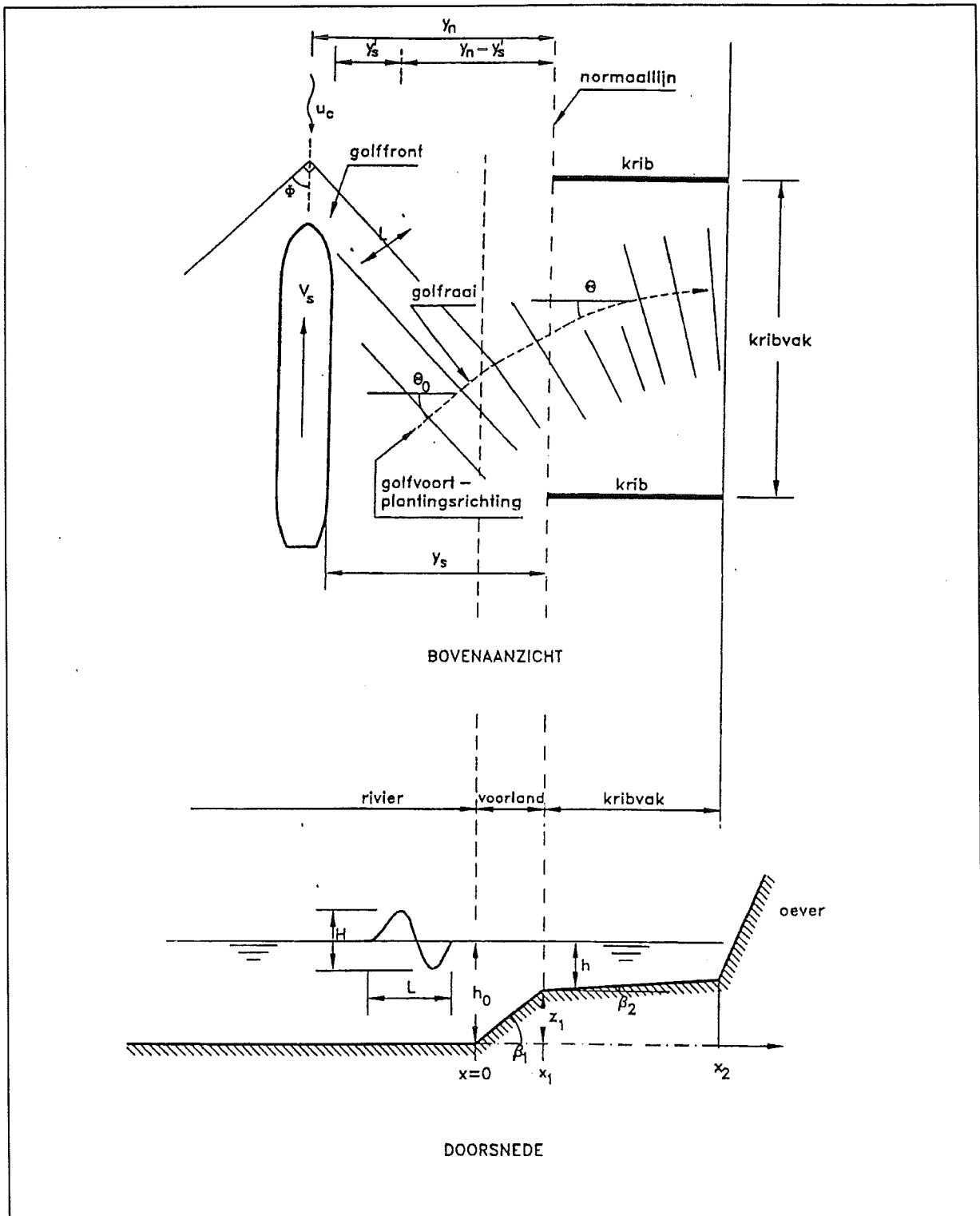
De hoek tussen de stromingsrichting en de golfvoortplantingsrichting is van invloed op de golfhoogte en de golflengte. Wanneer de golfvoortplantingsrichting en de stroming tegengesteld gericht zijn neemt de golfhoogte toe en de golflengte af. Is de richting van de golf gelijk aan de richting van de stroming dan zal de golfhoogte afnemen en de golflengte toenemen, (van Driel, et al., 1993).

De schroefstraal ontstaat achter het schip en heeft geen invloed op de waterbeweging aan de oever, zie figuur 3.2.1. Zowel de primaire als de secundaire golven zorgen voor een vergroting van de bodemschuifspanning aan de oever. Hoe groot de toename van de bodemschuifspanning is tijdens een scheepspassage, is onbekend. Ook het aandeel van de

secundaire golven in de totale scheepsgeïnduceerde belasting wordt niet in de literatuur beschreven. Dit zal dan ook nader onderzocht moeten worden.



Figuur 3.2.1: de verschillende componenten van de waterbeweging opgewekt door een schip en hun golfverschijnselen (Termes, et al., 1991).



Figuur 3.2.2: het veranderen van de golfvoortplantingsrichting van de secundaire golven richting de oever bij een stroomopwaarts varende schip (Kroon, 1995). N.B. stromingsrefractie buiten beschouwing gelaten.

Om de hydrodynamische invloed van schepen te kunnen karakteriseren is het scheepsgetal ontwikkeld. Het scheepsgetal wordt als volgt bepaald, (Hochstein and Adams, 1989 en Bhowmik et al., 1995):

$$U_{\max} = V_s * \left[\frac{A_c}{A_c - A_m} \right]^{2.5} * d * b_m \quad (3.2.1.a)$$

<i>met:</i>	U_{\max} : het scheepsgetal	$[-]$
	A_c : de natte doorsnede van de Waal	$[m^2]$
	A_m : de natte doorsnede van het schip	$[m^2]$
	V_s : vaarsnelheid van het schip t.o.v. de rivierafvoer	$[m/s]$
	d : diepteligging van het schip	$[m]$
	b_m : gemodificeerde scheepsbreedte	$[m]$

met:
de gemodificeerde scheepsbreedte:

$$b_m = \alpha * e^{-\alpha[1-F(\alpha)]} \quad (3.2.1.b)$$

met:

$$F(\alpha) = e^{-\alpha(0.42+0.51 \ln \alpha)} \quad (3.2.1.c)$$

en:

$$\alpha = \left[\frac{0.114 W_T}{b} \right] + 0.715 \quad (3.2.1.d)$$

<i>met:</i>	W_T : de rivierbreedte	$[m]$
	b : de scheepsbreedte	$[m]$

Bij een veldonderzoek zijn bij bepaalde omstandigheden de volgende dimensies voor ribbels waargenomen, (Inman, 1957):

$$d_{50}: 250-460 (\mu m)$$

$$\hat{U}_\delta: 0,2-0,4 (m/s)$$

$$\Delta_r: 0,05-0,15 (m)$$

$$\lambda_r: 0,3-0,9 (m)$$

Deze gegevens zullen vergeleken worden met de ribbelhoogte waargenomen tijdens het veldonderzoek.

3.2.2 Hypothesen en onderzoeksvragen

3.2.2.1 Eerste hypothese

- De scheepsgeïnduceerde secundaire golven zorgen voor een niet te verwaarlozen aandeel in het totale sedimenttransport in een kribvak, omdat schepen golven opwekken die de bodem eroderen. Het sediment kan dan getransporteerd worden door de rivierstroming en de waterbeweging ontstaan door de scheepvaart.

Deelhypothesen

- 1) De golven die aanwezig zijn in een periode waarin geen schepen passeren, zijn te klein om een bodemschuifspanning te veroorzaken die groot genoeg is om materiaal te eroderen.
- 2) De opgewekte secundaire golven door schepen veroorzaken een schuifspanning aan de bodem die groter is dan de kritieke schuifspanning.
- 3) De schuifspanning ontstaan door secundaire golven is niet te verwaarlozen ten opzichte van de schuifspanning ontstaan door stroming, omdat de golven bij het binnendringen van het kribvak op de steilrand breken.
- 4) De hoeveelheid getransporteerd materiaal door secundaire golven is klein, omdat de secundaire golfbeweging uit een orbitaalbeweging bestaat. Deze orbitaalbeweging zorgt vooral voor erosie door de golfbeweging en niet voor een netto transport. Het transport wordt vooral veroorzaakt door stroming in het kribvak. Deze stroming ontstaat door de combinatie van de rivierafvoer en de passage van schepen.

Bijbehorende onderzoeksvragen

- 1) Is de totale bodemschuifspanning tijdens de T_0 situatie, de situatie zonder scheepsinvloeden, kleiner dan de kritieke bodemschuifspanning?
- 2) Is de bodemschuifspanning opgewekt door secundaire golven bij de passage van een schip, groter dan de kritieke bodemschuifspanning?
- 3) Hoe groot is het aandeel van de bodemschuifspanning opgewekt door secundaire golven in de totale bodemschuifspanning ten tijde van een scheepspassage? Met andere woorden wat is de verhouding tussen de golf- en stromingsgeïnduceerde bodemschuifspanning?
- 4) Is er tijdens het eroderen van de bodem door de golfbeweging systematisch een stroming in een bepaalde richting aanwezig?

3.2.2.2 Tweede hypothese

Het golfpatroon verandert aanzienlijk in de ruimte en in de tijd, omdat tijdens een passage van een schip hoge golven worden opgewekt. Dit patroon verandert bij het binnendringen van het kribvak.

Deelhypothesen

- 1) De bodemschuifspanning opgewekt door secundaire golven neemt toe naarmate de golf de oever nadert doordat de golfhoogte toeneemt door 'shoaling'.
- 2) Het scheepstype, de vaarsnelheid, de vaarrichting, het volume en de passeerafstand bepalen de grootte van de golfparameters. Zijn de vaarsnelheid en het volume groot dan is de bodemschuifspanning opgewekt door secundaire golven groot. Is de passeerafstand klein dan is de bodemschuifspanning opgewekt door secundaire golven groot.

Bijbehorende onderzoeksvragen

- 1) Neemt de bodemschuifspanning opgewekt door secundaire golven toe richting de oever door “shoaling”?
- 2) Is er een verband tussen de bodemschuifspanning opgewekt door secundaire golven en de vaarsnelheid, het verplaatste watervolume, de passeerafstand en het scheepstype?
- 3) Is er een verschil in de bodemschuifspanning opgewekt door secundaire golven bij opvaart en bij afvaart?

3.3 Methodiek

3.3.1 Het berekenen van de bodemschuifspanning

3.3.1.1 Het bepalen van de T_0 situatie

Om de toename in de bodemschuifspanning te kunnen bepalen die tijdens een scheepspassage ontstaat, moet de bodemschuifspanning van de uitgangssituatie, T_0 , bekend zijn. Als T_0 situatie is een periode gekozen waarin geen schepen passeren. Voorafgaand aan deze periode zijn er gedurende 10 minuten geen schepen gepasseerd. Er zijn dus geen scheepsgolven, maar alleen windgolven tijdens de T_0 situatie. Ook heerst er een stroming veroorzaakt door de normale rivierafvoer. De windgolven en de normale rivierafvoer zorgden voor een geringe bodemschuifspanning tijdens de T_0 situatie. De bodemschuifspanning tijdens de T_0 situatie is berekend volgens dezelfde procedure als tijdens een periode waarin een schip passeerde, en wordt hieronder beschreven.

3.3.1.2 De totale bodemschuifspanning

Om antwoord te kunnen geven op de onderzoeksvragen met betrekking tot het eroderen van de bodem in de kribvakken door scheepsbewegingen, is er voor gekozen om een aantal karakteristieke scheepspassages te bestuderen. Voor iedere scheepspassage is per halve seconde de bodemschuifspanning berekend. Dit is alleen gedaan voor de twee kleine frames, omdat het sediment transport bij het grote frame vooral advectioneel van karakter was. De waterdiepte was hier groot waardoor er weinig erosie door golfwerking mocht worden verwacht. De stroming was hier vrijwel constant uit het kribvak gericht, (Kruyt,1997). Het sediment dat is geërodeerd in het kribvak werd hierlangs richting de rivier afgevoerd. De totale bodemschuifspanning is berekend volgens de procedures die daarvoor door Van Rijn (1993a) zijn aangegeven. Hierbij worden de bodemschuifspanning ontstaan door golven en bodemschuifspanning ontstaan door stroming bij elkaar opgeteld, zie vergelijking (3.3.1.a).

De totale bodemschuifspanning:

$$\tau_{b,tot} = \tau_{b,c} + \tau_{b,w} \quad [N/m^2]$$

(3.3.1.a)

Met: $\tau_{b,tot}$: totale bodemschuifspanning $[N/m^2]$

$\tau_{b,c}$: bodemschuifspanning door stroming $[N/m^2]$

$\tau_{b,w}$: bodemschuifspanning door golven $[N/m^2]$

Of er daadwerkelijk erosie optreedt kan bepaald worden door de kritieke bodemschuifspanning te bepalen, vergelijking (3.3.1.b). Is de totale bodemschuifspanning groter dan deze kritieke bodemschuifspanning dan wordt het sediment in beweging gebracht.

Met de kritieke bodemschuifspanning:

$$\tau_{b,cr} = \theta_{cr} (\rho_s - \rho) g d_{50} \quad [N/m^2]$$

(3.3.1.b)

Met: $\tau_{b,cr}$: de kritieke bodemschuifspanning $[N/m^2]$

ρ_s : de dichtheid van het sediment $[kg/m^3]$

ρ : de dichtheid van het water $[kg/m^3]$

g : de gravitatie constante $[m/s^2]$

d_{50} : de mediane korreldiameter [m]

θ_{cr} : de kritieke waarde van de mobiliteitsparameter voor het begin van beweging volgens Shields [-]

$$\theta_{cr} = 0.14 D_*^{-0.64} \quad \text{voor: } 4 < D_* \leq 10 \quad [-] \quad (3.3.1.c)$$

Met: D_* : dimensieloze korreldiameter [-]

$$D_* = \left[\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{1/3} d_{50} \quad [-] \quad (3.3.1.d)$$

Met: s : relatieve dichtheid: ρ_s / ρ [-]

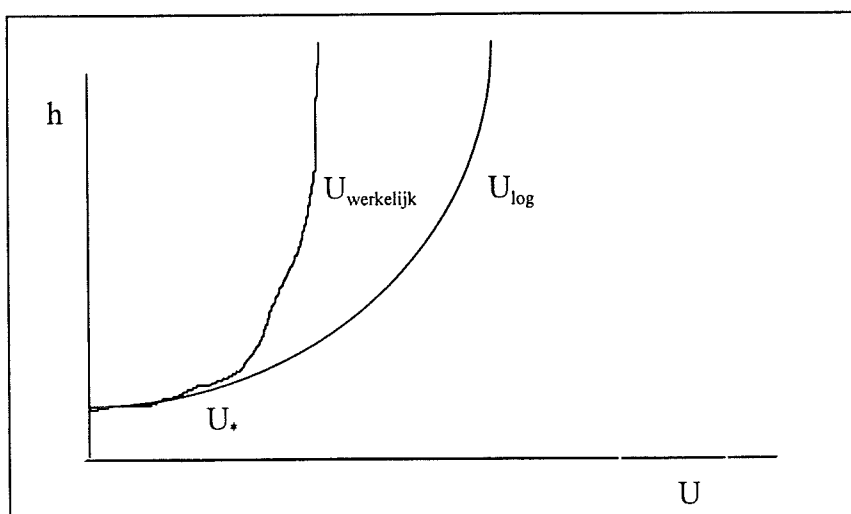
g : gravitatie constante [m/s²]

ν : viscositeit van het water [m²/s]

d_{50} : de mediane korreldiameter [m]

3.3.1.3 De bodemschuifspanning ontstaan door stroming

De bodemschuifspanning ontstaan door stroming is afhankelijk van de dieptegemiddelde stroomsnelheid, de waterdiepte en de bodemruwheid. Bij het bepalen van deze parameters is aangenomen dat de bodem hydraulisch ruw is, $(u_* k_s) / \nu > 70$, (Van Rijn 1993b). Voor de berekening van k_s zie vergelijking 3.3.1.f en voor de berekening van u_* zie vergelijking 3.3.1.h. Dit is gecontroleerd tijdens de berekening. Om u_* te kunnen bepalen moet de dieptegemiddelde stroomsnelheid bekend zijn. Aangezien er alleen metingen hebben plaatsgevonden op 10 cm boven de bodem, moet er een imaginaire dieptegemiddelde stroomsnelheid bepaald worden. Met behulp van de gemeten snelheidswaarde op 10 cm boven de bodem is, volgens een logaritmisch profiel, de dieptegemiddelde stroomsnelheid bepaald. Aangezien de werkelijke snelheidsverdeling alleen in het onderste gedeelte overeenkomt met een logaritmisch profiel, is dit een imaginaire dieptegemiddelde stroomsnelheid en komt niet overeen met de werkelijke dieptegemiddelde stroomsnelheid, zie figuur 3.3.1. Met behulp van deze imaginaire dieptegemiddelde stroomsnelheid is u_* bepaald. Doordat u_* betrekking heeft op de stromingssituatie dichtbij de bodem, en het werkelijke en het logaritmische snelheidsprofiel hier gelijk zijn, komt deze waarde voor u_* redelijk overeen met de werkelijke waarde.



Figuur 3.3.1: het werkelijke snelheidsprofiel en het imaginaire logaritmische snelheidsprofiel.

De bodemschuifspanning door stroming (hydraulisch ruw):

$$\tau_{b,c} = \frac{\rho g (\bar{u})^2}{\left[18 \log \left(\frac{12h}{k_s} \right) \right]^2} \quad [N/m^2] \quad (3.3.1.e)$$

Met: \bar{u} : de imaginaire diepte gemiddelde stroomsnelheid [m/s]
 h : de waterdiepte [m]
 k_s : de bodemruwheid [m]

Waarin,

de bodemruwheid:

$$k_s = k_s' + k_s'' \quad [m] \quad (3.3.1.f)$$

Met: k_s' : korrelruwheid, $3 \cdot d_{90}$ [m]
 k_s'' : vormruwheid, ribbelhoogte [m]

de imaginaire diepte gemiddelde stroomsnelheid volgens een logaritmisch snelheidsprofiel (Van Rijn 1993b):

$$\bar{u} = \frac{u \left[\frac{z_0}{h} - 1 + \ln \frac{h}{z_0} \right]}{\ln \frac{z}{z_0}} \quad [m/s] \quad (3.3.1.g)$$

Met: u : de stroomsnelheid op hoogte z [m/s]
 z : de hoogte [m]
 h : de waterdiepte [m]
 z_0 : $0,033k_s$, bij hydraulisch ruw [m]

Het berekenen van u_* :

$$u_* = \frac{\bar{u} K}{\ln \frac{z}{z_0}} \quad [m/s] \quad (3.3.1.h)$$

Met: \bar{u} : de dieptegemiddelde stroomsnelheid [m/s]
 K : de constante van Von Karman, 0,4
 z : de hoogte [m]
 z_0 : $0,033k_s$, bij hydraulisch ruw [m]

De gevoeligheid van $\tau_{b,c}$ voor de waterdiepte, de dieptegemiddelde stroomsnelheid en de bodemruwheid is te zien in figuur 3.3.2. In deze figuur is te zien dat $\tau_{b,c}$ het meest gevoelig is voor de dieptegemiddelde stroomsnelheid. De snelheid is op 10 cm boven de bodem nauwkeurig in het veld gemeten. Met behulp van deze waarde wordt volgens een logaritmisch profiel, formule 3.3.1.g, een imaginaire dieptegemiddelde stroomsnelheid bepaald. Met

behulp van deze imaginaire dieptegemiddelde stroomsnelheid worden berekeningen aan de bodem uitgevoerd waar het werkelijke snelheidsprofiel overeenkomt met het logaritmische, zie figuur 3.3.1. Er mag dus gesteld worden dat er door het berekenen van deze imaginaire dieptegemiddelde stroomsnelheid weinig onnauwkeurigheden optreden in de waarde van $\tau_{b,c}$ op 10 cm boven de bodem.

Ook de waterdiepte is nauwkeurig gemeten en aangezien $\tau_{b,c}$ weinig gevoelig is voor de waterdiepte, zie figuur 3.3.2, mag gesteld worden dat er geen onnauwkeurigheden optreden in de waarde van $\tau_{b,c}$ veroorzaakt door de waarde van de waterdiepte.

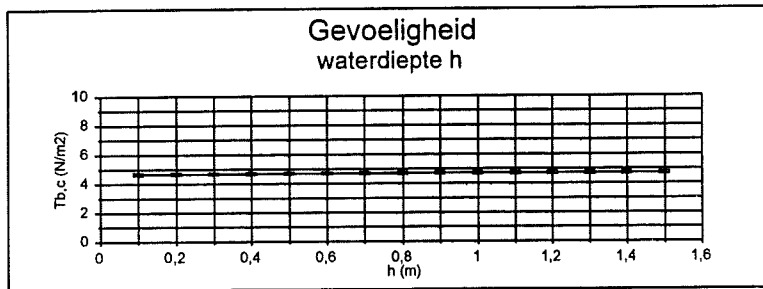
$\tau_{b,c}$ is naast de waarde voor de dieptegemiddelde stroomsnelheid erg gevoelig voor de waarde van de bodemruwheid k_s , zie figuur 3.3.2. De bodemruwheid bestaat uit een waarde voor de korrelruwheid, $3 \cdot d_{90}$, en een waarde voor de vormruwheid, de ribbelhoogte, zie vergelijking 3.3.1.f. De waarde voor de korrelruwheid is nauwkeurig omdat de korrelgrootteverdeling van de bodemmonsters bekend is. De waarde voor de vormruwheid kent wat meer onnauwkeurigheden. Ten eerste wordt aangenomen dat er geen megaribbels zijn en de bodemruwheid alleen bestaat uit een ruwheid veroorzaakt door ribbels. Dit is een redelijke aanname bij deze lage stroomsnelheden. De tweede onnauwkeurigheid in het bepalen van de vormruwheid is het schatten van de ribbelhoogte. Deze is geschat op 5 cm, maar dit is een gemiddelde waarde van een aantal waarnemingen verspreid over het gedeelte van het kribvak waar de waterdiepte kleiner dan 1,5 m was. De ribbelhoogte kan van lokatie tot lokatie verschillen en geeft dus een onnauwkeurigheid in de waarde van $\tau_{b,c}$. De ribbelhoogte kan geschat worden met behulp van de korrelgroottekaracteristieken (Van Rijn, 1993a) :

$$\Delta_r = 50 \text{ tot } 200 \cdot d_{50} \quad (3.3.1.i)$$

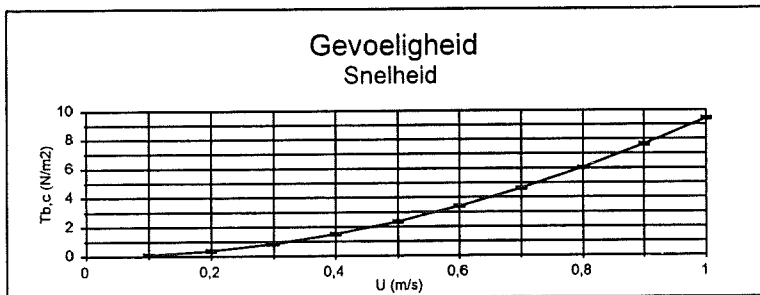
Met: Δ_r : de ribbelhoogte [m]
 d_{50} : de mediane korrelgrootte [m]

Formule 3.3.1.i is opgesteld voor een unidirectionele stroming. Wanneer de minimale d_{50} en de maximale d_{50} wordt ingevuld, respectievelijk 0,26 en 0,70 mm zie bijlage 3.4, geeft dit een minimale ribbelhoogte van 1,3 cm en een maximale ribbelhoogte van 14 cm. In de kribvakken is de stroming niet stationair. Kleine bodemvormen passen zich echter snel aan aan wisselende stromingscondities, (Van Rijn, 1993a). In de kribvakken waar de stroming overheerst ten opzichte van de golven met een korte periode worden de ribbels hoofdzakelijk gevormd door stroming. De waargenomen ribbelhoogte van 5 cm ligt dan ook in de berekende range van 1,3 tot 14 cm. Onder vergelijkbare omstandigheden en vergelijkbare korrelgroottekaracteristieken is in andere gebieden de ribbelhoogte waargenomen. De mediane korrelgrootte van dit veldonderzoek lag tussen de 0,25 en 0,46 mm en de maximale orbitaalsnelheid ter hoogte van de grenslaag lag in de range van 0,2 en 0,4 (m/s) (Inman, 1957). De waargenomen ribbelhoogte was 5 tot 15 cm. Deze korrelgroottekaracteristieken en omstandigheden komen dus overeen met de omstandigheden en sedimenteigenschappen in de vier kribvakken.

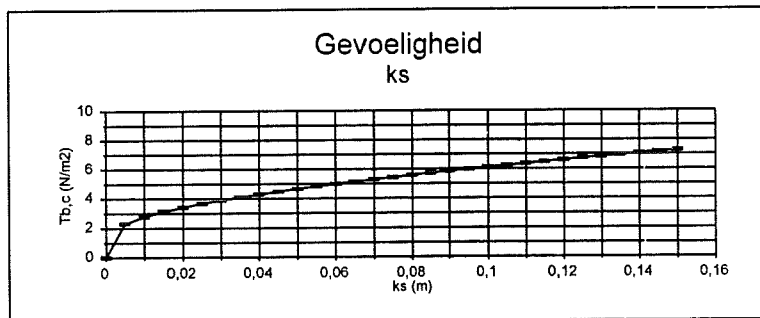
De onnauwkeurigheid die optreedt in de waarde van $\tau_{b,c}$, door de onnauwkeurigheid in de waarde van de bodemruwheid, wordt geschat op ± 1 (N/m²). Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de ribbelhoogte kan variëren tussen 4 en 6 cm, zie figuur 3.3.2. De onnauwkeurigheden die ontstaan in de waarde van $\tau_{b,c}$ door de onnauwkeurigheden in de waarde van de waterdiepte en de dieptegemiddelde stroomsnelheid wordt geschat op $\pm 0,1$ (N/m²). Dit geeft een totale onnauwkeurigheid in de waarde van $\tau_{b,c}$ van $\sqrt{1^2 + 0,1^2} = 1$ (N/m²).



$U = 0,5$ (m/s), $k_s = 0,05$ (m)



$h = 1$ (m), $k_s = 0,05$ (m)



$U = 0,5$ (m/s), $h = 1$ (m)

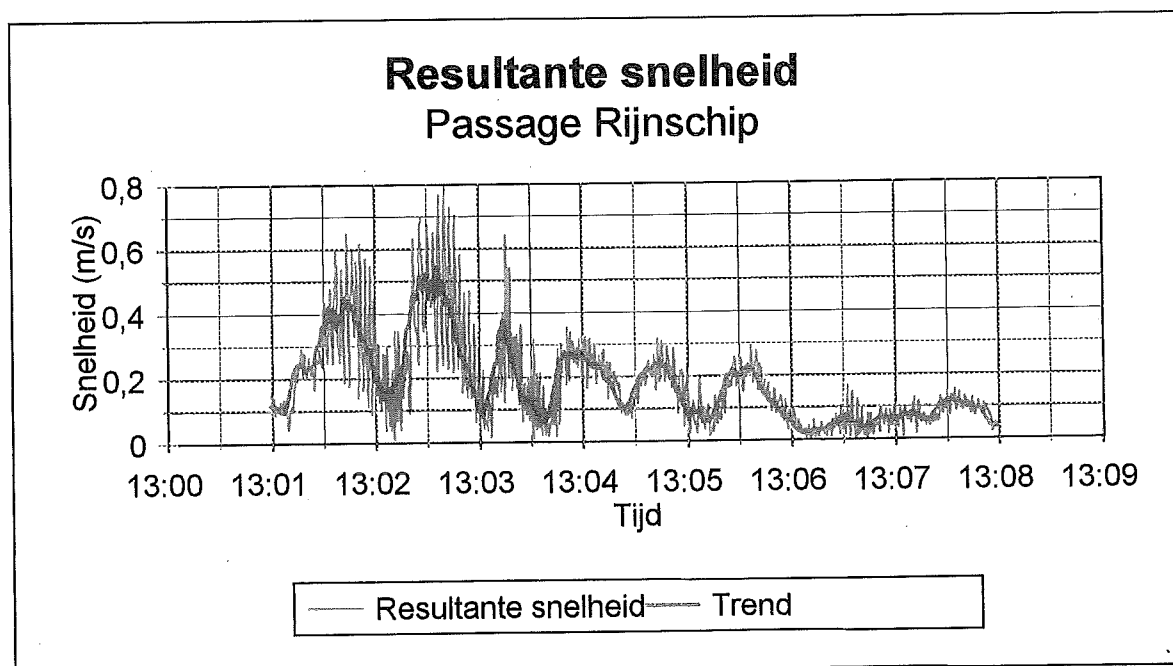
Figuur 3.3.2: de gevoeligheidsanalyse voor $\tau_{b,c}$

3.3.1.4 De bodemschuifspanning ontstaan door golven

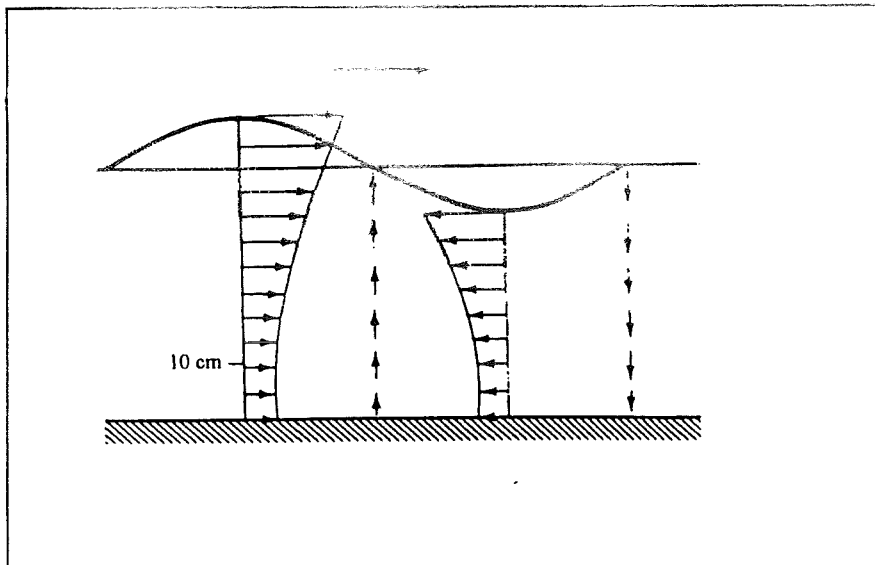
Om de bodemschuifspanning ontstaan door golven te kunnen berekenen moeten de periode en de maximale orbitaalsnelheid ter hoogte van de grenslaag bepaald worden.

De periode moet voor iedere golf tijdens een scheepspassage bepaald worden. Dit kan visueel gebeuren door de periode af te lezen in een grafiek waarin de golfhoogte of golfsnelheid tegen de tijd is uitgezet.

De orbitaalsnelheid ter hoogte van de EMF sensor wordt eveneens ontleend aan de meetreeksen. De snelheid in de Y-richting en de X-richting is op 10 cm boven de bodem gemeten. Deze twee snelheden in twee richtingen kunnen als vectoren worden opgeteld. Dit levert een resultante snelheid op voor iedere waarneming, die met 4 Hz zijn gemeten. Door het signaal te bewerken met een voortschrijdend gemiddelde van 20 waarnemingen, wordt een trend zichtbaar. Deze trend geeft de stroomsnelheid weer ontstaan door stroming. De variabiliteit hierop ontstaat door een golfbeweging in de snelheid, de orbitaalbeweging, zie figuur 3.3.3. Door van de resultante snelheid de trend af te trekken wordt de grootte van de variabiliteit berekend. De grootte van de variabiliteit wordt op deze manier voor iedere kwart seconde berekend. Deze variabiliteit op de stroming komt overeen met de orbitaalsnelheid. Er wordt aangenomen dat de orbitaalsnelheid op 10 cm boven de bodem gelijk is aan de orbitaalsnelheid net boven de grenslaag. Dit is een redelijke aanname, zie figuur 3.3.4. De grootte van de snelheid is vrij constant in het gedeelte van de snelheidsvertikaal net boven de grenslaag tot minimaal 10 cm waterdiepte, zie figuur 3.3.4. De grenslaag is een dunne laag die de overgang vormt tussen de bodem en de bovenliggende laag met de vrije orbitaalbeweging die een vrij constante snelheidsvertikaal kent. Binnen de grenslaag is de mate van turbulentie groot. De dikte van de grenslaag is hier maximaal ongeveer 1 cm, dit komt omdat er sprake is van zeer korte golven waardoor de grenslaag zich in deze korte periode niet goed kan ontwikkelen. Bij iedere omkering van de golf moet de grenslaag namelijk opnieuw worden opgebouwd.



Figuur 3.3.3: de resultante snelheid. De dikke lijn geeft de trend weer, de dunne lijn de variabiliteit hierop.



Figuur 3.3.4: Stroomsnelheden onder een korte golf. N.B. Het verloop van de grootte van de stroomsnelheden over de vertikaal is in het onderste gedeelte constant. Dit gedeelte waar de snelheid in de vertikaal constant is komt in de werkelijkheid overeen met hoogte van minimaal 10 cm.

Door van elke scheepspassage op deze manier de orbitaalsnelheid met 4 Hz ter hoogte van de grenslaag en de periode van bijbehorende golven te bepalen, kan de bodemschuifspanning ontstaan door golven berekend worden.

Bodemschuifspanning door golven:

$$\tau_{b,w} = 0,25 \rho f_w \left(\hat{U}_\delta \right)^2 \quad [N/m^2] \quad (3.3.1.j)$$

Met: \hat{U}_δ : de orbitaalsnelheid bovenin de grenslaag (δ) [m/s]
 f_w : golfwrijvingsfactor [-]

De wrijvingsfactor:

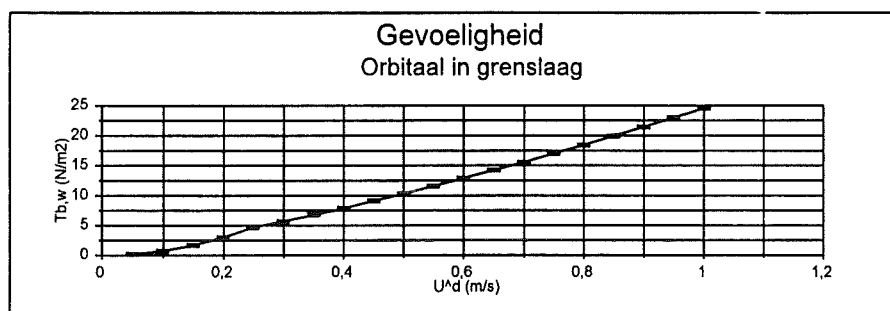
$$f_w = \exp \left[-6 + 5,2 \left(\frac{\hat{U}_\delta T / 2\pi}{k_s} \right)^{-0,19} \right] \quad [-] \quad (3.3.1.k)$$

Met: \hat{U}_δ : de orbitaalsnelheid bovenin de grenslaag (δ) [m/s]
 k_s : de bodemruwheid [m]
 T : de golfperiode [s]

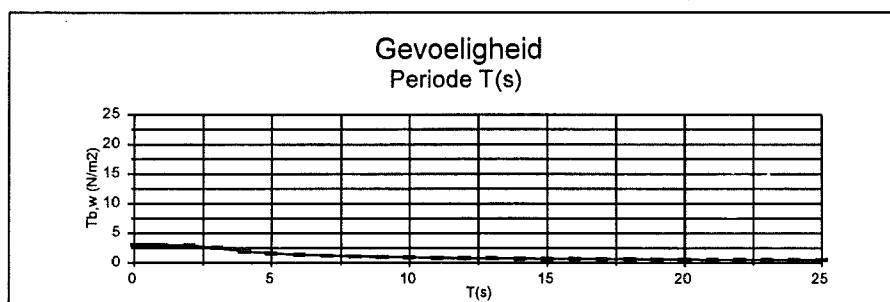
De gevoeligheid van $\tau_{b,w}$ voor de orbitaalsnelheid in de grenslaag, de golfperiode en de bodemruwheid is weergegeven in figuur 3.3.5. Het meest gevoelig is $\tau_{b,w}$ voor de orbitaalsnelheid in de grenslaag. Aangezien de snelheid op 10 cm boven de bodem nauwkeurig wordt gemeten en hieruit de orbitaalsnelheid ter hoogte van de grenslaag wordt bepaald, kunnen er weinig onnauwkeurigheden optreden in de waarde voor de orbitaalsnelheid ter hoogte van de grenslaag. De onnauwkeurigheid in de waarde voor $\tau_{b,w}$, ontstaan door de waarde van de orbitaalsnelheid ter hoogte van de grenslaag, wordt dan ook

geschat op 1 (N/m²). Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de orbitaalsnelheid ter hoogte van de grenslaag tot 0,05 (m/s) nauwkeurig bepaald kan worden. De gevoeligheid van $\tau_{b,w}$ voor de waarde van de periode is gering. En aangezien de waarde van de periode van de secundaire golven ongeveer twee seconde is en $\tau_{b,w}$ op het traject van nul tot drie seconde ongevoelig is voor de waarde van de periode, wordt de onnauwkeurigheid van de waarde van $\tau_{b,w}$ ontstaan door de onnauwkeurigheid in de waarde van de periode geschat op 0,1 (N/m²).

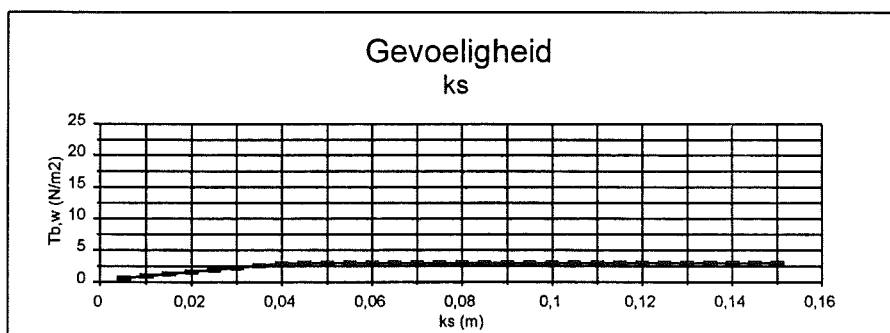
De waarde voor de vormruwheid, het grootste aandeel van de bodemruwheid, kan variëren tussen 4 en 6 cm. De onnauwkeurigheden in de waarde van $\tau_{b,w}$, ontstaan door de onnauwkeurigheid in het bepalen van de ribbelhoogte wordt geschat op 0,1 (N/m²). Dit geeft een totale onnauwkeurigheid in de waarde van $\tau_{b,w}$ van $\sqrt{1^2 + 0,1^2 + 0,1^2} = 1$ (N/m²).



$T = 2$ (s), $k_s = 0,05$ (m)



$\hat{U}_\delta = 0,2$ (m/s), $k_s = 0,05$ (m)



$\hat{U}_\delta = 0,2$ (m/s), $T = 2$ (s)

Figuur 3.3.5: de gevoeligheid van $\tau_{b,w}$ voor de waarde van de orbitaalsnelheid ter hoogte van de grenslaag, de periode van de golf en de bodemruwheid.

3.3.2 Het karakteriseren van de schepen

Doordat per bestudeerde scheepspassage de bodemschuifspanning uit de meetgegevens berekend is en de bodemschuifspanning van de T_0 situatie bekend is, kan de bodemschuifspanning opgewekt door het schip bepaald worden. Dit kan door de waarde van de bodemschuifspanning die heerst tijdens de T_0 situatie, af te trekken van de waarde van de bodemschuifspanning die gemiddeld heerst over de gehele periode dat een schip passeert. Dit is de gemiddelde bodemschuifspanning in het kribvak, opgewekt door een bepaald schip.

Bij het bepalen of bepaalde scheepstypen erosie veroorzaken moet gekeken worden of de totale bodemschuifspanning, dus met de T_0 bodemschuifspanning, groter is dan de kritische bodemschuifspanning. Op deze manier kunnen de scheepstypen geklassificeerd worden in klassen van wel of geen sediment opwoeling, afhankelijk van de vaarsnelheid, de afstand tot de oever, het volume en de diepgang van het schip.

Per kribvak zijn ongeveer 7 of 8 verschillende scheepspassages bestudeerd. Dit kunnen verschillende typen schepen zijn. De typen schepen die voorkomen op de Waal zijn weergegeven in bijlage 3.8 en tabel 3.3.1. Er is voor gekozen om alleen schepen groter dan 55 meter te bestuderen, omdat het effect van de kleine schepen gering bleek te zijn. Dus de scheepstypen 6 en 7 zijn niet bestudeerd.

Type	Naam	Lengte (m)	Breedte (m)	Diepteligging (m)		
				<i>Vol</i>	<i>Halfvol</i>	<i>Leeg</i>
1	4-Baksduwvaart	max. 180	22,80	4,00	2,00	0,40
2	Koppelverband	max. 180		4,00	2,00	0,40
3	Rijnschip	86-110	9,50	3,00	2,00	1,00
4	Kanaalschip	67-85	9,00	2,50	2,00	1,00
5	Dortmunder	55-67	8,20	2,50	2,00	0,90
6	Kempenaar	50-55	6,60	2,70	2,00	0,75
7	Spits	38-50	5,05	2,50	1,80	0,65
8	Coaster			4,50	3,00	1,75
9	Overige (baggerschip)			3,00	2,00	1,00
10	2-Baksduwvaart	max. 180	22,80 of 11,40	4,00	2,00	0,40
11	3-Baksduwvaart	max. 180	22,80	4,00	2,00	0,40

Tabel 3.3.1: de verschillende type schepen en hun karakteristieken.

3.4 Resultaten

3.4.1 De morfologie van het gebied

3.4.1.1 De morfologie tijdens de meetcampagne

De hoogtekaarten van de vier onderzochte kribvakken zijn weergegeven in bijlage 3.1. De waterlijn bevond zich tijdens de metingen op de 5 m hoogtelijn t.o.v. N.A.P. Ook zijn in deze bijlagen de posities van de drie frames weergegeven. Opvallend is dat de kribvakbodem een geringe helling heeft tot aan de kribkoppen. Bij de overgang van het kribvak naar de rivier is in de vier kribvakken een steilrand zichtbaar. Benedenstrooms van de bovenstroomse krib van ieder kribvak is een ellipsvormige depressie zichtbaar. Deze depressie ontstaat daar waar de neer zich bevindt en de stroming sterk turbulent is. De lange as van de ellipsvormige depressie is bij ieder kribvak schuin met de stroming mee naar de rivieras gericht. De depressie is het diepst in het kortste kribvak, kribvak 2. De depressie ligt hier 2,5 m lager dan de omgeving. Ook kribvak 4 heeft een diepe depressie. Kribvak 1 en 3 hebben een minder diepe depressie, respectievelijk 0,5 en 1,0 m.

3.4.1.2 Morfologische veranderingen

De verschilkaarten zijn vervaardigd door de waterpasmetingen die 10 weken voor de meetcampagne zijn uitgevoerd af te trekken van de waterpasmetingen tijdens de meetcampagne. De resultaten zijn te zien in bijlage 3.3. De dikke lijn in de drie dimensionale weergave geeft de nullijn weer, hier heeft dus geen erosie of sedimentatie plaatsgevonden tijdens de 10 weken. De stippellijn geeft de waterlijn tijdens de meetcampagne weer. Van kribvak 4 kon geen verschilkaart vervaardigd worden omdat de situatie 10 weken voor de start van de meetcampagne niet is ingemeten.

Opvallend is dat de grootste verschillen optreden in de hogere gedeelten van de drie kribvakken, ongeveer 60 cm is daar geërodeerd. Bij kribvak 1 en 2 is erosie zichtbaar in het hogere gedeelte, terwijl kribvak 3 hier depositie laat zien. De hogere gedeelten liggen boven de waterlijn en het transport kan dus veroorzaakt zijn door windtransport, zie verslag J-W Mol. Opgemerkt moet worden dat aan de randen grotere verschillen kunnen ontstaan door de randeffecten die optreden bij de interpolatie.

Het gedeelte beneden de waterlijn laat over de periode van 10 weken overwegend erosie zien in de orde van maximaal 50 cm. In kribvak 1 is de maximale erosie 20 cm. De erosie is het grootst midden tussen de kribben in. In kribvak 2 is 20 cm erosie te zien direkt benedenstrooms van de bovenstroomse krib. En 20 cm sedimentatie bovenstrooms van de benedenstroomse krib. Midden tussen de kribben is het verschil nul, dus geen verandering in morfologie na 10 weken. In kribvak 3 vindt overal erosie plaats behalve 50 m benedenstrooms van de bovenstrooms krib. Hier heeft 10 cm sedimentatie plaatsgevonden. De erosie is het grootst omstreeks de waterlijn in kribvak 3, het betreft hier 40 cm.

3.4.2 De karakteristieken van de korrelgrootte in het gebied

In ieder kribvak zijn een zevental bodemmonsters genomen. Hiervoor zijn de karakteristieken berekend. Deze karakteristieken worden per kribvak gemiddeld, de resultaten zijn weergegeven in tabel 3.4.1. Ook van het monster dat met behulp van een gaasje met een diameter van 50 μm uit het rivierwater is gefilterd, zijn de karakteristieken bepaald, (zwevend).

	d_{95}	d_{90}	d_{84}	d_{75}	d_{50}	d_{35}	d_{16}	d_{10}	d_5	sortering
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
Kribvak 1	0.77	0.61	0.50	0.52	0.33	0.36	0.23	0.20	0.19	1.47
Kribvak 2	1.79	1.34	0.98	0.47	0.26	0.21	0.18	0.16	0.13	2.42
Kribvak 3	7.31	4.08	2.58	1.81	0.70	0.53	0.35	0.33	0.28	2.95
Kribvak 4	5.87	4.32	3.27	1.68	0.64	0.47	0.35	0.28	0.22	3.64
Zwevend	0.38	0.31	0.34	0.26	0.22	0.24	0.21	0.17	0.14	1.31

Tabel 3.4.1: de karakteristieken van de bodemmonsters en het zand in het rivierwater.

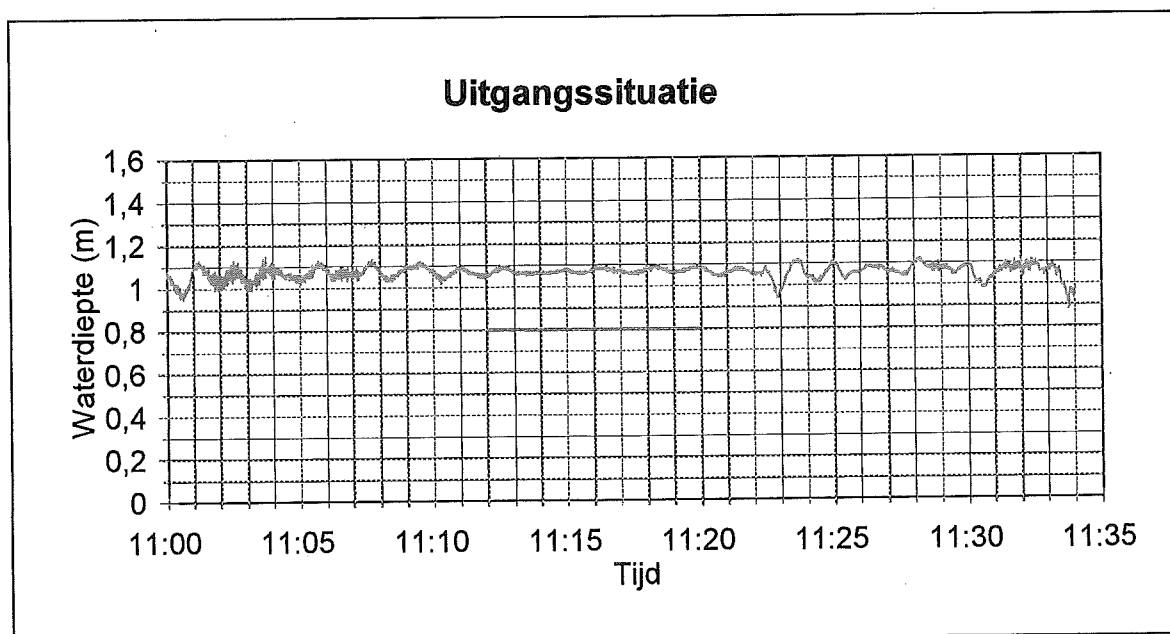
Opvallend is dat het sediment van de twee kribvakken aan de noordoever (3+4) grover is dan aan de zuidoever (1+2).

3.4.3 De bodemschuifspanning

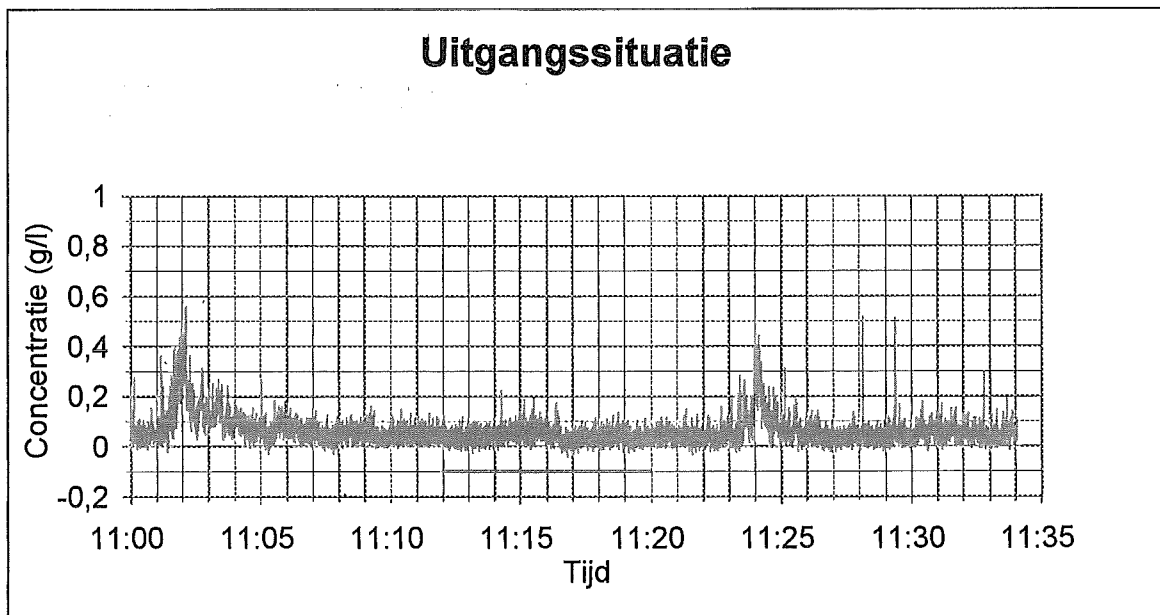
3.4.3.1 De bodemschuifspanning tijdens de T_0 situatie

Als T_0 situatie is een periode van 8 minuten gekozen uit de burst van 24 juni van 11.00.00 tot 11.35.00 uur. In de periode van 11.12.00 uur tot 11.20.00 uur passeerden er geen schepen en was de fluctuatie in het OBS signaal en de waterstand gering. Voorafgaand aan deze periode passeerden er gedurende 10 minuten geen schepen. De grafiek van de waterdiepte van de hele burst van miniframe 2, is weergegeven in figuur 3.4.1. De grafiek van het OBS signaal van de hele burst is weergegeven in figuur 3.4.2. Duidelijk zichtbaar is dat de waterbeweging en het OBS signaal een kleine variabiliteit heeft tijdens de 8 minuten van de T_0 situatie. Dit zijn dus de juiste omstandigheden voor een T_0 situatie.

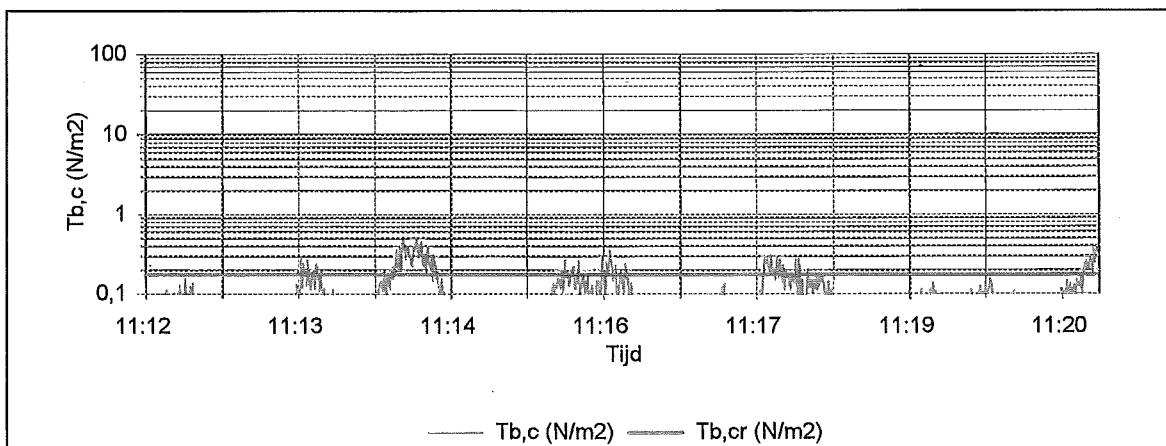
Met behulp van de meetreeksen is voor iedere kwart seconde de bodemschuifspanning op de al eerder beschreven manier berekend voor stroming ($\tau_{b,c}$), voor golven ($\tau_{b,w}$) en de totale bodemschuifspanning ($\tau_{b,tot}$). De resultaten voor miniframe 2 van $\tau_{b,c}$, $\tau_{b,w}$ en $\tau_{b,tot}$ zijn weergegeven in respectievelijk figuur 3.4.3, 3.4.4 en 3.4.5. De schaal op de y-as is zo gekozen zodat de figuren 3.4.3, 3.4.4 en 3.4.5 goed te vergelijken zijn met figuur 3.4.8, 3.4.9 en 3.4.10. De dikke lijn geeft de kritieke bodemschuifspanning weer die overschreden moet worden om materiaal te kunnen eroderen. De waarde van de kritieke bodemschuifspanning is in dit kribvak $0,18 \text{ (N/m}^2\text{)}$. De waarden van de kritieke bodemschuifspanning voor de drie andere kribvakken worden weergegeven in tabel 3.4.2. Duidelijk zichtbaar is dat in figuur 3.4.3, 3.4.4 en 3.4.5 de kritieke bodemschuifspanning zelden wordt overschreden. Wanneer dit wel het geval is, is de overschrijding gering.



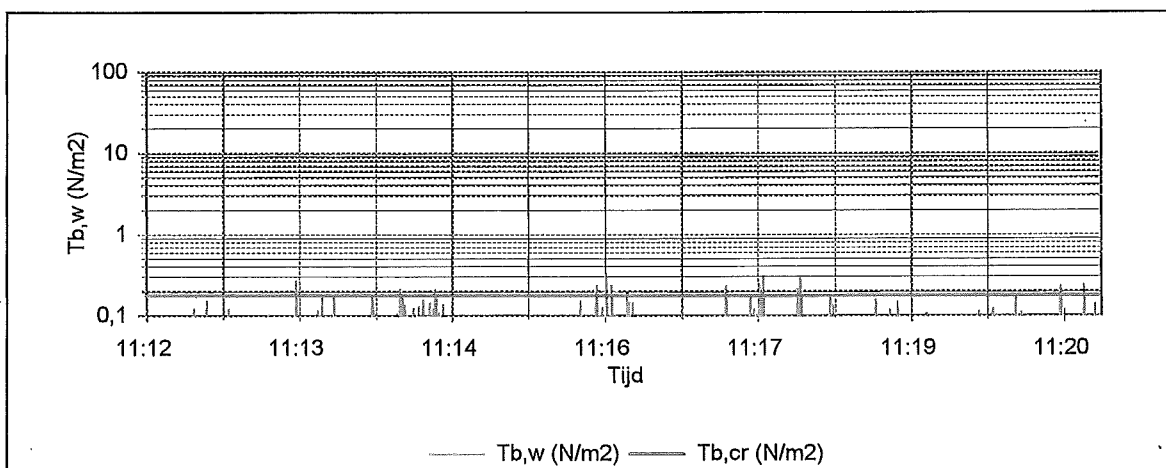
Figuur 3.4.1: de waterbeweging (rode lijn) tijdens de burst van 24-6 van 11.00.00 tot 11.35.00 uur bij miniframe 2. De blauwe lijn geeft de periode aan waarin geen schepen passeren, de T_0 situatie.



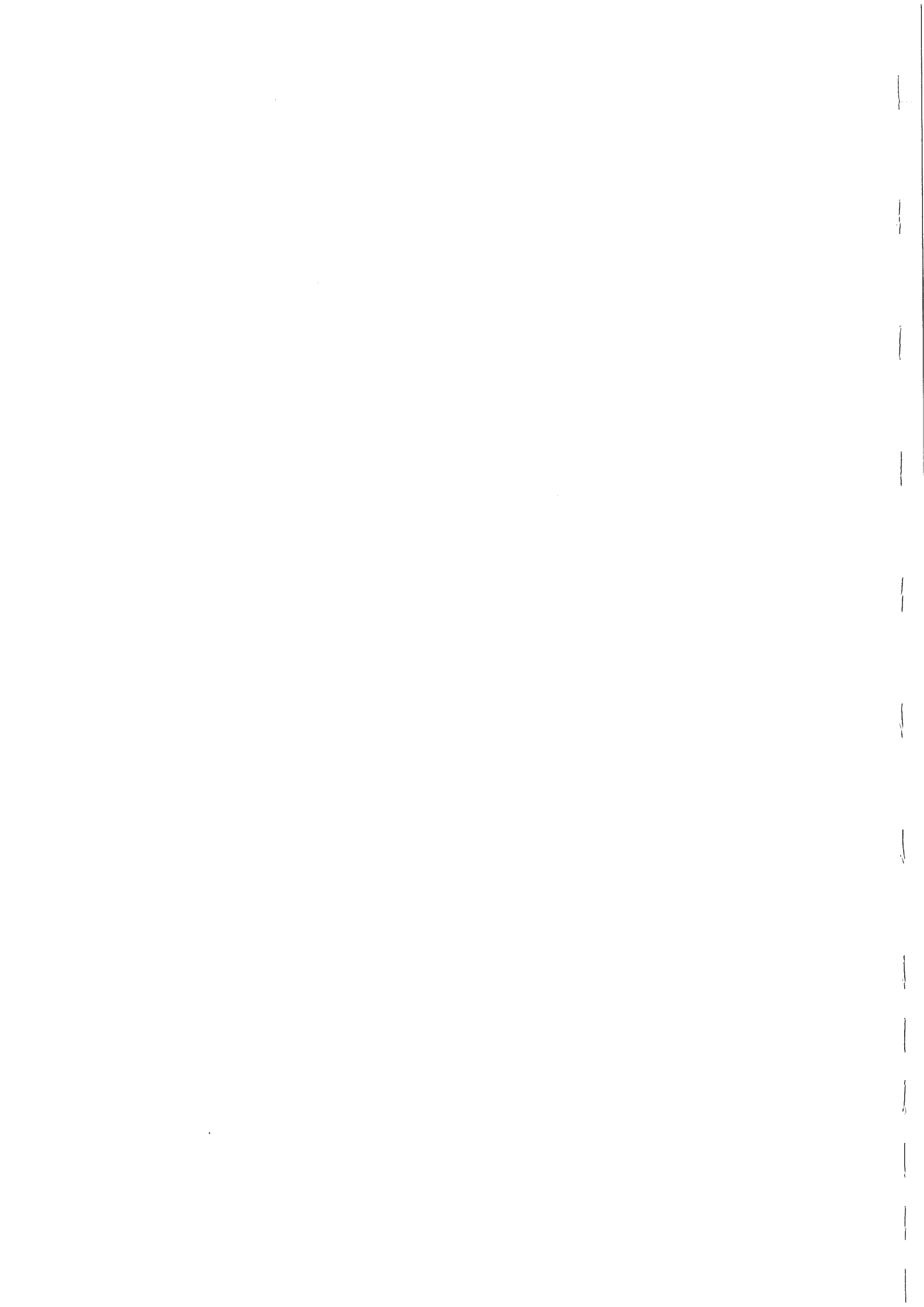
Figuur 3.4.2: het OBS signaal (rode lijn) tijdens de burst van 24-6 van 11.00.00 tot 11.35.00 uur bij miniframe 2. De blauwe lijn geeft de periode aan waarin geen schepen passeerden, de T_0 situatie.

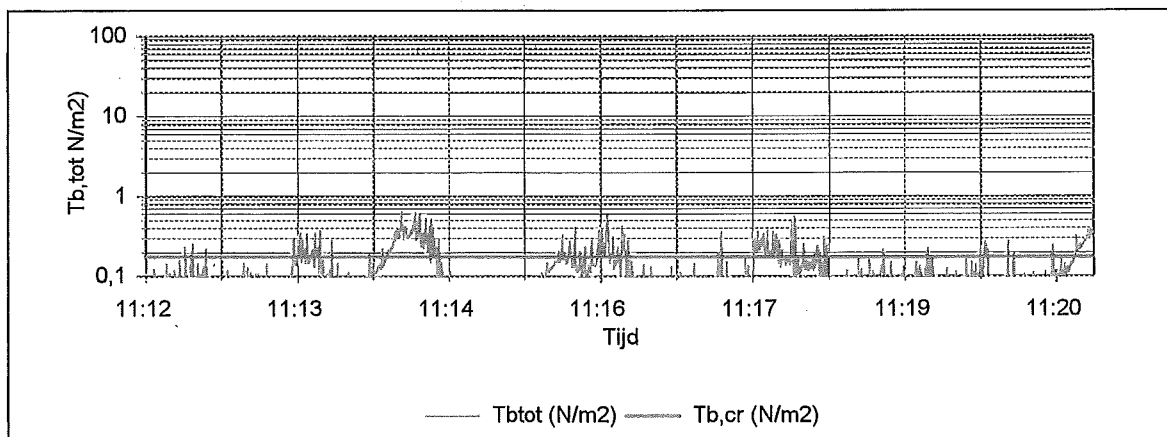


Figuur 3.4.3: de bodemschuifspanning ontstaan door stroming tijdens de T_0 situatie bij miniframe 2.



Figuur 3.4.4: de bodemschuifspanning ontstaan door golven tijdens de T_0 situatie bij miniframe 2.





Figuur 3.4.5: de bodemschuifspanning ontstaan door stroming en golven tijdens de T_0 situatie bij miniframe 2.

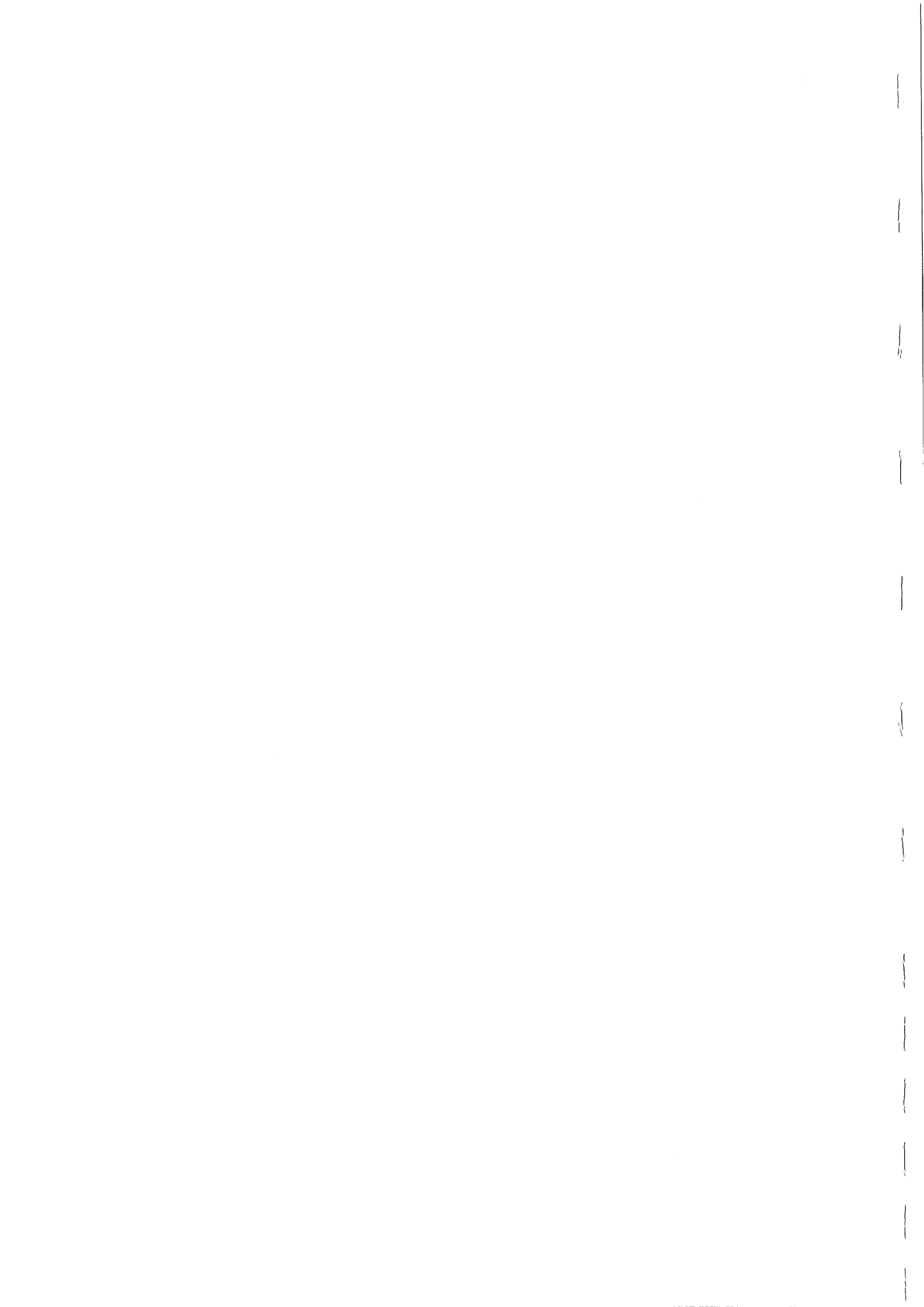
Over de gehele periode van 8 minuten wordt de gemiddelde waarde genomen van de bodemschuifspanning. Dit resulteerde in de waarden weergegeven in tabel 3.4.2. In kribvak 2 wordt dus de T_0 situatie bepaald. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de omstandigheden tijdens de periode dat er geen schepen passeren in ieder kribvak hetzelfde zijn. Tijdens de periode dat er geen schepen passeren wordt de bodemschuifspanning namelijk alleen bepaald door de rivierafvoer en de windgolven. De grootte hiervan is in ieder kribvak gelijk.

Kritische bodemschuifspanning			
	$\tau_{b,cr}$		
kribvak 1	0.19		
kribvak 2	0.18		
kribvak 3	0.34		
kribvak 4	0.32		
Bodemschuifspanning tijdens de T_0 situatie			
	$\tau_{b,c}$	$\tau_{b,w}$	$\tau_{b,tot}$
mf 1	0.16	0.03	0.18
mf 2	0.08	0.02	0.11

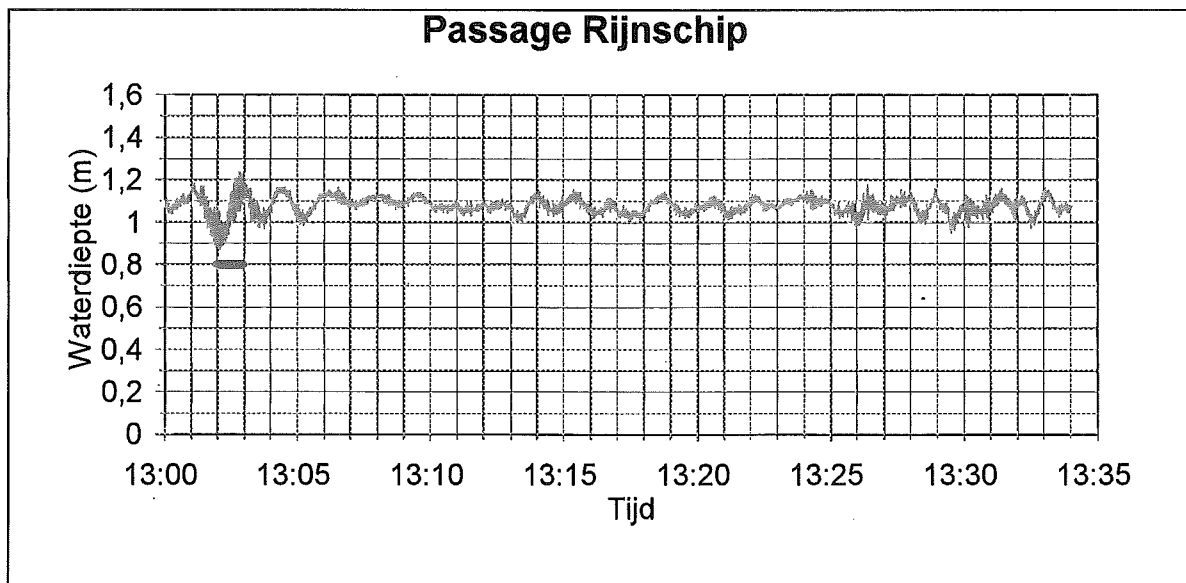
Tabel 3.4.2: de waarden voor de bodemschuifspanning tijdens de T_0 situatie in (N/m^2) en de waarden voor de kritieke bodemschuifspanning per kribvak.

3.4.3.2 De bodemschuifspanning tijdens de passage van een schip

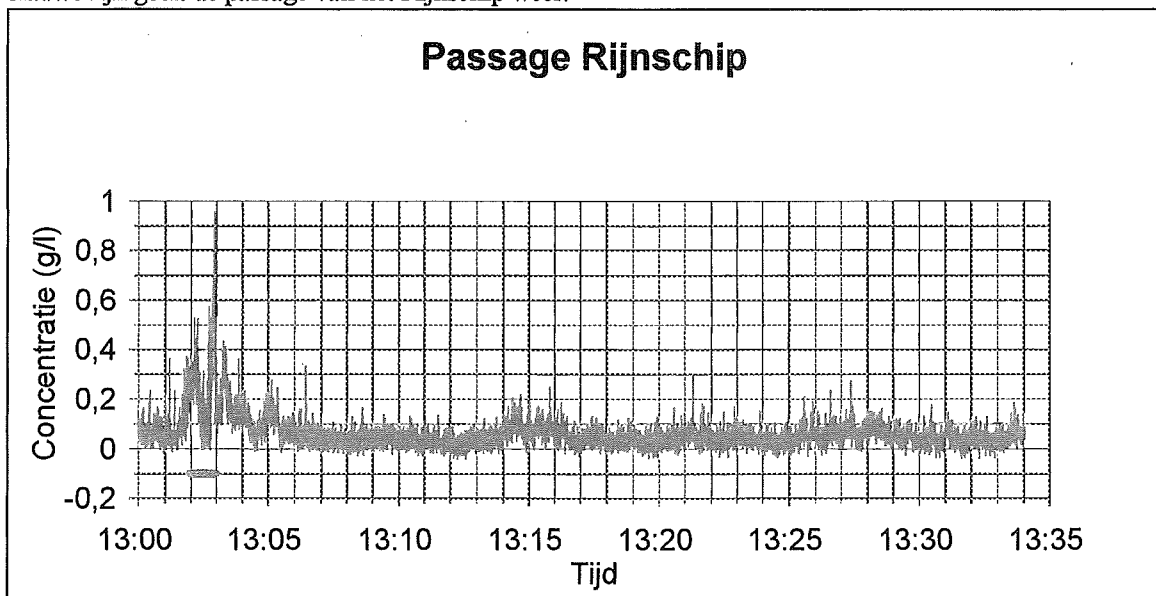
Ter illustratie zal één passage van een schip nader besproken worden. Het gaat hier om een passage van een Rijnschip op 24 juni om 13.02.00 uur. Het schip is 90 meter lang, beladen en vaart in stroomopwaartse richting aan de zuidoever. De metingen worden op dat moment uitgevoerd aan de zuidoever in kribvak 2. De grafiek van de waterdiepte en het OBS signaal zijn weergegeven in respectievelijk figuur 3.4.6 en 3.4.7. Opgemerkt moet worden bij de figuren dat wanneer het schip passeert de waterspiegel een golfbeweging maakt die langzaam uitdempt. Het uitdempen duurt ongeveer 5 minuten. De grote uitwijking is de primaire golf van het schip. De secundaire golven van het schip worden weergegeven door de variabiliteit op de grote uitwijking die toeneemt tijdens de passage van het schip. Het OBS signaal laat een piek in de concentratie zien op het tijdstip dat het schip passeert, hetgeen zou moeten resulteren in een berekende bodemschuifspanning die groter is dan de kritieke bodemschuifspanning. Dit is ook inderdaad het geval tijdens de passage van het schip. In figuur 3.4.8, 3.4.9 en 3.4.10 is de



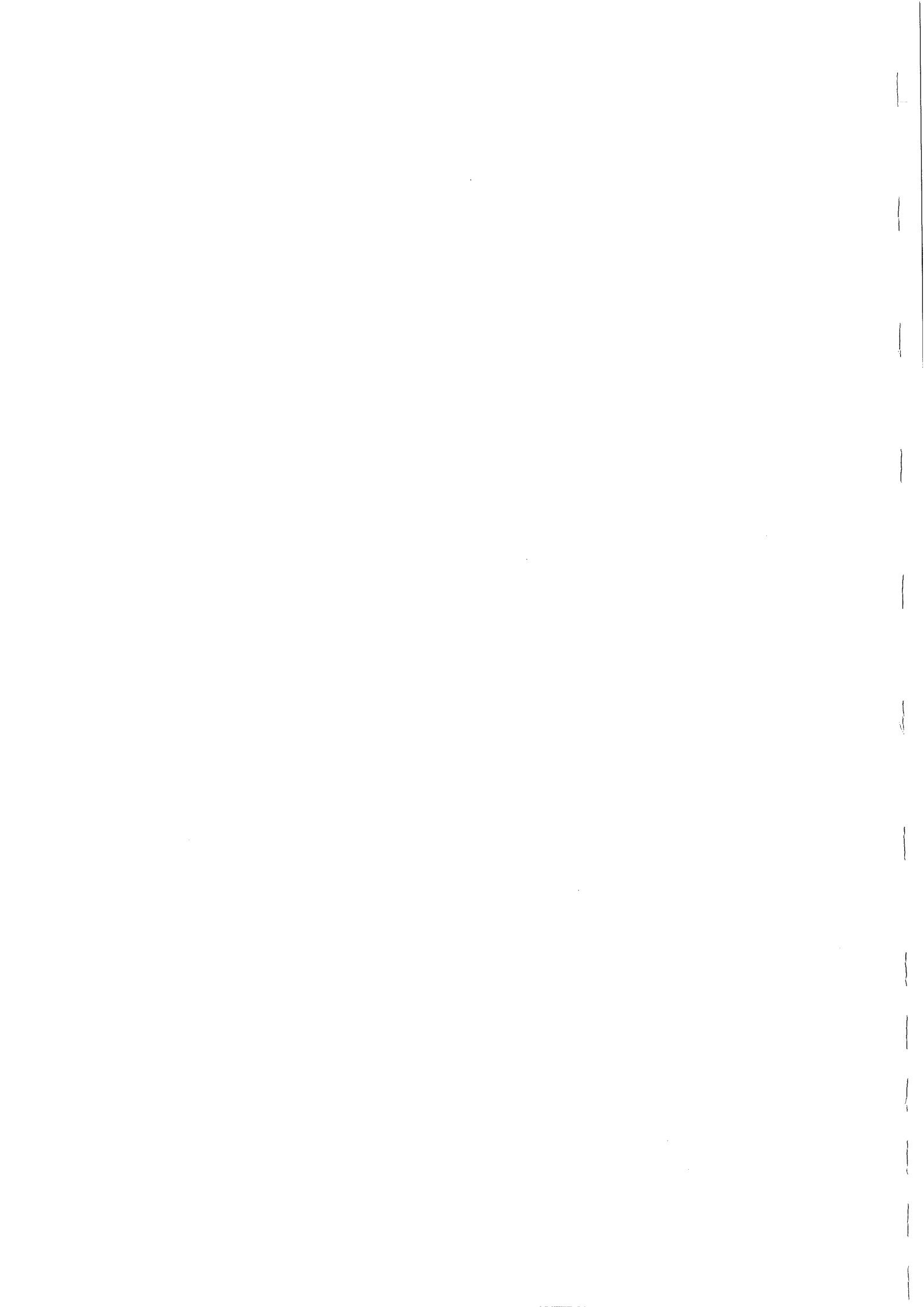
berekende bodemschuifspanning ontstaan door respectievelijk stroming, golven en de combinatie van stroming en golven weergegeven. Deze laat een sterke toename zien in zowel de bodemschuifspanning ontstaan door stroming als door golven bij de passage van het schip. De grootte van de bodemschuifspanning neemt geleidelijk weer af en de omstandigheden van de T_0 situatie keren weer terug. De gemiddelde waarden worden genomen over de periode vanaf het tijdstip wanneer het schip passeert tot de T_0 situatie weer terugkeert. Dit is de gemiddelde waarde van de bodemschuifspanning die heerst tijdens de passage van het schip. Het criterium voor het terugkeren van de T_0 situatie is als volgt: de totale bodemschuifspanning moet definitief onder de lijn van de kritieke bodemschuifspanning liggen, incidentele pieken uitgesloten. Aangezien de bodemschuifspanning tijdens de T_0 situatie bekend is, kan de bodemschuifspanning veroorzaakt door het schip berekend worden. Opmerkelijk in figuur 3.4.8 is de golfbeweging die te zien is in de grootte van de bodemschuifspanning ontstaan door stroming. Dit duidt erop dat de zuiging van het schip een golfbeweging kent, de primaire golf. Deze golfbeweging heeft een periode van ongeveer één minuut.

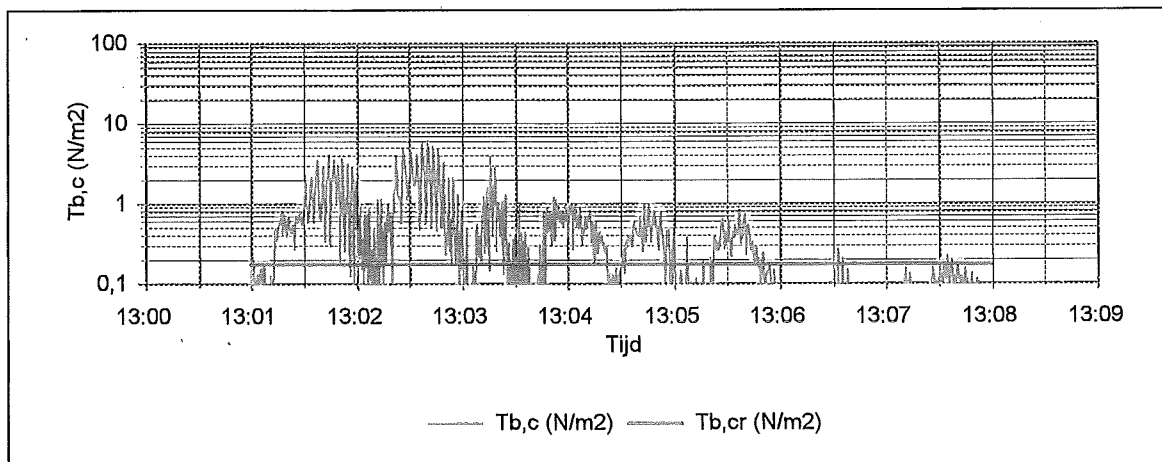


Figuur 3.4.6: de waterbeweging tijdens de burst van 24-6 van 13.00.00 tot 13.35.00 uur bij miniframe 2. De blauwe lijn geeft de passage van het Rijnschip weer.

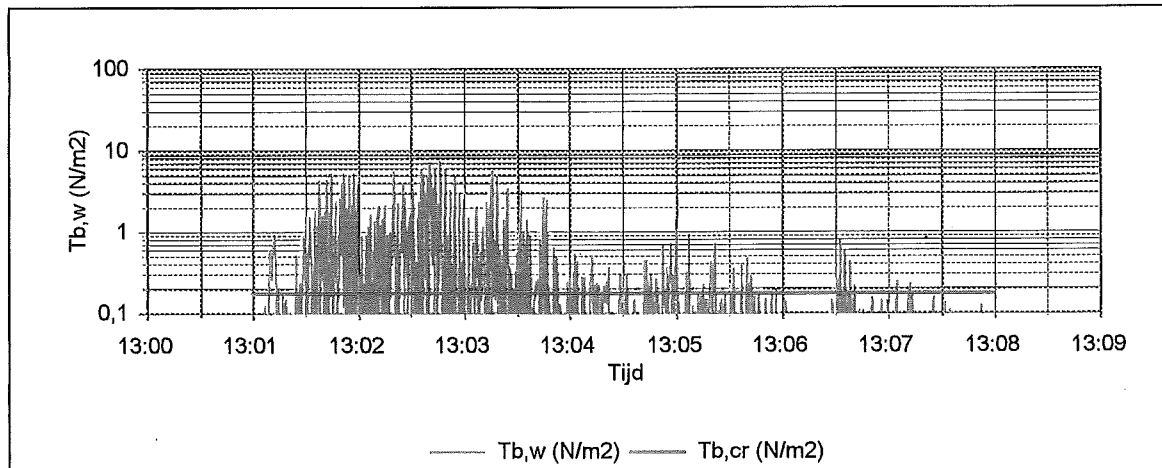


Figuur 3.4.7: het OBS signaal tijdens de burst van 24-6 van 13.00.00 tot 13.35.00 uur bij miniframe 2. De blauwe lijn geeft de passage van het Rijnschip weer.

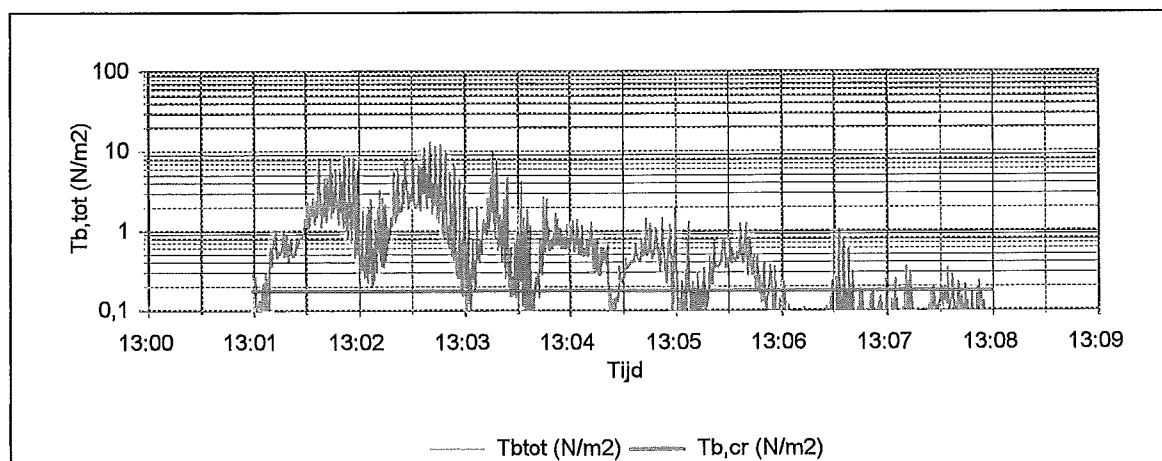




Figuur 3.4.8: de bodemschuifspanning ontstaan door stroming tijdens de passage van een Rijnschip bij mf 2.

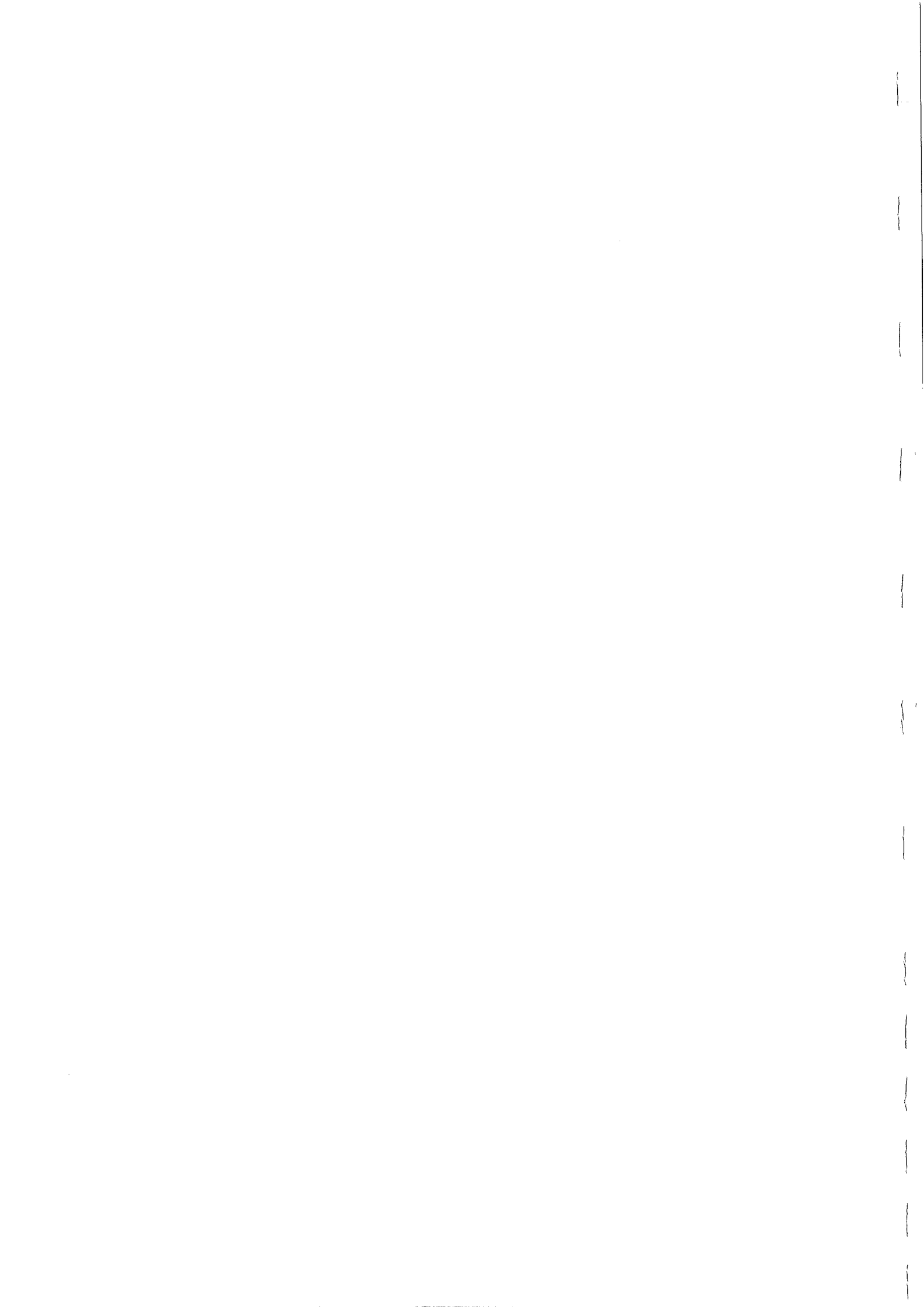


Figuur 3.4.9: de bodemschuifspanning ontstaan door golven tijdens de passage van een Rijnschip bij miniframe 2.



Figuur 3.4.10: de bodemschuifspanning ontstaan door stroming en golven tijdens de passage van een Rijnschip bij miniframe 2.

Op deze manier is voor een aantal schepen de gemiddelde bodemschuifspanning ontstaan door stroming, golven en de combinatie hiervan bepaald. De resultaten van de berekeningen die zijn uitgevoerd op de meetreeksen gemeten in kribvak 1 en 2 zijn weergegeven in bijlage 3.5. De

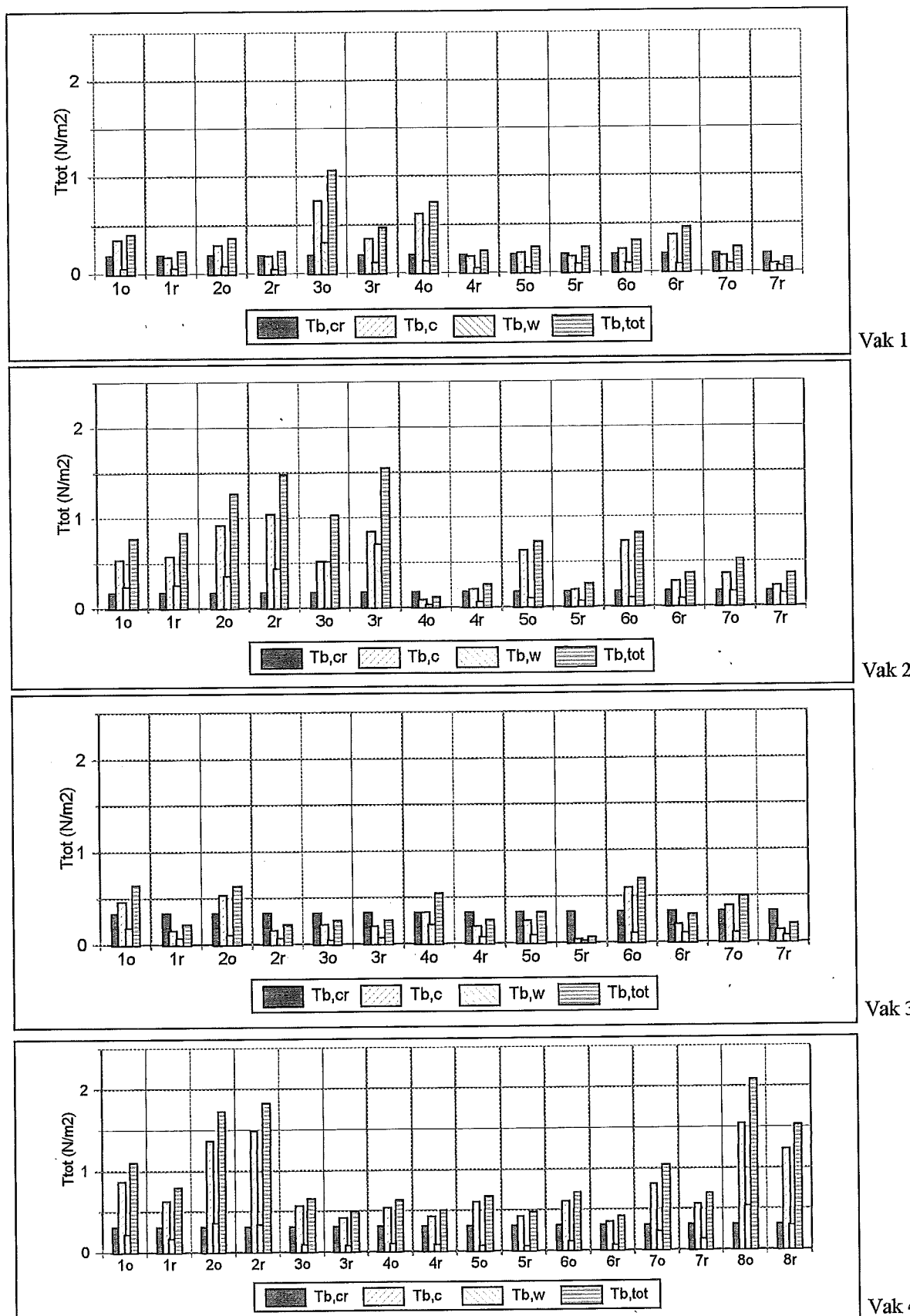


Op deze manier is voor een aantal schepen de gemiddelde bodemschuifspanning ontstaan door stroming, golven en de combinatie hiervan bepaald. De resultaten van de berekeningen die zijn uitgevoerd op de meetreeksen gemeten in kribvak 1 en 2 zijn weergegeven in bijlage 3.5. De resultaten van de berekeningen die zijn uitgevoerd op de dataset van kribvak 3 en 4 staan in bijlage 3.6. In bijlage 3.5 en 3.6 wordt de totale bodemschuifspanning ontstaan door stroming weergegeven door $T_{b,c}$, dus met de op de achtergrond heersende T_0 situatie. De bodemschuifspanning ontstaan door de stroming, veroorzaakt door het schip wordt weergegeven in bijlage 3.5 en 3.6 door $T_{b,c,sch}$. Dit is dus zonder de op de achtergrond heersende T_0 situatie. $T_{b,c}$ in de bijlage 3.5 en 3.6 komt dus overeen met $\tau_{b,c}$ en $T_{b,c,sch}$ komt dus overeen met $\tau_{b,c,sch}$. De b staat voor bodemschuifspanning, de c voor stroming (current) en sch staat voor schip.

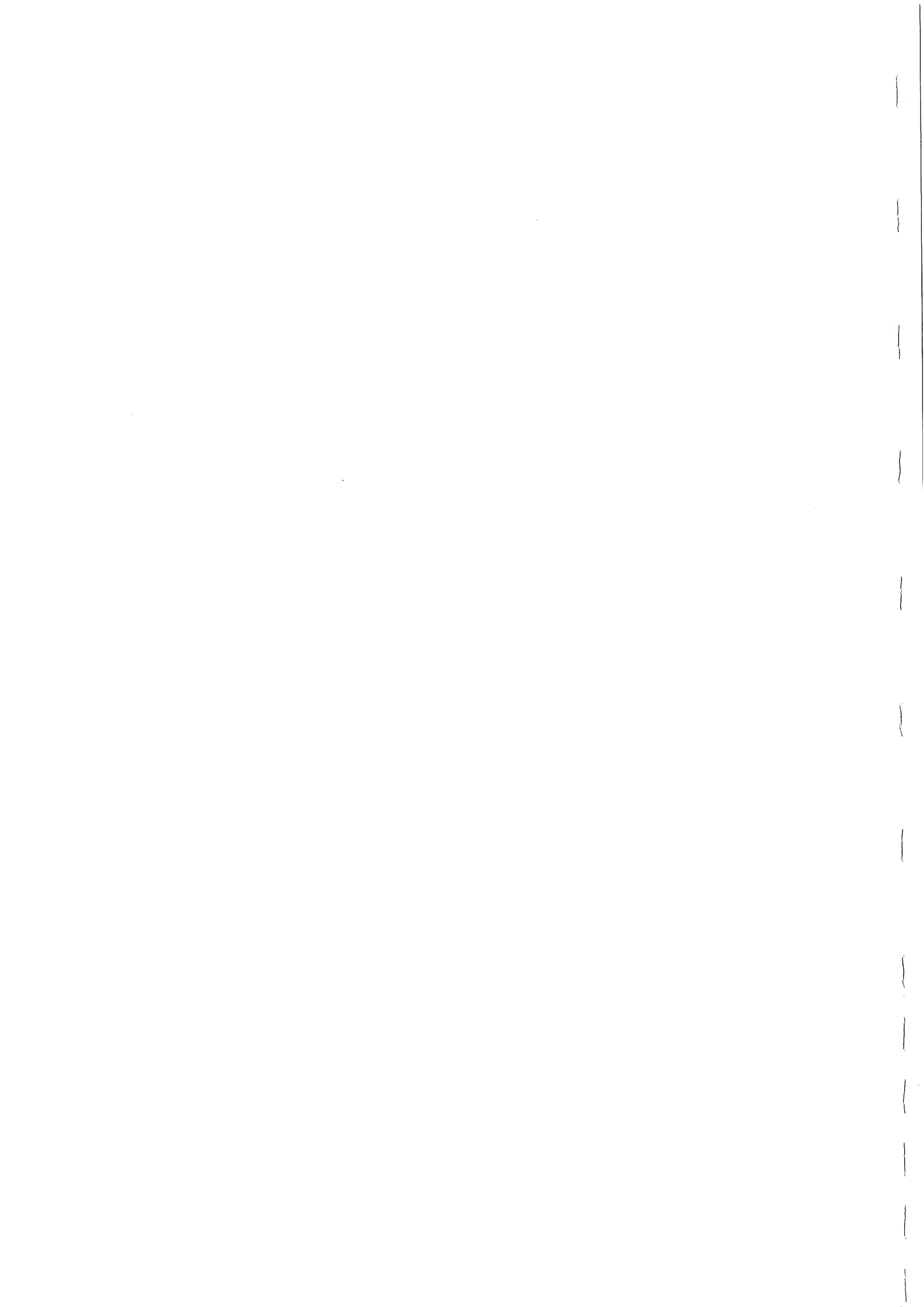
Figuren 3.4.11 en 3.4.12 geven dezelfde resultaten weer als de gegevens in bijlage 3.5 en 3.6. In figuur 3.4.11 wordt per kribvak van ieder passerend schip de kritieke bodemschuifspanning, de bodemschuifspanning ontstaan door stroming, de bodemschuifspanning ontstaan door golven en de combinatie hiervan weergegeven. Het gaat hier om totale bodemschuifspanning. Dus de bodemschuifspanning van de T_0 situatie met hierop gesuperponeerd de bodemschuifspanning ontstaan door de passage van een schip. In figuur 3.4.12 wordt alleen de bodemschuifspanning ontstaan door de passage van een schip weergegeven. De bodemschuifspanning die heerst tijdens de T_0 situatie is van de totale bodemschuifspanning afgetrokken. De aanduidingen op de x-as zijn terug te vinden in bijlage 3.5 en 3.6 in kolom 4. Per kribvak zijn 7 of 8 scheepspassages bestudeerd, dit wordt weergegeven door de nummers 1 t/m 7 of 1 t/m 8 op de x-as. Dit zijn dus geen cijfers die refereren naar het scheepstype, maar naar de bestudeerde scheepspassages. Om welke passage het gaat en om welk type schip kan opgezocht worden in bijlage 3.5 en 3.6. De "o" of de "r" geven respectievelijk het oeverframe (mf1) en het rivierframe (mf2) weer.

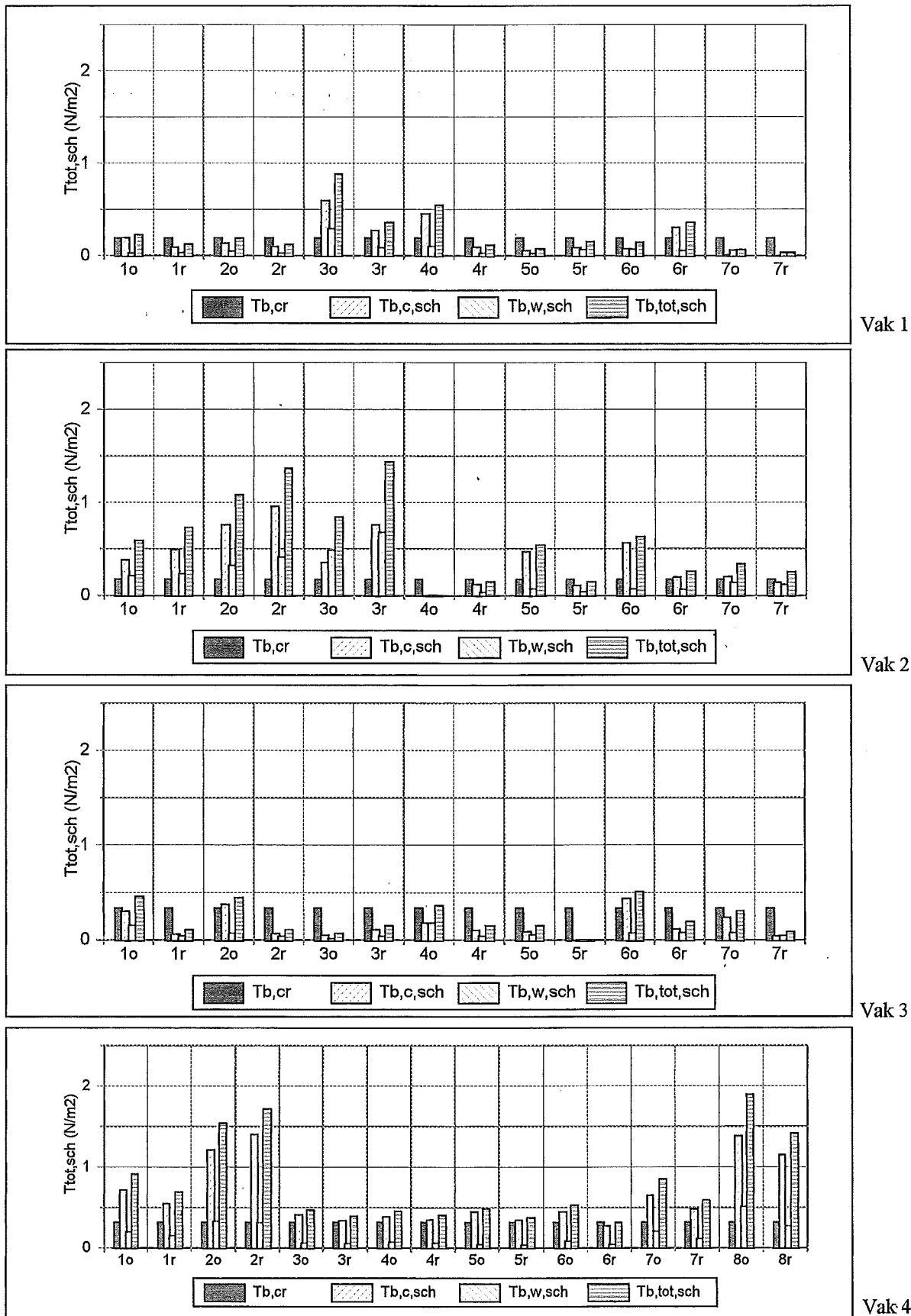
Opgemerkt moet worden dat in figuur 3.4.11 en 3.4.12 duidelijk zichtbaar is dat sommige schepen wel een hogere bodemschuifspanning veroorzaken dan de kritieke bodemschuifspanning en andere niet. Bijvoorbeeld schip 3 in kribvak 2, het Rijnschip dat al eerder besproken is, heeft een hogere bodemschuifspanning dan de kritieke bodemschuifspanning. Een ander Rijnschip, schip 3 in kribvak 3, heeft een bodemschuifspanning die kleiner is dan de kritieke bodemschuifspanning. Ook wanneer de op de achtergrond heersende T_0 situatie erbij gerekend wordt. Dit beeld van soms wel hoge en soms geen hoge bodemschuifspanningen bij eenzelfde type schip zal in de volgende paragraaf nader besproken worden.



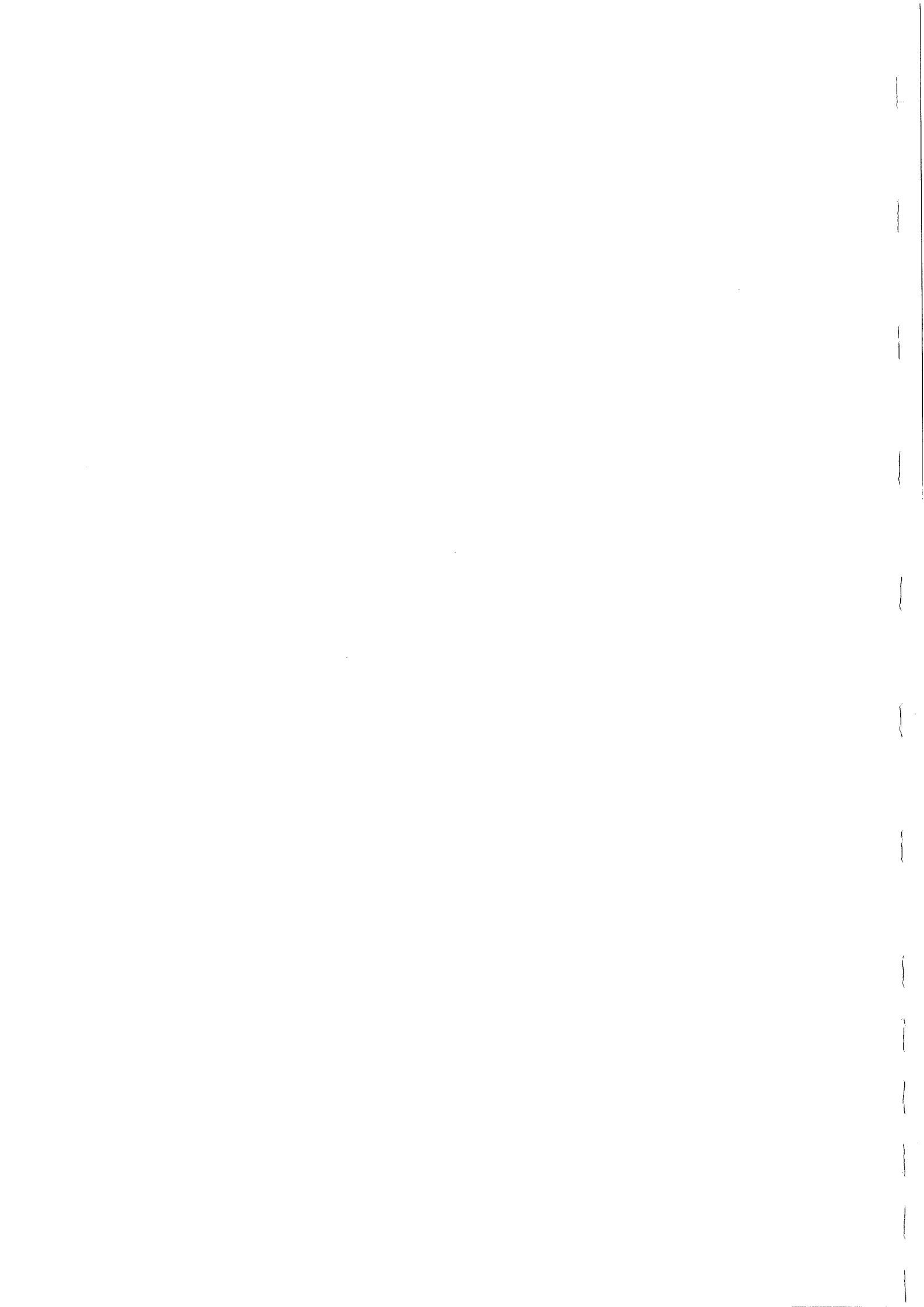


Figuur 3.4.11: de berekende bodemschuifspanningen voor 7 of 8 scheepspassages per kribvak. Het betreft hier de totale bodemschuifspanning, dus inclusief de waarde van de op de achtergrond heersende T_0 situatie. Cijfers op de x-as komen overeen met de cijfers in kolom 4 van bijlage 3.5 en 3.6. De o staat voor oever- en de r voor rivierframe.





Figuur 3.4.12: de berekende bodemschuifspanningen voor 7 of 8 scheepspassages per kribvak. Het betreft hier de bodemschuifspanning die door het schip wordt veroorzaakt, dus zonder de waarde van de op de achtergrond heersende T_0 situatie. Cijfers op de x-as komen overeen met de cijfers in kolom 4 van bijlage 3.5 en 3.6. De o staat voor oever- en de r voor rivierframe.



3.4.3.3 Welke scheepskarakteristieken bepalen de grootte van de bodemschuifspanning?

Er is naar een verband gezocht tussen de grootte van de bodemschuifspanning en de volgende variabelen: de vaarsnelheid, het scheepsvolume, de afstand tot de oever en de combinatie van bovenstaande factoren, opgenomen in het scheepsgetal. Het scheepsgetal wordt bepaald zoals beschreven in paragraaf 3.2.1.

In figuur 3.4.13 is voor ieder onderzocht schip de bodemschuifspanning, de vaarsnelheid, het scheepsvolume, de afstand tot de oever en het scheepsgetal weergegeven. De codes op de x-as corresponderen met de vierde kolom in bijlage 3.5 en 3.6. Op de x-as wordt eerst kribvak 2 daarna 1, 3 en 4 weergegeven. In figuur 3.4.13 is al te zien dat er geen consistent verband bestaat tussen de vier karakteristieken en de grootte van de bodemschuifspanning. Bij sommige scheepspassages met een hoge bodemschuifspanning is de vaarsnelheid hoog, (scheepspassage 1 t/m 3). Maar bij andere passages met een hoge bodemschuifspanning is de vaarsnelheid laag en is het scheepsvolume weer bepalend voor de grootte van de bodemschuifspanning. Met andere woorden het is dus geen eenduidig beeld. Dit beeld wordt ook verkregen wanneer er een regressie wordt uitgevoerd op de dataset. De regressiecoëfficiënten zijn dan ook laag en kennen de volgende waarden voor de regressie tussen de bodemschuifspanning en respectievelijk de vaarsnelheid, het scheepsvolume, de vaarafstand en het scheepsgetal: 0.00, 0.05, 0.05 en 0.03. Dit zijn te lage waarden, en er kan dan ook niet gesproken worden van een verband tussen welke van de vier variabelen dan ook en de grootte van de bodemschuifspanning.

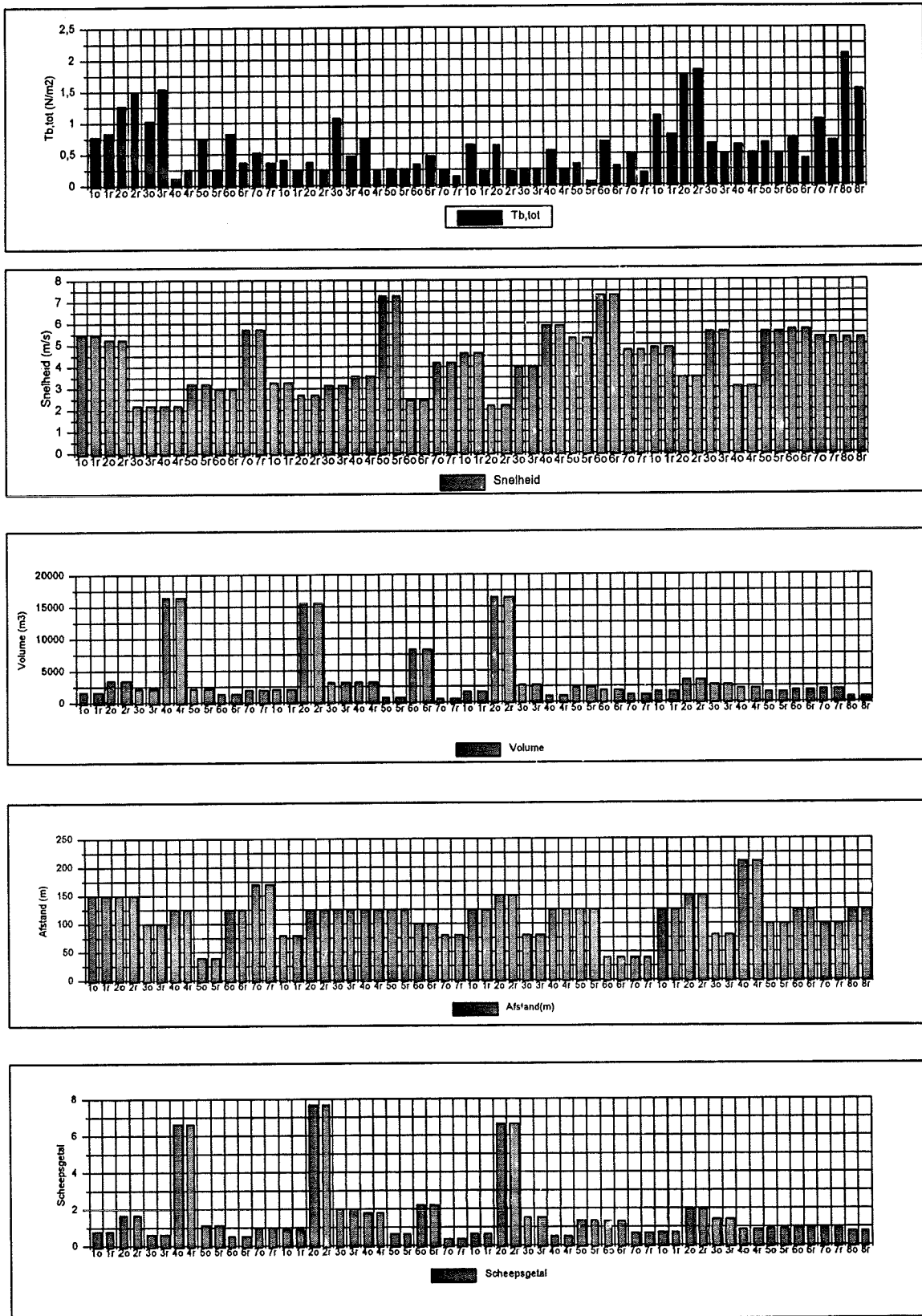
In figuur 3.4.14 is de relatie tussen de vier variabelen en de opgewekte bodemschuifspanning nog eens weergegeven. Ook is er nog een vijfde variabele weergegeven in figuur 3.4.14, het scheepsfroudegetal. Dit wordt als volgt berekend:

$$Fr_{sch} = \frac{u_{sch}}{\sqrt{g * l_{sch}}} * \frac{d_{sch}}{a} \quad [-] \quad (3.4.3.a)$$

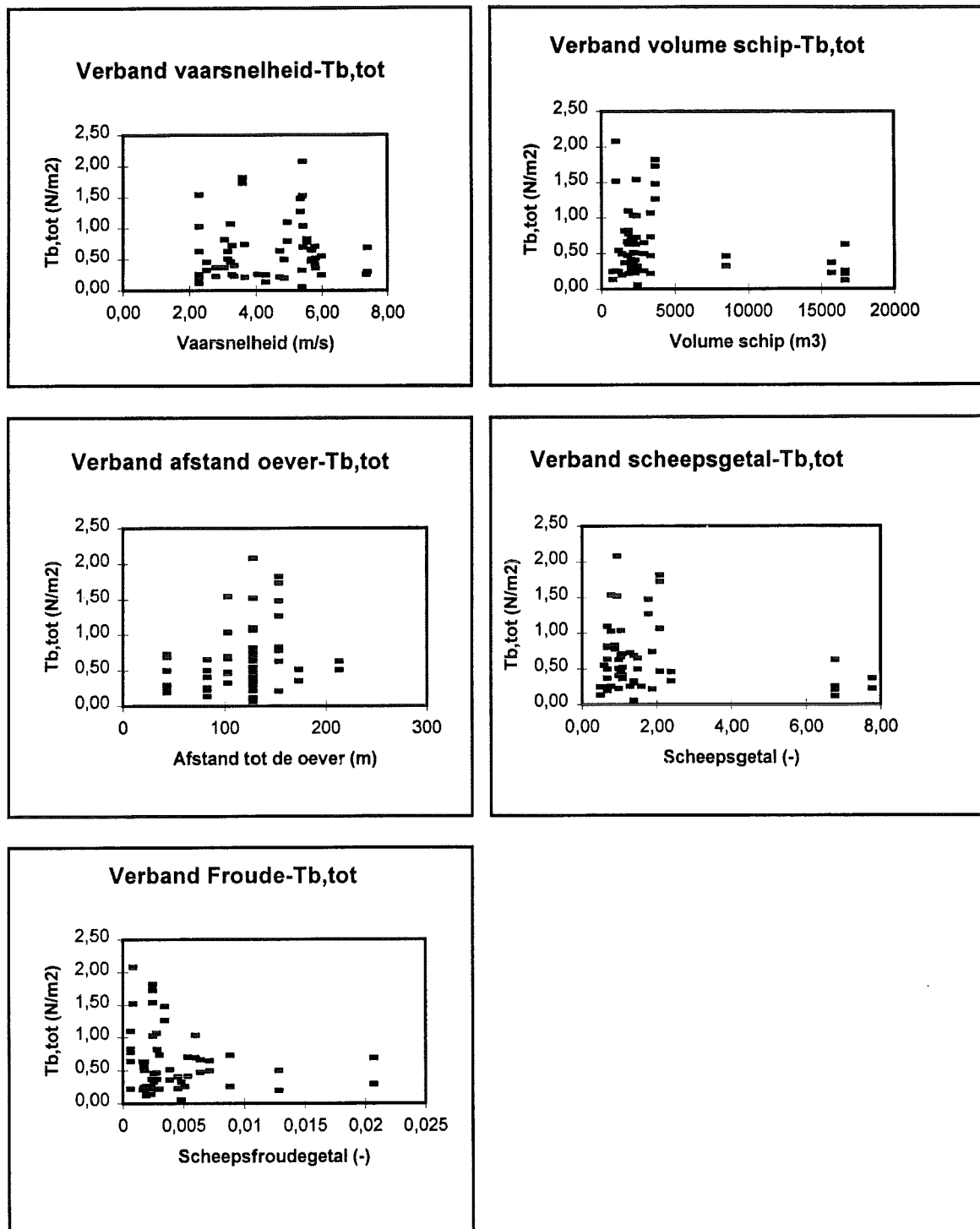
Met:	Fr_{sch} :	het scheepsfroudegetal	[-]
	u_{sch} :	de vaarsnelheid van het schip	[m/s]
	g :	de gravitatieconstante	[m/s ²]
	l_{sch} :	de lengte van het schip	[m]
	d_{sch} :	de diepteligging van het schip	[m]
	a :	de afstand van het schip tot de oever	[m]

Het scheepsfroudegetal bevat een combinatie van een aantal scheepskarakteristieken en is afgeleid van het Froude getal. Het gedeelte van formule 3.4.3.a voor het vermenigvuldigingsteken is vergelijkbaar met het werkelijke Froude getal. Om het aspect van de afstand tot de oever in rekening te brengen, is het gedeelte achter het vermenigvuldigingsteken toegevoegd. Ook het scheepsfroudegetal geeft bij het uitvoeren van een regressieanalyse tussen het scheepsfroudegetal en de opgewekte bodemschuifspanning een lage regressiecoëfficiënt, namelijk 0,03.

Er is dus geen verband aangetoond tussen de volgende scheepskarakteristieken, de vaarsnelheid, het scheepsvolume en de afstand tot de oever en de opgewekte bodemschuifspanning. Ook de twee combinaties van de scheepskarakteristieken, opgenomen in het scheepsgetal en scheepsfroudegetal, laten een slecht verband zien met de opgewekte bodemschuifspanning. Er is geen trend waarneembaar in de grafieken van figuur 3.4.14, maar slechts puntenwolken.



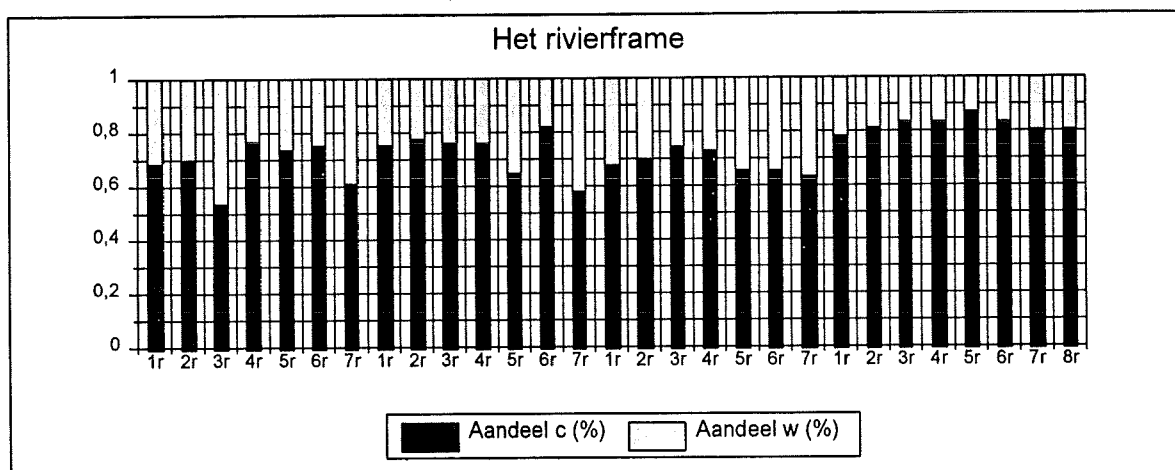
Figuur 3.4.13: het verband tussen de grootte van de bodemschuifspanning en de vier scheepskarakteristieken; vaarsnelheid, scheepsvolume, afstand tot de oever en het scheepsgetal. Cijfers op de x-as komen overeen met de cijfers in kolom 4 van bijlage 3.5 en 3.6. Op de x-as wordt eerst kribvak 2 dan 1, 3 en 4 weergegeven. De o staat voor oever- en de r voor rivierframe.



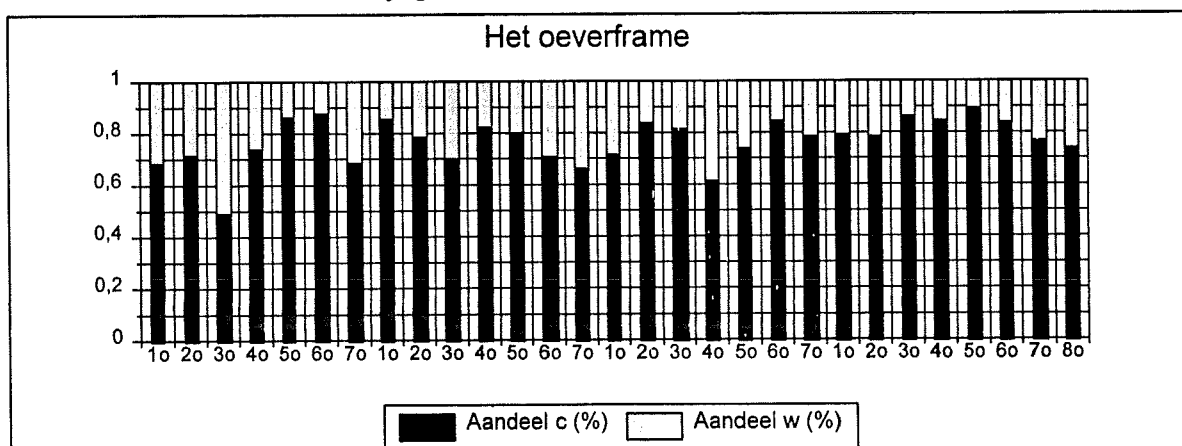
Figuur 3.4.14: de relatie tussen de scheepskarakteristieken en combinaties hiervan, en de opgewekte bodemschuifspanning. Ieder punt geeft een meting weer aan het rivierframe of het oeverframe tijdens een scheepspassage.

3.4.3.4 Wat is het aandeel van de golven in de totale bodemschuifspanning?

Doordat de bodemschuifspanning ontstaan door stroming en ontstaan door golven apart berekend is voor iedere scheepspassage, kan het aandeel van de golven in de totale bodemschuifspanning bepaald worden. De totale bodemschuifspanning is op 100% gesteld en er is berekend hoeveel procent van de bodemschuifspanning veroorzaakt wordt door de secundaire scheepsgolven. De resultaten zijn weergegeven in figuur 3.4.15 en 3.4.16. De codes op de x-as corresponderen weer met kolom 4 in bijlage 3.5 en 3.6. Eerst wordt kribvak 2 dan 1, 3 en 4 op de x-as weergegeven. In figuur 3.4.15 is het aandeel van de golven in de totale bodemschuifspanning bij miniframe 2 het rivierframe weergegeven, en in figuur 3.4.16 bij het oeverframe, miniframe 1. Het gemiddelde aandeel van de golven in de grootte van de bodemschuifspanning die ontstaat tijdens een scheepspassage bij miniframe 1, het oeverframe, is 27,3 %. Het aandeel van de golven in de grootte van de bodemschuifspanning bij miniframe 2, het rivierframe, is 28,9 %. Dus mag gesteld worden dat ongeveer 28,1 % van de bodemschuifspanning die ontstaat tijdens een scheepspassage opgewekt wordt door secundaire golven.



Figuur 3.4.15: de verhouding tussen de bodemschuifspanning ontstaan door stroming (c) en door golven (w) bij het rivierframe. De totale bodemschuifspanning opgewekt door een schip is op 100 % gesteld. Dus zonder de op de achtergrond heersende T_0 situatie. Op de x-as wordt eerst kribvak 2 dan 1, 3 en 4 weergegeven. De codes komen overeen met kolom 4 van bijlage 3.5 en 3.6.



Figuur 3.4.16: de verhouding tussen de bodemschuifspanning ontstaan door stroming (c) en door golven (w) bij het oeverframe. De totale bodemschuifspanning opgewekt door een schip is op 100 % gesteld. Dus zonder de op de achtergrond heersende T_0 situatie. Op de x-as wordt eerst kribvak 2 dan 1, 3 en 4 weergegeven. De codes komen overeen met kolom 4 van bijlage 3.5 en 3.6.

Het aandeel van de golven in de totale bodemschuifspanning per kribvak per miniframe wordt weergegeven in tabel 3.4.3. Opvallend is dat het aandeel van de golven in de totale bodemschuifspanning in kribvak 4 kleiner is dan in de kribvakken 1, 2 en 3. Dit is ook te zien in figuur 3.4.15 en 3.4.16. Kribvak 2, het kleinste kribvak, kent het grootste aandeel van de golven in de totale bodemschuifspanning.

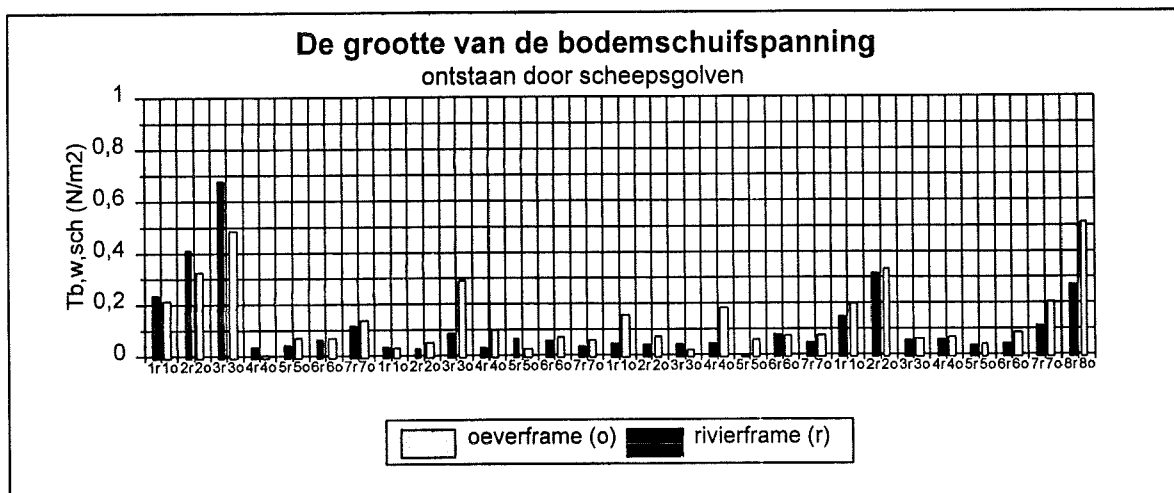
	Miniframe 1	Miniframe 2
	aandeel $\tau_{b,w}$ (%)	aandeel $\tau_{b,w}$ (%)
Kribvak 1	26,1	32,9
Kribvak 2	36,9	36,3
Kribvak 3	29,0	32,4
Kribvak 4	18,3	16,1

Tabel 3.4.3: het aandeel van de bodemschuifspanning ontstaan door scheepsgolven in de totale bodemschuifspanning per kribvak per miniframe.

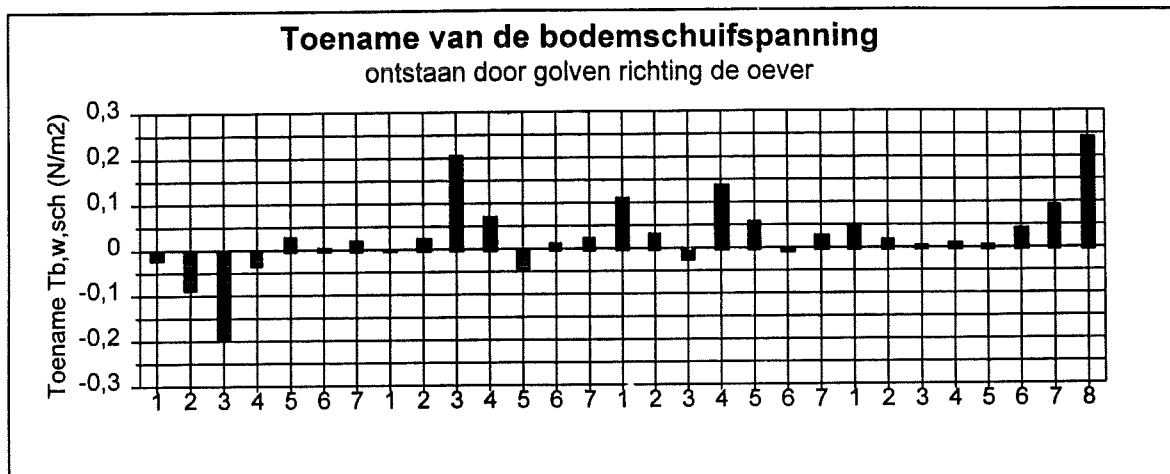
3.4.3.5 De toename richting de oever van de bodemschuifspanning ontstaan door secundaire golven

Omdat de twee miniframes in een lijn loodrecht op de oever geplaatst werden, kan de toename in de bodemschuifspanning ontstaan door secundaire scheepsgolven richting de oever eenvoudig bepaald worden. In figuur 3.4.17 is de grootte van de bodemschuifspanning ontstaan door secundaire scheepsgolven per bestudeerde scheepspassage per kribvak per miniframe weergegeven. De codes op de x-as komen overeen met de vierde kolom in bijlage 3.5 en 3.6. Per kribvak zijn 7 of 8 schepen bestudeerd, de "o" of de "r" geeft aan of het om respectievelijk het oeverframe of het rivierframe gaat. Het verschil tussen het rivierframe en het oeverframe is weergegeven in figuur 3.4.18. Een positieve waarde geeft een toename in de bodemschuifspanning door golven richting de oever weer. De cijfers op de x-as komen weer overeen met de codes in de vierde kolom van bijlage 3.5 en 3.6, en geven de 7 of 8 bestudeerde scheepspassages per kribvak weer. Een toename in de grootte van de bodemschuifspanning ontstaan door golven richting de oever duidt op "shoaling". De golfhoogte en de orbitaalsnelheden nemen toe richting de oever, hetgeen resulteert in een grotere bodemschuifspanning. Dit is bij 22 van de 29 scheepspassages het geval. Bij 15 van deze 22 scheepspassages is de toename kleiner dan $0,05 \text{ (N/m}^2\text{)}$, de toename is bij deze gevallen dus niet groot. Bij 7 van de 22 scheepspassages met een toename, is de toename wel groot, met een maximum van $0,24 \text{ (N/m}^2\text{)}$. Bij 7 van de in totaal 29 scheepspassages is een afname te zien in de bodemschuifspanning ontstaan door golven richting de oever. Hiervan kennen twee passages een afname groter dan $0,05 \text{ (N/m}^2\text{)}$, met een maximumafname van $0,19 \text{ (N/m}^2\text{)}$.

Een afname in de bodemschuifspanning ontstaan door golven richting de oever, kan ontstaan doordat bodemwrijving de "shoaling" gaat overheersen. De golf verliest teveel energie en hoogte door bodemwrijving zodat de bodemschuifspanning bij het oeverframe lager is dan bij het rivierframe.



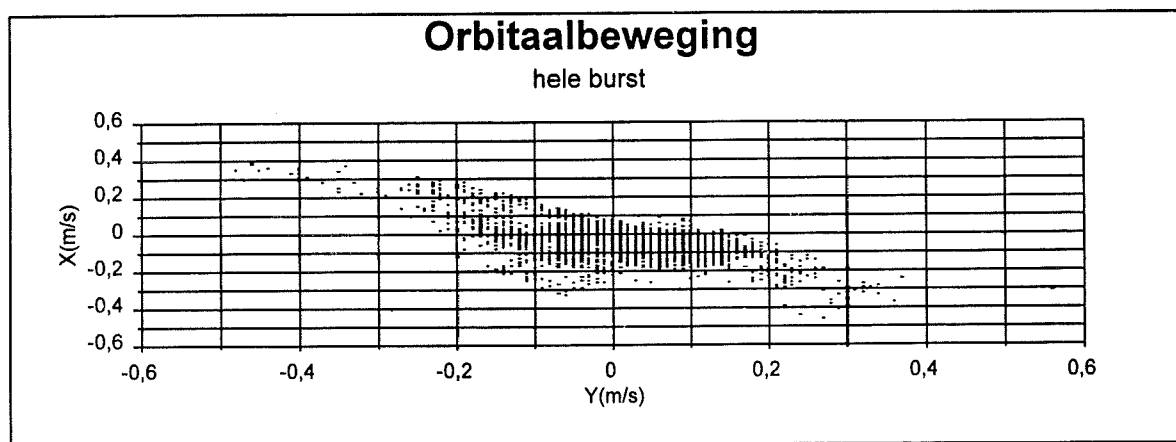
Figuur 3.4.17: de grootte van de bodemschuifspanning ontstaan door secundaire scheepsgolven bij de twee miniframes. De codes op de x-as komen overeen met de vierde kolom in bijlage 3.5 en 3.6. De eerste 7 bestudeerde schepen behoren bij metingen uitgevoerd in kribvak 2, de volgende 7 bij kribvak 1, de daaropvolgende bij kribvak 3 en de laatste 8 bij kribvak 4. De o staat voor oever- en de r voor rivierframe.



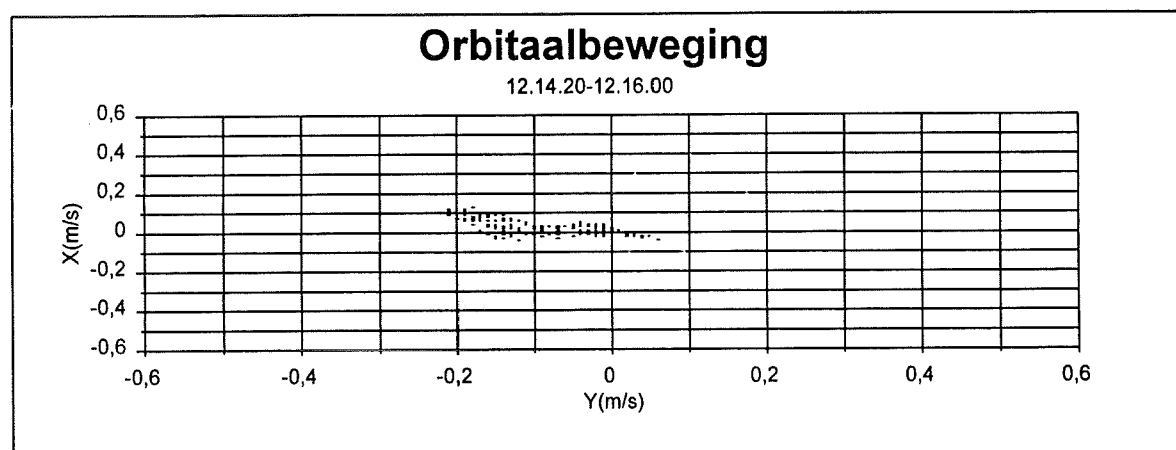
Figuur 3.4.18: de toename richting de oever van de bodemschuifspanning ontstaan door golven. De getallen op de x-as komen overeen met de getallen van de codes in de vierde kolom van bijlage 3.5 en 3.6. De eerste 7 bestudeerde schepen behoren bij metingen uitgevoerd in kribvak 2, de volgende 7 bij kribvak 1, de daaropvolgende bij kribvak 3 en de laatste 8 bij kribvak 4.

3.4.3.6 De bodemschuifspanning tijdens de passage van meerdere schepen achter elkaar

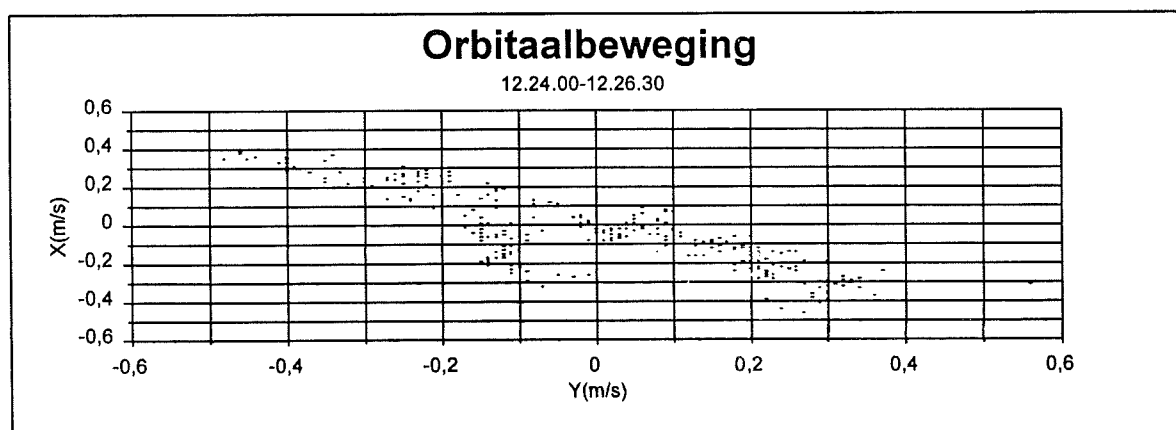
De bestudeerde scheepspassages zoals die weergegeven zijn in bijlage 3.5 en 3.6, zijn individuele passages van schepen. Dit houdt in dat er op het tijdstip dat het schip passeerde geen andere schepen in de buurt waren. Het vermoeden bestaat dat wanneer er meerdere schepen vlak achter elkaar of naast elkaar passeren, de opgewekte bodemschuifspanning groter of kleiner is dan bij een individuele passage. Dit komt omdat er interferentie plaatsvindt tussen zowel de primaire als de secundaire scheepsgolven van de verschillende schepen. Het vermoeden bestaat dan ook, dat de golven elkaar kunnen versterken of elkaar kunnen tegenwerken. Een illustratie hiervan is gegeven in figuur 3.4.19, 3.4.20 en 3.4.21. In figuur 3.4.19 is een scatterplot van de orbitaalsnelheid van de gehele burst op 24 juni van 12.00.00 tot 12.35.00 uur weergegeven. In figuur 3.4.20 wordt de scatterplot gegeven van de orbitaalsnelheden tijdens een individuele passage van een duwbak. De gegevens van de duwbak zijn weergegeven in bijlage 3.7. In figuur 3.4.21 is de scatterplot van de orbitaalsnelheden weergegeven tijdens de passage van een aantal schepen. Met onder andere eenzelfde duwbak als in figuur 3.4.20. Opvallend is dat de orbitaalsnelheden in figuur 3.4.21 groter zijn dan de orbitaalsnelheden in figuur 3.4.20. Dit duidt erop dat de golven van de verschillende schepen elkaar versterken en er grotere orbitaalsnelheden ontstaan dan tijdens een individuele passage. Dit is ook te zien in het OBS signaal, weergegeven in figuur 3.4.22. Op het tijdstip dat de duwbak passeert zonder andere schepen in de buurt, omstreeks 12.15.00 uur, is de uitwijking in het OBS signaal gering. Op het tijdstip dat de duwbak passeert met andere schepen in de buurt, omstreeks 12.25.00 uur, is de uitwijking in het OBS signaal aanzienlijk groter dan om 12.15.00 wanneer een individuele passage plaatsvindt.



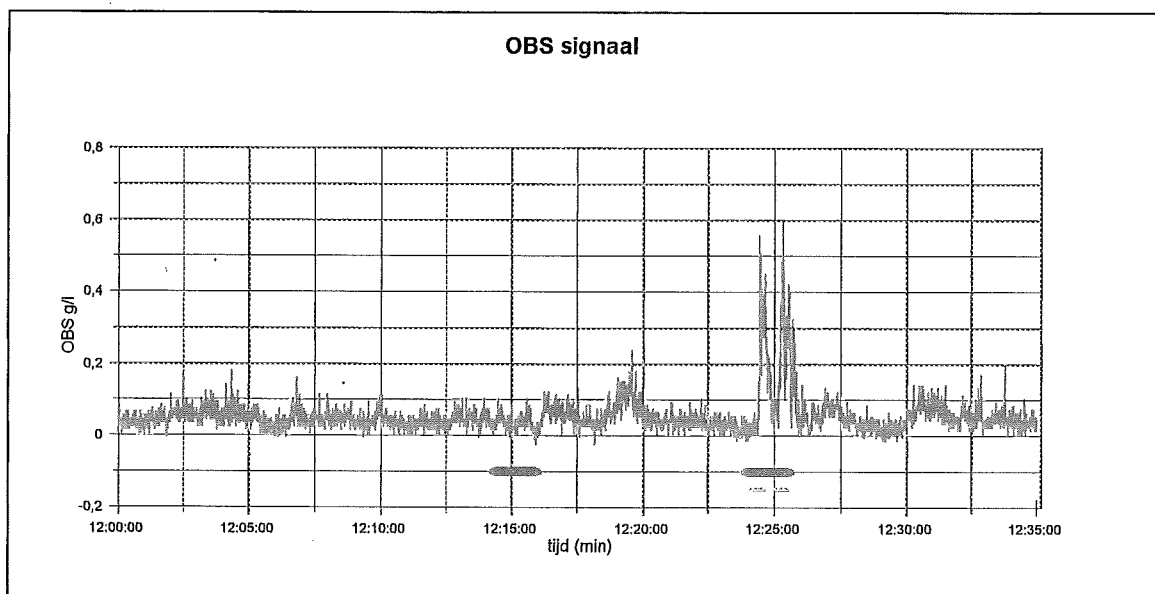
Figuur 3.4.19: de scatterplot van de orbitaalbeweging tijdens de burst van 24 juni van 12.00.00 tot 12.35.00 uur.



Figuur 3.4.20: de scatterplot van de orbitaalbeweging tijdens de passage van een duwbak om 12.14.20 uur. De gegevens van het schip zijn weergegeven in bijlage 3.7.

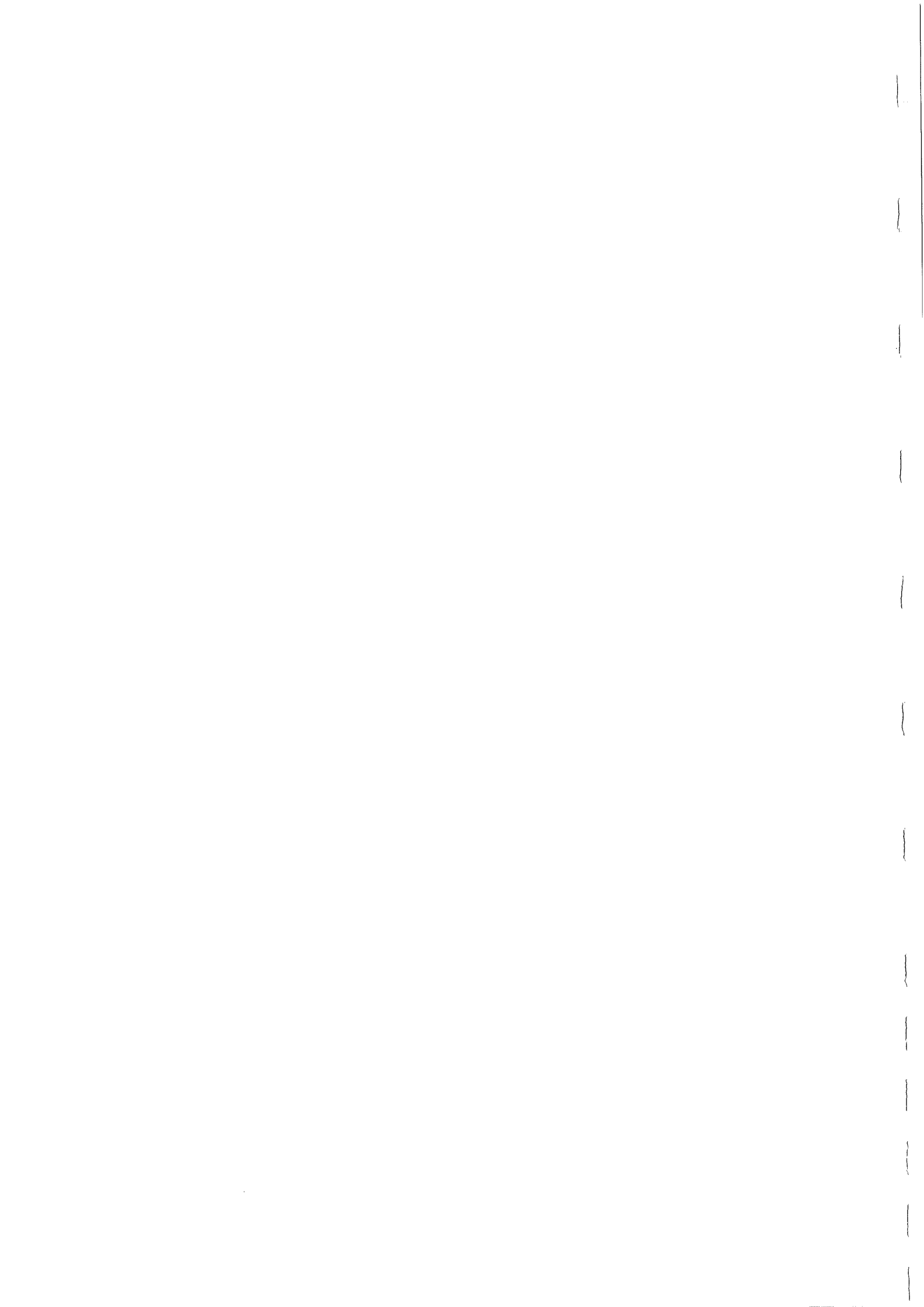


Figuur 3.4.21: de scatterplot van de orbitaalbeweging tijdens de passage van een aantal schepen om ongeveer 12.24.00 uur. De gegevens van de schepen zijn weergegeven in bijlage 3.7.

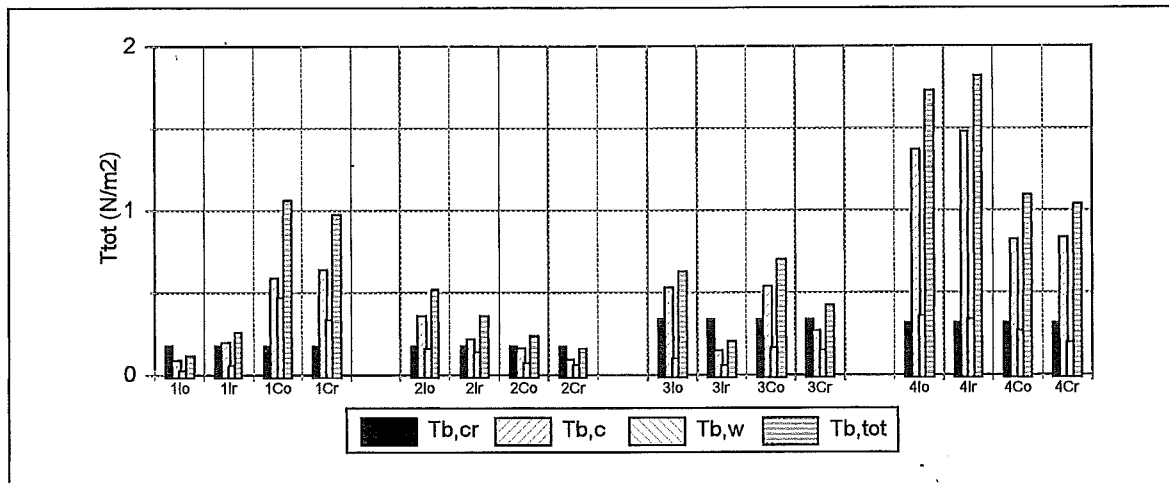


Figuur 3.4.22: het OBS signaal van de burst op 24 juni van 12.00.00 tot 12.35.00. De blauwe lijn geeft de passage van de duwbakken weer. De groene stippen zijn schepen die tijdens een passage van een duwbak passeren.

Om nader te onderzoeken of de golven elkaar altijd versterken of elkaar ook kunnen verzwakken, zijn een aantal berekeningen uitgevoerd. De berekeningen zijn op dezelfde manier uitgevoerd als voor een individuele passage, zoals beschreven in paragraaf 3.3.1.2, 3.3.1.3 en 3.3.1.4. Door van een individuele scheepspassage en van een periode waarin meerdere schepen passeren, de bodemschuifspanning uit te rekenen, kan iets gezegd worden over de interferentie tussen de schepen. De periodes waarin meerdere schepen passeerden, zijn zodanig geselecteerd dat aan het einde van de periode een schip van hetzelfde type passeert als het schip van de vergelijkbare individuele passage. Van de individuele passage en van de periode waarin meerdere schepen passeerden is de bodemschuifspanning berekend. Deze procedure is vier keer uitgevoerd. De resultaten zijn weergegeven in bijlage 3.7. In de tweede kolom is een code weergegeven. De "1" staat voor de eerste berekening van de vier. De "I" staat voor individuele passage en de "C" voor combinatie een periode waarin verschillende schepen passeren. De "o" en de "r" staan voor respectievelijk oeverframe en rivierframe. De resultaten van de berekeningen worden weergegeven in figuur 3.4.23. Hierin kunnen de waarden van de individuele passage met de waarden van de periode waarin meerdere schepen passeerden vergeleken worden. Bij de eerste berekening, waar een duwbak (scheepstype 1) bestudeerd wordt, is duidelijk te zien dat in de periode waarin meerdere schepen passeren een hogere bodemschuifspanning wordt opgewekt, dan in de periode wanneer er maar één schip passeert. Dit resultaat komt overeen met hetgeen zichtbaar is in figuur 3.4.20 en 3.4.21. Zowel de bodemschuifspanning opgewekt door stroming als door golven kent een hogere waarde bij de passage van de duwbak in een groep. De scheepstypen en de bijbehorende karakteristieken zijn weergegeven in bijlage 3.8. Bij de tweede berekening wordt een kanaalschip, (scheepstype 4), tijdens een individuele passage en een passage in een groep schepen bestudeert. Uit figuur 3.4.23 kan afgeleid worden dat de bodemschuifspanning tijdens de periode dat er meerdere schepen passeren iets lager is dan tijdens de individuele passage. Berekening 3 laat de



vergelijking zien van een individuele passage van een Rijnschip (scheepstype 3) met een passage van een vergelijkbaar Rijnschip met een vijftal andere schepen in de buurt. In figuur 3.4.23 is nauwelijks verschil te zien tussen de individuele passage en de passage in een groep van het Rijnschip. De vierde berekening die weergegeven wordt in figuur 3.4.23 laat nog een studie van een Rijnschip zien. Hier geeft de individuele passage hogere waarden voor de bodemschuifspanning dan de passage in een groep schepen. Dit duidt erop dat de interferentie tussen de schepen ook een verzwakkend effect kan hebben. Dit komt vooral tot uiting in de bodemschuifspanning opgewekt door stroming.



Figuur 3.4.23: de vergelijking van een individuele passage van een schip en de passage van een schip in een groep. De codes op de x-as komen overeen met de codes in bijlage 3.7 in de tweede kolom.

Het beeld dat tijdens een passage van een groep schepen ontstaat is dus niet consistent. Soms werkt de interferentie tussen de verschillende schepen versterkend, soms verzwakkend en soms is er geen verschil waar te nemen met een individuele passage. Waarom de interferentie soms verzwakkend en soms versterkend werkt is niet duidelijk. Ook de vaarrichting kan hierbij geen uitsluitsel geven. Bij berekening 1 treedt een versterking op en bij berekening 4 een verzwakking. De vaarrichting van het schip tijdens de individuele passage en van hetzelfde schip tijdens de passage van meerdere schepen is bij beide berekeningen rivier opwaarts. De andere schepen die passeren zijn bij beide berekeningen stroom afwaarts gericht. Dus twee keer een identieke situatie wat betreft de vaarrichting en toch treedt er één keer een versterkend effect op en de andere keer een verzwakkend effect.



3.4.3.7 *Vindt er in een bepaalde richting sedimenttransport plaats tijdens de passage van een schip ?*

Wanneer de bodemschuifspanning tijdens een scheepspassage groter is dan de kritieke bodemschuifspanning vindt er erosie plaats van de kribvakbodem. Het geërodeerde sediment wordt getransporteerd in de richting van de heersende stroomsnelheid. Deze stroomsnelheid ondervindt een wissellende toename en afname onder invloed van de primaire en secundaire scheepsgolven, zie figuur 3.3.3. De secundaire scheepsgolven zijn gesuperponeerd op de primaire scheepsgolf en de stroming door de rivierafvoer. De primaire scheepsgolf kent, net als de secundaire scheepsgolven, een toename en afname van de snelheid. Deze golfbeweging van de primaire golf heeft een periode van 1 minuut. Zowel de secundaire als de primaire golven veroorzaken een heen en weer gaande beweging van het geërodeerde sediment. Aangezien de snelheid in figuur 3.3.3 niet nul wordt en vervolgens omkeert, is er sprake van een snelheid naar een bepaalde richting en dus een netto transport richting. De stromingsrichting keert dus niet om, maar kent wel een toename en afname van de stroomsnelheid door de golfbeweging van de secundaire en primaire golf en blijft dus in één richting stromen, zie figuur 3.3.3. Dit beeld komt ook tot uiting in de scatterplot van figuur 3.4.20 van een duwbak. Hierin is te zien dat tijdens de passage van een schip de snelheden over een bepaalde range fluctueren. Dit is vooral in de y-richting het geval, de snelheden fluctueren van -0,22 (m/s) tot 0,8 (m/s). Het gemiddelde van deze scatterplot ligt op ongeveer -0,1 (m/s) in de y-richting en 0 (m/s) in de x-richting. Dit duidt op een netto stroomsnelheid van 0,1 (m/s) stroomafwaarts parallel aan de rivieras, tijdens de passage van de duwbak. Ook bij deze scheepspassage is er dus sprake van een netto stromingsrichting met hierop gesuperponeerd een golfbeweging die zorgt voor een toename en afname van de stroomsnelheid. De primaire en de secundaire golven veroorzaken dus een op- en neergaande beweging van het sediment. De netto stromingsrichting die er heerst zorgt ervoor dat er toch een netto transport plaatsvindt tijdens een scheepspassage.

3.5 Discussie

- De kribvakbodem heeft een geringe helling en gaat via een steilrand over in de rivierbodem, zie paragraaf 3.4.1.1 en bijlage 3.1. De secundaire golven komen dus vanuit vrij diep water het kribvak in. Wanneer ze het kribvak inlopen ondervinden ze veel weerstand van de steilrand. Hier gaat veel energie verloren. De golven zullen dus verder het kribvak inlopen met een minder grote golfhoogte. Bij de frames aangekomen hebben de golven dus al een deel van hun oorspronkelijke energie verloren. Het zou dus zo kunnen zijn dat de grootste erosie van het kribvak niet op de flauw hellende bodem plaatsvindt maar aan de steilrand waar geen metingen zijn uitgevoerd.

De flauw hellende bodem zorgt voor een verdere geleidelijke afname van energie, er is sprake van een dissipatieve bodem. Soms treedt er "shoaling" op, de golfhoogte neemt toe richting de oever. De bodemwrijving kan ook zo groot zijn op het flauw hellend vlak, dat er teveel golfenergie verloren gaat waardoor de golfhoogte, en dus de bodemschuifspanning ontstaan door golven, afneemt richting de oever, zie figuur 3.4.8. Het antwoord op de eerste onderzoeksvraag van de tweede hypothese, of de bodemschuifspanning opgewekt door secundaire golven toeneemt richting de oever door "shoaling", is dus soms negatief en soms positief, omdat de bodemwrijving soms het "shoaling-effect" overheerst.

- De verschilkaarten beschreven in paragraaf 3.4.1.2, laten beneden de waterlijn overwegend erosie zien. De maximale erosie is 50 cm. Deze erosie duidt erop dat tijdens normale afvoeren de kribvak bodem erodeert. De oorzaak zou gezocht kunnen worden in de scheepsgeïnduceerde hydraulische belasting. Tijdens de T_0 situatie is de bodemschuifspanning kleiner dan de kritieke bodemschuifspanning, zie paragraaf 3.4.3.1, er is dan dus geen erosie. Tijdens een scheepspassage is de opgewekte bodemschuifspanning vaak groter dan de kritieke bodemschuifspanning, zie paragraaf 3.4.3.2. Er is berekend dat sediment geërodeerd wordt tijdens een scheepspassage op de lokaties van de miniframe. Of dit ook daadwerkelijk tot een algehele erosie van de kribvakbodem in het gehele kribvak leidt, moet bepaald worden door het sedimentbudget van het gehele kribvak te bepalen. Is dit negatief, dan vindt er dus erosie over het gehele kribvak plaats. Aangezien na 10 weken de bodem op de meeste plekken geërodeerd is en slechts op enkele plekken sedimentatie heeft plaatsgevonden, zal dit sedimentbudget dan ook negatief zijn bij een afvoer van gelijke grootte. Of er tijdens een hogere afvoer over het gehele kribvak sedimentatie plaats zou vinden, zou nader onderzocht moeten worden aan de hand van bodempeilingen. Er kan nu dus alleen uitspraak gedaan worden over de morfologische veranderingen tijdens een periode van 10 weken.

- Opvallend bij de karakteristieken van de korrelgrootte gegevens is dat de korrelgrootte aan de noordoever groter is dan aan de zuidoever. Zowel de d_{50} als de d_{90} kent een hogere waarde aan de noordoever dan aan de zuidoever. Dit resulteert in een hogere kritieke bodemschuifspanning aan de noordoever, zie bijlage 3.5 en 3.6. Of bij een vergelijkbaar schip aan de noordoever minder sediment in transport wordt gebracht dan bij een vergelijkbaar schip aan de zuidoever is niet nader onderzocht, omdat de opgewekte bodemschuifspanning aan dezelfde oever bij eenzelfde type schip onder gelijke omstandigheden al sterk varieert. Het was dus niet mogelijk om te onderzoeken of het verschil in kritieke bodemschuifspanning tussen de Noord- en zuidoever resulteert in verschillende hoeveelheden getransporteerd materiaal tussen beide oevers.

Het monster "zwevend" aangegeven in paragraaf 3.4.2 en bijlage 3.4, is genomen in kribvak 1 en 2 aan het wateroppervlak op een lokatie met een waterdiepte van 1,5 m. De d_{50} van het sediment dat zich zwevend in het water bevond, en met een gaasje van 50 μm eruit is gefilterd, is 220 μm . Dit valt in de klasse matig grof zand. Dit is vrij grof. De oorzaak hiervan is dat het aandeel kleiner dan 50 μm , de silt en lutum fractie, niet achterbleef op het gaasje. Het monster aangeduid met "zwevend" in paragraaf 3.4.2 en bijlage 3.4, geeft dus een indicatie van de korrelgrootte van het zand aanwezig in water van de Waal en niet van het totale sediment aanwezig in water van de Waal. Opgemerkt moet worden dat de d_{95} van het monster "zwevend" 380 μm is, er komt dus nauwelijks sediment grover dan 0,38 mm voor aan het oppervlak van het water van de Waal.

- De bodemschuifspanning berekend tijdens de T_0 situatie, waarvan de resultaten zijn weergegeven in paragraaf 3.4.3.1, is in ieder kribvak bij elk frame kleiner of gelijk aan de kritieke bodemschuifspanning. Er vindt dus nauwelijks of geen erosie plaats tijdens de T_0 situatie. Alleen in kribvak 2 bij miniframe 1 is de bodemschuifspanning tijdens de T_0 situatie gelijk aan de kritieke bodemschuifspanning, zie tabel 3.4.2. Opgemerkt moet worden dat dit gemiddelde waarden zijn. Wanneer naar de instantane waarden wordt gekeken, is te zien dat de bodemschuifspanning incidenteel groter is dan de kritieke bodemschuifspanning, zie figuur 3.4.5 om 11.13.50 uur. Aangezien de waarde van de bodemschuifspanning niet veel groter is dan de kritieke bodemschuifspanning mag gesteld worden dat er geen of nauwelijks erosie optreedt tijdens de T_0 situatie. Dus de eerste onderzoeksvraag van de eerste hypothese, of de totale bodemschuifspanning tijdens de T_0 situatie kleiner is dan de kritieke bodemschuifspanning, kan positief beantwoord worden. Het betreft dan wel een waarde voor de gemiddelde bodemschuifspanning over de T_0 situatie en niet de instantane waarden. Deze instantane waarden van de totale bodemschuifspanning kennen incidenteel een hogere waarde dan de kritieke bodemschuifspanning.

- De bodemschuifspanning tijdens de individuele passages van de schepen, weergegeven in figuur 3.4.11, is bijna overal groter dan de kritieke bodemschuifspanning. De tweede onderzoeksvraag van de eerste hypothese, of de bodemschuifspanning opgewekt door secundaire scheepsgolven groter is dan de kritieke bodemschuifspanning, kan dan ook in veel gevallen positief beantwoord worden. Soms is de bodemschuifspanning opgewekt door secundaire golven groter dan de kritieke bodemschuifspanning en soms kleiner. Het al in paragraaf 3.4.3.2 beschreven niet consistente beeld van de bodemschuifspanning kan verklaard worden door interferentie van de golven. Dit niet consistente beeld houdt in dat twee vergelijkbare scheepspassages soms wel een hogere en soms geen hogere waarde voor de bodemschuifspanning hebben dan de kritieke bodemschuifspanning. Doordat interferentie met de primaire golf van eerder gepasseerde schepen plaatsvindt kan soms een versterkend effect en soms een verzwakkend effect optreden in de grootte van de bodemschuifspanning. De primaire golf van een schip kan namelijk zeer lang aanwezig zijn voordat deze geheel uitgedempt is. Dit kan soms 5 tot 10 minuten duren. Komt er binnen deze 5 of 10 minuten een ander schip langs dan vindt interferentie plaats tussen de oude primaire golf en de nieuwe primaire en/of secundaire golven. Dit kan versterkend of verzwakkend werken, zoals beschreven in paragraaf 3.4.3.6.

- De hierboven beschreven interferentie kan ook een oorzaak zijn voor het slechte verband dat gevonden wordt in paragraaf 3.4.3.3, tussen de grootte van de bodemschuifspanning en de volgende scheepskarakteristieken: de vaarsnelheid, het scheepsvolume, de vaarafstand tot de

oever en het scheepsgetal. Doordat bij twee vergelijkbare scheepspassages, dus met dezelfde scheepskarakteristieken, de interferentie soms wel en soms niet versterkend werkt, ontstaat bij de twee vergelijkbare passages een andere waarde voor de opgewekte bodemschuifspanning. Dit leidt tot een slecht verband tussen de scheepskarakteristieken en de grootte van de opgewekte bodemschuifspanning wanneer de interferentie tussen de golven niet meegenomen wordt.

Een andere reden voor het slechte verband kan zijn, dat er niet een verband bestaat tussen de individuele scheepskarakteristieken en de grootte van de opgewekte bodemschuifspanning, maar tussen een combinatie van de scheepskarakteristieken en de opgewekte bodemschuifspanning. Of er een verband bestaat tussen een combinatie van de scheepskarakteristieken en de grootte van de opgewekte bodemschuifspanning is al getoetst met behulp van het scheepsgetal, zie vergelijking 3.4.3.a. Ook hier wordt een slecht verband gevonden tussen het scheepsgetal en de grootte van de opgewekte bodemschuifspanning. Misschien heeft het scheepsgetal geen goede verhouding van de verschillende scheepskarakteristieken en moet er naar een betere combinatie gezocht worden. Dus een verband tussen de scheepskarakteristieken of een combinatie hiervan, en de grootte van de opgewekte bodemschuifspanning is moeilijk aan te tonen. De tweede onderzoeksvraag van de tweede hypothese betrekking hebbende op dit verband, moet dan ook negatief beantwoord worden

- De derde onderzoeksvraag van de eerste hypothese betreft de volgende; hoe groot is het aandeel van de bodemschuifspanning opgewekt door secundaire golven in de totale bodemschuifspanning ten tijde van een scheepspassage? Dit aandeel is berekend en beschreven in paragraaf 3.4.3.4. Het betreft voor miniframe 1 en 2 respectievelijk 27,3 % en 28,9%. Het aandeel van de golven in de totale bodemschuifspanning is bij miniframe 2, het rivierframe, iets groter dan bij miniframe 1. Dit verschil is verwaarloosbaar. Het gemiddelde van het aandeel van de golven in de totale bodemschuifspanning over de beide miniframes is 28,1 %. Dit betekent dus dat wanneer er alleen naar de primaire golven, ofwel de zuiging, wordt gekeken, 28,1 % van de totale bodemschuifspanning niet verklaard kan worden. Het alleen bestuderen van de primaire golven leidt dus tot een onderschatting van de hydraulische belasting door schepen.

- In paragraaf 3.4.3.7 is beschreven of er een netto transport plaatsvindt van het geërodeerde sediment in een bepaalde richting. Duidelijk is dat de primaire en de secundaire golven alleen een heen- en weergaande beweging van het sediment veroorzaken. Dit geeft dus geen netto transport het kribvak in of uit. Het heen- en weergaande transport geeft bij de OBS sensor dus wel een signaal af maar leidt niet tot een netto erosie of sedimentatie. De aanwezige rivierstroming kent wel een netto transportrichting, zie figuur 3.3.3 en 3.4.20. De primaire en secundaire golven kennen dus geen orbitaalbeweging om de oorsprong van de scatterplot, zie figuur 3.4.20, maar zijn gesuperponeerd op een stroming. Deze stroming is bij figuur 3.4.20, 0,1 (m/s) en stroomafwaarts parallel aan de rivier gericht. Of er bij iedere scheepspassage een netto transport richting bestaat en welke richting dit dan precies is zou nader onderzocht moeten worden. Op de vierde onderzoeksvraag van de eerste hypothese, of er systematisch een stroming in een bepaalde richting aanwezig is tijdens de scheepspassages, kan dan ook maar voor één scheepspassage antwoord worden gegeven.

3.6 Conclusies

3.6.1 Algemene conclusies

- De morfologie van de vier bestudeerde kribvakken bestaat uit een flauw hellende bodem, overgaand richting de rivier in een steilrand. Benedenstrooms van de bovenstroomse krib is een ellipsvormige depressie zichtbaar. De lange as van de ellipsvormige depressie is schuin met de stroming mee naar de rivieras gericht.
- De grootste morfologische veranderingen hebben over de periode van 10 weken voor de meetcampagne tot en met het tijdstip van de meetcampagne, plaatsgevonden boven de waterlijn. Hier is sedimentatie en erosie waargenomen. Beneden de waterlijn is grotendeels erosie waargenomen. Deze erosie kan veroorzaakt zijn door de scheepsgeïnduceerde hydraulische belasting.
- De korrelgrootte verdeling is aan de noordoever grover dan aan de zuidoever, het zand bestaat aan de noordoever uit grof zand en aan de zuidoever uit matig grof zand. Het sediment dat zich bovenin het water van de Waal bevindt, heeft een d_{95} van 0,38 mm. Er komt dus maar weinig sediment bovenin het water van de Waal voor met een diameter groter dan 0,38 mm.
- Tijdens de T_0 situatie, een periode zonder scheepspassages, is de bodemschuifspanning kleiner of gelijk aan de kritieke bodemschuifspanning. Er wordt dus weinig tot geen sediment geërodeerd wanneer er geen schepen passeren.
- De bodemschuifspanning is tijdens de passage van verschillende schepen soms groter en soms kleiner dan de kritieke bodemschuifspanning. Sommige passages resulteren in een gemiddelde bodemschuifspanning die zeven keer groter is dan de kritieke bodemschuifspanning. Er vindt dus erosie van de kribvakbodem plaats tijdens sommige passages van schepen. Dit is dan ook de reden voor de erosie beneden de waterlijn, waargenomen over een periode van 10 weken op de morfologische verschilkaarten.
- Er is geen verband tussen de scheepskarakteristieken (de vaarsnelheid, het scheepsvolume en de vaarafstand tot de oever) en de grootte van de opgewekte bodemschuifspanning. Ook een combinatie van deze scheepskarakteristieken, opgenomen in het scheepsgetal of het scheepsfroudegetal, kent een slecht verband met de grootte van de opgewekte bodemschuifspanning. Interferentie van de primaire golf van een vorige scheepspassage met de primaire en secundaire golven van een daaropvolgende scheepspassage kan de oorzaak zijn van het niet consistente beeld van de opgewekte bodemschuifspanning.
- Gemiddeld over beide miniframes is het aandeel van de bodemschuifspanning ontstaan door secundaire scheepsgolven in de totale bodemschuifspanning is 28,1 %. Het niet meenemen van de secundaire scheepsgolven zou een niet te verwaarlozen onderschatting van de totale bodemschuifspanning geven. Er moet dus niet alleen naar de zuiging, de primaire golf, gekeken worden, maar er moet ook rekening gehouden worden met de secundaire golven.
- De grootte van de bodemschuifspanning ontstaan door secundaire golven neemt bij 22 van de 29 bestudeerde scheepspassages toe richting de oever. Dit kan veroorzaakt worden door

“shoaling”. Bij de zeven gevallen waar de bodemschuifspanning ontstaan door secundaire golven afneemt richting de oever, overheerst waarschijnlijk de bodemwrijving waardoor de golf teveel energie verliest om een hogere bodemschuifspanning richting de oever te veroorzaken.

- Bij de passage van een groep schepen wordt er soms een hogere en soms een lagere bodemschuifspanning opgewekt in vergelijking met een vergelijkbare scheepspassage. Waarschijnlijk zorgt de interferentie tussen de primaire en de secundaire golven van de verschillende schepen soms voor een versterkend effect en soms voor een verzwakkend effect, waarbij de golven elkaar uitdempen.

Het sediment dat geërodeerd wordt tijdens een scheepspassage, wordt door de orbitaalbeweging van de secundaire golven alleen heen en weer getransporteerd. Ook de primaire golf zorgt voor een heen- en weergaande beweging, maar omdat de heen- en weergaande beweging gesuperponeerd is op een netto stroomsnelheid in een bepaalde richting, veroorzaakt door de rivierafvoer, wordt het sediment toch in een bepaalde richting getransporteerd. Welke richting en hoeveel sediment dit is zou nader bestudeerd moeten worden.

3.6.2 Conclusies met betrekking tot de hypothesen en onderzoeksvragen

3.6.2.1 Conclusie met betrekking tot de eerste hypothese

De scheepsgeïnduceerde secundaire golven zorgen voor een niet te verwaarlozen aandeel van 28,1 % in de totale bodemschuifspanning. De hypothese dat: *de scheepsgeïnduceerde secundaire golven zorgen voor een niet te verwaarlozen aandeel in het totale sedimenttransport in een kribvak, omdat schepen golven opwekken die de bodem eroderen*, kan dan ook bevestigd worden.

Antwoorden op de bijbehorende onderzoeksvragen

- 1) De totale bodemschuifspanning tijdens de T_0 situatie, de situatie zonder scheepsinvloeden, is kleiner dan de kritieke bodemschuifspanning.
- 2) De bodemschuifspanning opgewekt door secundaire golven bij de passage van een schip, is meestal groter dan de kritieke bodemschuifspanning.
- 3) Het aandeel van de bodemschuifspanning opgewekt door secundaire golven in de totale bodemschuifspanning is 28,1 % ten tijde van een scheepspassage.
- 4) Er was systematisch een stroming in een bepaalde richting aanwezig tijdens één bestudeerde scheepspassage. Of dit bij alle scheepspassages het geval is zou nader onderzocht moeten worden.

3.6.2.2 Conclusie met betrekking tot de tweede hypothese

De hypothese dat: *het golfpatroon verandert in de ruimte en in de tijd bij het binnendringen van het kribvak* kan ook bevestigd worden.

Antwoorden op de bijbehorende onderzoeksvragen

- 1) De bodemschuifspanning opgewekt door secundaire golven neemt soms toe en soms af richting de oever. De toename van de bodemschuifspanning opgewekt door secundaire golven wordt veroorzaakt door "shoaling" en de afname door bodemwrijving. Wanneer welk proces overheerst is niet duidelijk, maar een feit is dat de bodemschuifspanning opgewekt door secundaire golven verandert richting oever.
- 2) Er is geen duidelijk verband tussen de grootte van de bodemschuifspanning en de scheepskarakteristieken of een combinatie van de scheepskarakteristieken opgenomen in het scheepsgetal of het scheepsfroudegetal.
- 3) Er is geen verschil in de grootte van de bodemschuifspanning opgewekt door secundaire golven waargenomen bij op- en afvarende schepen.

3.7 Literatuur

- Alberda, J.E., 1981. Inleiding landmeetkunde. Delftse Uitgevers Maatschappij, 517 pp.
- Bhowmik, N.G., Xia, R., Mazumder, B.S. and Soong, T.W., 1995. Return flow in rivers due to navigation traffic. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121, No. 12, December 1995, 914-918.
- Bosman, J.J., Velden, E.T.J.M. van der en Hulsbergen, C.H., 1987. Sediment concentration measurement by transverse suction. *Coastal Eng.*, 11: 353-370.
- Brinke, W.B.M. ten, 1996a. Sedimenthuishouding kribvakken. Projectplan 1996. Werkdocument RIZA 96.037X, 13pp.
- Brinke, W.B.M. ten, 1996b. Onderzoeksvoorstel sedimenthuishouding kribvakken. Werkdocument RIZA 96.099X, 26pp.
- Driel, G. van, Meijer, D.G. en Verheij, H.J., 1993. Scheepsgeïnduceerde waterbeweging in kribvakken: Waterloopkundig laboratorium, Q1046, Delft.
- Hochstein, A.B., and Adams, C.E., 1989. Influence of vessel movements on stability of restricted channels. *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, 115(5), 444-465.
- Inman, D.L., 1957. Wave-generated ripples in nearshore sands. Tech. Memo 100, Beach Erosion Board, USA.
- Kroon, A., 1995. Coastal systems, their processes and products. Department of Physical Geography Utrecht University.
- Kruyt, N.M., 1997. Kribvakmetingen Druten/Ochten. Variaties tussen meetsignalen op hoofdlijnen. IMAU R97-03.
- Sorensen, R.M., 1966. Ship waves. Technical report HEL-12-2, Berkely, California.
- Termes, A.P.P., Wal, M. van der en Verheij, H.J., 1991. Waterbeweging door scheepvaart op de rivieren en in kribvakken: Waterloopkundig Laboratorium, bureaustudie Q1046, Delft.
- Van Rijn, L.C., 1993a. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands.
- Van Rijn, L.C., 1993b. Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans. Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands.
- WL, 1986. Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen. Secundaire sloopgolven en hun effect op de stabiliteit van talud bekledingen. Verslag modelonderzoek M1115 deel 6, waterloopkundig laboratorium.

PCRaster
Utrecht University
PO Box 80115
3508 TC Utrecht
The Netherlands
Tel: (31) 30 2532768
Fax: (31) 30 2540604
E-mail: pcraster@frw.ruu.nl
www: <http://www.frw.nl/pcraster.html>

4 Stromingspatroon en sedimenttransport

(Doctoraalonderzoek Bas van Maren)

4.1 Inleiding

In hoofdstuk 4 van dit rapport wordt het onderzoek beschreven naar het stromingspatroon en het sedimenttransport in een kribvak. Het ruimtelijk stromingspatroon is opgesteld voor zowel de natuurlijke rivierstroming als scheepsgedomineerde stromingscondities. Aan de hand hiervan is de sedimentbeweging binnen het kribvak kwantitatief benaderd. De doelstelling van het hieronder beschreven onderzoek is:

Middels het opstellen van het patroon van stroming en sedimentbeweging in een kribvak, voor zowel scheepsgedomineerde condities als voor natuurlijke condities, het effect van scheepvaart op dit patroon te kwantificeren.

Hoofdstuk 4 is als volgt opgebouwd. In paragraaf 4.2 worden de resultaten van het literatuuronderzoek behandeld, afgesloten met een aantal daaruit voortvloeiende werkhypothesen. Paragraaf 4.3 behandelt de methodiek en paragraaf 4.4 de resultaten. De discussie volgt in paragraaf 4.5, waarin de resultaten getoetst worden aan de werkhypothesen. De conclusie volgt in paragraaf 4.6.

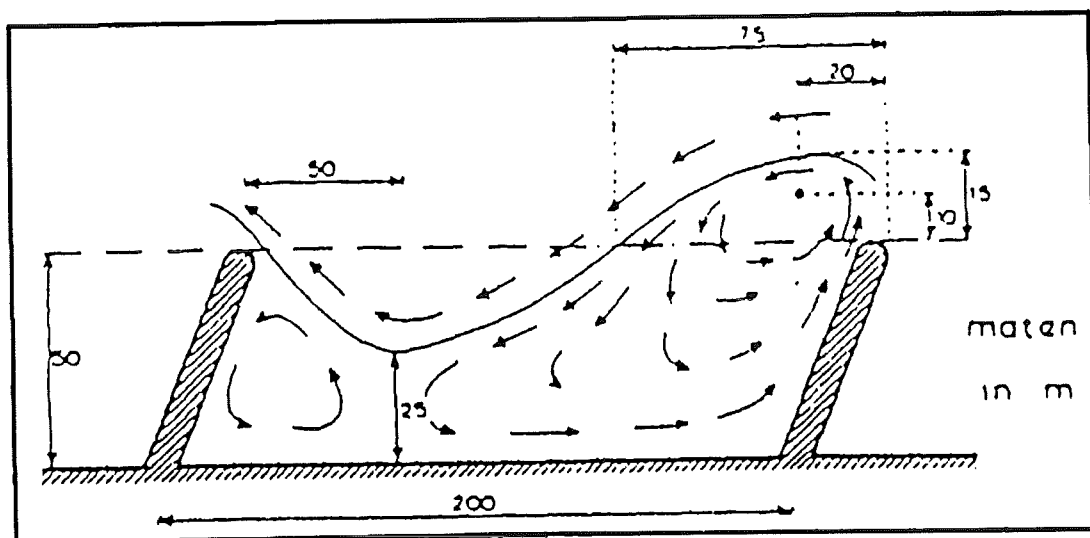
4.2 Literatuuronderzoek

4.2.1 Stromingspatroon

De waterbeweging in kribvakken wordt bepaald door een aantal processen die elkaar versterken en afzwakken. Dit zijn de (1) de rivierafvoer, (2) de primaire scheepsgolf (zuiging ten gevolge van de scheepsgeïnduceerde retourstroom), (3) secundaire scheepsgolven en windgolven, en (4) de schroefstraal. Aangezien de schroefstraal alleen in de bochten van belang is (Hochstein *et al.* 1989) wordt er hier verder niet op ingegaan.

4.2.1.1 Stroming als gevolg van de rivierafvoer

De rivierstroom en het kribvak worden gescheiden door een scheidingsstroomlijn. Deze is sinusvormig. Deze scheidingslijn is echter geen absolute waterscheiding; er stroomt water het kribvak binnen tussen de benedenstroomse krib en de neer benedenstrooms van de bovenstroomse krib. Deze waterbeweging heeft een of twee rondgaande bewegingen tot gevolg, de neren. Zie figuur 4.2.1.



Figuur 4.2.1: Theoretisch stroombeeld in een groot kribvak met twee neren. (WL 1987).

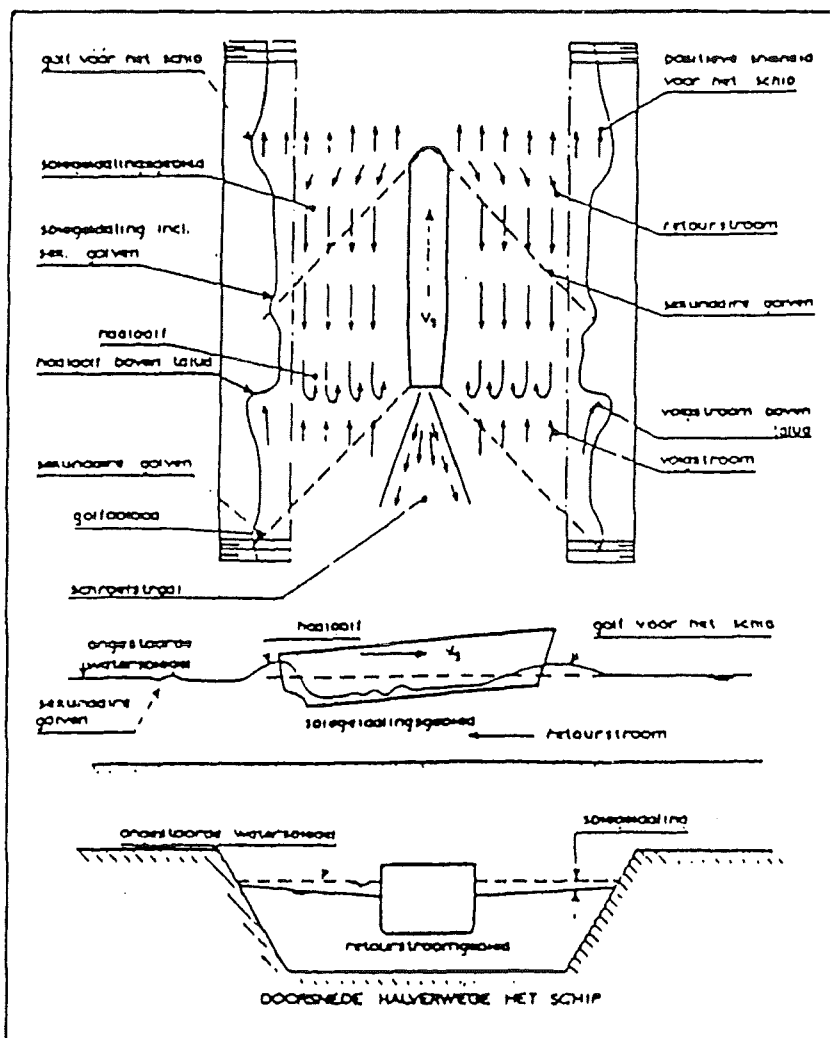
In een groot kribvak zal naast de dominante neer bij het uitstroompunt een kleinere neer ontstaan, stroomafwaarts van de dominante neer. Deze ontbreekt in de kleinere kribvakken. Bij een gemiddelde stroomsnelheid in de rivier van 1 m/s zal de gemiddelde snelheid in de kribvakken 0.3 m/s bedragen, oplopend tot 0.5 m/s in de neren. (Kornman 1993).

4.2.1.2 De primaire scheepsgolf

Het primaire golfsysteem ontstaat als gevolg van de grote waterverplaatsingen door een varend schip en heeft het ontstaan van stromingen en verstoringen in de waterspiegel tot gevolg. (Kornman 1993). Dit golfsysteem is onder te verdelen in drie fasen: (zie figuur 4.2.2)

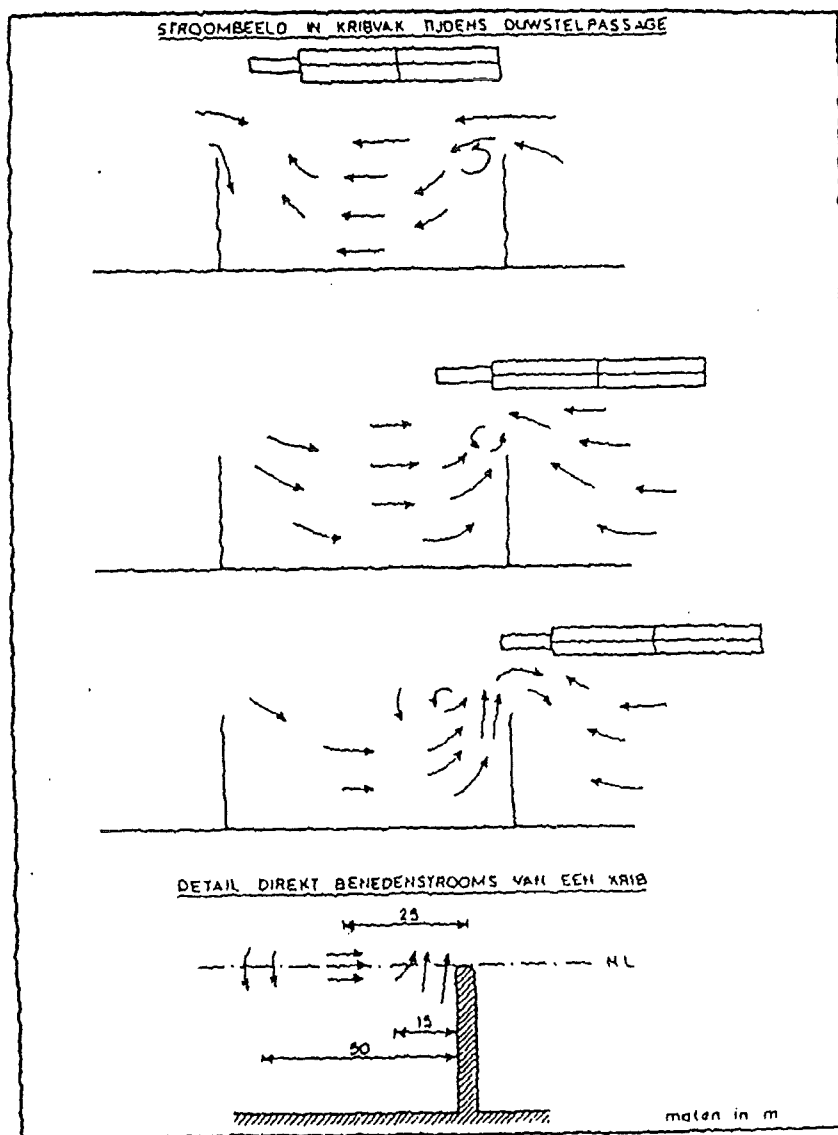
- De golf en stroming voor het schip.
- De waterspiegeldaling en de retourstroom. De retourstroming is de stroming onder het schip; deze is tegengesteld aan de vaarrichting. Deze retourstroom heeft een waterspiegeldaling over de gehele lengte van het schip tot gevolg.
- De haalgolf en de golfstroom. De haalgolf is een reactie op de waterspiegeldaling, Hierdoor wordt het ontstane dal in het water weer opgevuld. De haalgolf wordt weer gevolgd door de volgstroom. Deze stroomt in de vaarrichting en de maximale snelheid is gelijk aan de vaarsnelheid.

De invloed van het primaire golfsysteem neemt af met de afstand dwars op het schip.



Figuur 4.2.2: Waterbeweging als gevolg van het primaire golfsysteem. (Kornman 1993).

De verandering van het stroombeeld in kribvakken ten gevolge van een passerend duwstiel volgens WL (1987) is in figuur 4.2.3 weergegeven. Hierbij wordt uitgegaan van een vaarrichting tegengesteld aan de richting van de hoofdstroom. Dit zal voor de Waal bij Druten vooral aan de zuidoever het geval zijn.



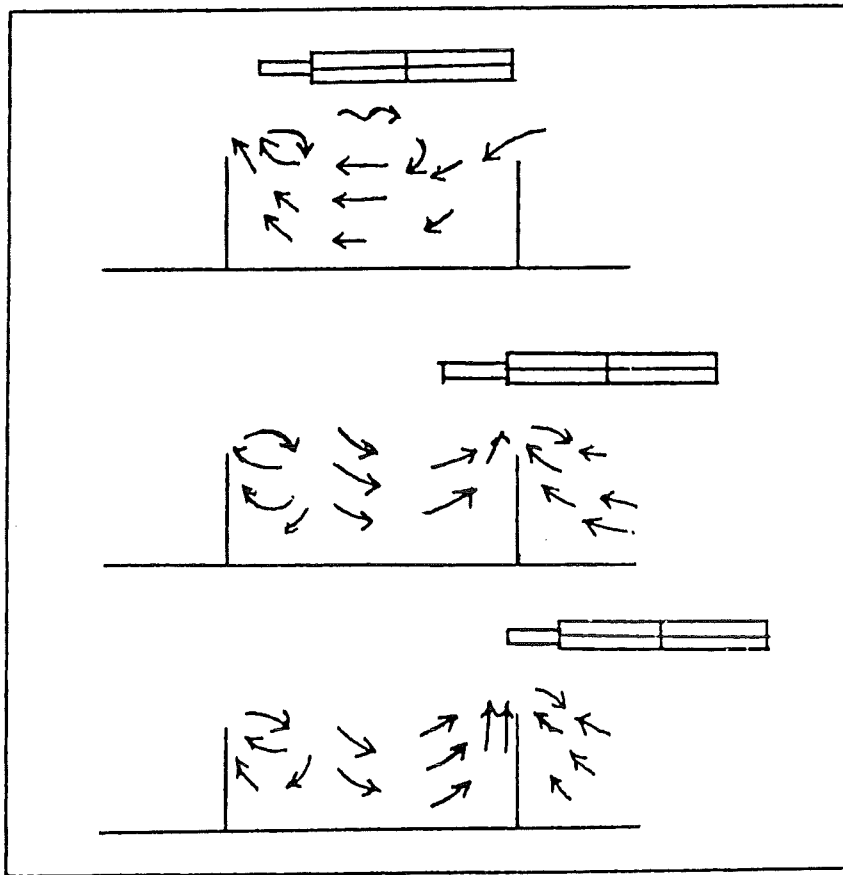
Figuur 4.2.3: Stroombeeld in een groot kribvak tijdens duwstielpassage, opvaart volgens WL (1987) (Uitleg; zie tekst).

Het gevolg van de passage van een opvarend duwstel wordt door WL (1987) als volgt beschreven:

- 1) Wanneer de boeg van het schip naast de kribkop ligt ontstaat tussen boeg en kribkop een verhang, de frontgolf. Hierdoor wordt het voor het schip liggende kribvak leeggezogen door de retourstroom. In het naast het schip gelegen kribvak is de stroming tegengesteld aan de vaarrichting, wat het gevolg is van de retourstroom. In dit kribvak is de waterspiegel nu op een dieptepunt. Ondertussen wordt er zowel water aangevoerd als afgevoerd. Aanvulling vindt plaats vanuit de bovenstroomse krib. De aanvulsnelheid is maximaal wanneer de boeg van het schip naast de bovenstroomse krib ligt. Afvoer vindt plaats langs een benedenstrooms gelegen deel van de scheidingsstroomlijn. Deze afvoer heeft geen duidelijke neer tot gevolg.
- 2) Bij het hek van het schip begint de volgstroom. Als de hek van het schip de benedenstroomse krib passeert ontstaat er dus een tegengestelde stroom in het kribvak. Hierbij wordt de benedenstroomse neer, welke zonder scheepvaart de kleinste is, de grootste neer. De volgstroom vult het kribvak weer op met water van het benedenstrooms gelegen kribvak. De watermassa's van de volgstroom en de retourstroom botsen tegen elkaar aan, waardoor de benedenstroomse neer versterkt wordt.
- 3) Deze wervel wordt door de stroming in de vaarrichting afgevoerd, totdat deze uit het kribvak verdwenen is. Hierbij treden bij de bovenstroomse neer stromingen loodrecht op de hoofdstroom op. Deze stroming is het sterkst bij de grote kribvakken omdat daar een groter watervolume verplaatst moet worden.

Uit het detail blijkt dat de omvang van de neer bij stap 3) niet veel verschilt met de omvang van de neer bij stroming zonder scheepvaart (vergelijk met figuur 4.2.1), uitgaande van een vaarrichting tegenovergesteld aan de richting van de hoofdstroom. Tijdens stap 3) versterkt een opvarend duwstel dus het stromingspatroon welke zonder scheepvaart aanwezig is.

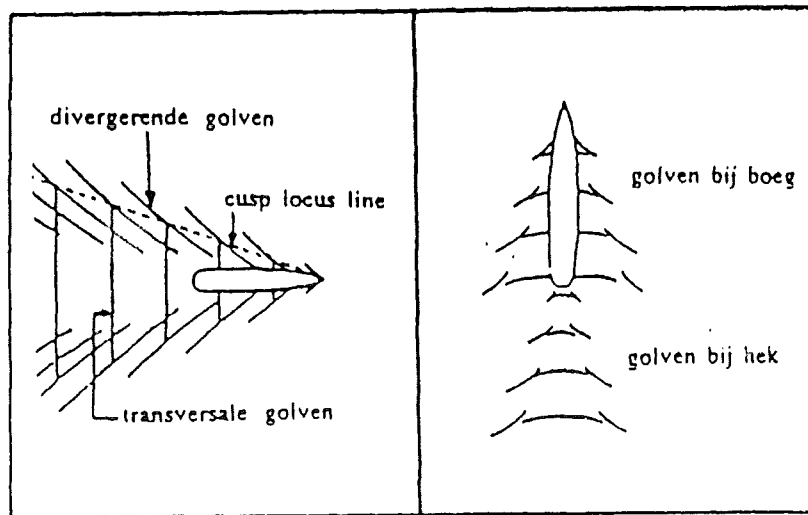
Minder aandacht wordt in de literatuur geschonken aan afvaart, scheepspassages met een vaarrichting gelijk aan de richting van de hoofdstroom. Het is aannemelijk dat de opvarende scheepspassage hier stromingen oplevert die minder overeenkomen met de stroming zonder scheepspassage als tijdens afvarende scheepspassages. De sterkste neerwerking zal hier optreden bij de bovenstroomse krib, terwijl de stroming zonder scheepspassage een sterke benedenstroomse neer tot gevolg zou hebben. Het lijkt waarschijnlijk dat hierbij twee neren ontstaan, één als gevolg van de scheepsgeïnduceerde retourstroom, en één als gevolg van de natuurlijke rivierafvoer. Een schets hiervan (gebaseerd op de scheepsgeïnduceerde waterbeweging zoals in figuur 4.2.2 en de rivierafvoer zoals figuur 4.2.1) is weergegeven in figuur 4.2.4.



Figuur 4.2.4: Hypothetisch stroombeeld in een groot kribvak tijdens duwstelpassage, afvaart.

4.2.2 Secundaire scheepsgolven en windgolven

Discontinuïteiten in de waterspiegel langs de romp van het schip veroorzaken een drukgradiënt waardoor er een golfpatroon ontstaat van divergerende en transversale golven. Deze zijn weergegeven in figuur 4.2.5.



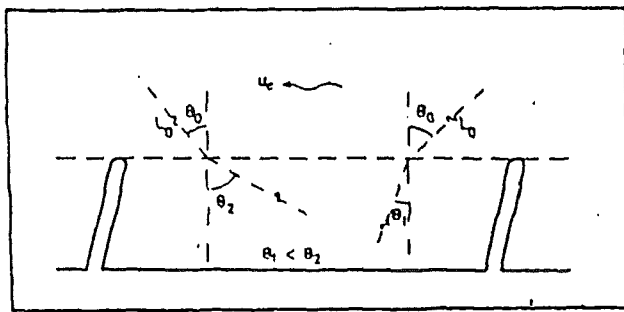
Figuur 4.2.5: Secundaire scheepsgolven. Uit Kornman 1993.

De scheepsgolven worden opgewekt bij de boeg van het schip en bij het hek van het schip. Deze zijn onder te verdelen in interferentiegolven en transversale golven.

- Transversale golven staan loodrecht op de vaarrichting van het schip.
- Interferentiegolven ontstaan langs de cusp locus line waar transversale en divergerende golven elkaar ontmoeten en daardoor interfereren met elkaar.

In het kribvak spelen de volgende aspecten een belangrijke rol met betrekking tot de secundaire scheepsgolven: refractie, shoaling en het breken van golven. (Termes et. al. 1991)

- refractie is het afbuigen van golfkammen als gevolg van een verschil in voortplantingssnelheid langs de kam. De schuine invalshoek heeft een luwtezone aan een kant van een krib tot gevolg, en aan de andere zijde een zone waar interferentie van inkomende golven met reflecterende golven optreedt. Het beeld van afbuiging naar de oever toe wordt verstoord door de stroming. Stroomafwaarts bewegende golven buigen sterker naar de oever toe, terwijl stroomopwaarts bewegende golven richting de hoofdstroom buigen. (zie figuur 4.2.6)



Figuur 4.2.6: Afbuiging van de golfrichting door de stromingsrichting. Uit Van Driel et. al. 1993.

- shoaling is het gevolg van het ondieper worden van het water. Als de waterdiepte gelijk is aan de golfbasis (bij een diepte van $0.5 \cdot \text{golflengte}$) worden de orbitaalbewegingen asymmetrisch door bodemwrijving. Hierdoor neemt de golfsnelheid af, wat resulteert in een overgang van kinetische energie naar potentiële energie. Als gevolg hiervan neemt de golfhoogte toe en de golflengte af.
- Breken van golven komt voor bij zeer ondiep water. Hierbij is de snelheid van de golfkam hoger dan de snelheid van het golfdal, wat resulteert in voorover hellen van de golf, welke vervolgens breekt. Volgens Van Driel et. al. (1993) breken de golven in de Waal alleen bij stroomafwaarts varen. Dit is mogelijk te verklaren uit het afbuigen van de golfrichting. Hierdoor blijven de golven gevangen in de hoofdstroom, en breken zij niet aan de oever.

4.2.3 Water- en sedimentbeweging in het kribvak

Door een instroom van water wordt sediment het kribvak ingevoerd. In het kribvak zijn de stroomsnelheden lager, waardoor sedimentatie optreedt. Een deel hiervan zal door de wind verstoven worden. Tevens zal erosie optreden. Door golfwerking wordt sediment opgewoeld, en vervolgens getransporteerd door stroming.

4.2.3.1 Bodemerosie

Door Kornman (1993) worden een aantal processen en factoren genoemd die verantwoordelijk zijn voor de bodemerosie.

Sturende processen

1) Variabele rivierafvoer.

Of de kribben wel of niet overstroomd zijn is afhankelijk van het afvoerregime. Bij een overstroomde krib wordt de stroming alleen vertraagd wat resulteert in sedimentatie stroomopwaarts van de krib, met name de kribkop, en erosie stroomafwaarts van de krib. Dit komt overeen met de sedimentatie- en erosie plaatsen bij een niet overstroomd kribvak. Toch zal netto sedimentatie optreden omdat er veel sediment wordt getransporteerd tijdens hoge afvoeren.

2) Scheepvaart.

Bij een dusdanige waterstand dat de kribben niet zijn overstroomt, hebben schepen een dominante invloed op de kribvakstromingen. Een scheepspassage kan tot een aanzienlijke verhoging van de stroomsnelheden leiden, waardoor de kans op overschrijding van de kritieke bodemschuifspanning toeneemt. Hierdoor neemt het sediment transport toe.

3) Golfwerking.

Golfwerking, door secundaire scheepsgolven of door windgolven, woelt het sediment los, wat vervolgens door de stroming meegevoerd kan worden. Aangezien golven vooral breken bij afvaart (van Driel et al 1993) zal erosie door golfwerking aan de noordkant van de Waal waarschijnlijk het hoogst zijn. Afvaart komt voornamelijk aan de noordzijde van de Waal voor.

Het gevolg van shoaling zou een ruimtelijke verdeling van de korrelgrootte kunnen zijn. Door de asymmetrie van de golven ontstaat een korte, hevige stroom oeverwaarts en een langere, minder hevige stroom rivierwaarts. Dit heeft tot gevolg dat er oeverwaarts hogere kritieke schuifspanningen overschreden worden dan rivierwaarts. Hierdoor zou een oeverwaarts transport van grof sediment en een rivierwaarts transport van fijner sediment op kunnen treden.

Sturende factoren

1) De kribvak geometrie.

De geometrie van het kribvak bepaalt het eroderend en aanzandend vermogen. Bij een klein kribvak vult de bovenstroomse neer het gehele kribvak waardoor de hoofdstroom van de rivier minder kans krijgt het kribvak binnen te dringen. Het gevolg hiervan is dat het aanzandend vermogen lager is, maar dat het eroderend vermogen ook lager is.

2) Sediment karakteristieken.

De textuur van het bodemsediment bepaalt de kritieke bodemschuifspanning. Grof

materiaal is moeilijk in beweging te brengen, en ook cohesieve materialen als klei hebben een grote weerstand tegen erosie. De kritieke bodemschuifspanning is af te leiden uit een Shields stabiliteits diagram.

3) Sediment beschikbaarheid.

De sedimentbeschikbaarheid is afhankelijk van het bovenstroomse gebied. Bij een hoge sedimentbeschikbaarheid is de aanzanding hoger

4.2.3.2 Oevererosie

De oever kan bestaan uit een oeverlijn (zandig materiaal) of een steilrand (kleiïg materiaal) en is over het algemeen begroeid met gras. Rechtstreekse aantasting zal vooral plaatsvinden bij hoogwater.

De hydrodynamische processen worden gekenmerkt door golfwerking en stromingen. Erosie enerzijds of aangroei van de oever anderzijds is afhankelijk van de duur, frequentie en grootte van de golf- en stromingsbelasting. Volgens Kornman (1993) is de duur dat het waternivo gelijk is aan de oeverlijn het meest bepalend. Hierbij staat de oever rechtstreeks bloot aan golfaanvallen. Wanneer dit lang duurt zal de erosie de overhand hebben en zal de vegetatie beschadigd worden. Wanneer de rechtstreekse golfaanval kort duurt zal de oeverlijn uitbreiden door groei van de vegetatie.

Bij steile oevers kunnen massabewegingen optreden. Dit komt voor als de schuifweerstand lager is dan de schuifspanning. De schuifweerstand daalt door een hogere waterdruk van de poriën, de schuifspanning stijgt door ondergraving. Massabewegingen zullen dus bij voorkeur optreden na een periode met een hoge waterstand. (Huyskens et. al. 1993)

4.2.3.3 Aanzanding van het kribvak

Sedimenttransport is onder te verdelen in bodemtransport en zwevend transport. Als de stroomsnelheid afneemt zakt het zwevende sediment naar de bodem. Daalt de bodemschuifspanning beneden een kritische drempel, dan treedt er waardoor geen bodemtransport meer op. Uit meerdere onderzoeken is gebleken dat de stroomsnelheid afneemt van 1 m/s in de hoofdstroom tot 0.3 m/s in het kribvak (Haas et al, 1987, Kornman, 1993 en Termes et al, 1991)

4.2.3.4 Scheepsinvloed

Erosie in kribvakken vind vooral plaats door duwstelpassages. Volgens Pilarczyk (1989) hebben zelfaangedreven schepen tot 2000 ton erg weinig effect. Stroomsnelheden in het kribvak nemen toe met een toename van de waterspiegeldaling. Aangezien de waterspiegeldaling in het kribvak toeneemt met de lengte van het schip zullen duwstellen, en dan met name de 6-bak duwstellen de grootste invloed op de kribvakbodem uitoefenen.

4.2.4 Hypothesen

De doelstelling van dit onderzoek is het opstellen van een ruimtelijk stromings- en sedimentatie patroon in een kribvak in een situatie met alleen de invloed van de rivierafvoer en in een situatie met scheepspassages. Hierdoor wordt het inzicht vergroot in de gevolgen van de passage van scheepvaart.

Aan de hand van de resultaten van het stromingspatroon en sedimentbeweging kunnen de volgende hypothesen getoetst worden:

- A. De stroming in een klein kribvak wordt gedomineerd door 1 neer, de stroming in een groot kribvak wordt gedomineerd door 2 neren. Het stromingspatroon in een groot kribvak komt overeen met het door de schaalmodellen voorspelde theoretische stroombeeld uit figuur 4.2.1.
- B. Het stromingspatroon onder invloed van scheepvaart vertoont hetzelfde patroon als wat door de schaalmodellen voorspeld wordt.
- C. Invloed van schepen is sterk afhankelijk van de grootte, snelheid en afstand uit de oeverlijn. De snelheid en de duur van scheepsgeïnduceerde stroming is afhankelijk van de snelheid en de grootte van de schepen. Deze stroming dempt uit naarmate de afstand tot het schip toeneemt. Er is een positief verband tussen de mate van erosie en de diepgang, lengte, breedte en snelheid van het schip. Tevens is er een verschil in het stromingspatroon van een op- en afvarend schip.
- D. Tijdens lage afvoer treedt erosie van de kribvakbodem op. Aangezien de hoogste stroomsnelheden optreden tijdens scheepspassages zal erosie plaatsvinden tijdens scheepspassages. Zonder scheepvaart zal sedimentatie plaatsvinden.
- E. Invloed kribvakgeometrie: in een klein kribvak zullen de erosie en sedimentatie lager zijn dan in een groot kribvak omdat de hoofdstroom het kribvak niet kan binnendringen. Hierdoor zijn de stroomsnelheden in een klein kribvak lager. Maar aangezien de lagere erosie gecompenseerd wordt door minder sedimentatie zal het netto resultaat hetzelfde zijn.
- F. Aan de noordoever is de golfopwoeling door scheepspassages hoger omdat de invloed van afvaart, welke brekende golven tot gevolg heeft, hier hoger is. De effecten van scheepspassages zullen hier dus sterker zijn.

De hier geformuleerde hypothesen zullen in de discussie getoetst worden aan de resultaten van het onderzoek. De beantwoording van de vijfde hypothese, de hogere invloed van scheepspassages aan de noordoever, zal echter gebeuren zonder golveninvloeden te berekenen, maar alleen door de invloed van scheepspassages te vergelijken. Wanneer de invloed van schepen groter is aan de noordoever kan dit hoogstens toegeschreven worden aan golven. Deze hypothese zal echter nooit met grote zekerheid beantwoord kunnen worden aangezien er geen golfgeïnduceerd suspensie wordt berekend.

4.3 Methodiek

4.3.1 Stromingspatroon

Het uitgangspunt was het verkrijgen van het stromingspatroon van zowel een T0 situatie (zonder scheepvaart) als een stromingspatroon met scheepvaart. Tevens is geprobeerd een beeld te krijgen van de temporele veranderingen in het stromingspatroon van een kribvak wanneer een schip passeert.

Een probleem voor de onderverdeling tussen natuurlijke stroming en scheepsgedomineerde stromingscondities is het oscillerende karakter van stroming in een kribvak. Wanneer een schip passeert, loopt het kribvak niet slechts één keer leeg om vervolgens weer vol te lopen. Het proces van vol- en leeglopen blijft ook na de passage van een schip voortduren. Al neemt de verplaatste watermassa in eerste instantie snel af, blijft de waterbeweging in een kribvak na 20 minuten nog na slingeren. De scheepsgeïnduceerde stroomsnelheden zijn vooral hoog in de eerste twee cycli van leeg- en vollopen. Hierna nemen de stroomsnelheden snel af tot een constante slinger beweging.

- 1) Verkenning van de data gebeurt met de analyse van meetbursts waarin weinig scheepspassages voorkomen. In deze bursts zijn tijdsgemiddelde stroomvectoren berekend met een olopende tijdsduur, van 10 s tot 2 min. Het tijdsgemiddelde waarin de scheepspassages zijn terug te vinden is een middenweg tussen enerzijds wegmiddeling van het scheepssignaal bij een hoog tijdsgemiddelde, en anderzijds een te grote invloed van de natuurlijke variatie bij een laag tijdsgemiddelde. De moeilijkheid bij het vaststellen van scheepsinvloeden is de naslingertijd; de waterbeweging kan nog lang na een scheepspassage naijlen.
- 2) Na vaststelling van het juiste tijdsgemiddelde van de stroomvectoren is de dataset in tweeën gesplitst, nl. in een deel zonder scheepsinvloed en een deel met scheepsinvloed. De dataset zonder scheepsinvloed is gebruikt voor berekening van de T0 - situatie. Van de T0 situatie zijn de gemiddelde resultante stroomsnelheid, stromingsrichting, en de standaarddeviatie van de stroomsnelheid berekend. De T0 situatie is voor elke dag, en dus voor elke meetpositie, berekend. De stroomsnelheid en de richting zijn in een plot weergegeven.
- 3) De volgende stap is het ontrafelen van de temporele verandering van het stromingspatroon in een kribvak ten gevolge van een scheepspassage. Hiervoor is een plot gemaakt van stromingsvectoren tijdens verschillende stadia van een scheepspassage. Een scheepspassage is opgedeeld in 4 fases: achtereenvolgens de eerste keer dat het kribvak leeg stroomde gevolgd door opnieuw vollopen van het kribvak, en de tweede keer dat het kribvak leeg stroomde gevolgd door het opnieuw vollopen. Tijdens deze 4 fases zijn de hoogste stroomsnelheden en sedimentconcentraties gemeten.

De aldus verkregen plots zijn vergeleken met de stromingspatronen uit figuur 4.2.3 en 4.2.4. De beschreven fasen komen echter niet met elkaar overeen. Fasen 1 en 3 uit de beide figuren komen overeen met resp. fase 1 en 2 uit stap 3). Een tussenliggende fase, zoals in figuur 4.2.3 en 4.2.4, is weggelaten omdat daarin alleen maar een kentering van de stroomsnelheden optreedt. Het is niet zinvol om die als aparte fase weer te geven.

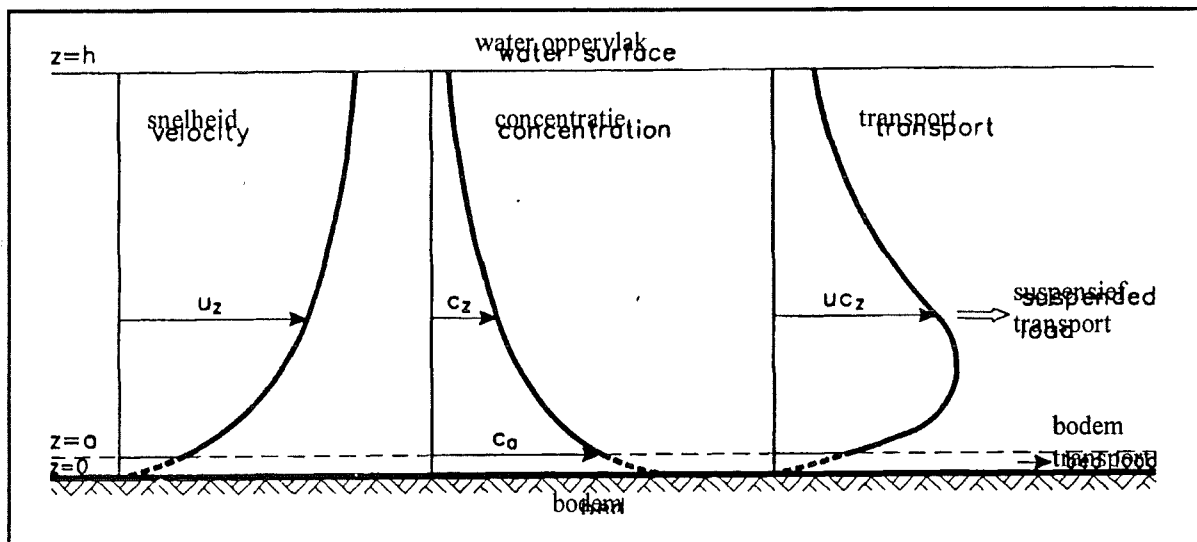
Om een ruimtelijk patroon te krijgen, is het noodzakelijk dat voor elke plot minstens 2 scheepspassages worden gebruikt. Eén scheepspassage werd immers door twee miniframes geregistreerd, en voor een ruimtelijk beeld zijn minstens 4 posities met stromingsvectoren

noodzakelijk. Er moesten dus twee scheepspassages gevonden worden waarvan de scheepskenmerken met elkaar overeen komen, en waarbij de miniframes op verschillende posities stonden. Hiervoor zijn twee grote, liefst identieke schepen gezocht die niet werden verstoord door andere scheepspassages en een vergelijkbaar EMFX-, EMFY-, druk- en OBS signaal opleverden. Deze exercitie werd voor een op- en een afvarend schip toegepast. Hiermee is een beeld analogoog aan dat van figuur 4.2.3 en 4.2.4 verkregen.

4.3.2 Berekening van het transport

Het totale transport is opgebouwd uit bodemtransport en suspensief transport.

Het suspensieve transport is berekend door het snelheidsprofiel te vermenigvuldigen met een concentratieprofiel zoals figuur 4.3.1.



Figuur 4.3.1: Verticale verdeling van de snelheid, concentratie en transport. Naar van Rijn 1993.

Kennis van de snelheids- en de concentratie verdeling over de verticaal is dus noodzakelijk. Een probleem bij de metingen met de miniframes is echter dat deze maar op 1 hoogte meet, en dat is op 10 cm boven de bodem.

Het snelheidsprofiel is, uitgaande van een logaritmische snelheidsverdeling, beschreven door de volgende vergelijking:

$$u_{(z)} = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

- waarbij $u_{(z)}$: snelheid op hoogte z
 u_* : schuifspanningsnelheid
 κ : von Karman constante, = 0,4
 z_0 : hoogte waarbij $u = 0$

u_* is dus te berekenen wanneer z_0 bekend is. Hierbij moet er echter vanuit gegaan worden dat de stroming uniform stationair is. Deze aanname is nog te rechtvaardigen aangezien het leegzuigen (en vollopen) van het kribvak een minuut duurt. De z_0 is te berekenen uit korrelgrootte karakteristieken, zoals $z_0 = 0.033 * D_{90} + 0.11 v/u$, bij een aanname van een vlak bed. (van Rijn 1993). Hiervoor is een iteratieve berekening noodzakelijk. Wanneer z_0 en u_*

bekend zijn kan de dieptegemiddelde snelheid berekend worden. Een probleem hierbij is dat de korrelgrootte zeer variabel is (zie bijlage 4.1), waardoor z_0 niet nauwkeurig berekend kan worden.

De berekening van het concentratie profiel is problematischer.

Allereerst moet gekozen worden door welk model de mixing coëfficiënt het beste beschreven kan worden: een constant, een lineair, of een parabolisch model. Vervolgens zijn de berekende parameters sterk afhankelijk van de korrelgrootte karakteristieken, terwijl dat een vrij onzekere factor is.

Analyse van de gestelde hypothesen uit paragraaf 4.2 vereist geen kennis van het totale transport. Het gaat om een interpretatie van de transportbanen, niet om het opstellen van een sedimentbudget. Voor interpretatie van transportbanen is kennis van de relatieve transporten toereikend. Dit wordt verkregen door de snelheid op 10 cm hoogte te vermenigvuldigen met de concentratie op 10 cm hoogte.

Aangezien er twee metingen per seconde beschikbaar zijn wordt met deze methode het momentane transport berekend. Wanneer deze transporten per halve seconde worden opgeteld en gemiddeld over de transportperiode wordt het transport geïntegreerd over de tijd verkregen:

$$S = \sum_{t(\text{begin})}^{t(\text{eind})} (u \times C) \quad [\text{kg/m}^2\text{s}]$$

Aanzien van de stroomsnelheid de X- en Y richting bekend zijn kan ook het sedimenttransport in vier richtingen berekent, zijnde X, -X, Y, en -Y.

Wanneer in het vervolg van dit rapport wordt gesproken over het sediment transport, wordt daarmee het relatieve transport op 10 cm hoogte bedoeld. Hierdoor worden een groot aantal aannamen ontweken, zonder dat dit nadelige gevolgen heeft voor het beantwoorden van de werk hypothesen. Aannamen welke niet te ontwijken zijn, zijn de volgende.

- Het bodemtransport wijkt in richting en relatieve grootte (toe- en afname bij scheepspassages) niet veel af van het transport op 10 cm boven het bed. Deze is niet bekend, en kan mogelijk tijdens lage stroomsnelheden (dus geen scheepspassage) voor transporten zorgen. Wanneer dit bodemtransport aanzienlijk is kan dit tot een fout in de berekende transportbanen zorgen.
- Het transport op 10 cm boven het bed is gelijk aan het diepte gemiddelde transport. Deze aanname is niet te controleren.
- De ruimtelijke transportgradiënten op 10 cm boven het bed zijn representatief voor de gehele transportvertikaal.

4.3.3 Ruimtelijk erosie- en sedimentatie patroon

Om uitspraken te doen over erosie en sedimentatie is kennis nodig van de ruimtelijke en temporele verdeling van het sedimenttransport. Erosie en sedimentatie kan alleen plaatsvinden wanneer het transport ruimtelijk verschilt. Er moet dus een ruimtelijke transportgradiënt $\delta S/\delta x$ aanwezig zijn. Wanneer deze temporeel sterk verandert (tijdens een scheepspassage) vindt erosie of sedimentatie plaats.

Evenals bij het stromingspatroon zijn de transportvectoren in de T0 situatie grafisch weergegeven. De berekening hiervan gebeurde analoog aan de berekening van de stromingsvectoren, en met de data uit hetzelfde tijdsbestek.

Vervolgens is het effect van de scheepspassages onderzocht. Allereerst is het netto transport berekend van de schepen welke gebruikt zijn voor de berekening van de temporele verandering van het stromingspatroon als gevolg van een scheepspassage. Hiermee kan het ruimtelijk beeld van het transport patroon benaderd worden.

De laatste stap is het relateren van de verschillende scheepstypen aan het ruimtelijk patroon van transportbanen. De moeilijkheid hierbij is dat gebleken is dat de scheepstypen en scheepskarakteristieken zeer moeilijk zijn terug te vinden in het ruimtelijk patroon van transport. Het opstellen van een reeks met grafische weergaven van de transportbanen is daardoor niet per scheepstype mogelijk. Daarom zijn per kribvak de transportvectoren van een aantal scheepspassages grafisch weergegeven zonder hierbij onderscheid te maken op scheepskarakteristieken. Elke vector is wel genummerd zodat de scheepskarakteristieken in een tabel zijn op te zoeken.

De bruikbare scheepspassages zijn als volgt geselecteerd. Allereerst worden de scheepspassages uitgezocht welke een plotselinge verandering in het EMF-, druk-, en/of OBS signaal tot gevolg hebben. Die verandering mag maar aan 1 scheepspassage zijn toe te schrijven. Van deze schepen is de richting en de mate van transport berekend volgens eerder beschreven methoden.

Aldus blijven de scheepspassages over die ofwel een te geringe invloed hebben op het meetsignaal, ofwel met elkaar interfereren tot een gecombineerd signaal. De scheepspassages zonder een merkbare invloed zijn vervolgens verzameld, en in een tabel opgenomen. De transport richting van deze passages moet als die van de T0 situatie beschouwt worden. Uit deze tabel is dus af te lezen welke schepen geen merkbare invloed hebben. Van de gecombineerde scheepspassages is het transport berekend wanneer de schepen een zeer duidelijk signaal opleveren, met name een sterke toename van de concentratie. Aan gecombineerde scheepspassages zonder toename in het OBS signaal is niet gerekend omdat de transporten hiervan niet veel van de T0 situatie verschillen, en omdat wel waargenomen verschillen nergens aan toe zijn te schrijven.

4.3.4 Toetsing hypothesen

De toetsing van de in 4.2.4 gestelde hypothesen is visueel gebeurt, aan de hand van de grafische weergave van de stromings- en transportvectoren. Door de vectoren grafisch weer te geven wordt de ruimtelijke verdeling van zowel de richting als de mate van transport overzichtelijk. Vanwege de grote variatie in de scheepssignalen is toepassing van statistische toetsingsmethoden geen goede oplossing. Dit geldt ook voor het berekenen van correlatie coëfficiënten.

Tevens zijn per kribvak een aantal scheepskarakteristieken uitgezet tegen de verandering van het transport en tegen de verandering van de stromingshoek. De aldus getoetste scheepskarakteristieken zijn :

- vaarafstand
- vaarsnelheid
- type schip (afhankelijk van de lengte en de breedte)
- diepteligging
- op/ afvaart.

Het transportverschil is berekend door het T0 transport af te trekken van het scheepsgeïnduceerde transport. Op dezelfde wijze is het hoekverschil berekend.

Interpretatie van deze grafieken is eveneens visueel gebeurd. Aan de hand van de aldus opgedane kennis zijn de hypothesen getoetst.

4.4 Resultaten

4.4.1 Bodemligging

De op basis van de interpolatie van de waterpasdata en de lodingen gemaakte kaartjes met de morfologie van de kribvakbodem en het aansluitende zomerbed van de rivier, zijn opgenomen in bijlage 4.2.1 t/m 4.2.4. De diepteverschil kaartjes zijn terug te vinden in bijlagen 4.2.5 t/m 4.2.7.

Uit deze kaartjes is de volgende informatie te halen. De steilrand waar de hoofdstroom van de rivier overgaat in het kribvak is een vrijwel rechte lijn tussen de twee kribkoppen in. Dit is een aanwijzing dat de hoofdstroom nauwelijks het kribvak binnenstroomt. De ontgrondingskuil bij de kribkoppen varieert in diepte van 1 tot 3 m beneden de gemiddelde rivierbodem. Een diepe kuil van 3 m diepte komt voor bij een groot en bij een klein kribvak.

Wat opvalt uit de verschilkaarten is dat de verschillen gering zijn. In de maanden tussen de eerste en de tweede waterpasmeting lijkt de morfologie van de kribvakbodem dus nauwelijks veranderd. Er is een verschil, al is dit nauwelijks significant te noemen. In alle drie de kribvakken heeft depositie van ± 20 cm plaatsgevonden rond de 6 m +NAP hoogtelijn. Hiervoor is een aantal verklaringen.

Het is mogelijk het gevolg van de hogere afvoer welke in de periode voorafgaand aan de meetcampagne is opgetreden. De 6 m hoogtelijn komt ongeveer overeen met het waternivo tijdens de hoogwatergolf. Het kan een afzetting aan de waterlijn zijn, bijvoorbeeld door golven naar de oever getransporteerd. Ook kan sedimentatie in het hele kribvak hebben plaatsgevonden. De afzetting rond de 6m +NAP lijn zou dan bewaard zijn gebleven, maar de afzetting beneden de 5m + NAP is weggeërodeerd tijdens de lagere rivierafvoer. Het waternivo rond de 5m + NAP lijn komt overeen met de waterstand tijdens laag water.

Een andere mogelijkheid is windverstuiving. Windverstuiving kan ook voor de extreme verschillen rond de 7 m + NAP hoogtelijn zorgen, maar fouten door randeffecten van de interpolatie kunnen hier ook debet aan zijn. Dit laatste lijkt echter niet waarschijnlijk omdat aan de rivierzijde geen randeffect optreedt.

In het deel van de kribvakbodem dat tijdens de meetcampagne onder de waterlijn heeft gelegen zijn nauwelijks morfologische verschillen waar te nemen. Dit kan, zoals eerder vermeld, een gevolg zijn van depositie tijdens hogere afvoer en vervolgens erosie tijdens lagere afvoer. De andere mogelijkheid is dat in de stromingscondities zoals opgetreden in de periode april-juni, nauwelijks morfologische veranderingen optreden.

De positie en de korrelmediaan (D_{50}) van de korrelgrootte monsters zijn opgenomen in bijlage 4.1. Hieruit blijkt een duidelijk verschil tussen de noordoever en de zuidoever. De korrelmediaan (D_{50}) van het sediment onder de waterspiegel is aan de noordoever veel hoger dan aan de zuidoever, een verschil van $\pm 400 - 900 \mu\text{m}$ (noordoever) tegenover $\pm 200 - 300 \mu\text{m}$ (klein kribvak zuidoever) en $\pm 300 - 400 \mu\text{m}$ (groot kribvak zuidoever).

Korrelgrootte monsters van het droge kribvak strand resulteerden in materiaal uit de grindfractie, met een D_{50} tot 5 mm.

4.4.2 Natuurlijke rivierafvoer

4.4.2.1 Stromingspatroon zonder scheepvaart

Zuidoever

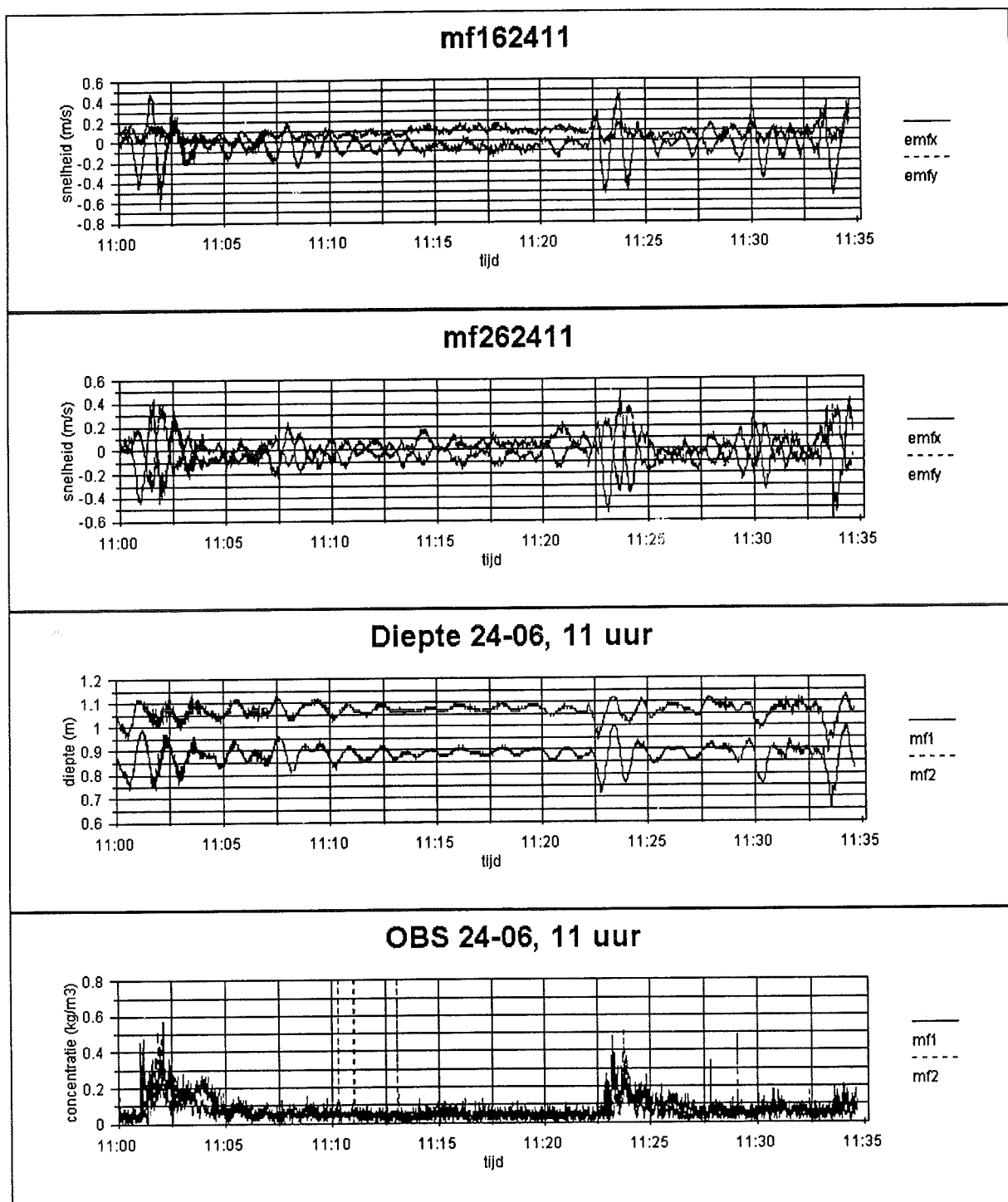
De grafische weergave van de stromingsvectoren zonder scheepsinvloeden zijn opgenomen in bijlage 4.3.1 en 4.3.2. Bij het vaststellen van een T0 situatie blijkt dat de stroming binnen het kribvak nooit stationair en unidirectioneel wordt. Dit wordt geïllustreerd door figuur 4.4.1, waarin de 2 bursts van 24 juni 11 uur zijn opgenomen. Tussen 11.02 en 11.22 vindt geen scheepspassage plaats. Toch blijft de deining in het kribvak regelmatig, na 11.13 is er geen afname van de deining zichtbaar. Dit zou er op kunnen duiden dat de schepen een zodanige invloed op de Waal hebben dat er een constante golfbeweging bestaat met een periode van 1,5 minuten. (Tussen 11.13 en 11.21 zijn 6 golven waarneembaar) Deze golfbeweging is in elke burst terug te vinden; per burst van 35 minuten zijn 20 tot 25 golven waarneembaar. Zie ook figuur 4.4.2. Aangezien deze golven erg onregelmatig zijn ten gevolge van de scheepspassages, is deze golfbeweging visueel vastgesteld.

Uit het stromingspatroon van kribvak 2 blijkt dat in een klein kribvak maar één neer bestaat, alle stroomvectoren zijn maar één kant op gericht. Tevens lijkt de hoofdstroom nauwelijks het kribvak binnen te dringen. De situatie is anders in kribvak 1, een groot kribvak. Hier dringt de rivierstroom wel het kribvak binnen (rivierframes van 19 t/m 21 juni). Het oeverframe van 20 juni heeft een zeer variabele stroomrichting. Dit zou kunnen duiden op de grens van twee neren.

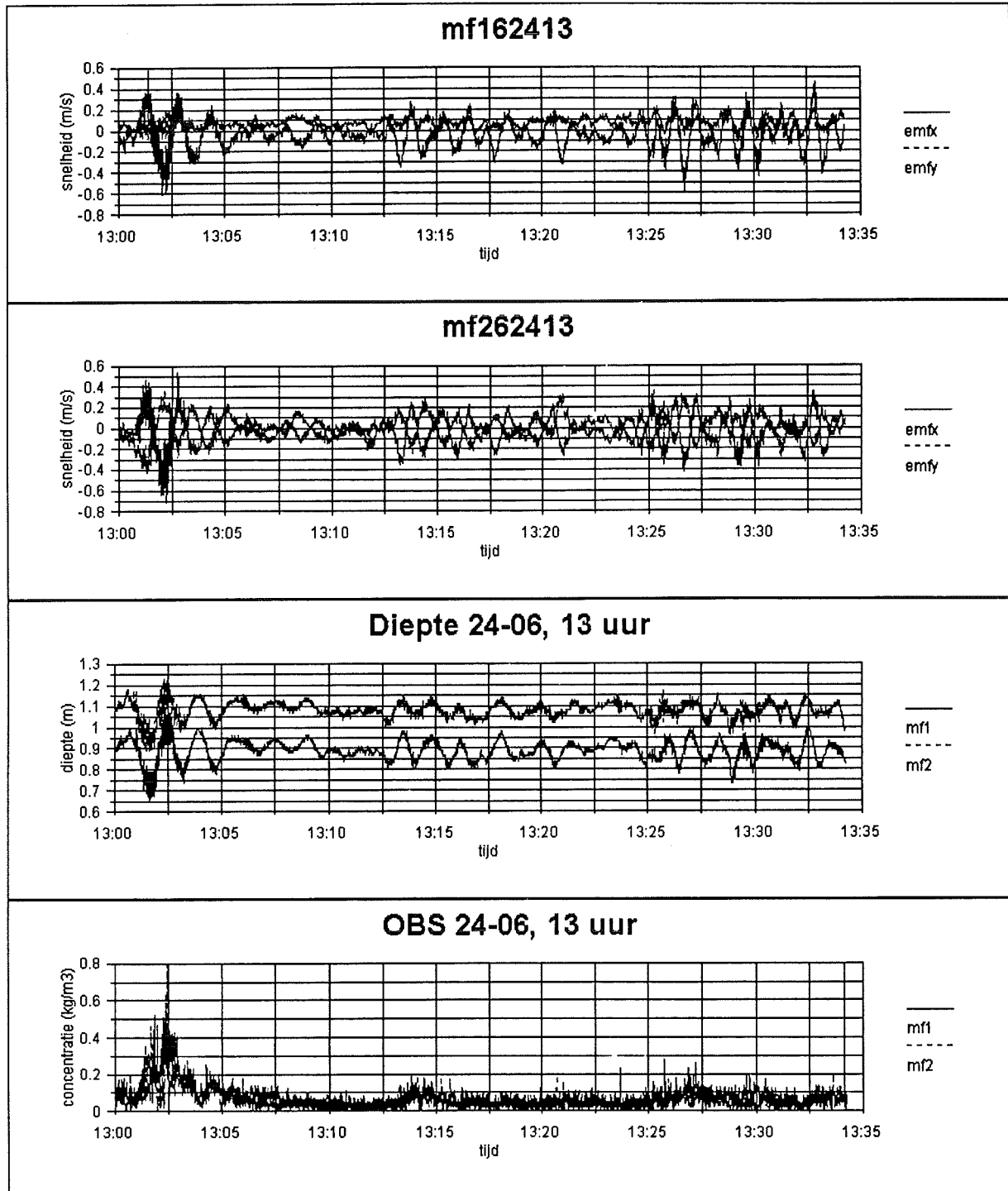
De gemiddelden en richtingen van de stroomsnelheden en transporten, met de standaarddeviaties van het gemiddelde transport en de stroomsnelheid zijn opgenomen in tabel 4.4.1.

kribvak	burst	v (m/s)	sd v (m/s)	hoek v	S (kg/m ² s)	sd S (kg/m ² s)	hoek S
1	161812	0.22	0.063	70.5	0.0189	0.0092	70.5
1	261812	0.16	0.046	68.4	0.0128	0.0070	68.3
1	161913	0.10	0.039	94.0	0.005	0.004	94.6
1	261913	0.16	0.065	282.9	0.011	0.013	287.7
1	162010	0.11	0.044	249.2	0.0067	0.0052	256.5
1	262010	0.22	0.051	230.8	0.0119	0.0056	230.1
1	162110	0.10	0.025	89.2	0.004	0.003	88.2
1	262110	0.10	0.045	294.1	0.004	0.004	297.8
2	162411	0.12	0.032	116.3	0.005	0.003	115.7
2	262411	0.08	0.054	131.4	0.0033	0.0034	129.3
2	162513	0.22	0.052	86.1	0.0076	0.0046	88.3
2	262513	0.17	0.048	102.8	0.0065	0.0050	102.5
2	162611	0.11	0.068	129.4	0.0040	0.0079	131.0
2	262611	0.08	0.059	198.3	0.0009	0.0067	193.3
2	162711	0.21	0.047	97.3	0.0090	0.0056	96.9
2	262711	0.10	0.049	124.2	0.0038	0.0046	126.3

Tabel 4.4.1: T0 situatie kribvak 1 en 2 (opbouw burstcode: #frame, #maand, ##dag, ##uur).



Figuur 4.4.1: Meetburst van 24 juni, 11 uur.



Figuur 4.4.2: Meetburst van 24 juni, 13 uur.

Noordoever

In kribvak 4 zijn de stromingsvectoren één kant op gericht, tegengesteld aan de richting van de hoofdstroom van de Waal, zie bijlage 4.3.4. Hier is dus geen directe aanwijzingen voor de aanwezigheid van meer dan 1 neer. Het is niet uit te sluiten dat dit het gevolg is van de plaatsing van de frames.

In kribvak 3 heeft één vector een richting het kribvak in. De meetframes welke aan de rivierzijde geplaatst zijn meten een stromingsrichting richting de rivier. De aanwijzingen voor twee neren zijn, op basis van de stromingsvectoren veroorzaakt door de natuurlijke

rivierafvoer, gering. Het is mogelijk dat de frames in beide kribvakken toevallig niet geplaatst zijn op een positie waar halverwege het kribvak de stromingsrichting loodrecht op die rivierrichting is. Hierdoor zou het dan lijken alsof de kribvakken door 1 neer gedomineerd worden. Vooral nog lijkt het erop dat de beide kribvakken aan de noordoever bij situaties zonder scheepvaart door slechts één neer gedomineerd worden.

De richting en grootte van het sedimenttransport en de stroomsnelheid voor de T0 situatie zijn opgenomen in tabel 4.4.2

kribvak	burst	v (m/s)	sd v (m/s)	hoek v	S (kg/m ² s)	sd S (kg/m ² s)	hoek S
3	170114	0.17	0.049	112.4	0.0129	0.0096	112.6
3	270114	0.09	0.049	339.8	0.0037	0.0048	339.5
3	170210	0.19	0.067	98.0	0.0072	0.0064	102.9
3	270210	0.08	0.037	163.5	0.0014	0.0028	174.6
3	170312	0.17	0.056	135.1	0.0102	0.0073	134.5
3	270312	0.08	0.043	114.4	0.0027	0.0040	108.9
3	170413	0.18	0.069	97.1	0.0143	0.0128	98.7
3	270413	0.09	0.049	150.1	0.0033	0.0047	142.9
4	170810	0.17	0.034	82.9	0.0103	0.0056	83.4
4	270810	0.11	0.030	64.3	0.0045	0.0032	67.4
4	170911	0.32	0.077	80.5	0.0200	0.0120	81.4
4	270911	0.30	0.065	111.2	0.0206	0.0123	111.9
4	171011	0.20	0.061	70.0	0.0100	0.0057	70.0
4	271011	0.14	0.045	60.2	0.0070	0.0049	60.0

Tabel 4.4.2: T0 situatie kribvak 3 en 4 (opbouw burstcode: #frame, #maand, ##dag, ##uur).

4.4.2.2 Transport zonder scheepvaart

Zuidoever

De grafische weergave van de transportvectoren van de zuidoever zijn opgenomen in bijlage 4.3.5 en 4.3.6. Het transport neemt in de T0 situatie recht evenredig toe met de snelheid. Dit is het gevolg van de constante temporele concentratie in de waterkolom; aangezien de concentratie in de T0 situatie niet verandert neemt het transport alleen toe als de snelheid toeneemt. Het patroon van sedimenttransport is daardoor gelijk aan het patroon van stroming. De concentraties vallen echter wel binnen de foutenmarge welke voor de OBS is geschat, zie bijlage 2.1. Het is daarom erg moeilijk om harde uitspraken te doen over de grootte van het transport.

De berekende transporten in kribvak 2 zijn lager dan die in het grote kribvak. De transporten in kribvak 1 schommelen rond de 10 g/m²s, terwijl de transporten in kribvak 2 vaak niet hoger zijn dan 5 g/m²s. Dit is het gevolg van lagere sedimentconcentraties omdat de berekende stroomsnelheden in kribvak 2 niet zoveel lager zijn dan die in kribvak 1.

De transporten van het rivier- en oeverframe zijn, in beide kribvakken, ongeveer even groot.

Noordoever

In bijlagen 4.3.7 en 4.3.8 zijn de transportvectoren van kribvak 3 en 4 terug te vinden. Voor kribvak 4 geldt, net als voor kribvak 1 en 2, dat het patroon van stroming gelijk is aan het patroon van sedimenttransport. Ook hier is de concentratie vrijwel constant in de tijd. In kribvak 3 verschilt het patroon van stroming enigszins van het patroon van sedimenttransport.

In dit kribvak is het transport van het rivierframe lager dan het transport van het oeverframe (0-5 g/m²s tegen 10 g/m²s), terwijl de stroomsnelheden vergelijkbaar zijn (orde 10-15 cm/s).

4.4.3 Scheepvaart

4.4.3.1 *Patroon van stroming tijdens scheepspassages*

In bijlagen 4.4.1 t/m 4.4.4 zijn de stromingsvectoren en sedimenttransporten tijdens een scheepspassage weergegeven. Elke bijlage bestaat uit deel A t/m D. In A zijn de stromingsvectoren van de opvaart opgenomen, en in B de resulterende sedimenttransporten. In C en D is hetzelfde voor de afvaart gedaan. De vectoren in de bijlagen (A) en (C) geven de maximale snelheden weer. Tijdens situatie (1) en (3) is de uitstroming maximaal, tijdens (2) en (4) stroomt het kribvak weer vol.

Gekozen is voor 4 stromingssituaties omdat tijdens deze situaties de hoogste stroomsnelheden worden behaald. Dit ondanks het feit dat er bij de hypothetische stroombeelden van fig. 4.2.3 en 4.2.4 uitgegaan wordt van 1 leegstroom fase en 1 volstroom fase.

Tevens is de sedimentconcentratie meestal het hoogst tijdens situatie (3) en (4) als gevolg van sediment opwoeling tijdens situatie (1) en (2). Wanneer een situatie in de figuur ontbreekt (afvaart kribvak 1 en afvaart kribvak 2) is een deel van de scheepspassage buiten de meting gevallen. Toch is voor deze scheepspassages gekozen omdat het signaal overeenkwam met de andere scheepspassages qua stroomsnelheid en het feit dat de veranderingen in de stroomsnelheid slechts aan 1 scheepspassage toe zijn te schrijven.

Uit de figuren blijkt het volgende:

De snelheden parallel aan de rivierrichting zijn tijdens een scheepspassage veel lager dan de snelheden dwars op de rivierrichting. Een scheepspassage heeft dus geen extra toename van de stroomsnelheden van de circulatie cel tot gevolg, maar een leeg- en volstroom fase met een richting dwars op de rivier. Deze leeg- en volstroming is gesuperponeerd op de circulatiecel, veroorzaakt door de natuurlijke rivierafvoer (T0-situatie).

Het verschil tussen op- en afvaart is gering, al is de stroomafwaartse stromingscomponent van de opvaart iets hoger, met name in situatie (1) en (2). De opwoeling in het kribvak is dan echter nog laag waardoor de concentratie en daarmee het transport nog gering is. In de resulterende netto transporten ten gevolge van de scheepvaart zijn dan ook weinig verschillen tussen op- en afvaart. In kribvak 1 lijkt de hoofdstroom alleen tijdens de afvaart het kribvak binnen te dringen, voor kribvak 2 is dit andersom; tijdens de opvaart is het sedimenttransport van het stroomafwaarts rivierframe stroomafwaarts gericht. Hier lijkt de hoofdstroom dus het kribvak binnen te dringen. Het belangrijkste verschil tussen op- en afvaart is dus de duur van de passage. Een afvarend schip vaart 2 tot 3 zo snel als een opvarend schip. Dit heeft tot gevolg dat de periode dat een opvarend schip invloed op het kribvak heeft ook 2 tot 3 zo lang duurt als een afvarend schip. Wanneer het transport (in $\text{kg/m}^2\text{s}$) tussen een op- en afvaart hetzelfde is zal de invloed van de opvaart dus hoger zijn.

De invloed van schepen op het sedimenttransport is groter op het oeverframe dan op het rivierframe. Tijdens meerdere passages is het transport bij het oeverframe aanzienlijk hoger dan bij het rivierframe (opvaart kribvak 1, 3 en 4, afvaart kribvak 2, 3 en 4). Andersom is dit niet het geval; de scheepsgeïnduceerde toename in het transport is bij het rivierframe nooit hoger dan bij het oeverframe. De richting van het transport is, ondanks de hoge stroomsnelheden dwars op de rivierrichting, vergelijkbaar met de T0 situatie.

4.4.3.2 Transportbanen van meerdere scheepspassages

De volgende stap is het bestuderen van meerdere scheepspassages. Hiervoor zijn de gemeten tijdreeksen en scheepspassages bestudeerd. Wanneer een scheepspassage terug was te vinden in de tijdreeks werd van de betreffende periode de richting en mate van het transport berekend. De resultaten hiervan zijn grafisch weergegeven in bijlage 4.5.1 t/m 4.5.4. De bijlage is als volgt opgebouwd: deel A is de grafische weergave van de sedimenttransport vectoren (voor kribvak 2 ook een deel B vanwege de grote hoeveelheid scheepspassages). Ook de T0 situatie is, ter vergelijking, in deel A (B) grafisch weergegeven.

Elke vector is voorzien van een nummer. De scheepskenmerken die bij dit nummer horen zijn opgenomen in deel B (C voor kribvak 2). Bij één nummer kan één scheepspassage horen, maar het kunnen ook een aantal schepen zijn die naast elkaar of vlak na elkaar gepasseerd zijn. Hierbij is niet uit het signaal te ontrafelen welke passage bij welk signaal hoort. Samenvallende scheepspassages worden in deel B (C) weergegeven met een *. Scheepspassages zonder merkbare invloed in het meetsignaal worden gemerkt met een X. Het patroon van sedimenttransport van deze passages is dus vergelijkbaar met die van de T0 situatie. De scheepsklassifikatie wordt uitgelegd in paragraaf 2.1.3 (zie tabel 2.1.3).

De interpretatie van de vectoren is als volgt. Gemiddeld is het netto transport van een scheepspassage een half tot twee maal zo groot als tijdens de T0 situatie. Het sediment transport neemt in de meeste gevallen toe. De richtingen verschillen niet extreem van de T0 situatie.

Schepen met een lengte minder dan 80 m hebben meestal geen tot een kleine invloed op het meetsignaal. Deze passages zijn in de tabellen van bijlage 4.5.1 t/m 4.5.4 gemerkt met een X. De invloed van grotere schepen kan echter nogal verschillen. De invloed van twee schepen met vrijwel dezelfde scheepskenmerken kan zeer verschillend zijn. (bijv. passage 4&5, 60&61). Passages met vrijwel dezelfde scheepskenmerken kunnen in het ene geval tot hoge stroomsnelheden in het kribvak leiden, en in het andere geval is het signaal niet terug te vinden. Een voorbeeld hiervan is 24 juni, 13 uur (figuur 4.4.2). Om 13.02 passeert een volle opvaart van 90 m het kribvak. Deze passage is duidelijk terug te vinden in het meetsignaal. Om 13.10 passeren 2 vergelijkbare schepen het kribvak. Deze dempen het golfsignaal juist uit. Deze twee scheepspassages hebben dus een effect tegenovergesteld aan dat van de eerste passage. Ook de invloed van een 4baks duwstel (scheepstype 1) verschilt sterk, al worden hiermee overwegend wel de hoogste transporten behaald.

De netto invloed van een aantal samenvallende grote scheepspassages is gering. Passage 9 resulteerde in een hoge uitslag van het OBS- en het EMF signaal maar het netto transport is slechts 2 maal de H0 situatie. Een transport lager dan de T0 situatie tijdens opeenvolgende scheepspassages is alleen in kribvak 1 voorgekomen (passages 1 en 15). In de overige kribvakken leidt een opeenvolging van schepen zonder uitzondering tot een toegenomen- of vergelijkbaar transport.

De invloed van scheepvaart op het sedimenttransport op de positie van het oeverframe is voor de meeste scheepspassages vergelijkbaar met het sedimenttransport op de positie van het rivierframe.

De spreiding van de sediment transportbanen ten gevolge van scheepspassages is belangrijk voor het circulatiepatroon in het kribvak. Waar de spreiding gering is, wisselt de stroming weinig van richting. Een hoge spreiding komt voor op plekken waar de stroom sterk van

richting wisselt zoals de grens tussen twee neren, de grens hoofdstroom/ kribvak, en het centrum van een neer. In kribvak 1 is dit van belang voor de meting van do 20 juni. De spreiding van de stromings richtingen is bij het rivierframe erg laag, en bij het oeverframe erg hoog. Dit kan er op duiden dat het rivierframe aan de rivierwaartse zijde van de scheidingsstroomlijn van het kribvak/ hoofdstroom ligt. Dit wordt onderbouwd door de diepte van het frame; het kribvak was hier 2.8 m diep. De grote spreiding in het oeverframe zou op de grens van twee neren kunnen duiden: tijdens een scheepspassage veranderen de neren van positie, waardoor de stroomsnelheden sterk fluctueren in de buurt van de grens van twee neren.

Voor kribvak 2 geldt dat de grote spreiding in het rivierframe van ma 24 juni op de grens hoofdstroom/ kribvak kan duiden.

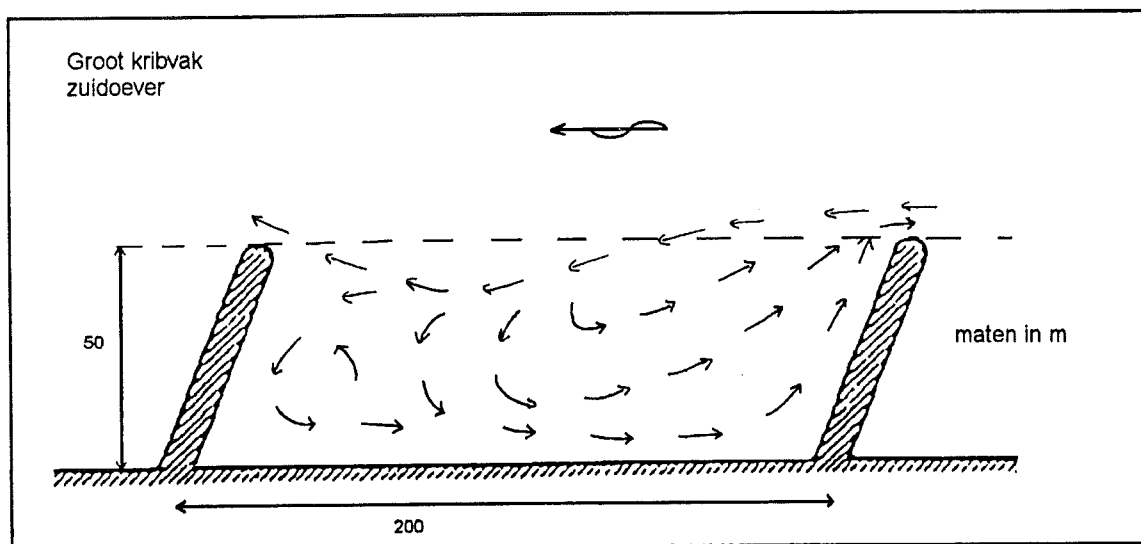
In kribvak 3 komen grote spreidingen voor bij het rivierframe van ma 1 juli, di 2 juli en do 4 juli. Deze wisselende stromingen zijn aanwijzingen voor zich verplaatsende neren. Tevens is de rivierwaartse stromingscomponent groter dan tijdens de T0 situatie. Dit zou betekenen dat er zich een kleine tweede neer rond de metingen van 1 en 3 juli bevindt.

De stromingen in kribvak 4 zijn unidirectioneel, met een richting tegenovergesteld aan de rivierrichting.

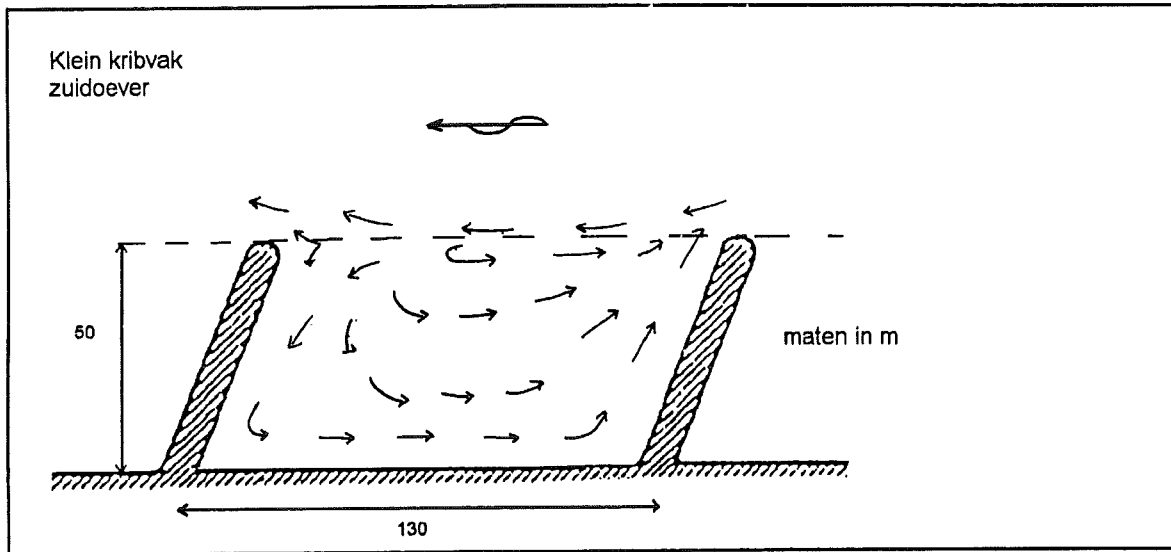
Met behulp van vectoren uit de T0 situatie, de morfologische kaartjes en de spreiding van de scheepsgeïnduceerde transportvectoren kan nu een schematisatie van de stroming in de kribvakken gemaakt worden, zie figuur 4.4.1 t/m figuur 4.4.3.

In de grote kribvakken kunnen twee neren onderscheiden worden. De kleine neer veroorzaakt een rivierwaartse stromingscomponent op 130 - 150 m van het kribvak. Op de positie van de oeverframes is de stroming echter vrijwel altijd parallel aan de oever, met een richting tegengesteld aan de rivierstroming. Hierdoor wordt geconcludeerd dat de twee neren binnen één grote circulatiecel liggen.

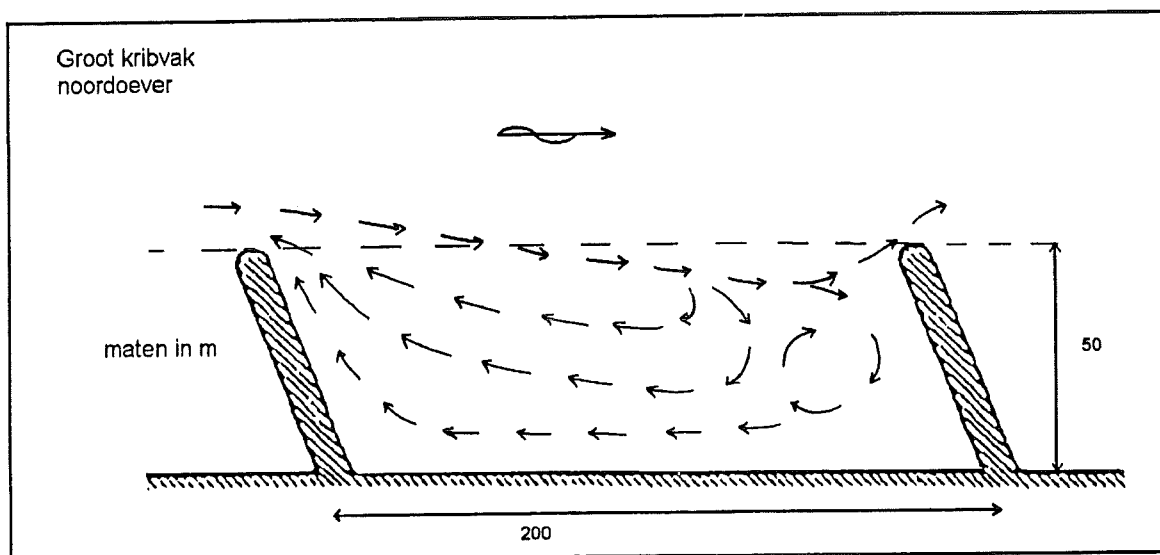
Het kleine kribvak wordt gedomineerd door één circulatiecel.



Figuur 4.4.3: Stromingspatroon in een groot kribvak, zuidoever. De stroming dringt in de stroomafwaartse helft het kribvak binnen, en stroomt via één grote circulatiecel weer naar buiten. Binnen deze cel zijn twee neren te onderscheiden, één grote en één kleinere.



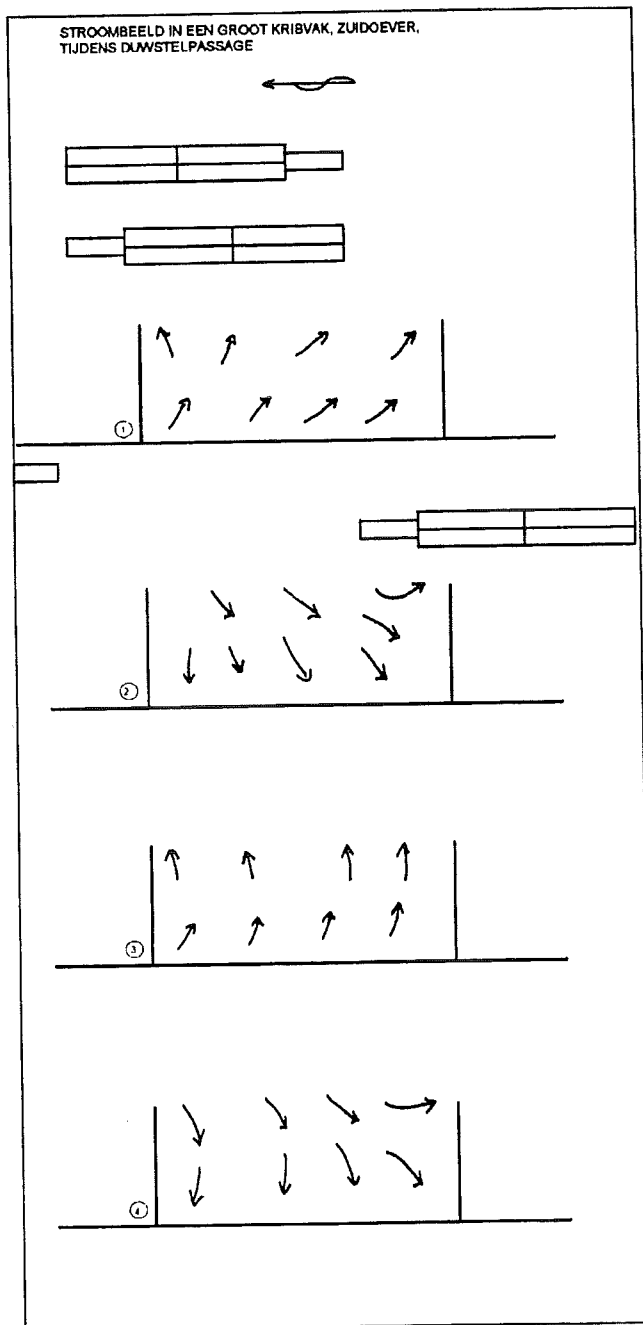
Figuur 4.4.4: Stromingspatroon in een klein kribvak, zuidoever. Stroomafwaarts dringt de hoofdstroom het kribvak binnen, om die via één stroomafwaarts neer te verlaten.



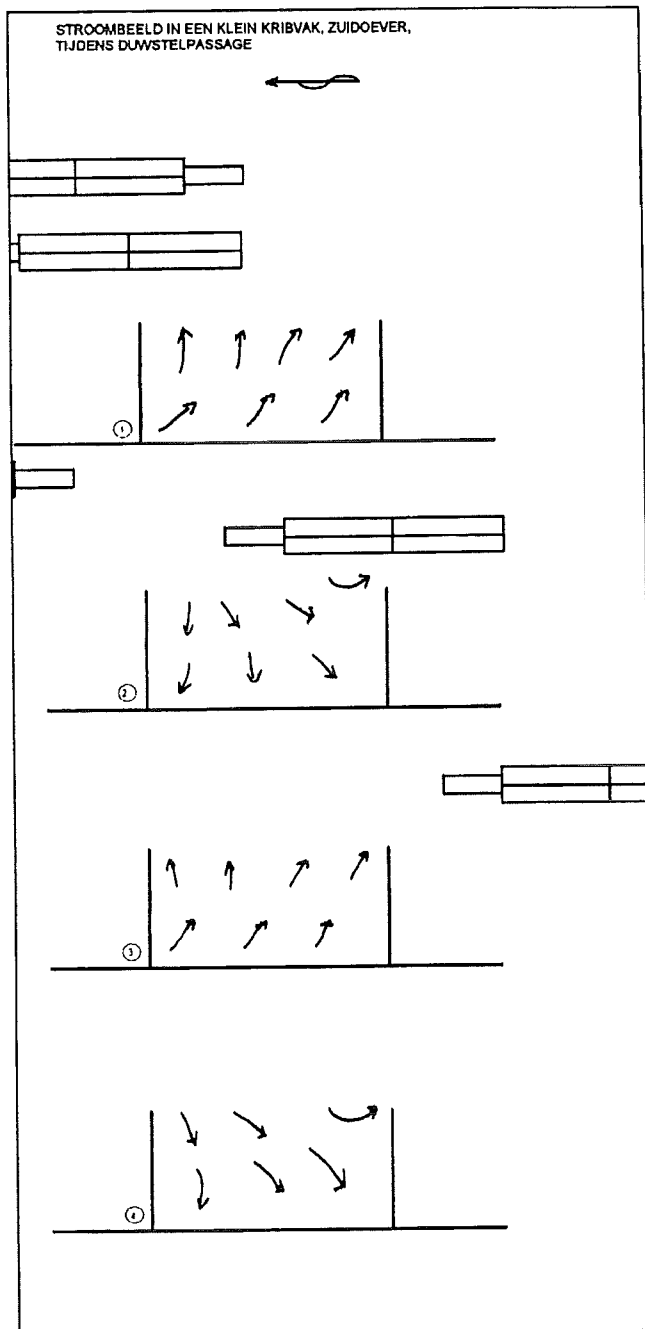
Figuur 4.4.5: Stromingspatroon in een groot kribvak, noordoever. De stroming dringt in de stroomafwaartse helft het kribvak binnen, en stroomt via één grote circulatiecel weer naar buiten. Binnen deze cel zijn twee neren te onderscheiden, één grote en één kleinere.

De kribvakken 3 en 4 zijn samengetrokken tot 1 schematisatie omdat de onderlinge verschillen klein zijn.

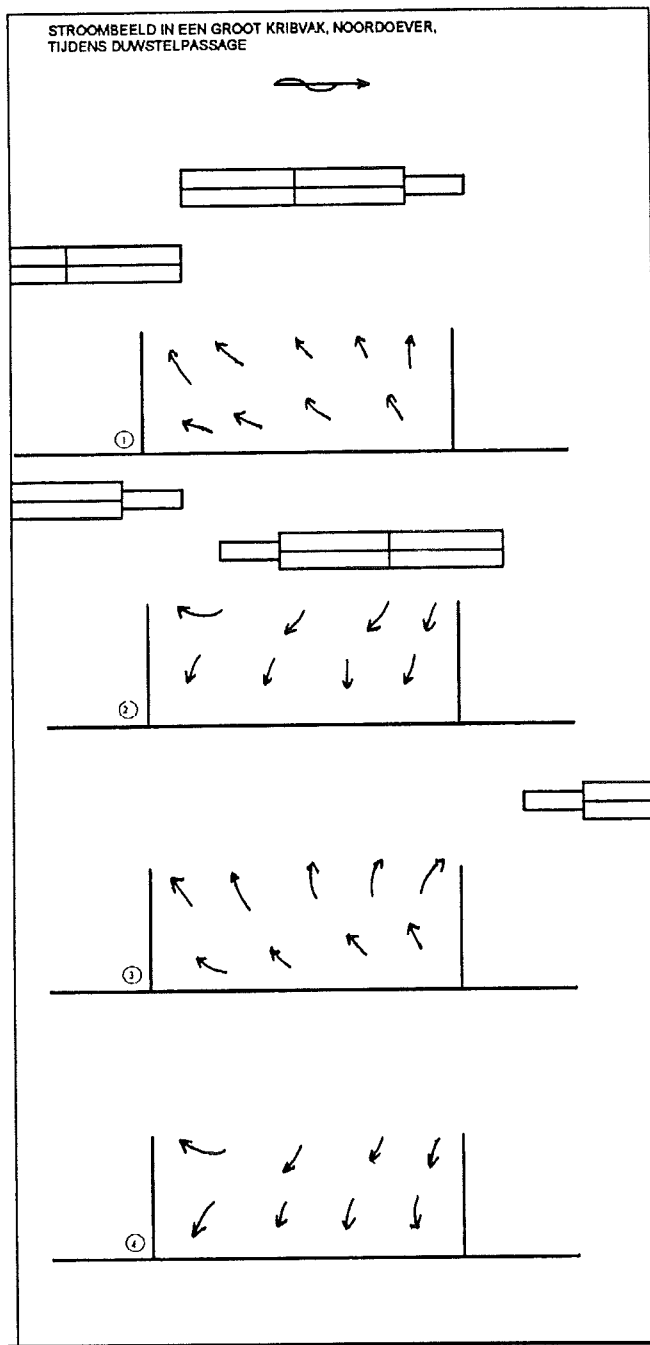
Voor de passage van duwstellen zijn de scheepsgeïnduceerde veranderingen in het stromingspatroon, samen met de positie van het vierbaks duwstel, aangegeven in de figuren 4.4.4 t/m 4.4.6. Deze figuren zijn gebaseerd op bijlage 4.4. Fase 1 is de eerste keer dat het kribvak wordt leeggezogen, tijdens fase 3 wordt het kribvak voor de tweede keer leeggezogen. Tijdens fase 2 en 4 stroomt het kribvak weer vol.



Figuur 4.4.6: Invloed van een opvarend of een afvarend duwstiel op het stromingspatroon op een groot kribvak, zuidoever. (fase 1: leegstroming, fase 2: volstroming, fase 3: leegstroming, fase 4: volstroming).



Figuur 4.4.7: Invloed van een opvarend of een afvarend duwstiel op het stromingspatroon op een klein kribvak, zuidoever. (fase 1: leegstroming, fase 2: volstroming, fase 3: leegstroming, fase 4: volstroming).

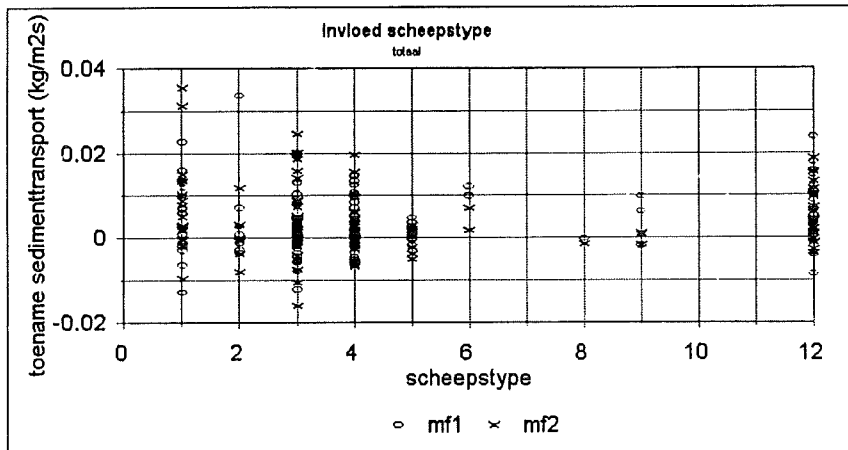


Figuur 4.4.8: Invloed van een opvarend of een afvarend duwstel op het stromingspatroon op een groot kribvak, noordoever. (fase 1: leegstroming, fase 2: volstroming, fase 3: leegstroming, fase 4: volstroming).

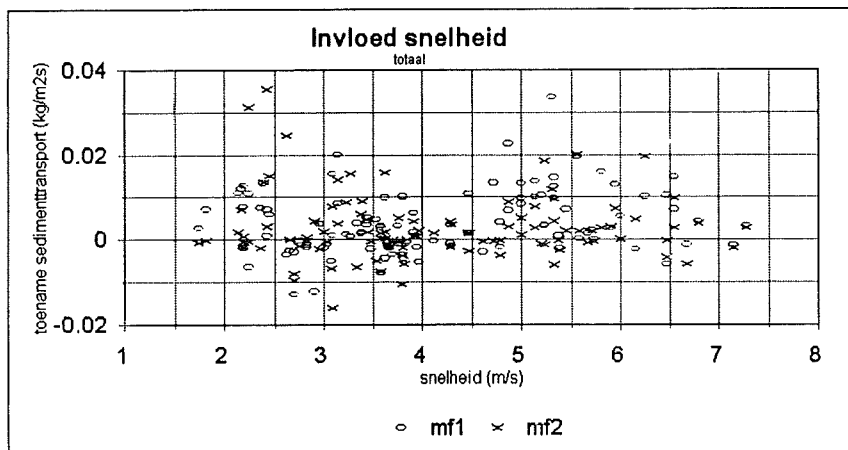
Gebleken is dat de verschillen tussen op- en afvaart zeer gering zijn, en nauwelijks terug te vinden in het meetsignaal. Daarom zijn in de figuren de vier fasen aangegeven met zowel de positie van een afvarend duwstel als met een opvarend duwstel. De posities van de duwstelen zijn gebaseerd op veldwaarnemingen. Per duwstelpassage kan de positie van het duwstel horende bij fase 1 t/m 4 nogal verschillen. Daarom kan de positie van het duwstel alleen maar opgevat worden als een indicatie, (zie hiervoor ook de foutenbespreking in paragraaf 4.4.4).

4.4.3.3 Scheepskenmerken

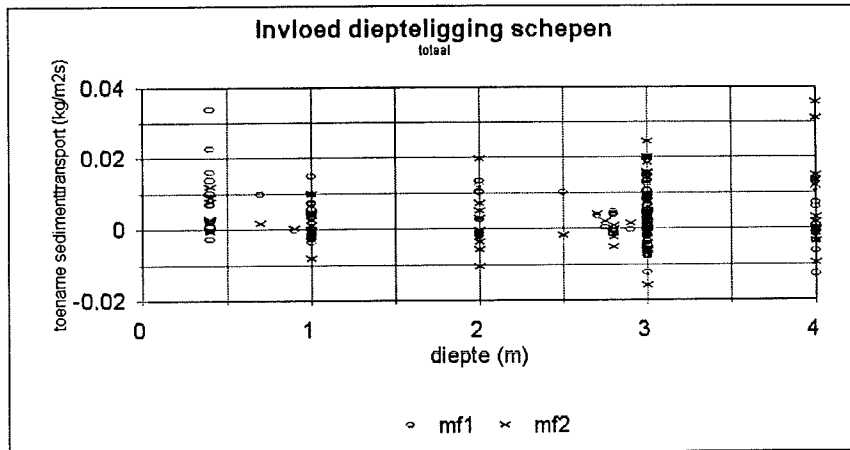
De invloed van de afzonderlijke scheepskenmerken is onderzocht door het verschil tussen scheepsgedomineerde stromingscondities en de T0 situatie voor zowel a) het transport als b) de stromingshoek, per kribvak, uit te zetten tegen de scheepskenmerken. De resultaten hiervan zijn opgenomen in bijlage 4.6.1 t/m 4.6.5. De toenames in het sedimenttransport zijn, samengevat over de hele meetcampagne, opgenomen in de figuren 4.4.9 t/m 4.4.12.



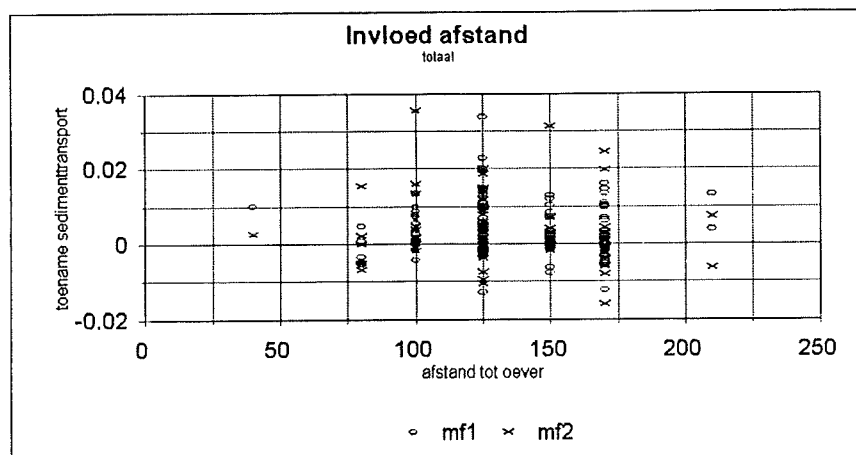
Figuur 4.4.9: Invloed scheepstype op de toename van het sedimenttransport.



Figuur 4.4.10: Invloed snelheid op de toename van het sedimenttransport.

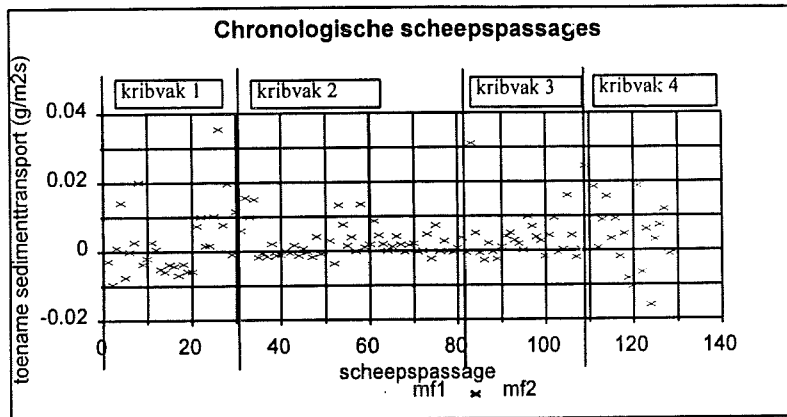


Figuur 4.4.11: Invloed diepgang schepen op de toename van het sedimenttransport.

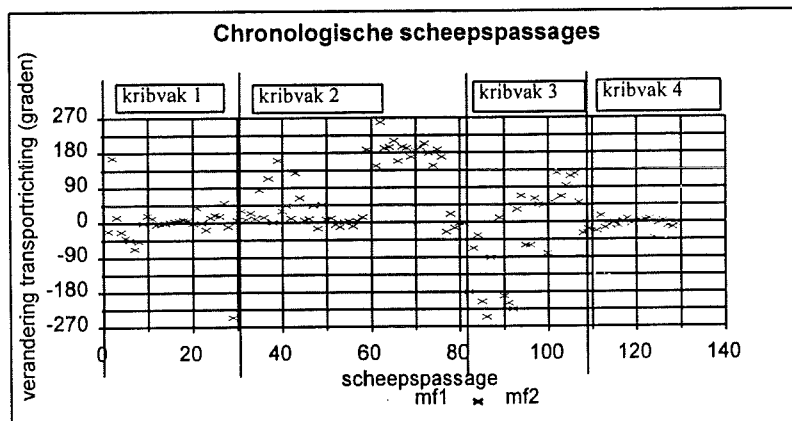


Figuur 4.4.12: Invloed vaar afstand uit de oever op de toename van het sedimenttransport.

Uit deze grafieken valt op dat scheepspassages overwegend tot een toename van het transport leiden (Ongeveer $0.01 \text{ g/m}^2\text{s}$). Er is echter geen verband tussen zowel het transport als de transportrichting en de afstand, de diepte, de snelheid en opvaart/ afvaart. Wel worden de hoogste toenames in transport gemeten tijdens de passage van duwstollen of Rijnschepen (scheepstypen 1, 2 en 3). Wat verder uit de grafieken blijkt, is het verschil tussen de verschillende kribvakken. Deze verschillen worden duidelijk samengevat in de figuren 4.4.13 en 4.4.14. Hier is de toename van het sedimenttransport en de verandering van de richting van het sedimenttransport uitgezet tegen alle bruikbare scheepspassages. Aangezien de scheepspassages de hele meetcampagne beslaan wordt een chronologisch overzicht verkregen.



Figuur 4.4.13: Scheepsgeïnduceerde toename sedimenttransport tijdens de meetcampagne.



Figuur 4.4.14: Scheepsgeïnduceerde verandering van richting sedimenttransport tijdens de meetcampagne.

Uit de 2 figuren blijken de volgende verschillen tussen de kribvakken.

De spreiding van het sedimenttransport is lager bij kribvak 2, het kleine kribvak. De meeste scheepspassages hebben daar nauwelijks een toename in het sedimenttransport tot gevolg.

Wat opvalt uit de verandering van de hoek van de transportrichting is de grotere verandering op de positie van het rivierframe, mf2. Dit is vooral het geval bij kribvak 2 en 3. De richting van het transport is vrij constant in kribvak 4.

4.4.4 Fouten bespreking

Tijdens veld metingen zijn meetfouten niet te voorkomen. Daarnaast worden fouten geïntroduceerd bij het doen van aannames bij de interpretatie en analyse van de meetresultaten. In deze paragraaf worden mogelijke fouten gepresenteerd en de gevolgen daarvan voor de interpretatie van de resultaten.

1) Representativiteit meetlokaties; invloed aanwezigheid meetschip de "Conrad".

- De meetframes worden van stroom voorzien door het meetschip de "Conrad". De frames zijn via 80 m lange kabels verbonden aan het schip. Dit impliceert dat het meetschip tijdens de metingen in het kribvak moet blijven liggen. De positie van het schip was doorgaans op de scheidinglijn van het kribvak met de hoofdstroom. De invloed van het schip op de stroming in het kribvak is hierdoor minimaal gebleven.
- De positie gedekt door de miniframes is zeer beperkt om definitief uitsluitel te geven over het ruimtelijk patroon. Het is mogelijk dat informatie verloren is gegaan doordat de meetframes niet op een bepaalde positie hebben gestaan.

2) Meet fouten

• Meetframes

De positie van de meetframes is bepaald door achterwaartse insnijding. Hierbij is het meetframe vanaf de oever op drie plaatsen ingeschoten. Wanneer deze drie lijnen worden uitgetekend, is het meetframe gesitueerd op het kruispunt (in de vorm van een driehoek) van de drie lijnen. De grootte van deze driehoek varieerde tussen enkele decimeters en 5 m. De oriëntatie van de frames wordt eveneens vanaf de oever ingeschoten. Bij een schietafstand van ongeveer 50 m komt een positie fout van 2.5 m (het midden van de grootste kruisings driehoek) neer op een oriëntatiefout 2.9°. Daarom wordt de maximale fout in de oriëntatie van de miniframes op 3° geschat.

Het waterpassen van de kribvakken is ook aan onnauwkeurigheden onderhevig. Vertikale aflees fouten bedragen ongeveer 0.1 m, de fout in de horizontale plaatsbepaling zal enkele decimeters bedragen.

• Scheepvaart registratie

Van de schepen zijn de scheepskenmerken genoteerd. Vaak stonden deze gegevens op het schip vermeld, waardoor deze gegevens exact bekend zijn. Wanneer dit niet het geval is werden deze maten geschat. De fout in de schatting van de lengte bedraagt maximaal 5 meter, de fout in schatting van de breedte is maximaal 1 meter, de fout in de schatting van de diepgang is ongeveer een halve meter. De genoteerde tijden zijn tot op 2 sec nauwkeurig. De scheepskenmerken zijn bepaald vanaf het meetschip. Voor de positie van de schepen ten opzichte van het kribvak is dus de positie van het meetschip van belang. Deze positie is elke dag geschetst. Door de onnauwkeurigheid van deze methode kan de onnauwkeurigheid van de positie van de passerende schepen kan oplopen tot 40 m.

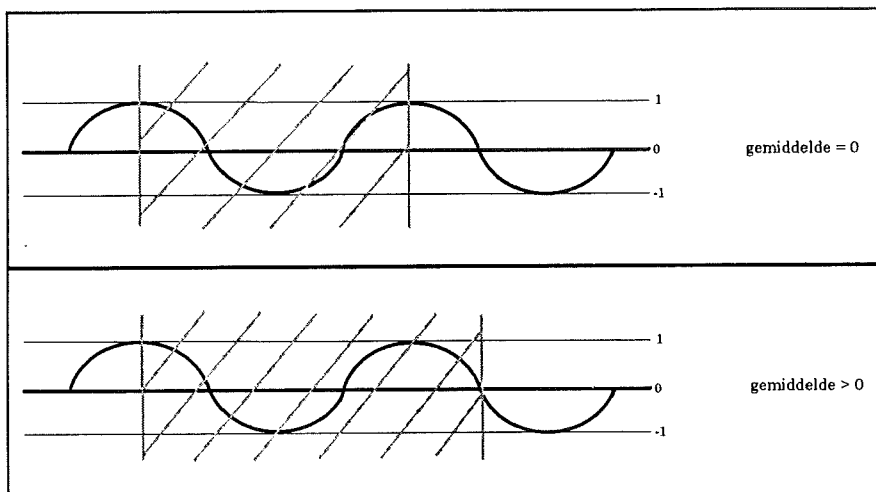
3) Miniframe data

Op basis van de oriëntatie van de frames wordt de stroomsnelheid onderverdeeld in een x- en een y-component. De fout van 3° is hiervoor verwaarloosbaar.

De calibratie van de stroomsnelheid en de druk sensor is zeer nauwkeurig; de hierdoor ontstane fouten zijn verwaarloosbaar. Dit geldt niet voor de ijking van de OBS. Deze ijking wordt uitgebreid behandeld in bijlage 2.1. De ijking heeft een basis onnauwkeurigheid van 50 mg tot gevolg, plus een onnauwkeurigheid tot $\pm 15\%$ in de concentratie.

4) Analyse fouten

Om de invloed van schepen op de kribvak stroming vast te stellen is het noodzakelijk dat de meetbursten worden onderverdeeld in een deel met en een deel zonder scheepsinvloeden. Hiervoor moet de gemeten datareeks in stukken verdeeld worden. Het gevolg van een scheepspassage is echter een slinger beweging van de waterstroom in het kribvak, vergelijkbaar met een golfbeweging. Om het juiste gemiddelde van deze golfbeweging te bepalen moet het beginpunt en het eindpunt van de waterbeweging met scheepsinvloeden exact hetzelfde zijn. Wanneer dit niet het geval is zal het gemiddelde onder- of overschat worden. Zie hiervoor figuur 4.4.15.



Figuur 4.4.15: Mogelijke fout in schatting gemiddelde.

4.5 Discussie

4.5.1 Stromingspatroon en transportpaden

De opgedane kennis van zowel de stromingsvectoren, verandering van de transportpaden, als de morfologische kaartjes hebben geleid tot het stromingsbeeld in kribvakken zoals de figuren 4.4.3 t/m 4.4.5. De belangrijkste ruggesteun hierbij zijn de stromingspatronen van bijlagen 4.3.1 t/m 4.3.4. De interpolatie tussen de meetpunten in is vooral gedaan met behulp van aannamen betreffende de circulatiepatronen, en met behulp van de spreiding van transportpaden ten gevolge van scheepspassages.

De grootste onzekerheid bij de stromingsbeelden is het wel of niet aanwezig zijn van een tweede circulatie in de kribvakken op de noordoever. Op basis van de rivierwaartse component van de metingen van 1 en 3 juli tijdens scheepsgedomineerde condities, en de grote spreiding hiervan, wordt geconcludeerd dat er een tweede neer aanwezig is. Dit komt ook overeen met de verwachtingen. De T0 situatie geeft erg weinig aanleiding voor de aanwezigheid van meer dan één neer, maar het is mogelijk dat de vectoren uit de T0 situatie fout berekend zijn (zoals uitgelegd in figuur 4.4.15).

Wanneer deze stromingsbeelden vergeleken worden met het theoretische stroombeeld van figuur 4.2.1 zijn er een aantal verschillen op te merken:

De stroming is in vrijwel het gehele kribvak tegengesteld aan de stromingsrichting van de hoofdstroom. Dit terwijl het schaalmodel voorspelt dat de stromingsrichting in de rivierwaartse helft van het kribvak hetzelfde is als de stromingsrichting van de rivier. Het centrum van de circulatie ligt dus dicht bij de rivier dan uit de schaalmodellen bleek.

Daarnaast lijkt de scheidingslijn tussen het kribvak en de rivier minder sinusoïdaal te zijn dan werd aangenomen. De scheidingsstroomlijn loopt vlak langs de kribkoppen, en de rivier dringt minder diep het kribvak in, maximaal 20 m. In het kleine kribvak dringt de rivier nauwelijks het kribvak in, de scheidingsstroomlijn blijft ter hoogte van de kribkoppen.

De kribvakken aan de zuidoever en de noordoever voldoen aan de verwachtingen in de zin dat een groot kribvak twee neren heeft, en het kleine kribvak 1 neer. Tevens is de sedimentconcentratie in het kleine kribvak lager, wat lagere transporten tot gevolg heeft.

De transportpaden zijn vergelijkbaar met de stromingsrichtingen omdat de concentratie stationair is; de sedimentconcentratie neemt niet toe als de stroomsnelheid toeneemt. Het transport is hier dus een lineaire functie van de snelheid.

4.5.2 Invloed scheepvaart

4.5.2.1 Stromingspatroon tijdens scheepspassages

Uit de bijlagen 4.4.1 t/m 4.4.4 blijkt dat een scheepspassage hoge stroomsnelheden dwars op de richting van de hoofdstroom van de rivier tot gevolg heeft. Deze stroomsnelheden kunnen oplopen tot 70 cm/s.

Dit komt niet overeen met de stromingsrichtingen zoals door de schaalmodellen voorspelt; door het schaalmodel worden aanzienlijke stroomsnelheden parallel aan de richting van de hoofdstroom van de Waal voorspeld. Dit wordt dus door de metingen weerlegt. De stromingen zijn in eerste instantie het kribvak in en uit, dwars op de rivierichting.

Er is op basis van het stromingspatroon geen enkel onderscheid te maken te maken tussen op- en afvaart. Dat dit wel in de verwachtingen lag was het gevolg van het feit dat de verschillen tussen op- en afvaart alleen gevolgen hebben voor longitudinale stroomsnelheden. Maar aangezien de longitudinale stroomsnelheden (parallel aan de richting van de hoofdstroom van de rivier) minder van belang zijn dan de transversale stroomsnelheden (dwars op de richting van de hoofdstroom van de rivier) zijn er geen verschillen in de metingen terug te vinden. Wel duurt een passage van opvaart langer vanwege de lagere snelheid. Aangezien de scheepsinvloed wordt uitgedrukt in m/s, is de totale invloed van de passage van een opvarend schip dus hoger dan die van een vergelijkbaar afvarend schip.

4.5.2.2 Invloed scheepskenmerken

De invloed van schepen op het netto transport is zeer variabel. Er lijkt geen patroon te zitten in de invloed in het kribvak en de scheepskenmerken. Uit de grafieken van bijlage 4.6.1 t/m 4.6.5 blijkt dat de relatie tussen het scheepsgeïnduceerde sedimenttransport en de afzonderlijke scheepskenmerken (lengte & breedte, diepgang, vaarsnelheid, vaarafstand uit de oeverlijn en vaarrichting) vooralsnog onduidelijk is. De belangrijkste factor lijkt interferentie van golven van verschillende oorsprong te zijn. Een scheepspassage kan deze golfbeweging versterken of uitdempen. Een voorbeeld hiervan is 24 juni, 13 uur (figuur 4.4.2). Om 13.02 passeert een volle opvaart van 90 m het kribvak. Deze passage is duidelijk terug te vinden in het meetsignaal. Om 13.10 passeren 2 vergelijkbare schepen het kribvak. Deze dempen het golfsignaal juist uit. Deze scheepspassages hebben dus een effect tegenovergesteld aan dat wat verwacht zou worden. De hypothese van een invloedrijk golfklimaat wordt gesteund door het feit dat in elke burst 20 tot 25 lange golven zijn terug te vinden. Dit komt neer op een golfperiode van 85 tot 105 s. Deze golven worden in eerste instantie door de primaire golf van schepen opgewekt, maar kunnen kennelijk lang in stand blijven, vermoedelijk door interferentie met harde oeververdedigingen zoals kribben. Deze golven hebben een maximale amplitude van ± 0.05 m, maar leveren wel stroomsnelheidsverschillen van 0.1 tot 0.15 m/s op. Uitdemping of versterking van deze golfbeweging kan dus maximale stroomsnelheidsverschillen opleveren van 0.2 to 0.3 m/s. Deze stroomsnelheidsverschillen worden nog groter wanneer twee primaire golven met elkaar interfereren.

Wel is gebleken dat alleen grote schepen zoals vierbaks duwvaart en volle Rijnschepen het potentieel hebben om een grote invloed op het kribvak uit te oefenen. Voorwaarde is dan wel dat er geen uitdemping als gevolg van interferentie optreedt.

4.5.2.3 Transport ten gevolge van schepen

De invloed op het netto transport als gevolg van schepen is laag vergeleken met de opgewekte stroomsnelheden. De stroomsnelheden kunnen toenemen van 0.2 tot 0.6 m/s zonder dat het resulterend transport toeneemt. Dit is te verklaren uit de oscillerende beweging van de stroming; transport in rivierwaartse richting wordt een even later gecompenseerd door eenzelfde transport in oeverwaartse richting. Alleen wanneer de opwoeling van sediment hoog is tijdens enerzijds de rivierwaartse of anderzijds de oeverwaartse stroming, door bijvoorbeeld brekende golven, kan een rivierwaarts of oeverwaarts transport optreden.

De residuele stromingen, welke qua richting en grootte redelijk overeen komen met de T0 situatie, voeren het opgewoelde sediment af. Deze residuele transporten zijn in de orde van een half tot twee maal het transport tijdens de T0 situatie.

Schepen versterken de sedimentconcentratie wanneer de schepen binnen een minuut na elkaar invloed hebben in het kribvak. Als dit gebeurt kan er gedurende 10 minuten of langer een sterke verhoging van de sedimentconcentratie voorkomen. Hierbij geldt echter weer dat dit geen grote invloed heeft op het netto transport vanwege de oscillerende beweging van de stroming. De residuele transporten zijn meestal niet meer dan twee maal het transport van de T0 situatie.

Een factor die niet in de berekening van de residuele transporten is meegenomen is de korrelgrootte van het sediment. De OBS, waarmee de sedimentconcentratie is gemeten, registreert zowel slib als zand. Het is mogelijk dat tijdens de T0 situatie of kleine schepen vooral slib wordt opgewoeld, of zand in de fractie 50-100 μm , terwijl grover zand voornamelijk tijdens passages van duwstellen (waarbij de hoogste stroomsnelheden voorkomen) wordt getransporteerd. Grover zand is van groter belang voor de stabiliteit van de kribvakbodem.

4.5.2.4 Erosie en sedimentatie in de kribvakken

Opwoeling speelt een belangrijke rol in de gemeten verschillen tussen het oeverframe en het rivierframe. Tijdens scheepspassages met de hoogste stroomsnelheden (bijlagen 4.4.1 - 4.4.4) zijn de transporten bij het oeverframe hoger dan bij het rivierframe, terwijl de stroomsnelheden van het oeverframe en het rivierframe onderling weinig verschillen. Een groter transport bij het oeverframe, zoals veroorzaakt door scheepspassages met de hoogste stroomsnelheden, worden veroorzaakt door een toename in de opwoeling.

Wanneer echter alle scheepspassages in beschouwing worden genomen (bijlage 4.5), zijn de verschillen in het gemeten transport tussen het oeverframe en het rivierframe verwaarloosbaar (figuur 4.4.13). Een hogere opwoeling bij het oeverframe dan bij het rivierframe is vooral voorbehouden aan schepen welke hoge stroomsnelheden veroorzaken zoals vierbaks duwstellen.

Voor de grotere opwoeling bij het oeverframe zijn een aantal mogelijkheden.

Ten eerste het feit dat de waterspiegel in de kribvakken aanzienlijk meer daalt tijdens de scheepspassages met hoge stroomsnelheden, dan tijdens de overige scheepspassages. Hierdoor komt een groter deel van het kribvakstrand tijdelijk droog te liggen. Wanneer dit strand weer vol stroomt raakt veel sediment in suspensie. Dit proces lijkt alleen voorbehouden aan scheepspassages met een grote potentiële invloed op de stroomsnelheden, zoals vierbaks

duwvaart en lange zelfaangedreven schepen. Dit beeld komt overeen met hetgeen tijdens de metingen in het veld is waargenomen. Tijdens een aantal passages van een vierbaks duwvaart leek het kribvak leeg te stromen en raakte veel sediment aan de oever in suspensie. Ten tweede is de golfopwoeling tijdens de passage van een groot schip of duwstel meestal ook hoger. Hierdoor wordt meer sediment in suspensie gebracht.

Het gevolg van de hoge opwoeling aan de oever is erosie in het kribvak. Het circulatie patroon brengt weinig sediment naar de oever, waar vervolgens veel sediment wordt opgenomen. Dit wordt vervolgens door de circulerende beweging rivierwaarts getransporteerd. Theoretisch gezien kan tijdens de verhoogde stroomsnelheden gedurende scheepspassages grover sediment worden getransporteerd. Hier zijn echter geen metingen naar gedaan. Het is echter mogelijk dat het getransporteerde zand tijdens een scheepspassage een fractie grover is dan het getransporteerde zand zonder tijdens rustiger condities. Dit zou van belang kunnen zijn voor de stabiliteit van de kribvakbodem. Wanneer tijdens de stroming zonder scheepvaart invloeden alleen zand uit de allerfijnste fractie wordt getransporteerd, heeft dit nauwelijks invloed op de stabiliteit van de kribvakbodem.

De door schepen veroorzaakte opwoeling impliceert dat erosie het resultaat moet zijn. Het water wat vanuit de rivier het kribvak binnen stroomt is relatief arm aan suspensief materiaal. In het kribvak wordt de waterstroom verrijkt met suspensief sediment, wat vervolgens weer uit het kribvak getransporteerd wordt. Tevens kan tijdens een scheepspassage grover sediment getransporteerd worden door de hogere stroomsnelheden. Dit grover sediment kan tijdens de T0 situatie niet aangevuld worden omdat daar de stroomsnelheden te laag voor zijn. Erosie treedt dus op tijdens passages van duwstellen. Aangezien de opwoeling het hoogst is bij de oever zal daar de erosie sterker zijn dan aan de rivierzijde van het kribvak. Over sedimentatie tijdens de T0 situatie is niets te zeggen. Als er erosie optreedt tijdens scheepspassages moet er sedimentatie voorkomen tijdens andere condities. Er zijn alleen geen uitspraken te doen of dit gebeurt in de T0 situatie of bijv. tijdens een hoge afvoer.

Vanwege de lage hoogteverschillen in de verschilkaarten is er nauwelijks een koppeling te maken tussen de morfodynamiek en de hydrodynamische condities. Er lijkt erosie opgetreden te zijn in het kribvak onder de 5 m +NAP lijn, en sedimentatie boven die lijn. Dit kan het gevolg zijn van hogere transporten aan de oever. Wanneer dit gekoppeld wordt aan de resultaten van de sedimenttransporten aangedreven door invloedrijke scheepspassages kan gesteld worden dat een aantal schepen een erosieve invloed uitoefenen op de oever. Hiertoe behoren de duwvaart en de grote Rijnschepen, mits de primaire golf van deze passages niet uitgedempt wordt.

4.5.2.5 Kribvakgeometrie

Er bestaat een duidelijk verschil tussen de stromingen en de transporten in een groot kribvak en een klein kribvak. Ten eerste dringt de hoofdstroom van de rivier nauwelijks een klein kribvak binnen. Daarnaast heeft dit aan de zuidoever het gevolg dat het kleine kribvak door slechts 1 neer gedomineerd wordt, tegen 2 in een groot kribvak.

Het transport in het kleine kribvak is lager dan in de drie overige kribvakken, al zijn de stroomsnelheden vergelijkbaar. Ook de scheepsgeïnduceerde transporten zijn lager dan in de drie overige kribvakken. Maar ook voor dit kribvak geldt dat tijdens invloedrijke

scheepspassages de transporten aan de oever hoger zijn dan aan de rivierwaartse zijde van het kribvak. Hierdoor treedt ook in het kleine kribvak erosie op ten gevolge van scheepvaart.

Een belangrijk verschil tussen de noordoever en de zuidoever is het verschil in korrelgrootte. Deze verschillen zijn aanzienlijk hoewel de hydrodynamische condities niet zoveel van elkaar verschillen. Dit verschil is daarom niet met behulp van de metingen te verklaren. In de hypothesen werd gesteld dat de golfwerking aan de noordoever hoger zou zijn doordat er meer golven zouden breken. Dit zou kunnen bijdragen aan grover sediment, en dan vooral in de brandingszone waar materiaal uit de grindfractie voorkomt. Uit de metingen is echter niet gebleken dat er aan de noordoever meer materiaal in suspensie wordt gebracht.

In het kleine kribvak aan de zuidoever komt fijner sediment voor dan in het grote kribvak aan de zuidoever. Dit zou het gevolg kunnen zijn van de lagere transporten in het kleine kribvak.

4.6 Conclusie

Op basis van de resultaten kunnen nu de hypothesen beantwoord worden.

- A. Het stromingsbeeld in een klein kribvak wordt gedomineerd door 1 neer, in een groot kribvak door twee neren. Deze twee neren kunnen geplaatst worden binnen 1 circulatiecel, waarin de kleine neer een rivierwaartse stromingscomponent tot gevolg heeft. De hoofdstroom van de rivier dringt de grote kribvakken zo'n 20 m binnen, terwijl dit in het kleine kribvak niet het geval is. De stromingspatronen zijn geschematiseerd in de figuren 4.4.1 t/m 4.4.3.
- B. Het gevolg van een scheepspassage zijn hoge transversale stroomsnelheden. De longitudinale component, parallel aan de rivierrichting, is laag. Ondanks de hoge stroomsnelheden nemen de residuele transporten weinig toe. Dit is het gevolg van de oscillerende beweging van de primaire scheepsgolf; eerst stroomt het kribvak leeg, om vervolgens weer vol te stromen. Dit komt dus niet overeen met het stromingspatroon zoals voorspeld door de schaalmodellen, waarin ook aanzienlijke rivier parallelle stromingscomponenten voorspeld werden.
- C. De invloed van de afzonderlijke scheepskenmerken is in dit onderzoek niet in het opgewekte transport terug te vinden. Dit lijkt het gevolg te zijn van interferentie van scheepsgolven. Hierdoor kunnen scheepsgolven uitgedempt worden zodat de invloed van de scheepspassage nauwelijks meer in het signaal is terug te vinden. Aangezien versterking van een scheepsgolf het andere uiterste is, ontstaat er een breed scala aan mogelijke invloeden van een scheepspassage. Wel is gebleken dat de hoogste stroomsnelheden door vierbaks duwvaart of door Rijnschepen opgewekt worden. Vierbaks duwstellen en Rijnschepen zijn dan ook meestal wel in het meetsignaal te identificeren. Er zijn echter ook volle vierbaks duwstellen met weinig invloed op de stromingen in het kribvak. Er kan gesteld worden dat wanneer de stroomsnelheden in het kribvak hoog zijn, dit is toe te schrijven aan een duwstel passage. Andersom gaat deze redenatie niet op, wanneer een duwstel passeert betekent dit niet direct dat de opgewekte stroomsnelheden hoog zullen zijn. Over alle scheepspassages beschouwd is het scheepsgeïnduceerde transport hoger dan het transport veroorzaakt door de natuurlijke rivierafvoer. De richting van dit transport wijkt echter niet zoveel van de richting tijdens de T0 situatie af. Verschillen in het stromingspatroon veroorzaakt door een op- of afvarend schip zijn gering, en nauwelijks in de meetresultaten terug te vinden. Wel vaart een opvarend schip een faktor twee tot drie langzamer dan een afvarend schip. Hierdoor is de periode dat het schip invloed heeft op het stromingspatroon in het kribvak ook twee tot drie keer langer.
- D. Erosie van de oever kan optreden wanneer een vierbaks duwvaart of een Rijnschip passeert. De opgewekte primaire golven (zuiging) van deze schepen kunnen echter uitgedempt worden door interferentie met andere lange golven. Wanneer de primaire scheepsgolf niet wordt uitgedempt komt een deel van het kribvakstrand door de zuiging bloot te liggen. Wanneer het kribvak vervolgens weer volstroomt komt veel materiaal in suspensie. Ook door golven wordt materiaal in suspensie gebracht. Aangezien het water dat het kribvak verlaat tijdens de passage van een duwstel veel suspensief materiaal meevoert is erosie van de kribvakbodem het resultaat. Het netto sediment transport opgewekt door

een vierbaks duwstel is ongeveer een faktor twee maal het transport tijdens de T0 situatie. Daarnaast neemt, tijdens de passage van een aantal vierbaks duwstellen, de opwoeling van sediment toe richting de oever van het kribvak. Erosie van de kribvakbodem neemt dus toe in de richting van de oever. Het is niet te zeggen of er sedimentatie optreedt tijdens de afwezigheid van scheepspassages. De fluctuaties in de berekende sedimenttransporten zijn te groot om een lichte toename in een oeverwaarts transport op te merken. Erosie tijdens scheepspassages impliceert dat sedimentatie plaats moet vinden tijdens andere condities, aangezien de kribvakbodems op de termijn van jaren redelijk constant zijn. Het is op basis van de metingen echter niet te zeggen of sedimentatie plaatsvindt bij het uitblijven van scheepvaart, of tijdens bijvoorbeeld een hoge afvoer.

- E. De kribvak geometrie heeft invloed op de transporten in het kribvak. In het kleine kribvak zijn de transporten lager zonder scheepvaart, en ook tijdens een scheepspassage zijn de opgewekte transporten lager. Dit kan het gevolg zijn van het feit dat de rivierstroming nauwelijks het kribvak binnendringt. Het sediment in het kleine kribvak op de zuidoever is fijner dan het sediment in een groot kribvak op de zuidoever.
- F. Uit de meetresultaten zijn geen verschillen gebleken tussen de transporten in een groot kribvak aan de zuidoever en aan de noordoever. De mogelijke invloed van meer brekende golven aan de noordoever is niet in de metingen terug gevonden. De invloed van schepen lijkt dus even groot aan de noordoever als zuidoever te zijn. Wel zijn de korrelgroottes aan de noordoever aanzienlijk hoger dan aan de zuidoever. Hier is in de meetresultaten geen verklaring voor gevonden.

4.7 Literatuurlijst

- Alberda, J.E., 1981. Inleiding landmeetkunde. Delftse uitgeversmaatschappij, 517 pp.
- Bosman, J.J, Velden, T.J.M. van der, and Hulsbergen, C.H., 1987. Sediment Concentration Measurement by Transverse Suction. *Coastal Eng.*, 11: 353-370.
- Brinke, W.B.M. ten, 1996. Onderzoeksvoorstel sedimenthuishouding kribvakken. Werkdocument RIZA 96.099X, 26 pp.
- Driel, G van, Meijer, D.G. en Verheij, H.J., 1993. Scheepsgeïnduceerde waterbeweging in kribvakken. Waterloopkundig laboratorium, Q1046, Delft.
- Haas, A.W. de en J.A.F. van Essen, 1987a. Onderzoek naar de invloed van duwvaart op de water- en zandbeweging in "Kribvak Druten". Nota 87.007, Rijkswaterstaat, dienst binnenwateren/RIZA.
- Huyskens, R.B.H. en Verheij, H.J., 1993. Verwijderen harde oeververdediging IJssel. Waterloopkundig laboratorium, bureaustudie Q1721.
- Kruyt, N.M., 1996. Analyse Kribvakmetingen Druten/ Ochten op hoofdlijnen. IMAU R96-19
- Hochstein, A.B. and Adams, C.E., 1989. Influence of Vessel Movements on Stability of Restricted Channels. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol 115, pp 444 - 465.
- Kornman, B.A., 1993. Onderzoek naar de erosie en sedimentatie in kribvakken langs de Waal. Werkdocument 93.149X, Rijkswaterstaat, RIZA.
- Pilarczyk, K.W., Przedwojski, B., and Blazejewski, R., 1994. River training techniques fundamentals, techniques and applications, part II: Fundamentals of river engineering and flood protection. Delft/Poznan.
- Rijn, L.C. van, 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications.
- Termes, A.P.P., Wal, M. van der en Verheij, H.J. 1991. Waterbeweging door scheepvaart op de rivieren en in kribvakken. Waterloopkundig laboratorium, bureaustudie Q1046, Delft.
- WL, 1987. Kribvakerosie door zes- en vierbaksduwvaart op de Waal. Verslag modelonderzoek. Rapport Q93/Q576, waterloopkundig laboratorium.

5 Eolisch zandtransport

(Doctoraalonderzoek Jan-Willem Mol)

5.1 Inleiding

Er treedt eolisch transport op in het drooggevallede deel van een kribvak. Het onderzoek was gericht op de kwantificering hiervan en van het zandverlies dat naar de uiterwaard optreedt, als onderdeel van de totale zandbalans van de kribvakken.

In volgend hoofdstuk worden in §5.2 theoretische achtergronden van eolisch zandtransport behandeld, waarna in §5.3 wordt beschreven welke methodiek is toegepast bij de uitvoering van het onderzoek. In §5.4 worden de resultaten gepresenteerd, waarna in §5.5 de resultaten bediscussieerd worden en in §5.6 de conclusies volgen.

5.2 Theorie eolisch zandtransport

5.2.1 Inleiding

In het nu volgende paragrafen wordt theorie van eolische transportmechanismen behandeld. Hierbij worden formuleringen afgeleid voor de berekening van eolisch zandtransport. In §5.2.2 wordt de wijze van eolisch zandtransport behandeld. In §5.2.3 worden vervolgens de begrippen logaritmische verticale windsnelheidsverdeling en bodemruwheid behandeld, en wordt een formule voor het berekenen van de schuifspanningssnelheid afgeleid. In §5.2.4 worden formules voor het berekenen van de kritische schuifspanningssnelheid behandeld, waarna in §5.2.5 een formule voor het berekenen van de schuifspanningssnelheid tijdens zandbeweging wordt afgeleid. In §5.2.6 wordt een formule voor de berekening van salterend zandtransport afgeleid. §5.2.7 behandelt het bodemtransport, waarna in §5.2.8 vier formules voor de berekening van het totale eolisch zandtransport worden besproken. In §5.2.9 worden formules afgeleid voor de hoeveelheid zandtransport door een meetraai, waarna in §5.2.10 de correctie voor invangbreedte en efficiëntie van de zandvangers wordt besproken.

5.2.2 Wijze van eolisch zandtransport

Wanneer over een uit zandkorrels bestaand bodemoppervlak een wind blaast, en deze wind een kritische waarde overschrijdt dan kunnen de bodemdeeltjes gaan bewegen. Wat betreft de wijze van bewegen zijn er drie mogelijkheden (Bagnold, 1941):

- a) het bodemdeeltje wordt over de bodem gerold en blijft hierbij in contact met de bodem. Deze vorm van bewegen wordt kruipend transport of 'surface creep' genoemd.
- b) het bodemdeeltje wordt van de bodem opgelicht, beschrijft een korte baan in de lucht waarna het weer terugkeert naar de bodem. Deze vorm van beweging wordt springend transport of saltatie genoemd.
- c) het deeltje wordt van de bodem opgelicht, beschrijft een zeer lange baan alvorens weer op de bodem terug te komen. Deze vorm van bewegen wordt suspensie transport genoemd.

Gebleden is dat alleen zeer fijnkorrelige sedimenten en stofdeeltjes in suspensie getransporteerd worden. Voor beschouwingen over het zandtransport op een strand kan deze vorm van sedimenttransport verwaarloosd worden (Adriani en Terwindt, 1974). Het zand wordt dus salterend of over de bodem getransporteerd. Wanneer de drempelsnelheid wordt bereikt

waarbij zandkorrels door de wind of korrelinslag kunnen worden opgetild, verliezen zandkorrels het contact met de bodem. Het salterend materiaal maakt vervolgens sprongen van een aantal decimeters ver en enkele decimeters hoog, afhankelijk van de windsnelheid. Of een zanddeeltje bij een bepaalde windsnelheid gaat bewegen hangt voornamelijk af van de grootte, de vorm en de dichtheid van de korrel. Kenmerkend voor het rollende materiaal is het blijvende contact met de bodem. Het rollende materiaal treft men aan bij het begin van zandtransport, als de windsnelheid nog niet hoog genoeg is om de zandkorrels van het strand op te tillen. Maar ook wanneer er materiaal salterend getransporteerd wordt, vindt er rollend transport plaats. In het laatste geval zijn het vooral korrels van grovere fracties die rollen, omdat zij nog niet door de wind of korrelinslag kunnen worden opgetild.

5.2.3 Luchtstromen, schuifspanning en bodemruwheid

Luchtdeeltjes die over het bodemoppervlak bewegen kunnen in botsing komen met zandkorrels. Bij deze botsingen vindt een impulsoverdracht plaats van de luchtdeeltjes op de zandkorrels. Impuls is de hoeveelheid van beweging $I = m \cdot v$

met: $I =$ impuls (N/s)

$m =$ massa (kg)

$v =$ snelheid (m/s)

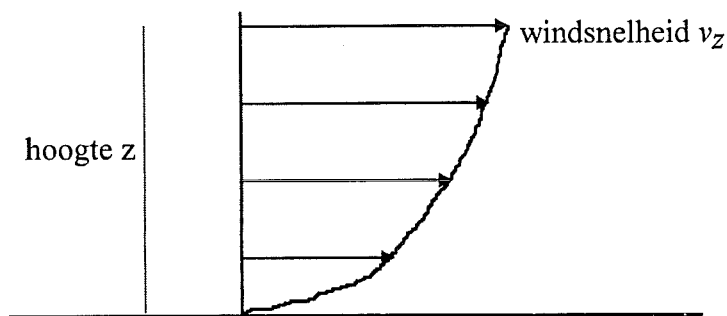
De relatie tussen impuls en kracht wordt gegeven door: $F = \frac{dI}{dt}$

met: $F =$ schuifkracht (N)

$dI =$ verandering van de hoeveelheid impuls (N/s)

$dt =$ verandering in de tijd (s)

De impulsverandering per tijdseenheid is dus een kracht. Deze kracht wordt de schuifkracht genoemd. De schuifkracht per eenheid van oppervlakte is de schuifspanning. Wanneer een luchtdeeltje in aanraking komt met een zandkorrel, verliest het impuls en ondervindt het wrijving van de bodem. Het verlies van impuls leidt tot een vertraging van het luchtdeeltje. Dit vertraagde luchtdeeltje kan echter weer in aanraking komen met niet-vertraagde luchtdeeltjes uit hogere luchtlagen. De vertraagde luchtdeeltjes worden hierdoor weer versneld, maar de snelle luchtdeeltjes worden op hun beurt weer vertraagd. Hoe verder van de bodem hoe minder dit effect als gevolg van de afname van de wrijving. De gemiddelde snelheid van de luchtdeeltjes is nabij de bodem het kleinste en neemt toe op grotere hoogte boven de bodem. Er ontstaat een snelheidsgradient in verticale richting (zie figuur 5.2.1).



Figuur 5.2.1 Verticale windsnelheidsverdeling

Bij zeer lage windsnelheden vindt de uitwisseling van impuls in verticale richting plaats op moleculaire schaal en kunnen luchtlagen worden beschouwd als evenwijdige banen die als het ware over elkaar heen glijden. We spreken dan van laminaire stroming. De schuifspanning in een dergelijke stroming is evenredig met de snelheidsgradient dv/dz . Is de verticale uitwisseling van luchtdeeltjes op grotere dan moleculaire schaal dan wordt de gelaagdheid van de stroming doorbroken en wordt de stroming turbulent. Het aantal botsingen neemt belangrijk toe. De schuifspanning is niet meer evenredig met de snelheidsgradient. Op grond van theoretische beschouwingen gaf Prandtl de volgende formule voor schuifspanning:

$$\tau = \rho_l l^2 \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 \quad (1)$$

met: τ = schuifspanning (N/m²)

ρ_l = dichtheid van lucht (kg/m³)

l = mengweg, de gemiddelde waarde van de zijdelingse uitwijking van luchtdeeltjes in een turbulente stroom (m)

De overgang van laminaire naar turbulente stroming wordt gemarkeerd door een kengetal van Reynolds. Voor luchtstroming ligt deze overgang bij $Re \approx 200$.

In formule (1) valt te zien dat de turbulente schuifspanning evenredig is met het kwadraat van de snelheidsgradient, en dat de grootte van de mengweg een functie is van de afstand tot de bodem. Wanneer nu de hoogte boven de bodem (z) heel klein wordt beschouwd in verhouding tot de hoogte van de luchtlaag, die aan de beweging deelneemt (h), dus wanneer $z \ll h$, dan geldt bij benadering dat de menging evenredig is met de hoogte z : $l = \kappa z$, waarbij κ de constante van Von Kármán voorstelt met een waarde van 0.4. Nu wordt (1):

$$\frac{dv}{dz} = \frac{1}{0.4 \cdot z} \sqrt{\frac{\tau}{\rho_l}} = \frac{2.5}{z} \sqrt{\frac{\tau}{\rho_l}} \quad (2)$$

Integratie van (2) geeft:

$$v_z = 2.5 \sqrt{\frac{\tau}{\rho_l}} \ln z + c \quad (3)$$

c is de integratieconstante. Dicht bij de bodem is er een hoogte z_0 waarvoor geldt $v_z = 0$. Dit geeft:

$$c = -2.5 \sqrt{\frac{\tau}{\rho_l}} \ln z_0 \quad (4)$$

(4) ingevuld in (3) geeft:

$$v_z = 2.5 \sqrt{\frac{\tau}{\rho_l}} \ln \frac{z}{z_0} \quad (5)$$

Overgang naar ¹⁰log geeft:

$$v_z = 5.75 \sqrt{\frac{\tau}{\rho_l}} \log \frac{z}{z_0} \quad (6)$$

Verder geldt dat de schuifspanningssnelheid $v_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_l}}$ zodat (6) kan worden herschreven tot:

$$v_z = 5.75 \cdot v_* \log \frac{z}{z_0} \quad (7)$$

Formule (7) geeft aan dat er een logaritmische snelheidsverdeling in de verticale richting aanwezig is. De factor z_0 in deze formule wordt de bodemruwheidsfactor genoemd. Deze

hoogte hangt uitsluitend af van de bodemoneffenheden zoals korrels en ribbels, en is onafhankelijk van de grootte van de snelheidsgradient. Uit metingen kon Prandtl afleiden dat z_0 ongeveer gelijk is aan 1/30 van de diameter van het bodemmateriaal.

5.2.4 Kritische schuifspanningssnelheid

Wanneer een zandkorrel aan het bodemoppervlak wordt beschouwd, is het geëxponeerde oppervlak van de zandkorrel evenredig met $\frac{1}{4} \pi \cdot d^2$ (Chepil & Woodruff, 1963)

met: π = constante gelijk aan 3.14 (-)
 d = gemiddelde korreldiameter (m)

In horizontale richting werkt op de zandkorrel een door de luchtstromen uitgeoefende schuifkracht F , die evenredig is met de totale schuifspanning die per oppervlakte-eenheid over de gehele bodem wordt uitgeoefend. De schuifkracht F wordt gegeven door:

$$F = r' \cdot \frac{1}{4} \eta d^2 = r \pi d^2 = r \rho_l v_*^2 d^2 \quad (8)$$

met: r' en r = evenredigheidsfactoren (-)

In horizontale richting werkt ook een component van een steunkracht. Deze steunkracht is een drukkracht die werkt in de aanrakingspunten van de zandkorrel met de omgevende korrels. De resultante van alle werkende steunkrachten maakt een hoek φ met de verticaal. Dit is de hoek van interne wrijving. Deze hoek is een constante en bedraagt voor droog zand ongeveer 33°. De grootte van de resultante is afhankelijk van het gewicht van de korrel ($m \cdot g$) zodat geldt:

$$T = s' m \cdot g \tan \varphi \quad (9)$$

met: T = horizontale component van de resultante van de steunkrachten (N)
 s' = evenredigheidsfactor (-)
 g = versnelling van de zwaartekracht (m/s²)

Verder geldt (Chepil & Woodruff, 1963) dat $m = \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho_s - \rho_l)$, dan volgt uit (9):

$$T = s (\rho_s - \rho_l) g \cdot d^3 \quad (10)$$

met: s = evenredigheidsfactor (-)
 ρ_s = dichtheid sediment (kg/m³)

Nu is T tegengesteld aan F en geldt bij het begin van bewegen dat T gelijk is aan F . De kritische schuifspanningssnelheid v_{*c} waarbij de beweging van zandkorrels begint, kan uit (8) en (10) worden opgelost:

$$v_{*c}^2 = \frac{s \cdot g (\rho_s - \rho_l) d^3}{r \rho_l \cdot d^2}$$

ofwel:
$$v_{*c} = A \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_l)}{\rho_l} g d} \quad (11)$$

De evenredigheidsfactor A bevat de evenredigheidsfactoren s/r . Bagnold (1941) vond dat A ongeveer gelijk is aan 0.1 voor zand met een diameter groter dan 200 μm . Formule (11) geldt voor cohesieloos zand; voor vochthoudende bodems moet (11) worden gecorrigeerd. Hotta et

al. (1984) hebben hiervoor een methode ontwikkeld die geldig is voor zand met een mediane korreldiameter van $300\mu\text{m}$ en een vochtgehalte kleiner dan 8%. De methode gaat uit van toename van de kritische schuifspanningssnelheid als gevolg van een toenemend vochtgehalte volgens:

$$v_{*cr} = A\sqrt{s_l g d} + 0.075\omega \quad (12)$$

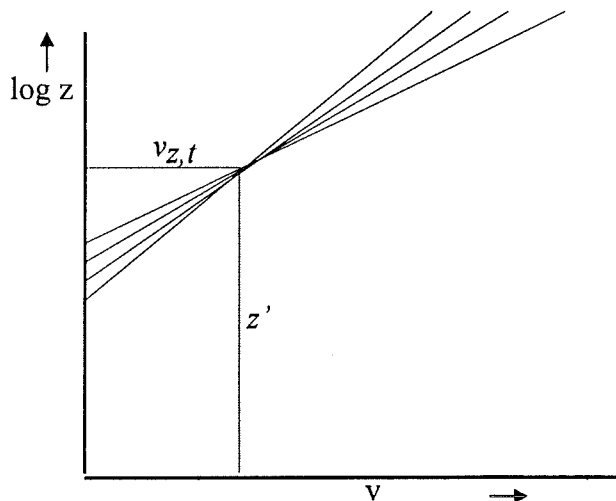
met: v_{*cr} = kritische schuifspanningssnelheid gecorrigeerd voor vochtgehalte (m/s)

ω = vochtgehalte (%)

s_l = relatieve dichtheid = $\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l}$ (-)

5.2.5 Schuifspanningssnelheid tijdens zandbeweging

Wanneer de schuifspanningssnelheid de kritische schuifspanningssnelheid overschrijdt, zullen zandkorrels gaan bewegen. De zandkorrels worden daardoor versneld en de wind vertraagd. Hoe meer zand er in beweging is, hoe groter de vertraging van de wind en hoe vlakker de windsnelheidsgradient. Dit wordt geïllustreerd in figuur 5.2.2.



Figuur 5.2.2 Verandering windsnelheidsverticalen onder invloed van zandtransport

In figuur 5.2.2 is te zien dat de verschillende snelheidsverticalen in één punt snijden. Dit punt is door Bagnold het focuspunt genoemd. De hoogte van het focuspunt boven de bodem wordt aangegeven door z' , een ruwheidsfactor die bepaald wordt door zowel de korrelruwheid als de vormruwheid van windribbels en obstakels op het strand. De factor z' is gebiedsspecifiek en blijkt voor stranden aan de kust in de orde van 1 cm te zijn. Uit metingen op kribvakstranden blijkt dat de waarde van z' op een kribvakstrand zo'n 2 à 3 cm bedraagt. Aangezien alle windsnelheidsverticalen, onafhankelijk van de grootte van de schuifspanningssnelheid v^* , door het focuspunt gaan, zal ook de snelheidsverticaal behorende bij v_{*c} door het focuspunt gaan. De windsnelheid in het focuspunt kan dus worden gekoppeld aan v_{*c} en wordt daarom drempelsnelheid genoemd. Voor de drempelsnelheid $v_{z,t}$, op hoogte z boven de bodem geldt:

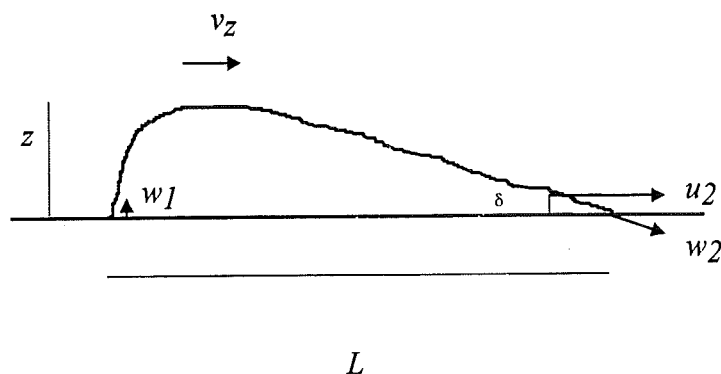
$$v_{z,t} = 5.75v_{*c} \log \frac{z}{z_0} \quad (13)$$

Voor de schuifspanningssnelheid tijdens zandtransport geldt dan:

$$v_* = \frac{(v_z - v_t)}{5.75 \log \frac{z}{z_0}} \quad (14)$$

5.2.6 Zandtransport door saltatie

Salterende zandkorrels maken sprongen van een aantal decimeters lengte en enkele decimeters hoog. De korrels verkrijgen daarbij een snelheid die ongeveer gelijk is aan de windsnelheid nabij het hoogste punt van hun baan. De impuls die de korrels hierdoor ontvangen is zodanig groot, dat bij het raken van de bodem één of meerdere korrels kunnen worden opgeworpen of verrolt. Tijdens de saltatie beschrijven de korrels banen zoals in figuur 5.2.3 is aangegeven.



Figuur 5.2.3 Schema baan salterende korrel

De eindsnelheid w_2 heeft in horizontale richting een component u_2 . Aangezien hoek δ klein is geldt bij benadering dat w_2 gelijk is aan u_2 . Aangezien de eindsnelheid van het deeltje, dicht bij de bodem ongeveer gelijk is aan de windsnelheid v_z geldt bij benadering: $u_2 = v_z$.

Wanneer op een deel van het bodemoppervlak, bepaald door de breedte van de windbaan en door de gemiddelde spronglengte L , per tijdseenheid een aantal korrels n met een gemiddelde massa m neerkomen, dan wordt op het bodemoppervlak een impuls I overgebracht van $I = n \cdot m \cdot u_2$ (Chepil & Woodruff, 1963). Met de aanname $u_2 = v_z$ wordt de impuls per oppervlakte-eenheid in horizontale richting:

$$I_L = n \cdot m \frac{v_z}{L} \quad (15)$$

Verder geldt bij benadering $\frac{z}{L} \approx \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{w_1}{v_z}$ (Chepil & Woodruff, 1963), ofwel $\frac{v_z}{L} = \frac{w_1}{z}$.

Uit de kinematica volgt dat de verticale coördinaat van het hoogste punt van een kogelbaan wordt gegeven door: $z = \frac{w_1^2 \sin^2 \varepsilon}{2g}$. Nu blijkt dat vrijwel alle korrels min of meer verticaal worden opgeworpen, nadat ze door invallende salterende korrels zijn getroffen. Dit

rechtvaardigt een aanname van $\varepsilon = 90^\circ$, zodat $z = \frac{w_1^2}{2g}$ en $\frac{v_z}{L} \approx \frac{2g}{w_1}$. Aangezien $n \cdot m$ uit (15) gelijk is aan het salterend zandtransport per eenheid bodemoppervlak per tijdseenheid, wordt (15):

$$I_L = q_s \cdot \frac{2g}{w_1} \quad (16)$$

Het impulsverlies is een maat voor de weerstand per oppervlakte-eenheid, die de luchtstroom ondervindt als gevolg van de zandbeweging. Deze weerstand is gelijk aan de schuifspanning

$$\tau = \rho \cdot v_*^2, \text{ zodat volgt:} \quad \rho \cdot v_*^2 = q_s \cdot \frac{2g}{w_1}$$

$$\text{ofwel:} \quad q_s = \frac{\rho}{2g} v_*^2 w_1 \quad (17)$$

Bagnold doet vervolgens de arbitraire aanname dat de verticale 'take-off' 'snelheid w_1 evenredig is met de schuifspanningssnelheid. Hierbij wordt aangenomen dat naarmate de impulsoverdracht groter wordt en daarmee de schuifspanningssnelheid, de eindsnelheden van de korrels w_2 groter worden en ook de beginsnelheid van de weggeschoten korrels. Nu wordt (17):

$$q_s \approx \frac{\rho_l}{2g} v_*^3$$

en met een evenredigheidsconstante B tenslotte:

$$q_s = B \frac{\rho_l}{2g} v_*^3 \quad (18)$$

Bagnold (1941) noemt B de botsingsfactor, die afhankelijk is van de korrelgrootteverdeling van het zand volgens $B = c_1 \sqrt{\frac{d}{D}}$, waarin D een referentie korreldiameter voorstelt van $250 \mu\text{m}$, en c_1 een coëfficiënt waarin onder meer de spreiding in de korreldiameters tot uiting komt. Met de botsingsfactor wordt de korrelgrootteverdeling in rekening gebracht. In evenwichtstoestand, wanneer de windverticaal met zand verzadigd is, verandert q_s niet in de windrichting, zodat een lengte-eenheid uit de dimensie van q_s mag verdwijnen. Wordt de botsingsfactor in (18) vervangen dan resulteert de volgende formule voor het saltatietransport per meter breedte van de windbaan:

$$q_s = c_1 \sqrt{\frac{d}{D}} \frac{\rho_l}{2g} v_*^3 \quad (19)$$

5.2.7 Zandtransport over bodem

Rollende zandkorrels ontvangen hun voorwaartse moment hoofdzakelijk van botsingen met salterende zandkorrels en niet direct van de wind zelf (Bagnold, 1941). Het rollende transport oefent dan ook nauwelijks weerstand uit op de wind. Het rollende transport is dus een functie van het salterende transport. Uit metingen in windtunnels en de natuur blijkt dat er een constante verhouding bestaat tussen het salterende zandtransport q_s en het rollende zandtransport ('creep') q_c . Deze verhouding is: $q_s : q_c = 3 : 1$ (Bagnold, 1941). Deze verhouding resulteert in de volgende formule voor het bodemtransport:

$$q_c = \frac{1}{3} c_1 \sqrt{\frac{d}{D}} \frac{\rho}{2g} v_*^3 \quad (20)$$

5.2.8 Totale zandtransport door wind

Uit (18) en (19) volgt de volgende formule voor het totale zandtransport door wind:

$$q = \frac{4}{3} c_1 \sqrt{\frac{d}{D}} \frac{\rho_l}{2g} v_*^3 = C \sqrt{\frac{d}{D}} \frac{\rho_l}{g} v_*^3 \quad (21)$$

met: q = zandtransport door wind (kg/s/m)
 D = referentie korreldiameter van 250 μ m

De waarde C is een experimenteel bepaalde constante die volgens Bagnold (1941) een waarde heeft van 1.8 voor redelijk gesorteerd zand.

In navolging van Bagnold zijn verschillende formules afgeleid voor het berekenen van het potentiële zandtransport. Hieronder zijn drie veel gebruikte formules weergegeven. Het betreft de formules van respectievelijk Kawamura (1951), Lettau & Lettau (1977) en White (1979), die uitgaan van (21) en het feit dat zandtransport optreedt wanneer de schuifspanningssnelheid de kritische schuifspanningssnelheid overschrijdt:

Kawamura:
$$q = C \frac{\rho_l}{g} (v_* + v_{*c})^2 (v_* - v_{*c}), \text{ met } C = 2.78 \quad (22)$$

Lettau & Lettau:
$$q = C \sqrt{\frac{d}{D}} \frac{\rho_l}{g} (v_* - v_{*c}) v_*^2, \quad \text{met } C = 4.2 \quad (23)$$

White:
$$q = C \frac{\rho_l}{g} (v_* - v_{*c}) (v_*^2 - v_{*c}^2), \text{ met } C = 2.61 \quad (24)$$

Wanneer de condities waaronder de formules (21) t/m (24) zijn afgeleid worden beschouwd, blijkt dat bij de afleiding is uitgegaan van een ideale situatie waarin zandkorrels getransporteerd worden. Verder wordt verondersteld dat de hoeveelheid ingeblazen zand gelijk is aan de hoeveelheid uitgeblazen zand; het zandniveau blijft dus constant. Deze situatie zal niet in een kribvak voorkomen, omdat er elementen zijn die wel invloed hebben op het zandtransport, maar niet in de formules zijn opgenomen. Om deze reden verschillen de potentiële zandtransporten berekend met de formules (21), (22), (23), en (24) veelal van de werkelijke, gemeten zandtransporten. De verschillen tussen de door de formules berekende hoeveelheden eolisch zandtransport en de gemeten hoeveelheden zandtransport worden hoofdzakelijk veroorzaakt door één van, of een combinatie van de volgende factoren:

- *Capillaire krachten die op het strand werkzaam zijn* (Svasek & Terwindt, 1974; Bauer, 1991). Wanneer de capillaire zone in de bodem tot aan het oppervlakte reikt, zijn de zandkorrels aan het oppervlak omgeven door water. Dit resulteert in cohesie waardoor de kritieke schuifspanningssnelheid hoger wordt en de hoeveelheid zandtransport lager.
- *Ruimtelijke en temporele variabiliteit van de korrelgrootteverdeling en ruwheidsfactor van de salterende zandkorrels en de daarmee geassocieerde beddingvormen* (Kroon & Hoekstra, 1990). Wanneer de korrelgrootteverdeling en de ruwheidsfactor in een bepaald gebied ruimtelijk en temporeel variëren zullen er in het gebied verschillende schuifspanningssnelheden optreden. Dit heeft tot gevolg dat de hoeveelheid zandtransport in het gebied ook variabel zal zijn.
- *Windsnelheden die dicht bij de drempelsnelheid zitten* (Sarre, 1988). Wanneer een over een bepaalde periode gemiddelde windsnelheid voorkomt die dicht bij de

drempelsnelheid voor het begin van zandtransport zit, kan de transportverticaal niet totaal tot verzadiging komen. Het zandtransport kan niet volledig worden geïnitieerd.

- *Het effect van de aanwezige vegetatie* (Goldsmith et al., 1990). Vegetatie kan de wind afremmen. De hoogte boven de bodem waar de windsnelheid gelijk aan 0 is (z_0), kan hierdoor veranderen. Deze verandering leidt tot een verandering van de hoeveelheid zandtransport.
- *De aanwezigheid van een pleisterlaag* (Carter, 1977; Davidson-Arnott & Law, 1990). Na de formatie van een pleisterlaag geldt een andere korrelgrootteverdeling en ruwheidsfactor, waardoor het zandtransport ook zal veranderen.
- *Een steile helling van het strand* (Sherman & Hotta, 1990). Wanneer een strand een steile helling heeft, zal de helling invloed hebben op de manier waarop de wind in contact komt met het strandoppervlak en zal de factor gravitatie een rol gaan spelen. Deze factoren leiden tot een verandering van de hoeveelheid zandtransport.
- *Breedte van het meetgebied* (Nordstrom & Jackson, 1993). De strijklengte van de wind, en daarmee de mate van verzadiging van de windverticaal, hangt af van de ruimte die het zandtransport heeft om te initialiseren.

5.2.9 Zandtransport door een meetraai

De hoeveelheid zandtransport loodrecht door een meetraai kan worden bepaald met de formule van Adriani & Terwindt (1974):

$$q_t = \sum_i \sum_j f_{ij} q_j a \sin \alpha_i \quad (25)$$

met: q_t = totale hoeveelheid zand die de raai passeert (kg/periode)
 f_{ij} = frequentie van optreden van windsnelheid j in windrichting i (s/periode)
 q_j = zandtransport bij windsnelheid j (kg/s/m)
 a = lengte van de raai (m)
 α_i = hoek tussen windrichting i met de raairichting ($^\circ$)

α_i is gedefinieerd als: $\alpha_i = \beta_i - \gamma$

met: β_i = hoek tussen het geografisch noorden en de richting waarin de wind waait ($^\circ$)
 γ = hoek tussen geografisch noorden en de richting van de raai ($^\circ$)

De hoeveelheid zandtransport door een meetraai is afhankelijk van het oppervlak van het kribvakstrand waarover het transport plaatsvindt. Dit oppervlak wordt bepaald door de waterstand in de rivier. Verder geldt dat de wind een bepaalde strijklengte over het kribvakstrand moet hebben alvorens zij maximaal met zand verzadigd raakt. Bij een klein kribvakstrand kan het voorkomen dat het zandtransport door de meetraai nog niet volledig geïnitieerd is. Om deze reden is voor verschillende windsnelheden de relatie bepaald tussen de strijklengte en de mate van verzadigd zijn van de transportverticaal. Op deze wijze is altijd het zandtransport door de meetraai te berekenen, ook wanneer de transportverticaal nog niet geheel verzadigd is. Voor een aanpassingsproces in de natuur geldt algemeen een exponentieel verloop. Bij aanname van een exponentieel verloop van de aanpassing van de mate van verzadigdheid met de afstand x , wordt het zandtransport gegeven door:

$$q_x = q \left(1 - e^{-\frac{E_0 \cdot x}{q}} \right) \tag{26}$$

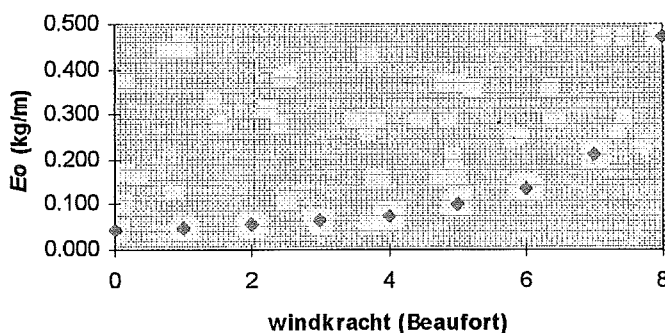
met: q_x = hoeveelheid zandtransport op afstand x (kg/s/m)
 q = hoeveelheid zandtransport bij verzadigde transportverticaal (kg/s/m)
 E_0 = aanpassingssnelheid dq/dx van het zandtransport q op tijdstip 0 (kg/m)

De aanpassingssnelheid E_0 verschilt per windsnelheid. Met behulp van data die in hoofdstuk 5.4.3 zijn verwerkt, zijn de waarden van E_0 tijdens windkracht 4, 5, en 6 bepaald. Deze waarden zijn in figuur 5.2.4 uitgezet tegen de windkracht. In figuur 5.2.4 zijn tevens de volgens een exponentieel verband geëxtrapoleerde waarden van E_0 weergegeven voor de overige windsnelheden. Omdat exponentiële extrapolatie voor windkracht 9 tot 12 niet mogelijk is, wordt aangenomen dat de transportverticaal bij deze windkrachten na 5 meter verzadigd is (Horikawa et al., 1983). De waarde van E_0 bedraagt voor deze windkrachten 0.94. In tabel 5.2.1 is een overzicht gegeven van de waarden van E_0 zoals die gelden voor ieder van de windkrachten.

windkracht	E_0
1	0.050
2	0.057
3	0.067
4	0.075
5	0.100
6	0.137
7	0.213
8	0.472
9t/m12	0.940

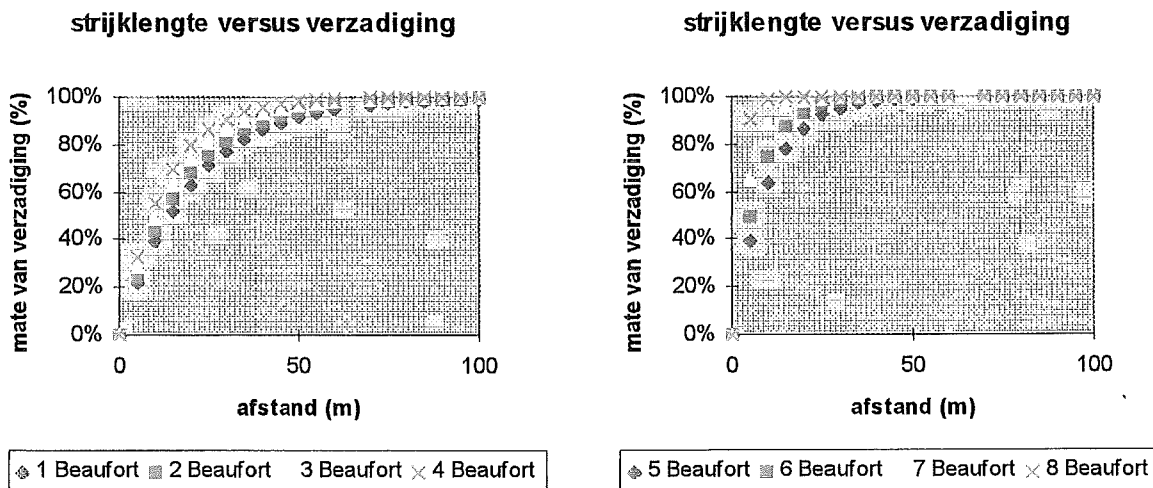
Tabel 5.2.1 Waarden E_0

E_0 versus windkracht



Figuur 5.2.4 Verband tussen windkracht en de waarde van E_0

In figuur 5.2.5 is ter illustratie het verband tussen strijklengte over afstand x en de mate van verzadiging, zoals berekend volgens (26), voor de windkrachten 1 tot 8 weergegeven.



Figuur 5.2.5 Berekend verband tussen strijklengte en de verzadiging van de transportverticaal

Figuur 5.2.5 Berekend verband tussen strijklengte en de verzadiging van de transportverticaal

5.2.10 Correctie voor invangbreedte en efficiëntie zandvanglers

Wanneer op een kribvakstrand met behulp van zandvanglers in een meetperiode een bepaalde hoeveelheid zand wordt ingevangen, zal deze hoeveelheid zand moeten worden gecorrigeerd voor invangbreedte en efficiëntie van de zandvanger om een gemiddeld zandtransport in kg/periode/m te krijgen. Hiertoe wordt een gemiddelde hoeveelheid ingevangen zand voor iedere meetdag berekend (q_i) en gecorrigeerd voor invangbreedte en de efficiëntie van de volgens:

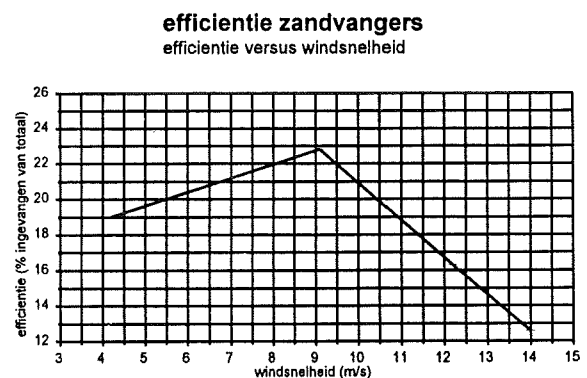
$$q_m = \frac{q_i}{E \cdot B_i} \quad (27)$$

met: q_m = voor invangbreedte en efficiëntie gecorrigeerde hoeveelheid gemeten zandtransport (kg/periode/m)

E = efficiëntie zandvanger (-)

B_i = effectieve invangbreedte van de zandvanger (m)

Op deze wijze wordt de totale hoeveelheid gemeten zand (q_m) verkregen. De efficiëntie van de zandvanglers is afhankelijk van de windsnelheid waarbij wordt ingevangen. Voor de zandvanglers die gebruikt zijn is de relatie tussen efficiëntie en windsnelheid bekend. Deze is verkregen uit calibratiemetingen in een windtunnel (Arens & Van der Lee, 1995). In figuur 5.2.6 staat weergegeven hoe de efficiëntie afhangt van de windsnelheid voor zand met een mediane korreldiameter van $240\mu\text{m}$. De windsnelheden die op de x-as zijn weergegeven, zijn gemeten op 0.4m hoogte.



Figuur 5.2.6 Efficiëntie zandvanglers (Arens & Van der Lee, 1995)

Naast literatuur zijn tevens luchtfoto's van kribvakken langs de Waal bestudeerd. Resultaten van deze studie zijn verwerkt in §5.6.2 van dit rapport. Op grond van het literatuuronderzoek en de luchtfotostudie zijn de volgende hypothesen opgesteld:

1. *Ten gevolg van een variabel windklimaat, treedt een temporele variatie op in de grootte van het eolisch zandtransport.* Zowel de windsnelheid als de windrichting veranderen met de tijd. Het eolisch zandtransport is sterk afhankelijk van de windsnelheid en -richting, zodat het eolisch zandtransport ook temporeel verandert.
2. *Ten gevolg van de verschillende oriëntaties van kribvakstranden langs de Waal, treedt een ruimtelijke variatie op in de grootte van het eolisch zandtransport.* De oriëntatie van de kribvakstranden bepaalt, samen met de windrichting, de strijklengte van de wind. De strijklengte bepaalt de mate van verzadiging van de transportverticaal en daarmee de hoeveelheid zand die verstuift op een kribvakstrand. De oriëntatie van kribvakstranden

varieert langs de Waal, hierdoor zal de strijklengte en het eolisch zandtransport langs de Waal eveneens een ruimtelijke variatie vertonen.

3. *Het eolisch zandtransport vanuit kribvakken langs de Waal worden ingeschat op basis van metingen in enkele kribvakken onder een selectie van windcondities.* Dit kan wanneer de kribvakken, waarin de metingen worden verricht, representatief zijn voor alle kribvakken langs de Waal. Uit de selectie van windcondities kan een relatie tussen het windklimaat en de hoeveelheid zandtransport worden bepaald. Deze relatie kan worden geëxtrapoleerd naar windcondities waarbij niet gemeten is.
4. *Eolisch zandtransport is een belangrijke term voor de zandbalans van kribvakken op jaarbasis.* Bij een hoogwatergolf wordt zand afgezet door de rivier, waarna het door fluviatiele en eolische processen wordt geërodeerd. Boven de waterlijn kan bij laagwater het zand alleen door verstuiwing uit een kribvak verdwijnen.

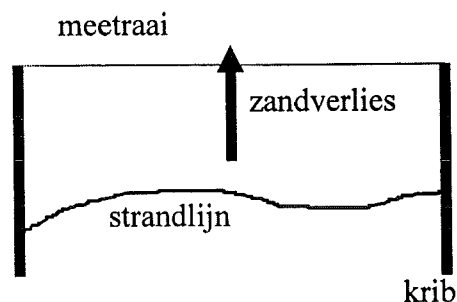
De doelstelling en hypothesen geven aanleiding tot de volgende onderzoeksvragen:

1. *Kan de grootte van het eolisch zandtransport worden gerelateerd aan windsnelheid en windrichting, en kan uit deze relatie een temporele variatie in het eolisch zandtransport worden afgeleid?*
2. *Kan de grootte van het eolisch zandtransport worden gerelateerd aan de oriëntatie van kribvakstranden, en kan uit deze relatie een ruimtelijke variatie van het eolisch zandtransport worden afgeleid?*
3. *Kan het eolisch zandtransport vanuit kribvakken langs de Waal, voor de gehele rivier worden ingeschat op basis van metingen in enkele kribvakken onder een selectie van windcondities?*
4. *Is eolisch zandtransport een belangrijke of verwaarloosbare term voor de zandbalans van kribvakken op jaarbasis?*

5.3 Methodiek

5.3.1 Algemeen

Voor de berekening van het jaarlijks zandverlies uit kribvakken is het noodzakelijk de kribvakken te begrenzen met behulp van meetraaien. Zandverlies uit kribvakken vindt plaats wanneer zand vanaf het kribvakstrand naar de omliggende begroeiing wordt getransporteerd, waar het wordt ingevangen. Om deze reden is gekozen voor één meetraai over de zomerdijk, loodrecht op de kribben (zie figuur 5.3.1). Met behulp van de hoeveelheid zand die de meetraai passeert, kan het zandverlies uit de kribvakken worden bepaald. Voor de berekening van de hoeveelheid zand die een meetraai passeert, is nodig:



Figuur 5.3.1 Positie meetraai

- een verband tussen windsnelheid en hoeveelheid zandtransport.
- langperiodische waarnemingen van windsnelheid en windrichting, die representatief zijn voor het meetgebied.

5.3.2 Verband tussen windsnelheid en hoeveelheid zandtransport

Het verband tussen de windsnelheid en de hoeveelheid zandtransport is bepaald door op het kribvakstrand, onder verschillende windcondities, het verticale windprofiel te bepalen met behulp van de windsnelheden gemeten door de anemometers. Hierbij is ook gekeken of de windsnelheid zoals die op 10m is gemeten in het verticale windprofiel past, om zo het verband tussen de windsnelheid in de kribvakken en op 10m hoogte te verkrijgen. Voor iedere meetperiode is een gemiddeld windsnelheidsprofiel bepaald. Met de formules (11), (12), (13), en (14) is vervolgens voor iedere meetdag een gemiddelde schuifspanningssnelheid en een gemiddelde, voor vocht gecorrigeerde, kritische schuifspanningssnelheid berekend. Hierbij zijn voor de in te vullen parameters de volgende waarden gebruikt: v_z = gemeten windsnelheid (m/s) op hoogte z boven het kribvakstrand; $A = 0.1$; $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$; $\rho_l = 1.22 \text{ kg/m}^3$; $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; $z_0 = 1/30d$; d = mediane korreldiameter voor betreffende meetdag (μm); ω = vochtgehalte van kribvakstrand op betreffende meetdag (%). Met behulp van de berekende schuifspanningssnelheden en bovenstaande waarden voor de in te vullen parameters, zijn vervolgens met de formules (21), (22), (23), en (24) zandtransporten in kg/s/m berekend. Vervolgens zijn deze zandtransporten met behulp van formules (25) en (26) vertaald naar zandtransporten loodrecht door de meetraai, gecorrigeerd voor de invloed van strijklengte. De berekende zandtransporten zijn vervolgens vergeleken met de hoeveelheden gemeten zandtransport op de verschillende meetdagen. Uit de vergelijking tussen de potentiële en de gemeten transporten komt naar voren welke van de formules (21) t/m (24) het best het zandtransport in kribvakken voorspelt. Deze formule geeft het verband tussen windsnelheid en hoeveelheid zandtransport op kribvakstranden. Met deze formule wordt voor de windsterktes 0 - 12 Beaufort het zandtransport berekend in tonnen per jaar per meter. De windsnelheden in meter per seconde zijn met behulp van tabel 5.3.1 vertaald naar de windsterktes volgens de meer gangbare schaal van Beaufort.

Windsterkte volgens de schaal van Beaufort	gemiddelde windsnelheid op 10m hoogte in m/s	omschrijving
0	0.0-0.2	windstil
1	0.3-1.5	zwakke wind
2	1.6-3.3	zwakke wind
3	3.4-5.4	matige wind
4	5.5-7.9	matige wind
5	8.0-10.7	vrij krachtige wind
6	10.8-13.8	krachtige wind
7	13.9-17.1	harde wind
8	17.2-20.7	stormachtige wind
9	20.8-24.4	storm
10	24.5-28.4	zware storm
11	28.5-32.6	zeer zware storm
12	32.7-36.9	orkaan

Tabel 5.3.1 Schaal van windsnelheden

5.3.3 Langperiodische waarnemingen van windsnelheid en -richting

Voor de berekening van het zandverlies uit kribvakken op jaarbasis, is een langjarig windklimaat nodig dat representatief is voor het onderzoeksgebied. Dit langjarig windklimaat wordt ontleend aan het KNMI-meteostation dat het dichtst bij het meetgebied ligt, en

waarvoor geldt dat een voldoende lange, ononderbroken tijdreeks van het windklimaat beschikbaar is. Het windklimaat bij het meteostation wordt vergeleken met het windklimaat in het onderzoeksgebied, zoals dat is gemeten door de windsnelheids- en richtingmeter op 10m boven het maaiveld. Wanneer het windklimaat bij het meteostation vergelijkbaar is met het windklimaat in het onderzoeksgebied, mag het windklimaat bij het meteostation representatief worden gesteld voor het onderzoeksgebied. Wanneer het windklimaat bij het meteostation als gevolg van bijvoorbeeld bebouwing of begroeiing, niet vergelijkbaar is met het windklimaat in het onderzoeksgebied zal het windklimaat bij het meteostation zodanig moeten worden gecorrigeerd dat dit windklimaat wel representatief mag worden verondersteld voor het onderzoeksgebied. Bij deze correctie wordt voor verschillende windrichtingen bekeken of er verschillen optreden tussen de windsnelheden zoals die gemeten zijn bij het meteostation en in het onderzoeksgebied. Wanneer er systematische verschillen optreden zal het windklimaat van het meteostation per windrichting gecorrigeerd worden voor deze systematische verschillen. Op deze manier wordt een windklimaat verkregen dat representatief is voor het meetgebied. Met behulp van dit windklimaat en de berekende zandtransporten bij de verschillende windsterkten, zijn potentiële zandtransporten in twaalf verschillende richtingen berekend (kg/jaar/m).

5.3.4 Ruimtelijke vertaalslag naar de gehele Waal

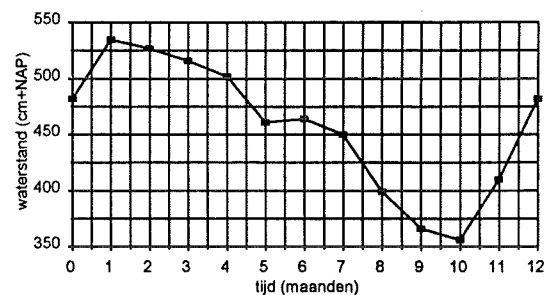
Om vanuit het meetgebied van een aantal kribvakken een ruimtelijke vertaalslag te maken naar alle kribvakken langs de Waal, is van vier kribvakken (1 t/m 4 uit 1.3.1) de morfologie nauwkeurig bepaald. Dit is gedaan door waterpasgegevens te koppelen aan echolodingen, zodat de morfologie wordt beschreven van de rivierbedding tot aan de zomerdijk. Deze exercitie is voor de vier kribvakken uitgevoerd met waterpasgegevens van juni/juli 1996 en echolodingen van juli 1996 (kribvak 2,3 en 4) en september 1996 (kribvak 1). Voor de vier kribvakken is een gemiddelde relatie tussen de waterstand en het strandoppervlak bepaald. Vervolgens zijn luchtfoto's (genomen bij een waterstand van 400cm +N.A.P. bij Tiel op 06/10/85 en 21/10/85, schaal 1:5000) van kribvakken in de Waal bestudeerd. Het betreft hier het deel van de Waal van Millingen aan de Rijn tot Woudrichem (zie figuur 5.3.2).

Bij de luchtfotostudie is voor 318 kribvakken aan noordoever en voor 312 kribvakken aan de zuidoever, het oppervlak van het kribvakstrand, de oriëntatie, en de morfometrie van het kribvakstrand bepaald. De morfometrie beschrijft de vorm van het kribvakstrand tussen de kribben. Na bestudering van alle kribvakken is bepaald in hoeverre de vier geselecteerde kribvakken representatief zijn voor de kribvakken langs de gehele Waal qua strandoppervlak en oriëntatie.

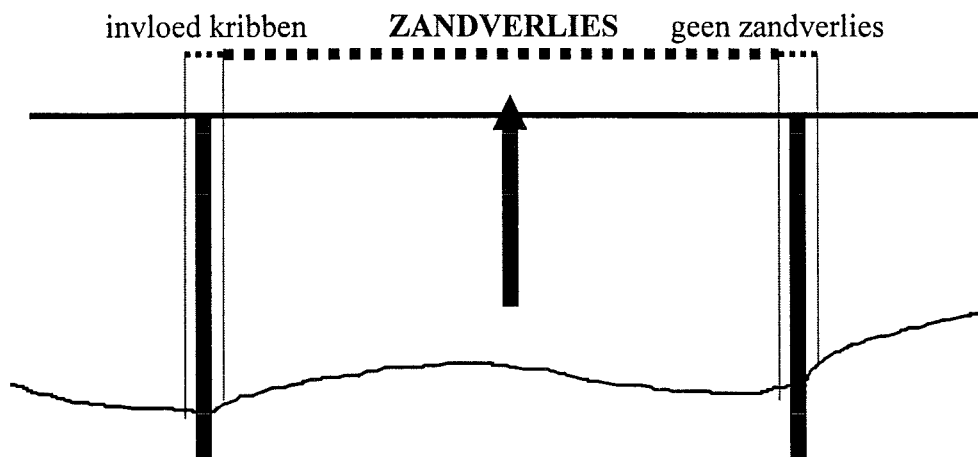
Figuur 5.3.2 Bestudeerd traject Waal (Grote Provincie Atlas 1:25.000)

Hierbij is het strandoppervlak genomen zoals dat op de luchtfoto's duidelijk te onderscheiden is van begroeiing. Wanneer de representativiteit gegronnd blijkt, kan de relatie tussen waterstand en strandoppervlak worden gecombineerd met een ruimtelijke vertaalslag naar de gehele Waal. Met behulp van de waterstanden voor de gemiddelde (over 1960 tot 1994) jaarafvoer uit figuur 5.3.3, de relatie tussen waterstand en strandbreedte in de vier kribvakken, en het totale strandoppervlak langs de Waal bij een bekende waterstand, kan het totale strandoppervlak c.q. strandbreedte langs de Waal worden berekend voor een jaarvariatie in waterstand. Uit deze jaarvariatie wordt een jaargemiddelde strandbreedte bepaald. Met behulp van deze jaargemiddelde strandbreedte, de oriëntatie van de kribvakken langs de Waal, en de berekende jaarlijkse zandtransporten in verschillende richtingen, kan het jaarlijks zandverlies uit kribvakken langs de Waal worden berekend. Het betreft hier de totale hoeveelheid zandtransport loodrecht door de meetraai op de zomerdijk langs de Waal. Voor de lengte van de totale meetraai door alle kribvakken wordt uitgegaan van de lengte van de rivieras over het traject Millingen aan de Rijn tot Woudrichem. Verder wordt er van uitgegaan dat door invloed van de kribben geen zandtransport plaatsvindt ter plaatse van de kribben (zie figuur 5.5.4). De gemiddelde breedte van de kribben langs de Waal bedraagt zo'n 15 meter. Wanneer gecorrigeerd wordt voor de kribbreedte bedraagt de effectieve raailengte 53 km.

gemiddelde jaarafvoer (1960-1994)
waterstanden bij Tiel



Figuur 5.3.3 Maandgemiddelde waterstand bij Tiel over de periode 1960-1994



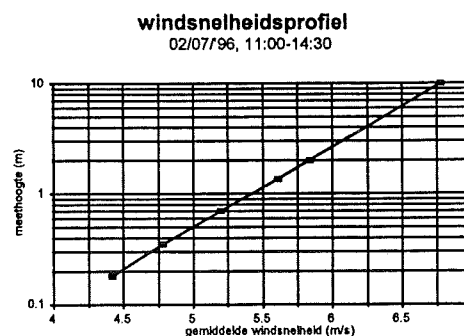
Figuur 5.3.4 Invloed kribben op zandverlies

De jaarlijkse hoeveelheid eolisch zandverlies uit kribvakken langs de Waal wordt vergeleken met de jaarlijkse zandvracht door de hoofdgeul van de rivier. Deze bedraagt ongeveer 500.000m^3 per jaar voor het bovenstroomse deel van de Waal.

5.4 Resultaten

5.4.1 Windsnelheidsprofiel boven kribvakstrand

In figuur 5.4.1 staat het windsnelheidsprofiel voor meetdag 02/07/'96 weergegeven. In de grafiek is te zien dat de windsnelheid met de hoogte exponentieel toeneemt. Verder valt op dat de gemiddelde windsnelheid zoals die door de windsnelheids- en richtingmeter op 10 meter boven het maaiveld is gemeten, aansluit bij de gemiddelde windsnelheden zoals die gemeten zijn met behulp van de anemometers op het kribvakstrand. Dat dit voor alle meetdagen het geval is, is te zien in bijlage 5.1 waar de windsnelheidsprofielen van de alle meetdagen staan weergegeven.



Figuur 5.4.1 Windsnelheidsprofiel voor meetdag 02/07/'96

5.4.2 Vochtgehalte kribvakstrand

In tabel 5.4.1 staat het gemiddelde vochtgehalte voor elk van de meetdagen weergegeven.

meetdag	02/07/'96	03/07/'96	04/07/'96	09/07/'96	12/09/'96	18/09/'96	03/10/'96	29/10/'96	12/02/'97	28/03/'97
gem. vochtgehalte	1.12%	0.67%	1.52%	0.96%	2.09%	0.78%	1.41%	3.24%	1.30%	1.94%

Tabel 5.4.1 Gemiddelde vochtgehalten voor de verschillende meetdagen

Uit tabel 5.4.1 valt af te leiden dat het vochtgehalte van de kribvakstranden tijdens de meetdagen over het algemeen, gemiddeld tot laag is. Alleen op de meetdagen 12/09/'96, 29/10/'96, en 28/03/'97 is het vochtgehalte hoger dan gemiddeld voor de meetdagen geldt.

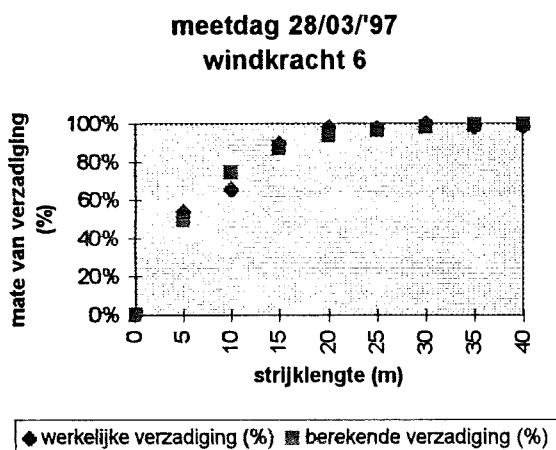
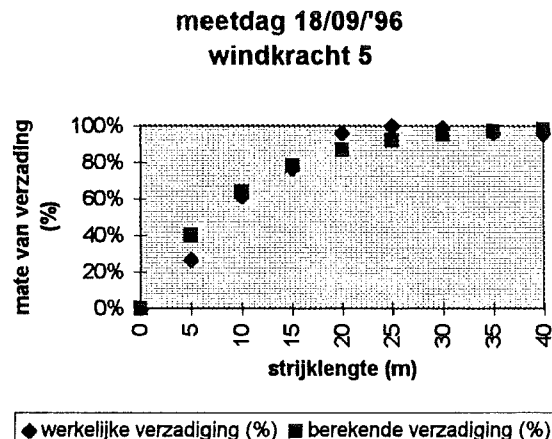
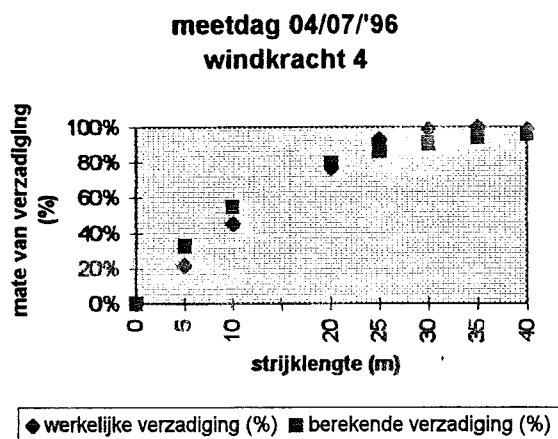
5.4.3 Gemeten zandtransport

De volgens formule (27) voor invangbreedte en efficiëntie gecorrigeerde hoeveelheid ingevangen zand (q_m), staat voor iedere meetdag weergegeven in tabel 5.4.2

datum	02/07/'96	03/07/'96	04/07/'96	09/07/'96	12/09/'96	18/09/'96	18/09/'96	18/09/'96	03/10/'96	29/10/'96	12/02/'97	28/03/'97	28/03/'97
meet-periode	11:00-14:30	11:00-14:30	12:00-16:45	11:00-14:30	11:15-15:45	11:55-12:55	13:35-14:35	15:10-15:55	11:15-15:15	12:15-16:15	11:45-14:45	13:50-14:30	14:45-15:25
q_m (kg/m)	3.9	2.6	35.8	0.1	11.3	23.6	26.2	15.0	0.2	5.1	1.1	34.6	34.6

Tabel 5.4.2 Hoeveelheid ingevangen zand, gecorrigeerd voor invangbreedte en efficiëntie

Uit de tabel is af te leiden dat er grote verschillen optreden tussen de hoeveelheid gemeten zandtransport op de verschillende meetdagen. Zo is bijvoorbeeld op meetdag 09/07/'96 in 210 minuten slechts 0.1 kg/m gemeten terwijl op meetdag 28/03/'97 in 40 minuten 34.6 kg/m gemeten is. De relatie tussen de afstand waarover een wind waait, en de mate van verzadiging van de transportverticaal, is bepaald door het zandtransport om de vijf meter in te vangen. Dit is gedaan op de meetdagen 04/07/'96, 18/09/'96, en 28/03/'97, waarop windkrachten van respectievelijk 4, 5, en 6 Beaufort voorkwamen. In figuur 5.4.2 is de mate van verzadiging

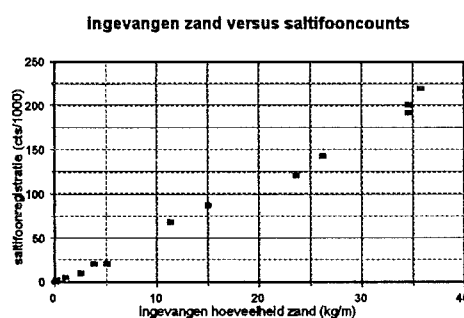


Figuur 5.4.2 Verband tussen striklengte en de verzadiging van de transportverticaal

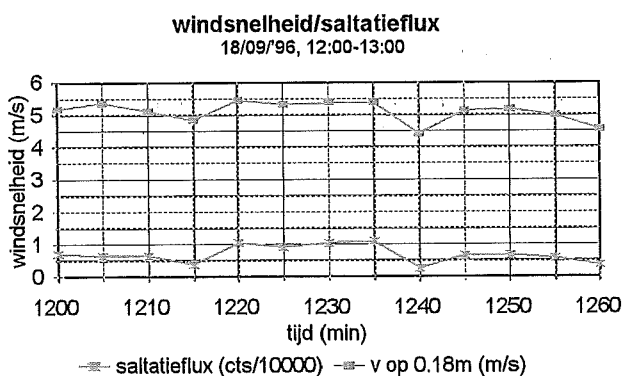
Door extrapolatie van de waarden van E_0 zoals die voor windkracht 4, 5, en 6 bepaald zijn, zijn de waarden gekozen zoals die in tabel 5.2.1 zijn weergegeven.

Het aantal tikken ('counts') dat door de saltifoon is geregistreerd is voor iedere meetdag opgeteld en in figuur 5.3 uitgezet tegen de door de zandvangsers ingevangen hoeveelheid zand. Uit figuur 5.4.3 blijkt dat er een lineair verband bestaat tussen het aantal door de saltifoon geregistreerde tikken, en de door de zandvangsers hoeveelheid ingevangen zand. Deze hoeveelheid is ingevangen over de hoogte 0.0-0.3m.

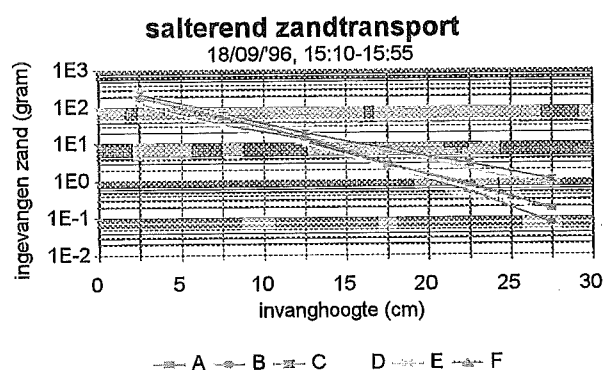
Uit dit verband komt naar voren dat in een bepaalde tijd waarin zandtransport plaatsvindt 100.000 counts overeenkomen met zo'n 17 kg/m. In figuur 5.4.4 is voor meetdag 18/09/'96 de saltatieflux uitgezet tegen de windsnelheid op 0.18m hoogte. Uit de figuur valt af te leiden dat er een duidelijk verband bestaat tussen de windsnelheid op 0.18m hoogte boven het strand, en de saltatieflux. Wanneer de windsnelheid toeneemt, neemt ook de saltatieflux toe, en bij een afname van de windsnelheid neemt ook de saltatieflux af. Voor alle meetdagen zijn de saltifoongegevens gecombineerd met de windsnelheid op 0.18m en weergegeven in bijlage 5.2. Meetdag 09/07/'96 ontbreekt in de bijlage omdat de saltifoon op deze meetdag geen salterend zandtransport geregistreerd heeft. In figuur 5.4.5 staat voor meetdag 18/09/'96 het



Figuur 5.4.3 Verband tussen de hoeveelheid saltifooncounts en de hoeveelheid ingevangen zand



Figuur 5.4.4 Verband tussen windsnelheid en de saltatieflux



Figuur 5.4.5 Verband tussen ingevangen hoeveelheid zand en invanghoogte

gewicht van de door de zandvangers A-F ingevangen hoeveelheid zand uitgezet tegen de verschillende invanghoogten. In de figuur is te zien dat de hoeveelheid ingevangen zand exponentieel afneemt met de invanghoogte. Voor alle meetdagen zijn de ingevangen hoeveelheden zand uitgezet tegen de invanghoogte en weergegeven in bijlage 5.3. In de bijlage valt op dat over het algemeen geldt dat de verschillen in ingevangen hoeveelheid tussen de verschillende zandvangers A tot en met F, groter is op meetdagen waarop weinig salterend zandtransport optreedt dan op meetdagen waarop meer salterend zandtransport optreedt.

5.4.4 Berekend zandtransport

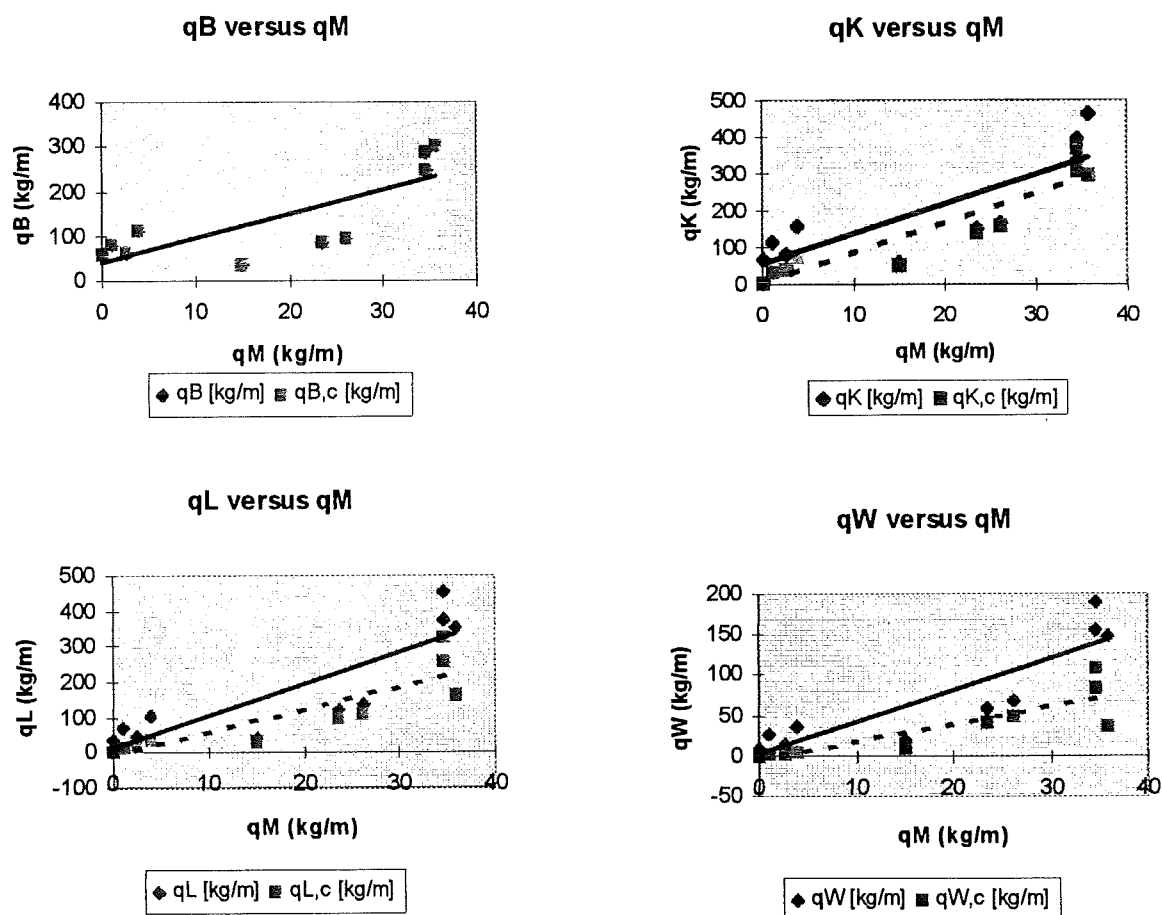
In tabel 5.4.3 zijn de zandtransporten voor elk van de meetdagen weergegeven. Het betreft ongecorrigeerde potentiële zandtransporten berekend volgens de methoden van Bagnold (q_B), Kawamura (q_K), Lettau & Lettau (q_L), en White (q_W), en voor vochtgehalte en strijklengte gecorrigeerde zandtransporten ($q_{K,c}$ enz.). Voor de invloed van het vochtgehalte is gecorrigeerd volgens formule (12), voor de strijklengte wordt gecorrigeerd volgens formule (26). De zandtransporten zoals die gemeten zijn door de zandvangers (q_m) zijn ook in de tabel opgenomen.

Datum	meetduur	q_m	q_B	q_K	$q_{K,c}$	q_L	$q_{L,c}$	q_W	$q_{W,c}$
		[kg/m]	[kg/m]	[kg/m]	[kg/m]	[kg/m]	[kg/m]	[kg/m]	[kg/m]
02/07/96	11:00-14:30	3.9	113.1	157.0	66.9	102.9	32.6	35.7	4.5
03/07/96	11:00-14:30	2.6	63.4	79.7	36.0	44.9	16.6	13.4	2.2
04/07/96	12:00-16:45	35.8	415.1	656.2	459.0	539.7	274.4	238.0	81.9
09/07/96	11:00-14:30	0.1	59.1	68.2	1.3	37.7	0.5	10.3	0.0
12/09/96	11:15-15:45	11.3	267.6	403.9	119.6	306.2	57.2	123.2	5.9
18/09/96	11:55-12:55	23.6	87.0	150.0	135.1	121.3	92.1	60.1	39.4
18/09/96	13:35-14:35	26.2	96.0	166.0	151.1	136.9	105.4	68.6	46.1
18/09/96	15:10-15:55	15.0	35.6	59.0	48.2	42.2	28.3	18.9	10.2
03/10/96	11:15-15:15	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29/10/96	12:15-16:15	5.1	505.6	742.0	195.9	667.5	98.7	274.8	7.7
12/02/97	11:45-14:45	1.1	79.6	114.4	27.3	71.3	11.9	25.6	1.0

28/03/97	13:50-14:30		246.0	336.0	300.3	377.4	252.8	154.5	81.6
		34.6							
28/03/97	14:45-15:25		289.2	395.0	361.7	455.8	316.2	189.1	106.7
		34.6							

Tabel 5.4.3 Berekende potentiële zandtransporten

In figuur 5.4.6 zijn de berekende zandtransporten volgens de vier verschillende methoden uitgezet tegen de gemeten zandtransporten. In de figuur zijn de ongecorrigeerde zandtransporten weergegeven, en de voor vocht en strijklengte gecorrigeerde zandtransporten. De zandtransporten berekend volgens de methode van Bagnold zijn alleen gecorrigeerd voor strijklengte omdat de correctie voor vocht uitgaat van een hogere kritische schuifspanningssnelheid, en deze parameter niet in formule (21) van Bagnold is opgenomen. Hierdoor valt uit de eerste grafiek in figuur 5.4.6 af te leiden dat de correctie voor strijklengte weinig invloed heeft. Op de meetdagen was de transportverticaal steeds bijna geheel verzadigd. Door de ongecorrigeerde zandtransporten is steeds een aaneengesloten trendlijn getrokken. Door de voor vocht gecorrigeerde zandtransporten is een onderbroken trendlijn getrokken. Wanneer de zandtransporten in figuur 5.4.6 worden beschouwd, valt op dat algemeen geldt dat zandtransporten die zijn berekend met de formules van Bagnold, Kawamura, en Lettau en Lettau, hoger uitvallen dan de zandtransporten die zijn berekend met de formule van White. Voor de niet-gecorrigeerde zandtransporten geldt, dat in alle gevallen de berekende zandtransporten in meer of mindere mate hoger zijn dan de gemeten



Figuur 5.4.6 Verband tussen het gemeten en het volgens verschillende methoden berekend transport

transporten. Dit geldt ook voor de voor vocht en strijklengte gecorrigeerde transporten, met uitzondering van de transporten berekend met de formule van White, die een paar keer een onderschatting van het gemeten transport laten zien, en een paar keer een overschatting. De berekende potentiële transporten volgens de methode van White laten de kleinste overschatting zien ten opzichte van de gemeten transporten. De formule van White presteert dus het best. Uit figuur 5.4.6 valt verder af te leiden dat de correctie voor de invloed van het vochtgehalte volgens formule (12) relatief grote invloed heeft op de berekende potentiële transporten. Als gevolg hiervan is de fout die optreedt wanneer een foutief vochtgehalte wordt gehanteerd, ook groot. Om deze reden is gekozen om de berekende potentiële zandtransporten niet voor vocht te corrigeren. Door uit te gaan van het lineaire verband dat bestaat tussen de zandtransporten berekend met formule (24) en de gemeten zandtransporten kunnen de potentiële zandtransporten in kribvakken door correctie van de door (24) berekende zandtransporten worden bepaald. Het verband wordt gegeven door:

$$q_w = 4 \cdot q_M \quad (29)$$

In tabel 5.4.4 staan de met behulp van formule (24) berekende zandtransporten weergegeven in tonnen per jaar per meter, voor windkracht 0 t/m 12. Hierbij is uitgegaan van de klassegemiddelde windsnelheid (m/s) voor iedere windkracht en een gemiddelde mediane korrel diameter van 324 μm . De zandtransporten zijn volgens formule (26) gecorrigeerd voor strijklengte, waarbij is uitgegaan van een gemiddelde strandbreedte van kribvakstranden langs de Waal. Tevens zijn de zandtransporten gecalibreerd op veldmetingen volgens formule (29).

Windkracht (Beaufort)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
zandtransport (tonnen/jaar/m)	0	0	0	0	0.4	14.7	69.7	198.0	428.5	796.4	1376.9	2229.3	3402.3

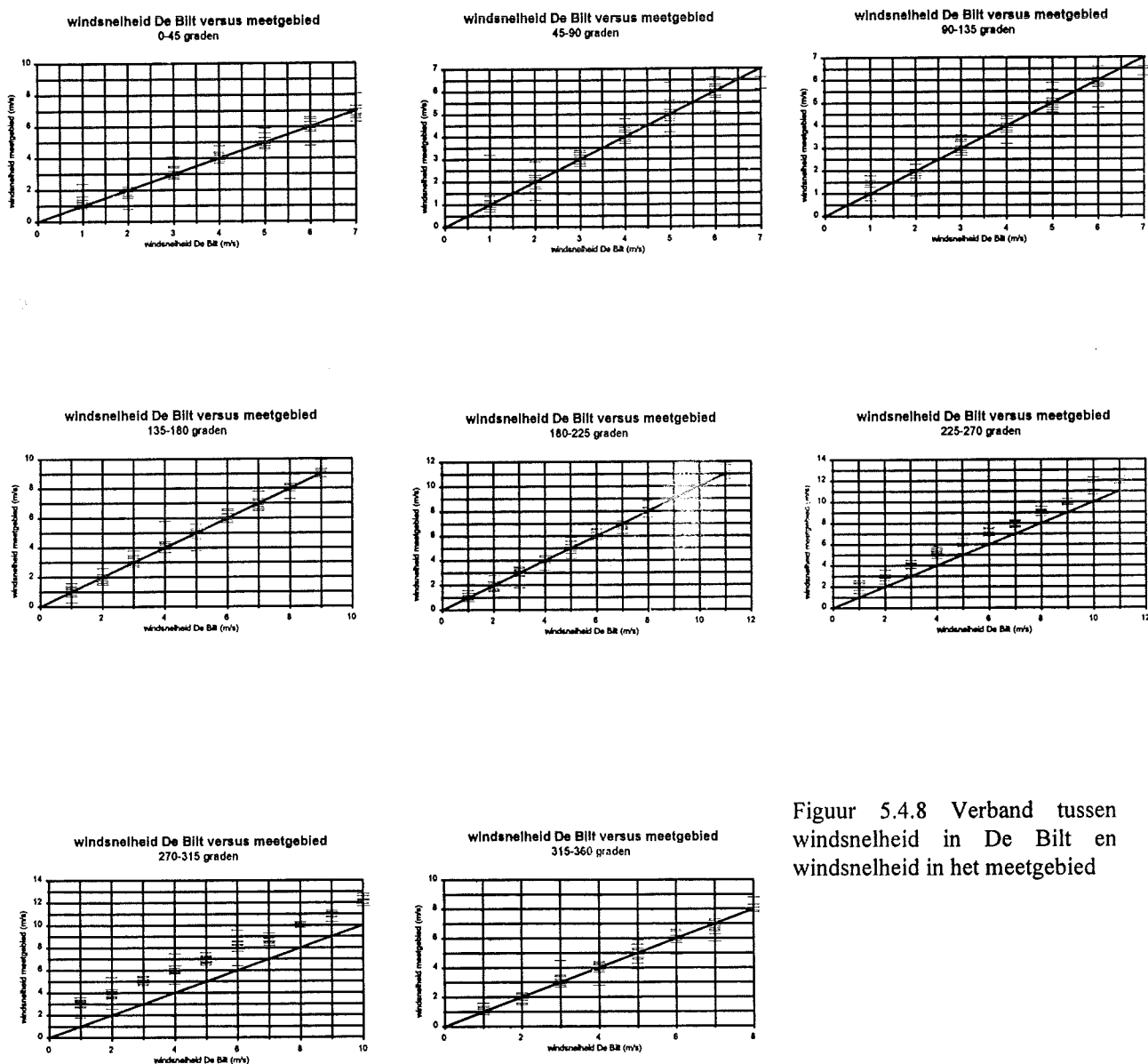
Tabel 5.4.4 Berekende potentiële zandtransporten voor verschillende windkrachten

5.4.5 Langperiodisch windklimaat

Het dichtst bij het meetgebied gelegen meteostation, met een voldoende lange ononderbroken meetreeks van windsnelheid en windrichting, is het meteostation in De Bilt. Het jaargemiddelde windklimaat zoals dat van 1961-1980 in De Bilt is gemeten, is weergegeven in figuur 5.4.7 waarin de combinatie van windrichting en windsnelheid een klasse voorstelt.

Figuur 5.4.7 Verdeling van de windsnelheid en -richting in De Bilt voor de periode 1961-1980

Om de representativiteit van het windklimaat in De Bilt voor het meetgebied te testen, is de windsnelheid in De Bilt voor verschillende windrichtingen uitgezet tegen de windsnelheid zoals die gemeten is op 10m hoogte in het meetgebied. In figuur 5.4.8 is deze relatie weergegeven.



Figuur 5.4.8 Verband tussen windsnelheid in De Bilt en windsnelheid in het meetgebied

Uit figuur 5.4.8 valt af te leiden dat voor windsnelheden bij een west-zuidwestelijke wind geldt, dat de windsnelheden in het meetgebied steeds 1m/s hoger uitvallen dan de windsnelheden in De Bilt. Voor het segment 225°-270° moet het windklimaat uit de De Bilt om deze reden worden gecorrigeerd met een factor + 1m/s. Verder valt te zien dat voor winden uit het west-noordwesten geldt dat de windsnelheden in het meetgebied steeds 2m/s

hoger uitvallen dan de windsnelheden in De Bilt. Voor het segment 270°-315° moet worden gecorrigeerd met een factor +2 m/s. Voor de overige segmenten geldt dat de windsnelheden in het meetgebied overeenkomen met de windsnelheden in De Bilt. Voor deze segmenten hoeft het windklimaat niet te worden gecorrigeerd. Correctie van het windklimaat in De Bilt voor de systematische afwijkingen in de twee aangegeven segmenten, resulteert in een jaargemiddelde frequentieverdeling van windsnelheid en -richting die representatief is voor het onderzoeksgebied. Deze verdeling is in tabel 5.4.5 weergegeven.

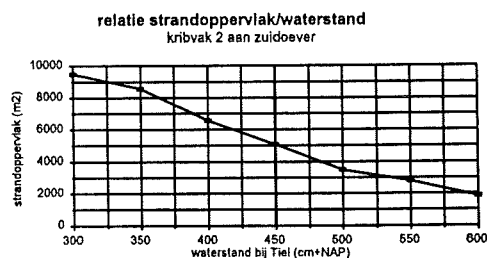
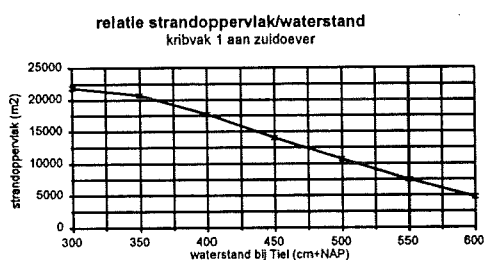
Windkracht (Beaufort)/ windrichting	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
000°-030°	0.01%	0.17%	0.68%	1.06%	1.41%	0.65%	0.22%	0.04%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
030°-060°	0.00%	0.25%	1.09%	1.91%	2.82%	1.54%	0.57%	0.14%	0.03%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%
060°-090°	0.00%	0.31%	1.10%	1.64%	2.24%	1.20%	0.56%	0.16%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
090°-120°	0.01%	0.32%	1.01%	1.38%	1.67%	0.72%	0.33%	0.08%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
120°-150°	0.01%	0.31%	0.90%	1.15%	1.41%	0.64%	0.22%	0.05%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
150°-180°	0.01%	0.50%	1.55%	1.99%	2.08%	0.95%	0.34%	0.06%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
180°-210°	0.01%	0.44%	1.53%	2.02%	2.26%	1.24%	0.66%	0.22%	0.07%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
210°-240°	0.00%	0.56%	1.55%	2.66%	3.54%	2.35%	1.31%	0.52%	0.24%	0.08%	0.01%	0.00%	0.00%
240°-270°	0.00%	0.74%	1.55%	2.47%	3.15%	2.40%	1.37%	0.56%	0.22%	0.07%	0.01%	0.00%	0.00%
270°-300°	0.00%	0.31%	1.62%	1.78%	1.62%	1.83%	0.75%	0.32%	0.10%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%
300°-330°	0.01%	0.32%	1.23%	1.73%	2.07%	0.84%	0.32%	0.09%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%
330°-360°	0.01%	0.34%	1.32%	1.81%	1.90%	0.60%	0.23%	0.06%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

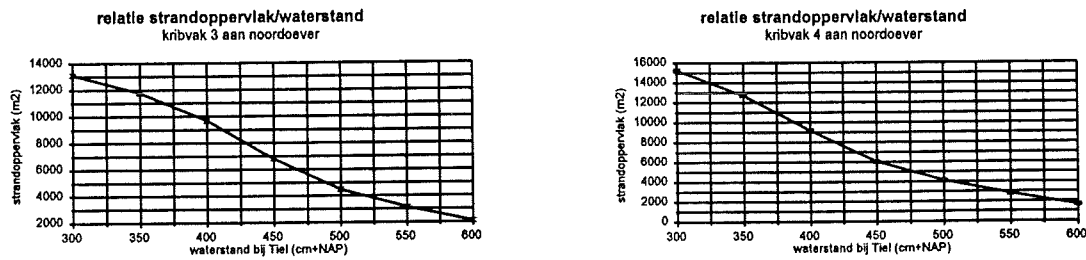
Tabel 5.4.5 Jaargemiddelde frequentieverdeling van windrichting en windsnelheid in meetgebied

5.4.6 Vertaalslag naar de gehele Waal

5.4.6.1 Verband tussen waterstand en strandoppervlak in het onderzoeksgebied

In de figuur 5.4.9 is het verband weergegeven tussen het strandoppervlak voor de vier representatief veronderstelde kribvakken, en de waterstand bij Tiel.





Figuur 5.4.9 Verband tussen standoppervlak en waterstand voor vier kribvakken in het onderzoeksgebied

Wanneer blijkt dat de kribvakken in het onderzoeksgebied representatief zijn voor de rest van de kribvakken langs de Waal, zal uit figuur 5.4.9 een gemiddeld verband tussen de waterstand en strandoppervlak c.q. strandbreedte worden afgeleid. Dit verband wordt dan representatief verondersteld voor alle kribvakken langs de Waal.

5.4.6.2 Oriëntatie, morfometrie en oppervlak kribvakstranden

Uit de luchtfotostudie komt naar voren dat van alle kribvakken langs de Waal 58.3% een oost-west oriëntatie (lengte-as ligt 90° - $270^{\circ} \pm 10^{\circ}$), 22.3% een oriëntatie in zuidwestelijke richting (lengte-as ligt 30° - $210^{\circ} \pm 10^{\circ}$), en 19.4% een oriëntatie in noordwestelijke richting (lengte-as ligt 120° - $300^{\circ} \pm 10^{\circ}$) heeft. Wat betreft de morfometrie van de kribvakken geldt dat 84.0% van de kribvakken aan de noordoever, en 79.2% van de kribvakken aan de zuidoever een 'recht' strand heeft. Met een recht strand wordt een strand bedoeld dat van krib tot krib min of meer dezelfde breedte heeft. Naast een recht strand komt een morfometrie voor waarbij de strandbreedte aan de stroomopwaartse krib meer dan twee keer zo groot is als de strandbreedte aan de stroomafwaartse krib; deze morfometrie heeft aan de noordoever een voorkomen van 9.7% en aan de zuidoever een voorkomen van 9.9%. Aan de noordoever is in 6.3% van alle gevallen het strand aan de stroomafwaartse krib twee keer zo groot als het strand aan de stroomopwaartse krib, aan de zuidoever ligt dit percentage op 10.9%. Op het moment dat de luchtfoto's zijn genomen, was de waterstand bij Tiel 400cm + N.A.P. Op dat moment bedroeg het totale oppervlak van de kribvakstranden aan de noordoever $2.6 \cdot 10^6$ m², en het totale oppervlak van de kribvakstranden aan de zuidoever $3.0 \cdot 10^6$ m². Het gemiddelde strandoppervlak en de gemiddelde strandbreedte van een kribvakstrand aan de noordoever bedraagt bij een waterstand van 400cm + N.A.P. respectievelijk 8300 m² en 45 meter. Voor een kribvakstrand aan de zuidoever bedraagt het gemiddelde strandoppervlak 9350 m² en de gemiddelde strandbreedte 50 meter.

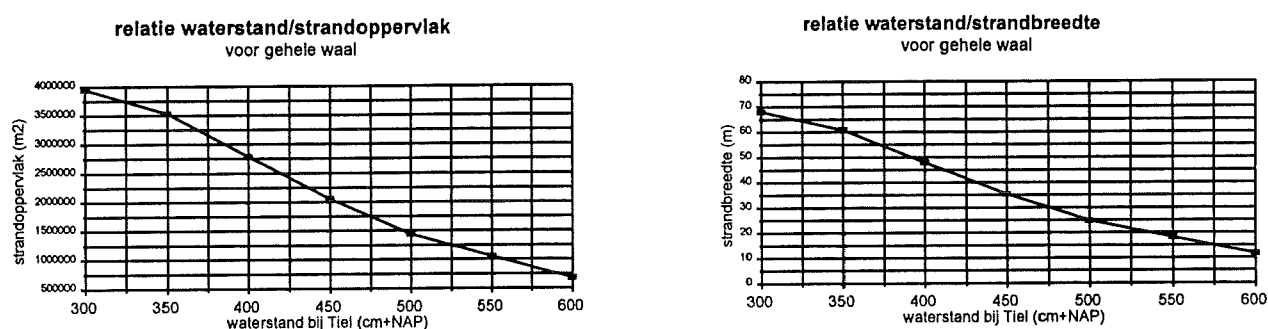
5.4.6.3 Representativiteit kribvakken onderzoeksgebied

De oriëntatie van de vier kribvakken in het onderzoeksgebied komt overeen met de meest voorkomende oriëntatie van kribvakken langs de Waal (oost-west). De vier kribvakken hebben een 'recht' strand, morfometrisch komen ze overeen met het merendeel van de overige kribvakken langs de Waal. Voor de gemiddelde strandbreedte geldt dat de twee kribvakken aan de noordoever een strandbreedte hebben die gemiddeld 10 meter breder is dan de gemiddelde strandbreedte aan de noordoever. Aan de zuidoever is de gemiddelde

strandbreedte van de twee kribvakken 12 meter breder dan de gemiddelde strandbreedte aan de zuidoever.

5.4.6.4 Verband tussen waterstand en strandoppervlak/strandbreedte

Er is aangenomen dat de vier kribvakken in het onderzoeksgebied representatief zijn voor de rest van de kribvakken langs de Waal. De relatie tussen het strandoppervlak en waterstand voor de vier kribvakken in het onderzoeksgebied levert dan, gecombineerd met het totale oppervlak van alle kribvakstranden langs de Waal bij een bekende waterstand, de relatie tussen de waterstand en het gemiddeld oppervlak c.q. breedte van alle kribvakstranden zoals in de figuur 5.4.10 is weergegeven.



Figuur 5.4.10 Verband tussen waterstand en strandoppervlak en tussen waterstand en strandbreedte voor gehele Waal

5.4.6.5 Jaarlijks zandverlies uit kribvakken langs de Waal

Wanneer de potentiële zandtransporten uit tabel 5.4.4 met de jaargemiddelde frequentieverdeling van het windklimaat in het gebied (tabel 5.4.5) worden vermenigvuldigd, wordt de verdeling van het jaarlijkse potentiële zandtransport over twaalf windrichtingen verkregen. Deze verdeling is weergegeven in tabel 5.4.6. Door deze verdeling te combineren met de oriëntaties van de kribvakken, en formule (25) wordt de verdeling van het jaarlijkse potentiële zandtransport verkregen, loodrecht door een denkbeeldige meetraai over de zomerdijk.

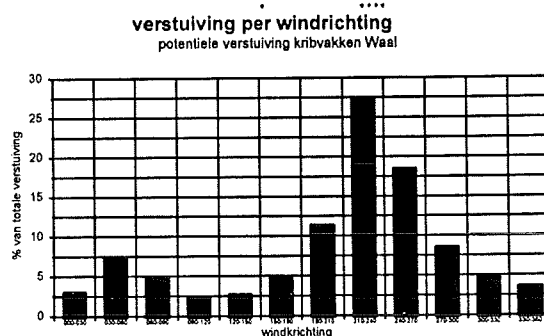
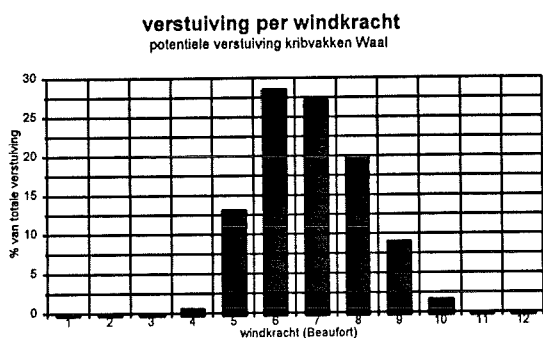
windrichting	potentieel zandtransport (kg/jaar/m)
000-030	376
030-060	1119
060-090	1106
090-120	543
120-150	394
150-180	546
180-210	1386
210-240	4104
240-270	4066
270-300	2019
300-330	698
330-360	417

Deze verdeling is in tabel 5.4.7 voor verschillende windrichtingen weergegeven. Wanneer de oriëntaties van de kribvakstranden worden gecombineerd met de percentages zandtransport bij verschillende windrichtingen blijkt dat 54.0% van het totale zandverlies plaatsvindt uit kribvakken met een oost-west oriëntatie, 22.2% van het zandverlies plaatsvindt uit kribvakken met een oriëntatie in zuidwestelijke richting, en 23.8% van het zandverlies plaatsvindt uit kribvakken met een oriëntatie in noordwestelijke richting. Wanneer de potentiële zandtransporten loodrecht door de meetraai, voor alle windrichtingen worden opgeteld, wordt een jaarlijks eolisch zandverlies verkregen van 9.800 kg/m. Over het traject van Millingen aan de Rijn tot Woudrichem betekent dit een jaarlijks eolisch zandverlies van 195000m³. Voor het strandoppervlak over dit traject betekent dit een jaarlijkse daling van 3.5cm als gevolg van verstuiwing. Wanneer dit eolische zandverlies wordt vergeleken met een jaarlijkse zandvracht van 500.000m³, blijkt dat het eolisch zandtransport een niet verwaarloosbare term is. In figuur 5.4.11 staan percentages van de totale potentiële verstuiwing in kribvakken langs de Waal weergegeven voor verschillende windsterktes en windrichtingen.

Tabel 5.4.6 Jaarlijks zandtransport bij verschillende windrichtingen

windrichting	zandtransport door meetraai op loodrecht (kg/jaar/m)
000-030	304
030-060	736
060-090	495
090-120	227
120-150	268
150-180	469
180-210	1121
210-240	2700
240-270	1818
270-300	845
300-330	474
330-360	359

Tabel 5.4.7 Jaarlijks zandtransport loodrecht door meetraai op



Figuur 5.4.11 Zandverlies uit kribvakken langs de Waal per windsterkte en windrichting

Uit figuur 5.4.11 is af te leiden dat op jaarbasis het zandverlies het grootst is tijdens zuidwestelijke winden met een kracht van 6 à 7.

5.5 Discussie

5.5.1 Windsnelheidsprofiel boven kribvakstrand

Het windsnelheidsprofiel vertoont over het algemeen een exponentiële toename van de windsnelheid met de hoogte (zie figuur 5.4.1 en bijlage 5.1). Doordat de windsnelheden over de meetperioden gemiddeld zijn, valt de variantie in de tijd van de windsnelheden binnen de meetperiode weg. Voor de meetdagen 09/07/'96, 18/09/'96 en 29/10/'96 is een afwijking op een meethoogte van 2m te zien. De windsnelheid op deze hoogte is op deze meetdagen lager dan op gronde van het exponentiële verloop zou worden verwacht. Deze afwijking kan zijn veroorzaakt door de fysieke aanwezigheid van de tui-draden. Door de aanwezigheid van de draden wordt de wind afgeremd, waardoor de anemometers een lagere windsnelheid registreren. De kans op verstoring van de windsnelheid wordt hierbij kleiner met de afstand waarop de tui-draden zich van de anemometers bevinden. De kans op verstoring is het grootst bij de anemometer op 2m hoogte, waar de maximale geschatte fout 0.1m/s bedraagt. De afwijkingen kunnen ook het gevolg zijn van de relatief grote afstand tussen het strandoppervlak en de hoogte waarop gemeten wordt. Het exponentiële verloop van het windsnelheidsprofiel ontstaat door bodemwrijving (figuur 5.2.1) en is dicht bij het strandoppervlak dus het best waarneembaar. Afwijkingen van de windsnelheid op 10m kunnen zijn veroorzaakt door de lokatie waarop deze windsnelheid gemeten is. De windsnelheid en -richtingmeter heeft gedurende de gehele meetperiode op een vaste lokatie op 10m hoogte boven het maaiveld gemeten. De aanwezigheid van bebouwing en begroeiing kan tevens een fout veroorzaken in de windsnelheid en -richting. Door de bebouwing en begroeiing wordt de wind afgeremd en wordt de windrichting veranderd door zuiging. De maximale fout in de windsnelheid wordt geschat op 1m/s, de maximale fout in de windrichting op 30°.

5.5.2 Vochtgehalte kribvakstrand

De hogere vochtgehaltenes op de meetdagen 12/09/'96, 29/10/'96 en 28/03/'97 zijn veroorzaakt door regenval op die meetdagen. De bepaling van het vochtgehalte is sterk afhankelijk is van de lokaties waar de 10 afzonderlijke monsters worden gestoken. Zelfs wanneer de monsters rond de anemometeropstelling gestoken worden, treden kleine lokale verschillen in vochtgehalte op, op lokaties die enkele meters van elkaar verschillen. Deze verschillen worden veroorzaakt door factoren als korrelgrootte, strijkrichting van de wind, en het vochtgehalte van de ondergrond. Een andere factor die van invloed is op het vochtgehalte, is de tijd die tussen het steken en het wegen van de monsters zit. In de meeste gevallen is dit ongeveer 1 tot 1½ uur, het is echter ook voorgekomen dat de monsters zo'n 18 uur nadat ze gestoken zijn, zijn gewogen. De zandmonsters van meetdag 09/07/'96 zijn 48 uur nadat ze gestoken zijn gewogen. Door grote tijdsverschillen tussen het steken en wegen van de zandmonsters, is het vochtgehalte lager berekend dan in feite het geval is. De maximaal geschatte fout hierin bedraagt 5% van het vochtgehalte.

5.5.3 Gemeten zandtransport

Het salterend zandtransport op 0.1 m hoogte is geregistreerd door de saltifoon. Het meten van zandtransport met behulp van een acoustische meter wijkt af van methoden met zandvangsers. De saltifoon onderscheidt zich van deze methoden doordat de saltifoon precies kan registreren wanneer over een bepaald tijdsinterval een hoeveelheid zandtransport plaatsvindt, terwijl met

zandvangersons alleen kan worden bepaald hoeveel zandtransport er geïntegreerd over dat tijdsinterval heeft plaatsgevonden. Nadeel van de saltifoon is dat de microfoon onder vochtige omstandigheden dichtslibt met natte zandkorrels, zodat er geen saltatieflux meer gemeten wordt. Door regelmatige controle van de microfoon kan dit probleem worden opgelost. Wanneer de saltatieflux wordt vergeleken met de hoeveelheden ingevangen zand (figuur 5.4.4), blijkt dat er een duidelijk verband bestaat tussen de hoeveelheid zandtransport gemeten met behulp van de twee verschillende methoden. De hoeveelheid zand die op verschillende hoogten is ingevangen, vertoont over het algemeen een exponentiële afname met de hoogte (zie figuur 5.4.5 en bijlage 5.3). De hoeveelheden zand, zoals ingevangen door de verschillende zandvangersons, vertonen verschillen op dagen waarop weinig zandtransport heeft opgetreden (bijvoorbeeld meetdag 02/07/'96). Het zandtransport op deze dag is bepaald door windvlagen (zie bijlage 5.2), hierdoor verstuijft het zand op sommige, drogere lokaties op het kribvakstrand wel en op andere, nattere lokaties niet. Hierdoor kunnen de verschillen tussen de zandvangersons op verschillende lokaties worden verklaard. Wanneer de ingevangen hoeveelheden zand volgens formule (27) worden gecorrigeerd voor de efficiëntie van de zandvangersons worden de hoeveelheden sterk vergroot. Deze vergroting brengt een vergroting van onzekerheden met zich mee. De lage efficiëntie van de zandvangersons is in dit opzicht een nadeel. De fout die bij de correctie voor efficiëntie optreedt wordt geschat op maximaal 5% van de gecorrigeerde hoeveelheid ingevangen zand. Uit figuur 5.4.4 blijkt dat de efficiënties voor de verschillende windcondities verhoudingsgewijs redelijk kloppen, anders zou de relatie tussen saltatieflux en ingevangen hoeveelheid zand niet lineair zijn. De windkracht waarbij is gemeten varieert van windkracht 4 tot en met windkracht 6. Voor een meer nauwkeurige voorspelling van het zandtransport in kribvakken zouden meer metingen tijdens hogere windsterkten (windkracht 7 tot 10) moeten worden verricht.

5.5.4 Berekend zandtransport

Voor de volgens formule (21),(22),(23), en (24) berekende potentiële zandtransporten geldt dat de berekende zandtransporten een overschatting laten zien ten opzichte van de gemeten zandtransporten (zie figuur 5.4.6). Wanneer de potentiële zandtransporten worden gecorrigeerd voor strijklengte en vochtgehalte, neemt de overschatting ten opzichte van de gemeten zandtransporten af. De correctie voor het vochtgehalte volgens formule (12) heeft zeer grote invloed heeft op de uitkomsten. Een relatief kleine verandering van het vochtgehalte veroorzaakt een relatief grote verandering van het berekende potentiële zandtransport. Om deze reden is ervoor gekozen de berekende zandtransporten niet te corrigeren voor het vochtgehalte. Van de potentiële zandtransporten die niet zijn gecorrigeerd voor vochtgehalte, blijkt dat de zandtransporten berekend met formule (24) van White de kleinste overschatting laat zien ten opzichte van de gemeten zandtransporten. Bovendien gaat de lineair getrokken trendlijn door de oorsprong, waardoor de calibratie voor veldmetingen volgens formule (29) toegepast mag worden. Op deze manier kunnen potentiële zandtransporten op kribvakstranden in kg/s/m berekend worden. De grote van de zandtransporten wordt hoofdzakelijk bepaald door de factoren windsnelheid, strijklengte en bodemruwheid. Wanneer deze factoren goed bepaald zijn kan met (24), (26) en (29) een goede schatting worden gemaakt van het potentiële zandtransport in kg/s/m.

5.5.5 Langperiodisch windklimaat

Bij de vergelijking tussen het windklimaat in De Bilt en in het meetgebied is gekeken naar, op gehele getallen afgeronde, uurgemiddelde waarden. Hierdoor is niet bekend hoe de

5.6 Conclusies

De conclusies met betrekking tot de gestelde hypothesen zijn:

1. De grootte van het eolisch zandtransport kan worden gerelateerd aan windsterkte en windrichting. Uit deze relatie kan een temporele variatie in het eolisch zandtransport worden afgeleid zoals in figuur 5.11 is aangegeven. Hieruit blijkt dat op jaarbasis het grootste deel van het zand op kribvakstranden verstuift tijdens zuidwestelijke winden met een kracht van 6 à 7 Beaufort.
2. De grootte van het eolisch zandtransport kan worden gerelateerd aan de oriëntatie van kribvakstranden. Uit deze relatie kan een ruimtelijke variatie van het eolisch zandtransport op jaarbasis worden afgeleid waarvoor geldt dat 54.0% van het totale zandverlies plaatsvindt uit kribvakken met een oost-west oriëntatie, 22.2% van het zandverlies plaatsvindt uit kribvakken met een oriëntatie in zuidwestelijke richting, en 23.8% van het zandverlies plaatsvindt uit kribvakken met een oriëntatie in noordwestelijke richting.
3. Het eolisch zandtransport uit kribvakken langs de Waal kan vrij nauwkeurigheid worden ingeschat op basis van metingen in enkele kribvakken onder een selectie van windcondities. De nauwkeurigheid hangt het sterkst af van de keuze van representatieve gemiddelde waarden voor de factoren windsnelheid, windrichting, strijklengte, en bodemruwheid.
4. Eolisch zandtransport is voor de zandbalans van kribvakken op jaarbasis een belangrijke term.

5.7 Aanbevelingen

Het veldonderzoek is verricht van juni 1996 tot april 1997. In deze periode heerste een relatief rustig windklimaat. In het najaar zijn de stormen uitgebleven. Hieruit vloeit een aanbeveling van dit onderzoek voort: een monitoring programma dat op een aantal lokaties langs de Waal het eolisch zandtransport over de seizoenen een aantal jaren volgt. Hierbij moet het windklimaat op meerdere lokaties langs de Waal gemeten worden en moet in meerdere kribvakken korrelgrootte-monsters genomen worden. Bovendien moet de morfometrie van kribvakken op meerdere lokaties langs de Waal bepaald worden. Om het berekende zandverlies te controleren is het aan te bevelen in een aantal kribvakken de bodemdaling in het kribvak te meten met behulp van erosiepinnen.

5.8 Literatuur

- Adriani, M.J. & Terwindt, J.H.J. (1974) Sand stabilization and dune building. Rijkswaterstaat communications 19, 68 pp
- Arens, S.M. & Lee, G.E.M. van der (1995) Saltation sandtraps for the measurement of aeolian transport into the foredunes. *Soil Technology*, 61-74
- Bagnold, R.A. (1941) *The physics of blown sand and desert dunes*. Methuen and co, London, 265 pp
- Carter, R.W.G. (1977) The rate and pattern of sediment interchange between beach and dune. In *Proc. Symposium on Coastal Sedimentology*, 3-34
- Chepil, W.S. & Woodruff, ? (1963) The physics of wind erosion and its control. *Advances in Agronomy* 15, 211-301
- Davidson-Arnott, R.G.D. & Law, M.N. (1990) Seasonal patterns and controls on sediment supply to coastal foredunes, Long Point, Lake Erie. *Coastal Dunes: Form and Process*, John Wiley, Chichester, 17-37
- Goldsmith, V., Rosen, P. & Gertner, Y. (1990) Eolian transport measurements, winds, and comparison with theoretical transport on Israeli coastal dunes. *Coastal Dunes: Form and Process*, John Wiley, Chichester, 177-200
- Horikawa, K., Hotta, S., Kubota, S., & Katori, S. (1983) On the sand transport rate by wind on beach. *Coastal Engineering in Japan*, 26, 100-120
- Horikawa, K. & Shen, H.W. (1960) Sand movement by wind. *Trans. Am. Geoph. Union*, 38, 171-174
- Hotta, S., Kubota, S., Katori, S. & Horikawa, K. (1984) Sand movement by wind on a wet sand surface. *Coastal Engineering*, 1265-1280
- Kawamura, R. (1951) Study on sand movement by wind. *Rep. Inst. Sci. Technol. Univ.*, Tokyo. 5, 58 pp
- Kroon, A. & Hoekstra, P. (1990) Eolian sand transport on a natural beach. *Journal of coastal Research* 6, 367-379
- Lettau, K. & Lettau H. (1977) Experimental and micro-meteorological field studies of dune migration. *Exploring the world's driest climate*. University of Wisconsin Press, Madison ??
- Nordstrom, K.F. & Jackson, N.L. (1993) The role of wind direction in eolian transport on a narrow sandy beach. *Earth Surf. Proc. and Landforms* 18, 675-685
- Rijn, L.C. van (1993) Principles of sediment transport in rivers, estuaries, coastal seas. Aqua publications, Oldemarkt, Amsterdam, 3.1-3.16
- Sarre, R.D. (1988) The morphological significance of vegetation and relief on coastal foredune processes. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband*, ??
- Sherman, D.J. & Hotta, S. (1990) Aeolian sediment transport: theory and measurement. *Coastal Dunes: Form and Process*, John Wiley, Chichester, 17-37
- Svasek, J.N. & Terwindt, J.H.J. (1974) Measurements of sand transport by wind on a natural beach. *Sedimentology* 21, 311-322
- White, B.R. (1979) Soil transport by winds on Mars. *J. Geophys. Res.* 84, 4643-4651

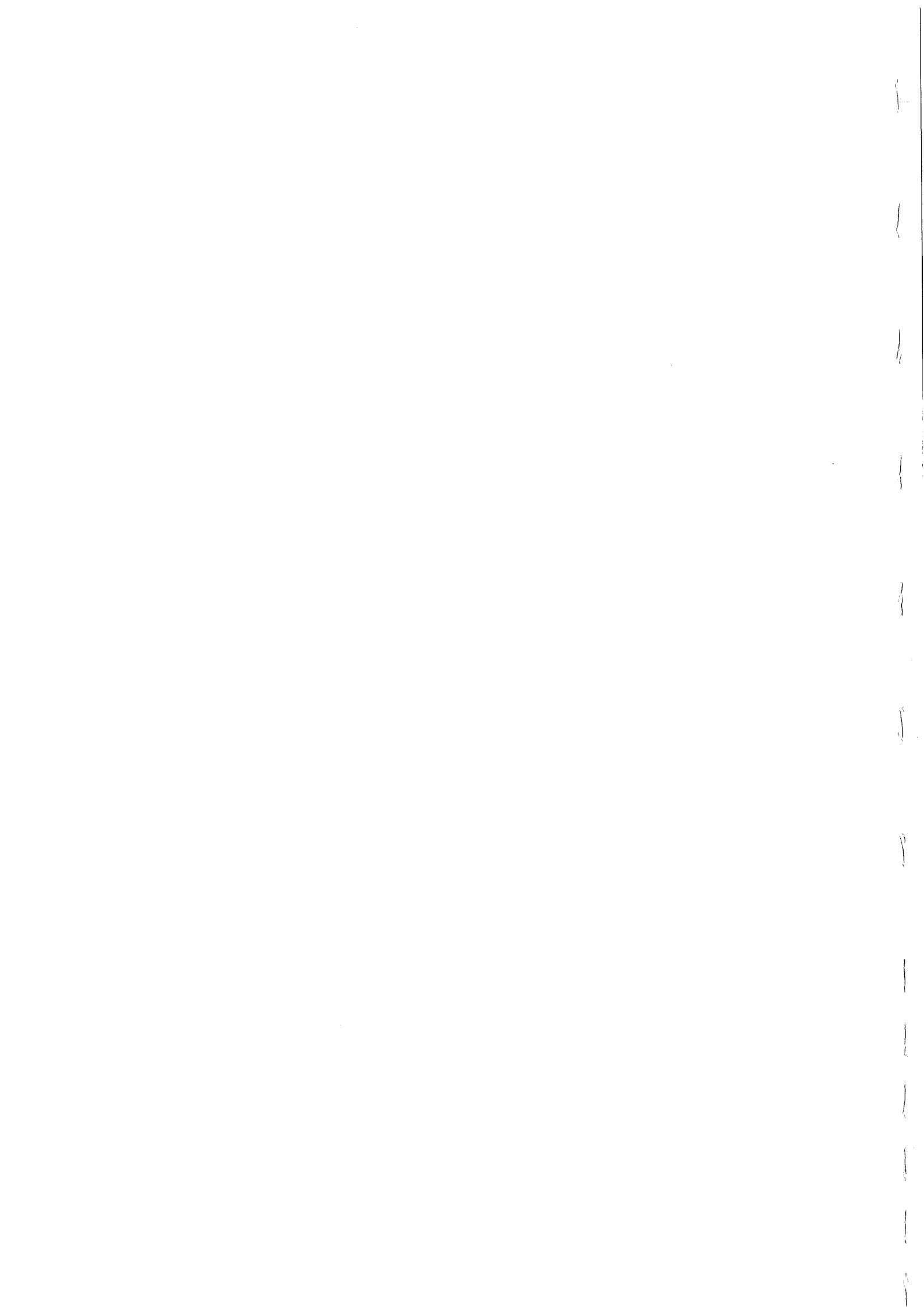
6 Algemene conclusies

Scheepspassages veroorzaken erosie van de kribvakbodem. De opgewekte hydraulische belasting tijdens een scheepspassage heeft tot gevolg dat de bodemschuifspanning de kritieke bodemschuifspanning overschrijdt. Dit houdt in dat er tijdens scheepspassages sediment opgewoeld wordt in het kribvak. Stroomsnelheden in het kribvak nemen gemiddeld toe tijdens scheepspassages. Een toename in de hoeveelheid opgewoeld sediment en een toename in de stroomsnelheden impliceren een toename in het bodemtransport. Het aandeel van de secundaire scheepsgolven in de totale bodemschuifspanning is 28,1%.

Het stromingspatroon in een kribvak wordt gedomineerd door een of twee circulatiecellen. Hierbij stroomt water vanuit de rivier het kribvak binnen en woelt hier sediment op, om het kribvak aan de bovenstroomse zijde te verlaten. De toename van het sedimenttransport in het kribvak tijdens scheepspassages heeft dus tot gevolg dat meer sediment het kribvak verlaat.

De relatie tussen de gemeten fysische parameters in het kribvak, de stroomsnelheid en de sedimentconcentratie, en de kenmerken van passerende schepen, zoals vaarsnelheid, grootte, en vaarrichting, is niet eenduidig. Deze slechte correlatie is het gevolg van interferentie van de primaire scheepsgolven met een bestaand golfklimaat op de Waal. Door deze interferentie kan de primaire scheepsgolf zowel verzwakt als versterkt worden.

Boven de waterlijn worden de fijnere fracties van het sediment door eolische processen weggevoerd. De grootte van het eolisch zandtransport in kribvakken langs de Waal kan worden gerelateerd aan windsterkte, windrichting en oriëntatie van de kribvakken. Hieruit blijkt dat op jaarbasis het grootste deel van het zand uit kribvakken verstuift tijdens zuidwestelijke winden met een kracht van 6 à 7. De totale verstuiving op jaarbasis bedraagt 195000m^3 voor de kribvakken over het traject van Millingen aan de Rijn tot Woudrichem. Dit komt overeen met een jaarlijkse bodemdaling van 3.5 cm.



Bijlagen hoofdstuk 2

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

Bijlage 2.1

Calibratie procedure OBS miniframes

Inleiding

De OBS registreert de troebelheid van het water, en zendt dit om in een stroomsignaal. Door calibratie met een regressielijn wordt dit stroomsignaal omgezet in een zandconcentratie. Om de kwaliteit van de calibratie te controleren zijn tijdens de metingen watermonsters genomen, waarvan door filtering de slib- en zandconcentratie bepaald zijn. Deze watermonsters zijn via een ca. 10 m lang slangetje opgezogen. Het mondstuk van dit slangetje was naast de OBS geplaatst. De watermonsters zijn gedurende een halve minuut opgezogen.

Probleem

De calibratie van de OBS is in eerste instantie gedaan met de regressielijn welke is gemeten door het laboratorium van de vakgroep Fysische Geografie, Universiteit Utrecht (lab FG). Zie hiervoor fig. 1. Voor het opstellen van deze regressie is zand uit de kribvakbodem gebruikt. Dit is in een goot, waarin de OBS is geplaatst, in beweging gebracht. Door variatie van de stroomsnelheid, en zo de zandconcentratie, kan een regressielijn worden opgesteld. Aangezien het sediment aan de Noord- en Zuidoever van elkaar verschilt is per oever een regressielijn opgesteld. De concentraties berekend met deze regressielijnen hebben een basis zandconcentratie van 300 mg/l met pieken tot 1000 mg/l. Zie fig. 5. Voor een kribvak met stroomsnelheden van maximaal 0.5 m/s is dit te hoog.

Daarnaast zijn in de watermonsters maximale zandconcentraties van 50 mg/l aangetroffen.

Voor deze verschillen zijn een aantal redenen aan te wijzen

1) De zandconcentraties in de watermonsters zijn te laag.

Deze concentraties zijn namelijk over een halve minuut gemiddeld. De hoge concentraties komen echter in veel kortere periodes voor, tijdens de enkele seconden van zeer hoge stroomsnelheden tijdens een scheepspassage.

Ook is het mogelijk dat de stroomsnelheid in het opzuig slangetje te laag zijn om de "zware" zandkorrels op te zuigen. Volgens Bosman et al (1987) moet de opzuigsnelheid in multidirectionele, niet-stationaire stromingscondities gelijk zijn aan drie keer de stroomsnelheid. De opzuigsnelheid zou dus gelijk moeten zijn aan 1,5 m/s. De opzuigsnelheid varieert tussen de 0.6 en 1.2 l/min. Het zuigslangetje had een diameter van 6 mm, maar is later vervangen door een slangetje van 3 mm. De opzuigsnelheid in het slangetje varieerde dus tussen de 0.35-0.71 m/s (6mm) en 1.41-2.83 m/s (3 mm).

De snelheden in het slangetje met een diameter van 3 mm zouden dus hoog genoeg moeten zijn. De concentraties van de monsters opgezogen met het 3 mm slangetje verschillen echter niet significant van die van het 6 mm slangetje.

2) De zandconcentraties volgens de lab FG ijking zijn te hoog.

De voornaamste reden hiervoor is dat voor de ijking procedure kraanwater is gebruikt. In het water van de Waal komt echter veel zwevend slib voor (wash load). Aangezien de OBS zeer gevoelig is voor slib levert dit een overschatting van de zandconcentratie op.

De ijking zelf heeft echter een correlatie coëfficiënt van 0.993.

Regressies watermonsters

Met de watermonsters zijn een aantal regressies uitgevoerd door het stroomsignaal van de OBS te middelen over de periode dat de watermonsters genomen zijn. Dit stroomsignaal in mv wordt uitgezet tegen de gemeten slibconcentratie, de gemeten zandconcentratie en de zand- en slibconcentratie opgeteld. Dit wordt per miniframe gedaan.

De regressies zijn op een aantal ruimtelijke schalen uitgevoerd, om aan de hand van correlatie coëfficiënten te bepalen binnen welke schaal de correlatie het grootst is en dus het meest geschikt voor de calibratie. Deze schalen zijn als volgt: de gegevens uit de hele meetcampagne, per oever en per kribvak. Dit leverde de volgende resultaten op:

- Zoals bij 1) al uitgelegd is er geen correlatie tussen de zandconcentratie en het stroomsignaal. Zie fig. 2.
- De correlatie coëfficiënten van de regressielijnen van de slibconcentratie per kribvak zijn te laag door het geringe aantal meetpunten, hiermee kan dus geen calibratie worden uitgevoerd. De correlatie coëfficiënten van de regressielijnen over de hele meetcampagne zijn het hoogst vanwege het hoge aantal datapunten. Er moet dus aangenomen worden dat de toename van de slibconcentratie met de stroomsnelheid over de hele meetcampagne constant is.

Calibratie

De conclusie die hieruit getrokken kan worden is dat de gemeten zandconcentraties totaal onbruikbaar zijn. De meest correcte methode zou nu zijn om de slib regressie lijn af te trekken van de regressie lijn van het lab FG. De offset is echter nog steeds te groot. Bij zeer lage stroomsnelheden zou er nog steeds een onrealistisch groot zandtransport zijn. Hierdoor is uitgeweken naar een methode om de offset aan de hand van het stroomsignaal in mv te bepalen. (zie fig. 4) Aangenomen wordt dat bij de laagste stroomsignalen geen zandtransport optreedt. Het stroomsignaal van de OBS is nu het gevolg van slibdeeltjes in het water. Deze aanname wordt gesteund door de beelden welke de onderwatercamera opleverde; bij het uitblijven van schepen werden nauwelijks bewegende zandkorrels waargenomen. De offset (in mv) is daarom visueel vastgesteld door een lijn te construeren waar de 95 - 99% van de burstwaarden boven ligt. Uitschieters naar beneden die hierdoor een negatieve zandconcentratie gekregen hebben zijn later gelijk gesteld aan 0. Deze offset is voor elke meetburst apart vastgesteld, omdat de slib/ zand concentratie door tijd en plaats verschillen. Het zwevend slib gehalte in de Waal kan gedurende de meetcampagne toe- of afnemen, of het sediment van de ene kribvakbodem bevat meer slib dan de andere kribvakbodem. De offset van de regressielijn van het lab FG en de offset van de regressielijn van de slibcorrectie zijn dus niet meer gebruikt. Vervolgens is de regressie coëfficiënt C1 bepaald. Uit fig. 3 blijkt dat de slib concentraties toenemen met een toename in het mv signaal. De meest voor de hand liggende oplossing is dus de regressie coëfficiënt van de slib regressie af te trekken van de regressie coëfficiënt van de ijking lab FG. De afname van de zandconcentratie door deze slibregressie is echter maar een paar procent. Hierna is de regressie constante C0 berekend uit de offset en C1. In formulevorm is dit als volgt:

$$\begin{aligned} [\text{conc}] &= C1 * mv + C0 \\ C1 &= C1_{(\text{lab})} - C1_{(\text{slib})} \\ C0 &= -C1 * \text{offset} \end{aligned}$$

Per burst is op deze wijze een regressielijn opgesteld. Het resultaat van een voorbeeld van zo'n calibratie is weergegeven in fig. 6.

Nauwkeurigheid OBS signaal

Er zijn een aantal factoren waardoor fouten kunnen optreden in het OBS signaal. Fouten ten gevolge van de calibratie zijn de volgende:

- fouten in de aflezing van de offset
- fout in de slibregressie
- fout in de regressie lab FG

Het basis signaal van de concentratie schommelt tussen de 0 en 150 mg. Een fout in de vaststelling van de basisconcentratie zou op kunnen lopen tot 50 mg. De fout in de slibregressie bestaat uit een fout tijdens het filteren van de monsters en uit de spreiding van de monsters in de regressie. De filterfout wordt geschat op $\pm 10\%$. De r^2 van de slibregressie is 0.67, dus 67% van de variantie in de slibconcentratie wordt verklaard door het OBS signaal. Hierdoor is de fout in de variantie 33%, wat neerkomt op een standaarddeviatie van $\pm 6\%$. De totale fout in de slibconcentratie is dus $\pm 11,5\%$. De r^2 van de regressie van het lab FG is 0.993, waarmee de fout van deze regressie verwaarloosbaar is. De OBS is echter sterk afhankelijk van de korrelgrootte van het sediment. Dit sediment kan op de verschillende plaatsen in het kribvak sterk verschillen. Een grove schatting van deze fout is $\pm 10\%$

De totale fout ten gevolge van de calibratie komt hierdoor neer op $\pm 15\% \pm 50\text{mg}$. De relatieve fout neemt dus af naarmate de concentratie hoger wordt. Bij een concentratie van 30 mg is de fout $\pm (50 + 0.15 * 30 = 54.5 \text{ mg})$. De concentratie valt dus binnen de foutenmarge, waardoor weinig conclusies aan een dergelijk signaal te verbinden zijn. Bij een zandconcentratie van 200 mg is de fout $\pm (50 + 0.15 * 200 = 80 \text{ mg})$.

Tenslotte moet rekening gehouden worden met fouten welke niet aan de calibratie zijn te wijten, namelijk door het water meegevoerde onzuiverheden zoals blaadjes e.d. Ook vissen kunnen makkelijk voor een verstoring van het signaal zorgen.

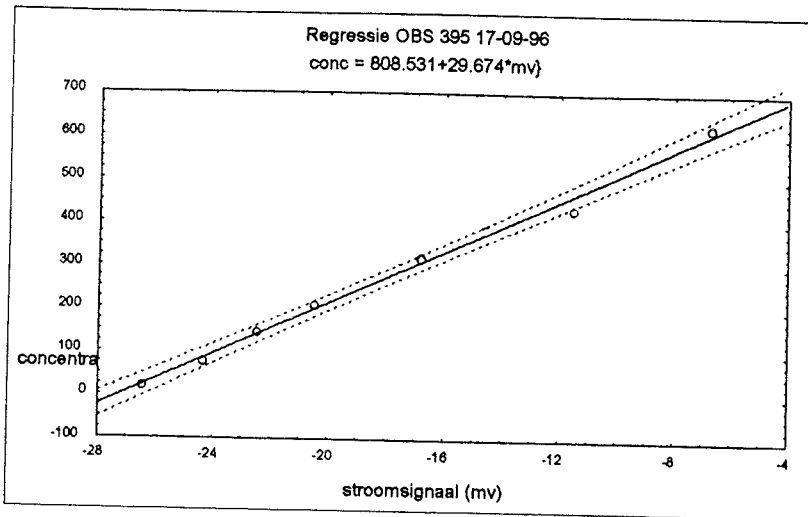


Fig. 1. Regressie zandconcentratie mfl zuidoever, $R^2 = 0.993$

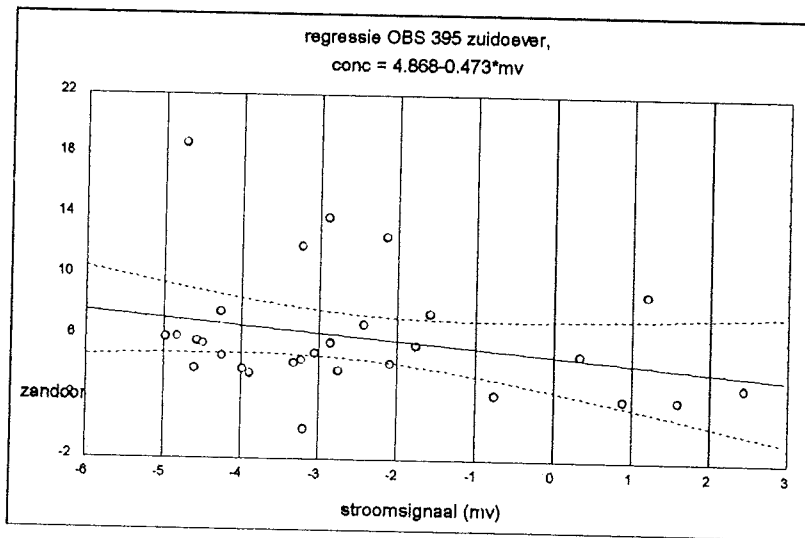


Fig. 2. Regressie zandconcentratie mfl zuidoever, $R^2 = 0.06$

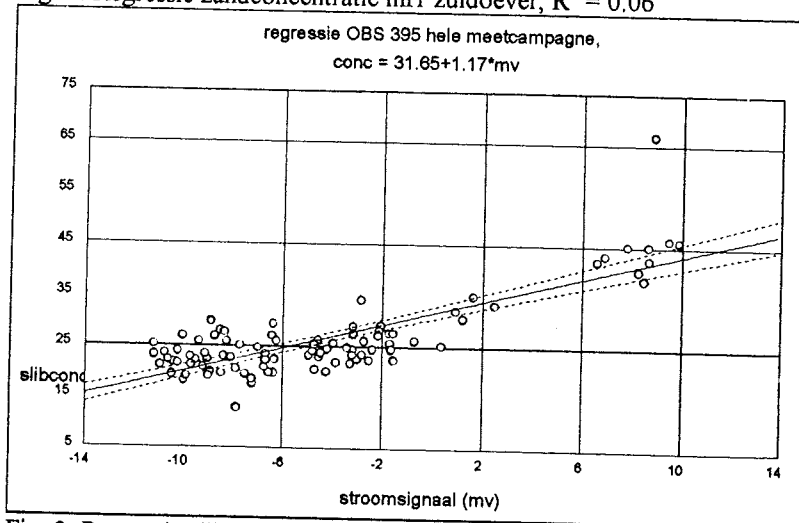


Fig. 3. Regressie slibconcentratie mfl hele meetcampagne, $R^2 = 0.67$

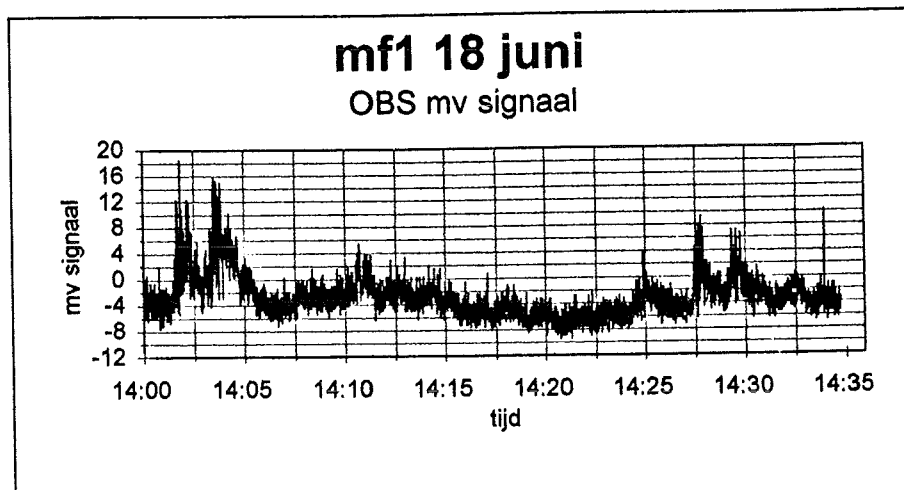


fig. 4 Voorbeeld van ongeijkt OBS signaal.

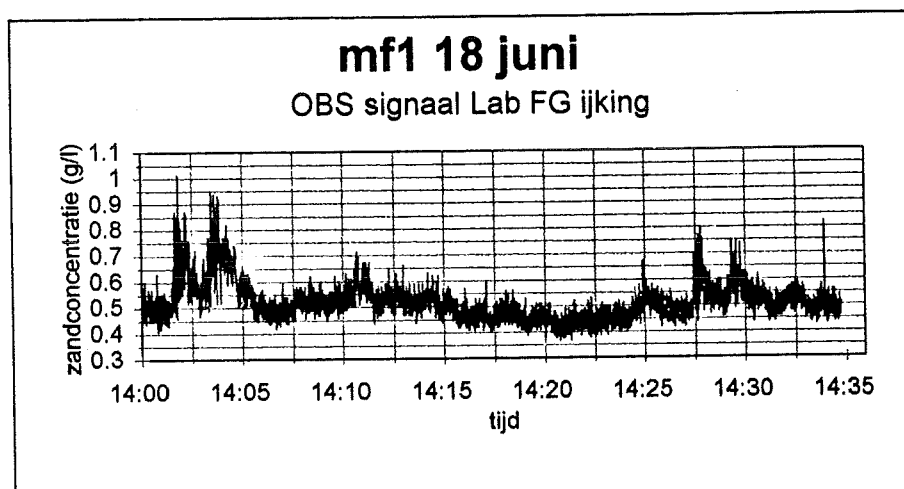


fig.5 Voorbeeld van de zandconcentratie na ijking met de ijklijn uit het laboratorium Fysische Geografie

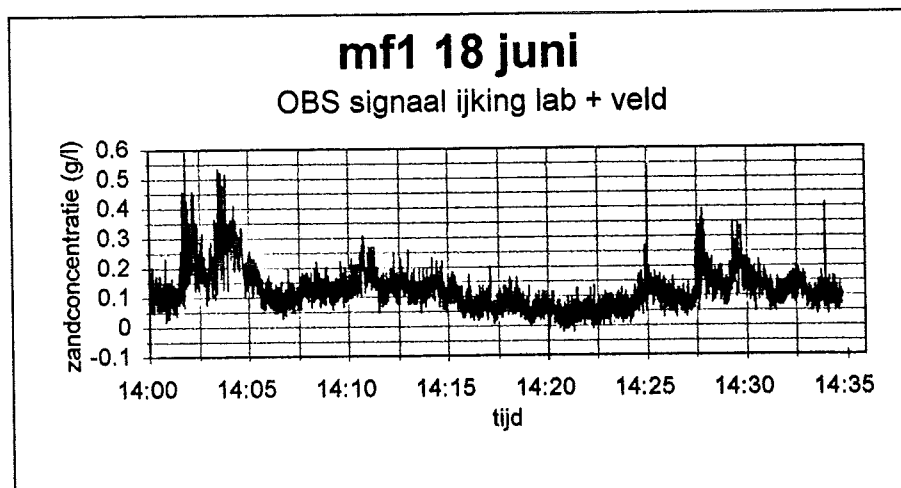


fig. 6 Voorbeeld van de zandconcentratie na ijking met de ijklijn uit het laboratorium Fysische Geografie, ijklijn bepaald uit de slibmonsters, en visuele vaststelling van de offset.

Bijlage 2.2

Interpolatie methoden: geostatistiek

Voor het kribvakonderzoek zijn 3 datasets met hoogtegegevens verzameld: 1 dataset met lodingen van een deel van het kribvak tot aan de rivieras, en 2 sets met waterpasdata van het kribvak zelf maar gemeten in april en juni. Het uitgangspunt is het maken van een verschilkaart van het kribvakstrand waaruit morfologische veranderingen over de periode april - juni blijken, en van een kaart waarin de waterpasdata uit de maand juni gekoppeld worden aan de lodingen.

Constructie verschilkaart

De hoogtegegevens liggen op een onregelmatig grid met een onderlinge afstand van 5 tot 10 m. Aangezien de data in een grid liggen en er geen abrupte overgangen plaatsvinden zal kriging de beste resultaten opleveren. Kriging is een geostatistische interpolatie methode waarbij wordt uitgegaan van de regionalised variable theorie:

$$Z = m_{(x)} + \varepsilon'_{(x)} + \varepsilon'' \quad \text{waarbij}$$

$m_{(x)}$	=	structurele component van Z op plaats x.
$\varepsilon'_{(x)}$	=	stochastisch, lokaal variërend maar ruimtelijk afhankelijk residu van x
ε''	=	ruis

Intrinsieke hypothese voor de regionalised variable theorie:

- verschillen zijn stationair.
- verschilvariantie is stationair.

⇒ Wanneer structurele effecten bekend zijn, is de rest v/d variantie homogeen ⇒ verschillen tussen punten is functie van afstand. Deze functie wordt weergegeven door het variogram model. Hierbij wordt van alle datapunten op een stapsgewijs steeds groter wordende afstand (lags) de semivariantie ($\gamma(h)$) berekent. De semivariantie is een maat voor de samenhang: in hoeverre dragen de datapunten bij aan de totale verklaarde variantie in het te interpoleren punt. Ideaal gezien wordt de variantie vooral bepaald door punten op een korte afstand, en nauwelijks door verafgelegen punten. De semivariantie wordt tegen de afstand geplot, en aan de hand van deze plot wordt een variogram model opgesteld. Dit model is opgebouwd uit drie componenten: (zie fig 1)

sill = geen ruimtelijke afhankelijkheid (semivariantie neemt niet meer toe met de afstand).

range = afstand waarover de semivariantie toeneemt met de afstand.

nugget = residuvariantie van -meetfouten

-ruimtelijke variantie over afstanden veel korter dan de sample afstand.

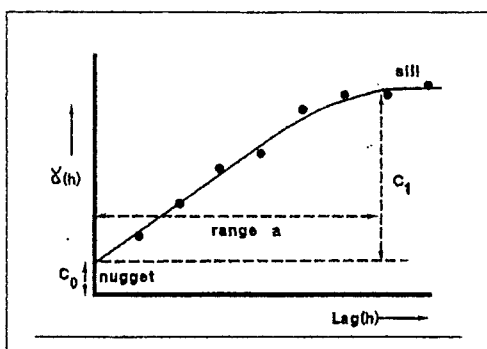


Fig 1 Voorbeeld van een semivariogram

Met het variogrammodel wordt de interpolatie uitgevoerd. Dit model doorsnijdt de originele datapunten niet, lokale extremen worden weggemiddeld. Interpolatie is uitgevoerd met de GSTAT module van PCRaster.

Voor de waterpasdata levert Ordinary Point Kriging met een range van 50 tot 100 m, en een sferisch/lineair model de beste resultaten op. Aangezien bij interpolaties fouten kunnen optreden door randeffecten, is er geen interpolatie uitgevoerd op punten die verder dan 20 m van datapunten liggen. De interpolatie is uitgevoerd voor de kribvakdata van april en juni. Waar de interpolaties elkaar overlappen is een verschilkaart berekend.

Constructie totaalkaart

Het meetnet van de lodingen is op basis van raaien: meetpunten op een raai hebben een onderlinge afstand van 1 m, de raaien liggen op een afstand van 10 m van elkaar, terwijl kriging uitgaat van een bijna regelmatig grid. Het gevolg is dat het variogrammodel een slingerbeweging vertoont; de semivariantie neemt toe wanneer de zoekstraal een raai kruist, maar neemt vervolgens weer af. Daarnaast zijn de bodemvormen unidirectioneel, gevormd door de rivierstroming. Hierdoor is het noodzakelijk het kriging model een grain mee te geven (zoekstraal met een voorkeursrichting) waardoor een langwerpige extreme vorm zoals de ontgrondingskuil bij de kribkop niet wordt weggemiddeld. Een andere mogelijkheid is interpolatie met het programma IPLOD, ontwikkeld door L Hazelhoff. Dit is een vorm van Inverse Distance interpolatie. Het is ontwikkeld voor rivierlodingen, en interpoleert dus in een voorkeursrichting. Ook doorsnijdt dit model de originele datapunten. Welke methode de beste resultaten oplevert is onderzocht door middel van validatie. Hierbij wordt de originele dataset gesplitst in een interpolatieset en een validatieset. Met de interpolatieset wordt de interpolatie uitgevoerd. Vervolgens worden op de posities van de validatie punten de verschillen berekend tussen de hoogte van de validatieset en de geïnterpoleerde hoogte. Het gemiddelde en de standaarddeviatie van de verschillen is een maat voor de kwaliteit van de interpolatie; beiden dienen zo laag mogelijk te zijn. Uit de validatie is gebleken dat de interpolatie met het programma IPLOD de betere resultaten oplevert. Deze resultaten worden vervolgens aan de kriging kaarten van de kribvakken gekoppeld. Bij kribvak 1 t/m 3 overlappen de kaarten elkaar. Data op deze overlap is lineair gemiddeld. Bij kribvak 4 is er geen overlap tussen de lodingen en de waterpasdata. Op het deel zonder data is een extrapolatie tussen de waterpasdata en de lodingen noodzakelijk.

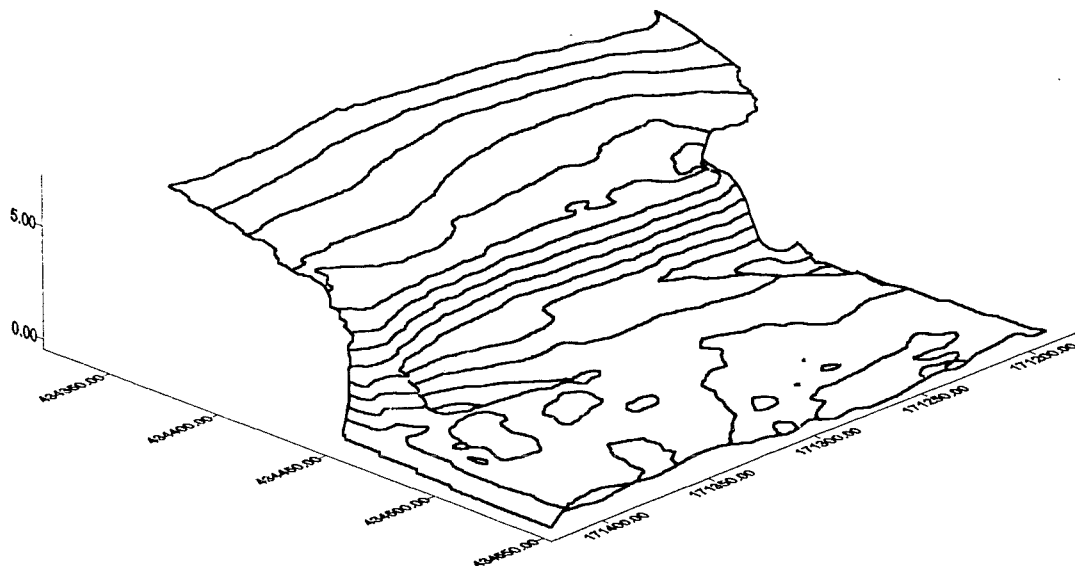
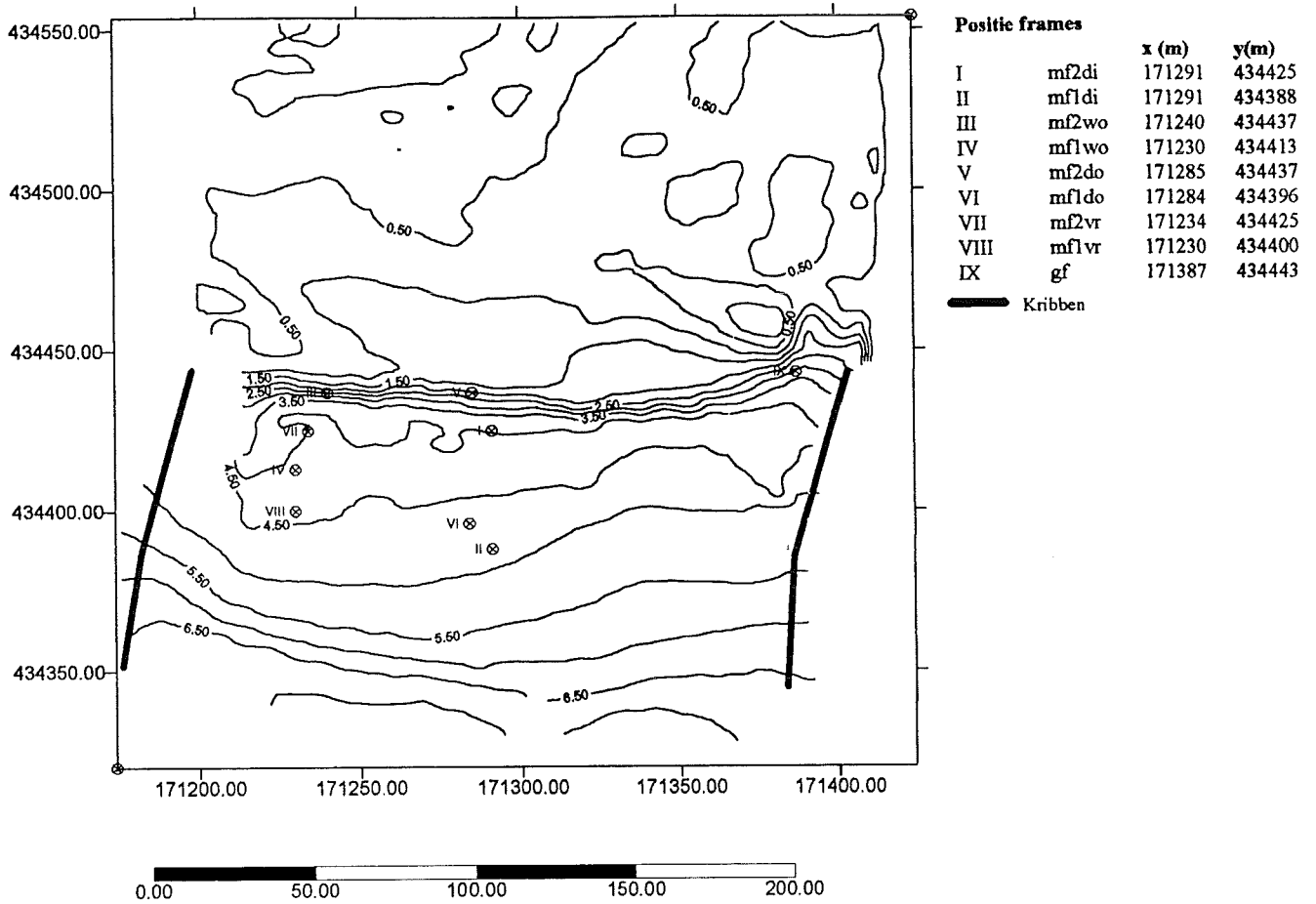
Bijlagen hoofdstuk 3



Bijlage 3.1

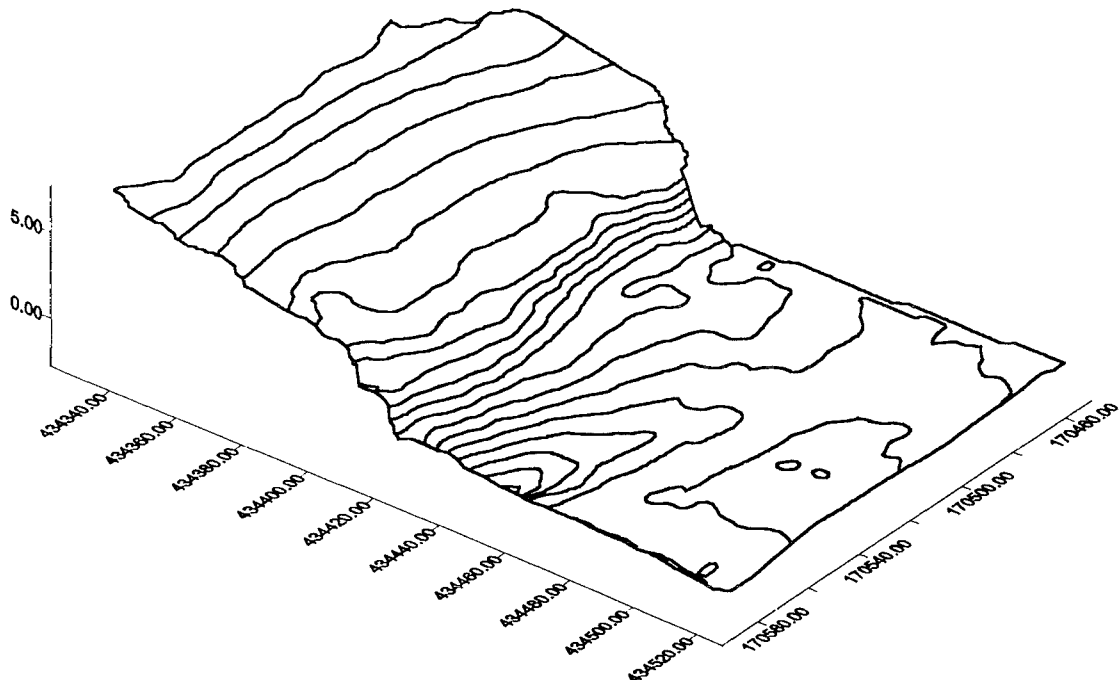
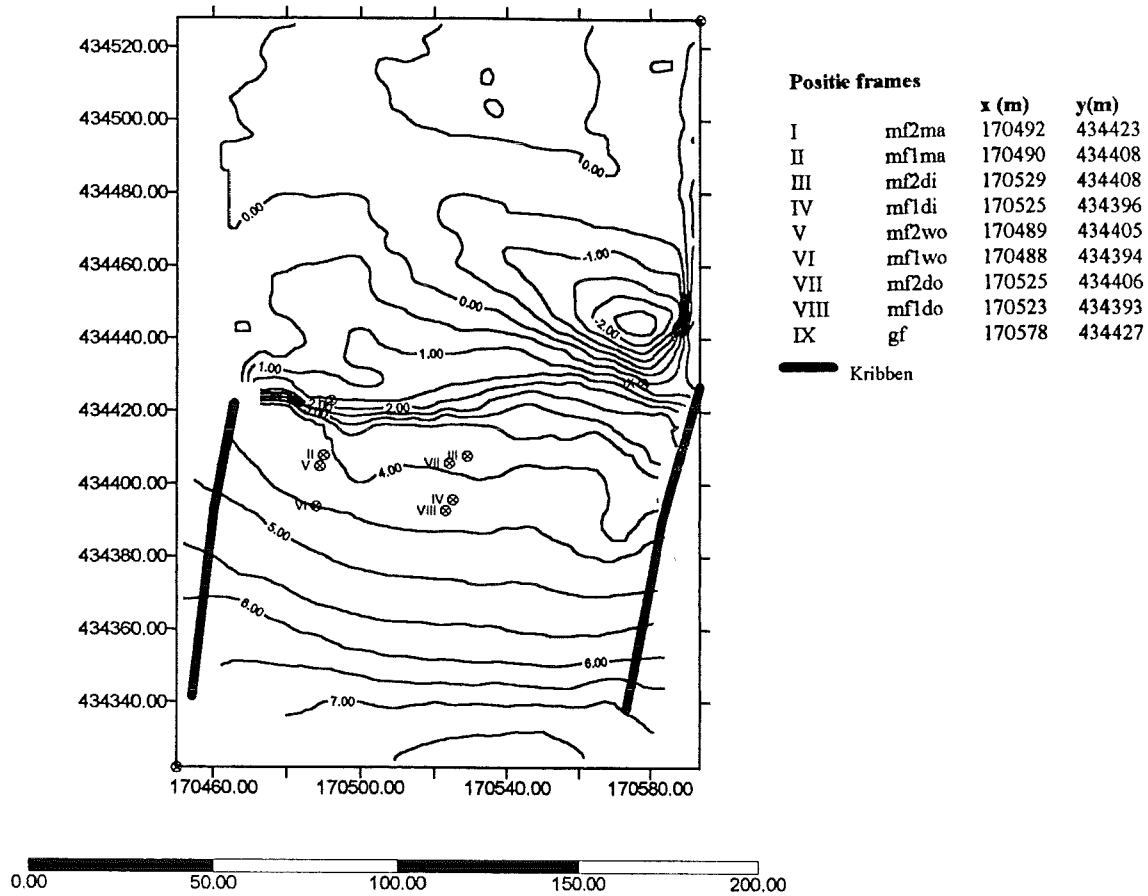
De hoogtekaarten van de vier bestudeerde kribvakken.

Hoogtekaart kribvak 1, Zuidoever



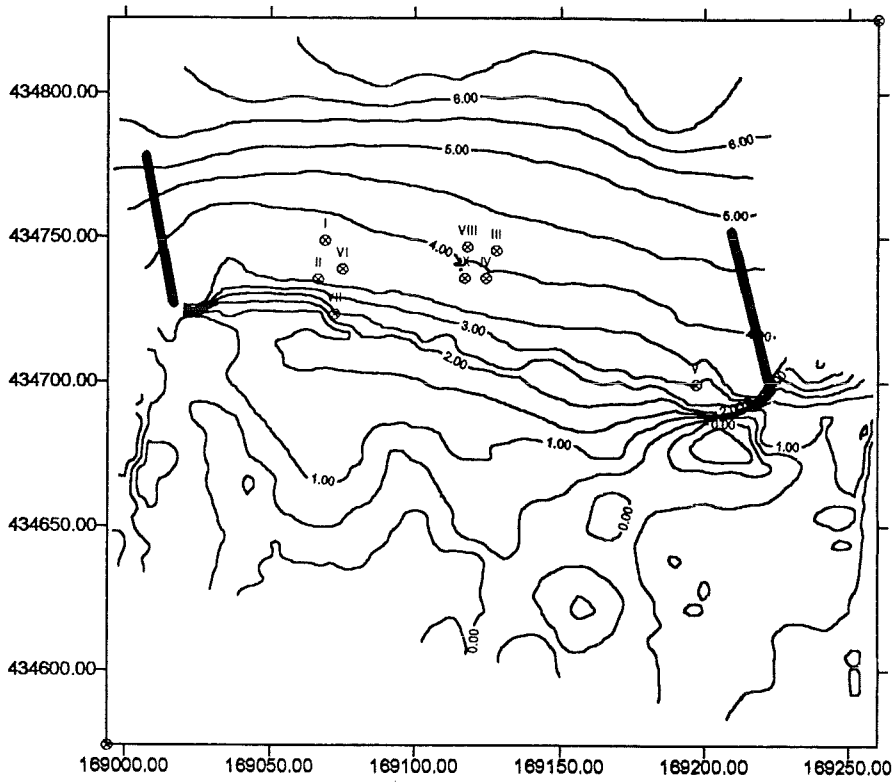
Bijlage 3.1.1: de hoogtekaart van kribvak 1 met 3-D weergave. De waarden voor de hoogte, worden gegeven t.o.v. N.A.P. De waterlijn ligt op 5,00 m N.A.P. De waarden op de x en y-as zijn gegeven in meters. Mf1, mf2 zijn de kleine meetframes; gf is het grote meetframe.

Hoogtekaart kribvak 2, Zuidoever



Bijlage 3.1.2: de hoogtekaart van kribvak 2 met 3-D weergave. De waarden voor de hoogte, worden gegeven t.o.v. N.A.P. De waterlijn ligt op 5,00 m N.A.P. De waarden op de x en y-as zijn gegeven in meters. Mf1, mf2 zijn de kleine meetframes; gf is het grote meetframe.

Hoogtekaart kribvak 3, Noordoever

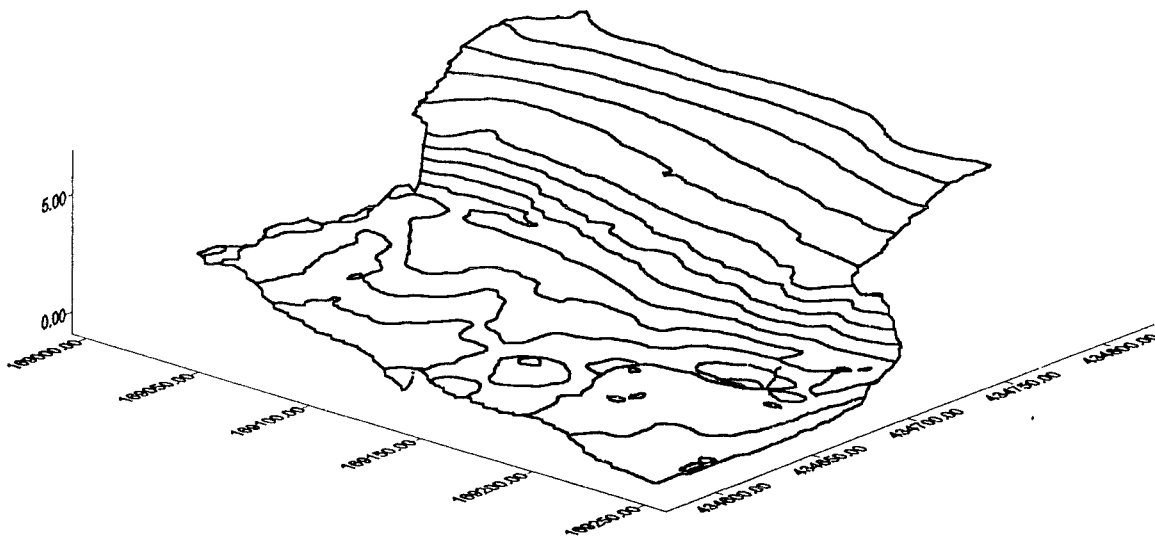


Positie frames

		x (m)	y(m)
I	mf1ma	169069	434749
II	mf2ma	169067	434736
III	mf1di	169128	434746
IV	mf2di	169125	434736
V	gf	169197	434699
VI	mf1wo	169075	434739
VII	mf2wo	169072	434724
VIII	mf1do	169118	434747
IX	mf2do	169117	434736

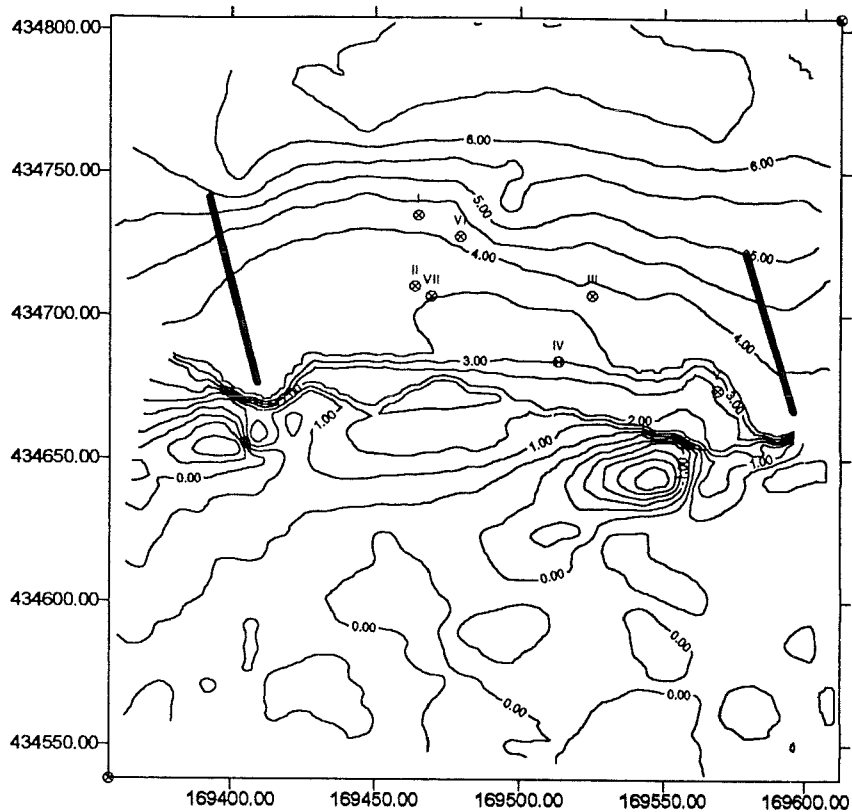
— Kribben

0.00 50.00 100.00 150.00 200.00



Bijlage 3.1.3: de hoogtekaart van kribvak 3 met 3-D weergave. De waarden voor de hoogte, worden gegeven t.o.v. N.A.P. De waterlijn ligt op 5,00 m N.A.P. De waarden op de x en y-as zijn gegeven in meters. Mf1, mf2 zijn de kleine meetframes; gf is het grote meetframe.

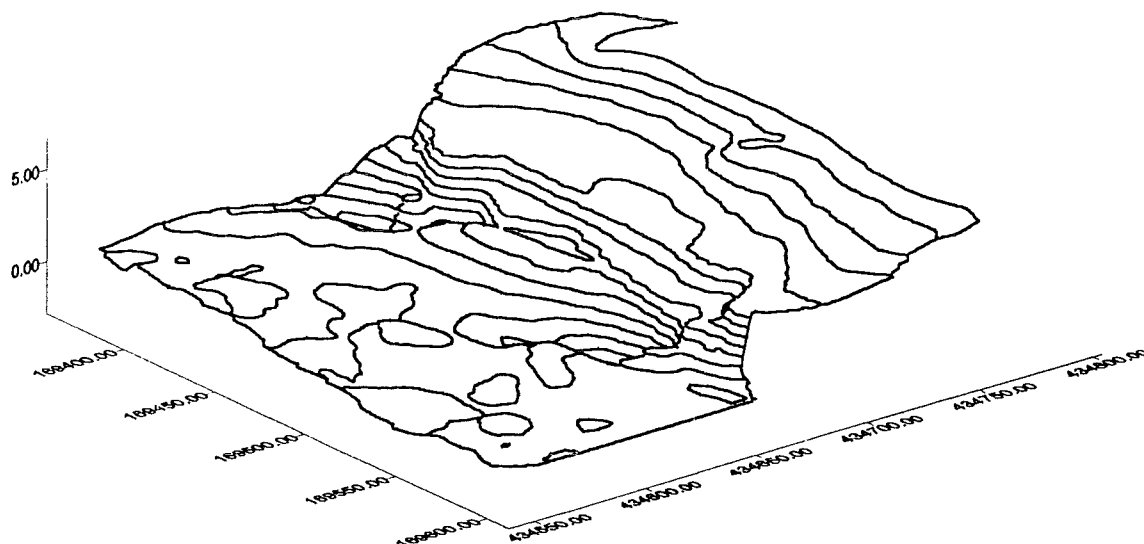
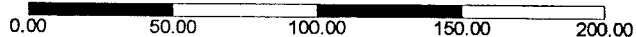
Hoogtekaart kribvak 4, Noordoever



Positie frames

		x (m)	y(m)
I	mf1ma	169465	434735
II	mf2ma	169464	434710
III	mf1di	169525	434707
IV	mf2di	169513	434684
V	gf	169569	434674
VI	mf1wo	169479	434728
VII	mf2wo	169469	434707

Kribben



Bijlage 3.1.4: de hoogtekaart van kribvak 4 met 3-D weergave. De waarden voor de hoogte, worden gegeven t.o.v. N.A.P. De waterlijn ligt op 5,00 m N.A.P. De waarden op de x en y-as zijn gegeven in meters. Mf1, mf2 zijn de kleine meetframes; gf is het grote meetframe.

Bijlage 3.2

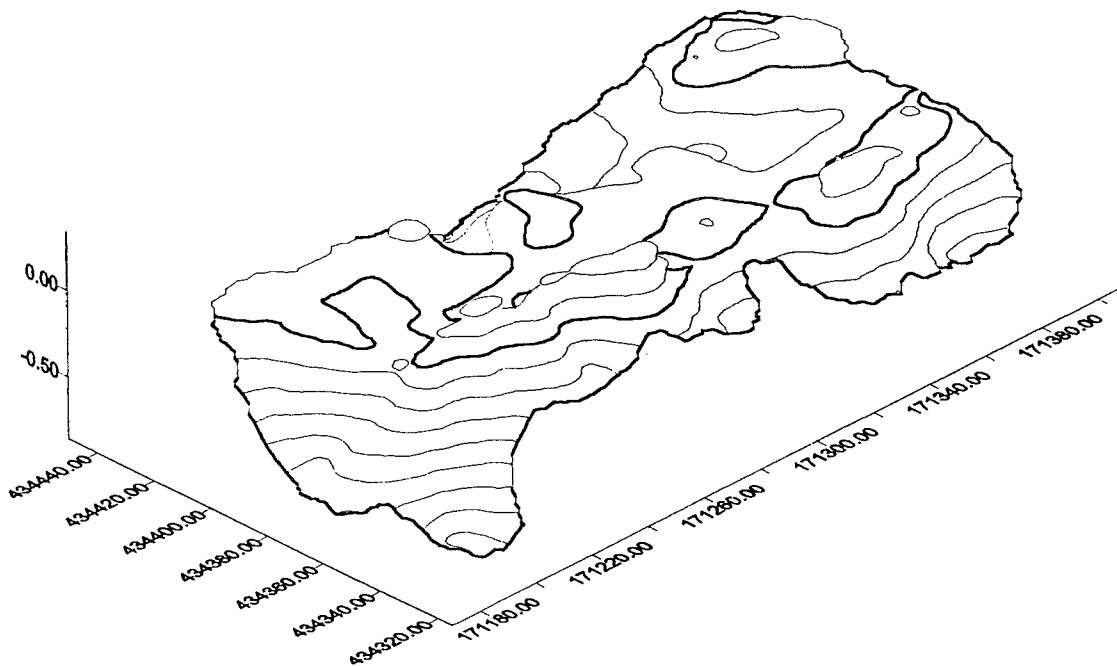
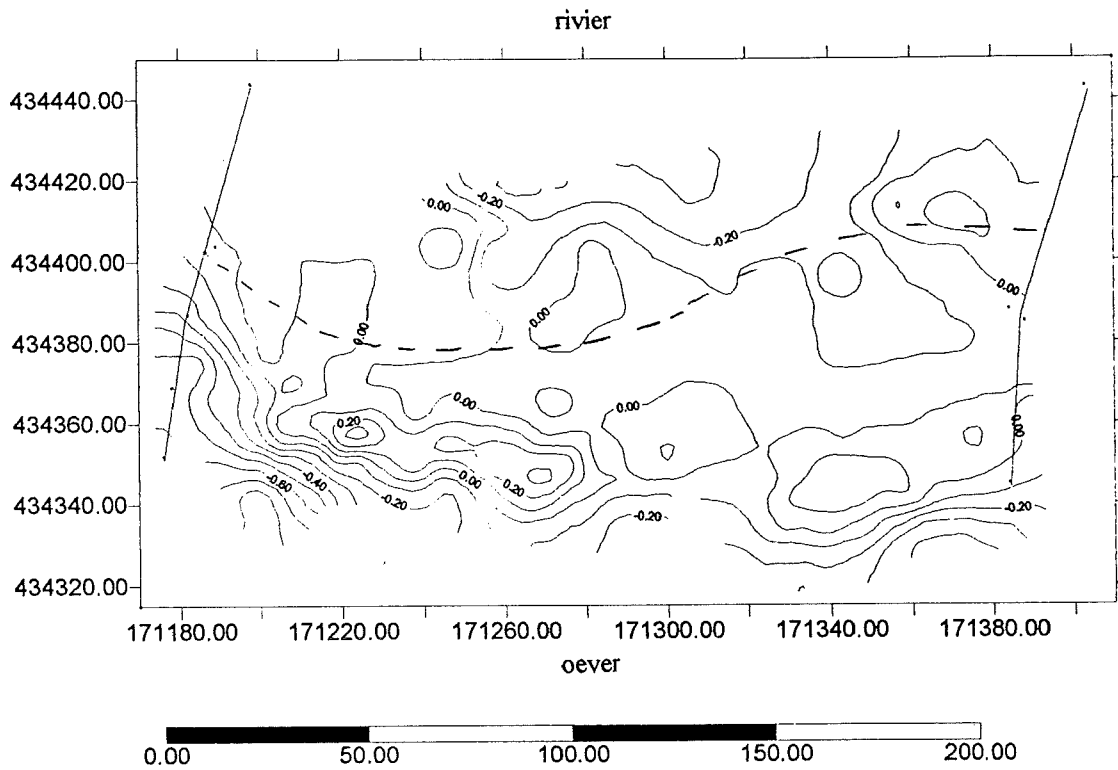
Frakties van de zevenset ter bepaling van de korrelgrootteverdeling

Zeefnummer	Zeefdiameter μm
zeef 26	8000
zeef 25	5600
zeef 24	4000
zeef 23	2800
zeef 22	2000
zeef 21	1700
zeef 20	1400
zeef 19	1180
zeef 18	1000
zeef 17	850
zeef 16	710
zeef 15	600
zeef 14	500
zeef 13	420
zeef 12	355
zeef 11	300
zeef 10	250
zeef 9	210
zeef 8	180
zeef 7	150
zeef 6	125
zeef 5	105
zeef 4	90
zeef 3	75
zeef 2	63
zeef 1	53
onderbak	

Bijlage 3.3

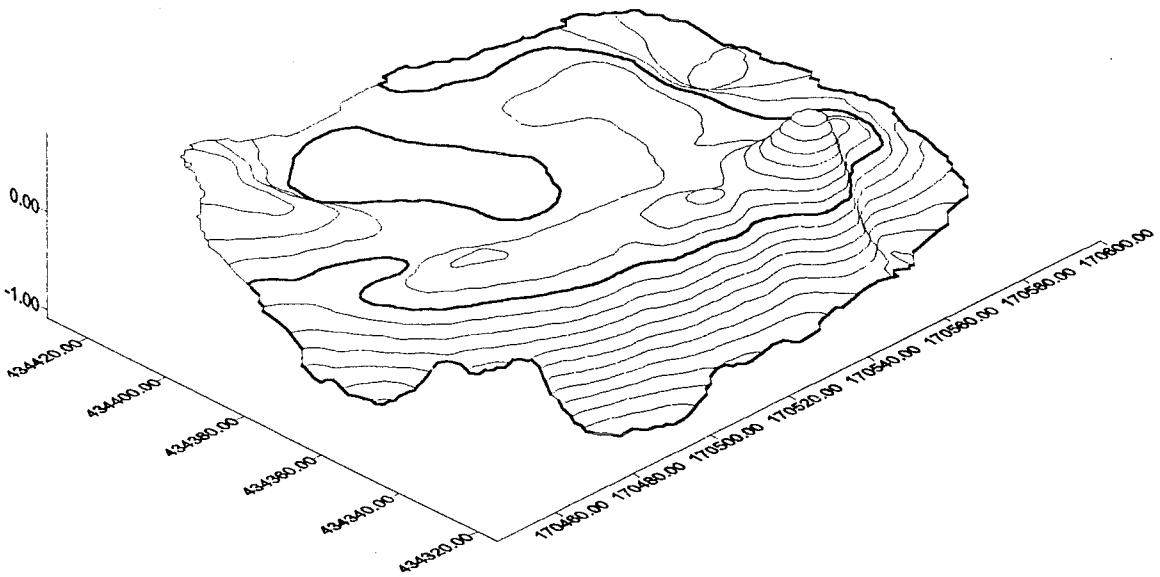
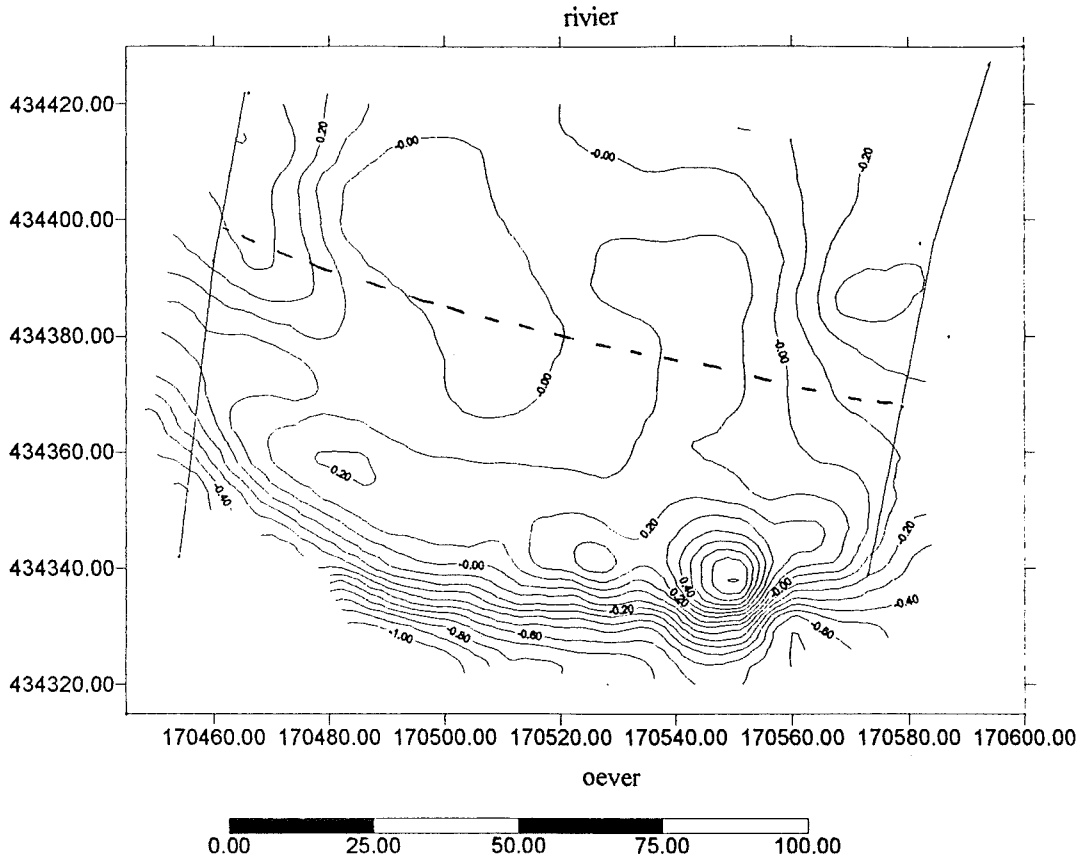
De verschilkaarten van kribvak 1, 2 en 3.

Verschilkaart kribvak 1, Zuidoever



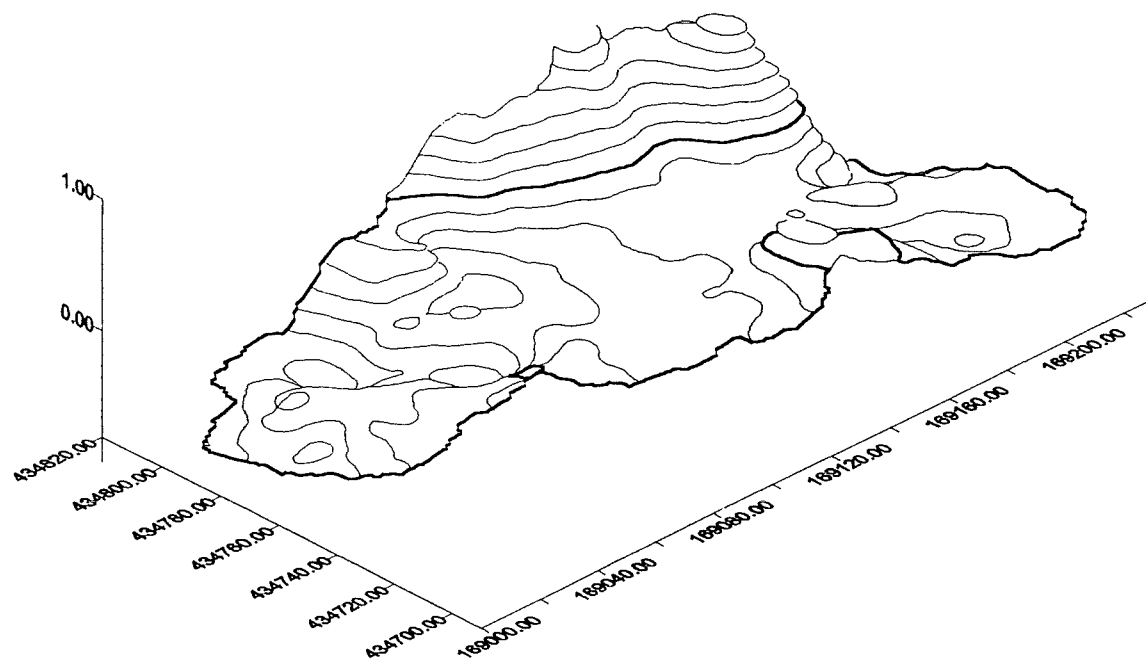
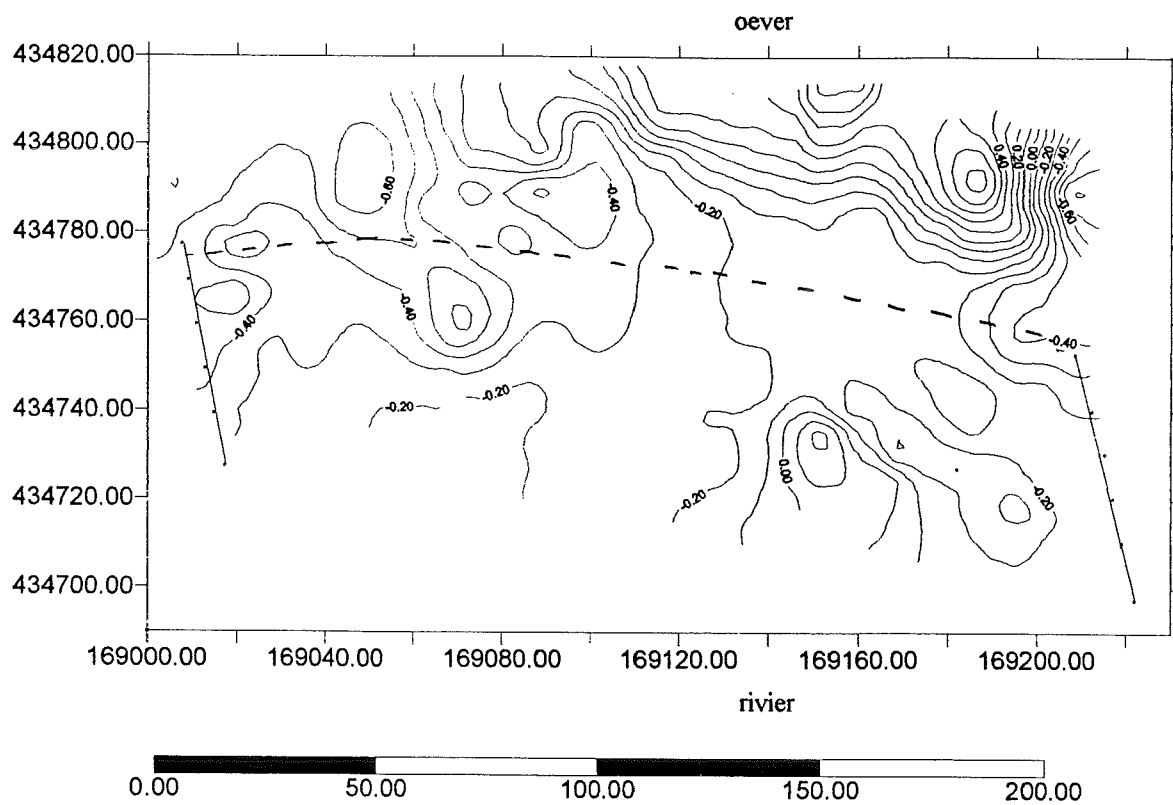
Bijlage 3.3.1: de verschilkaart van kribvak 1, met 3-D weergave. De waarden op de x en y-as en de waarde voor het verschil worden gegeven in meters. De stippellijn geeft de waterlijn aan tijdens de meetcampagne.

Verschilkaart kribvak 2, Zuidoever



Bijlage 3.3.2: de verschilkaart van kribvak 2, met 3-D weergave. De waarden op de x en y-as en de waarde voor het verschil worden gegeven in meters. De stippellijn geeft de waterlijn aan tijdens de meetcampagne.

Verschilkaart kribvak 3, Noordoever



Bijlage 3.3.3: de verschilkaart van kribvak 3, met 3-D weergave. De waarden op de x en y-as en de waarde voor het verschil worden gegeven in meters. De stippellijn geeft de waterlijn aan tijdens de meetcampagne.

Bijlage 3.4

De resultaten van de korrelgrootte analyse

	d ₉₅	d ₉₀	d ₈₄	d ₇₅	d ₅₀	d ₃₅	d ₁₆	d ₁₀	d ₅	sortering
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
Kribvak 1	0.77	0.61	0.50	0.52	0.33	0.36	0.23	0.20	0.19	1.47
Kribvak 2	1.79	1.34	0.98	0.47	0.26	0.21	0.18	0.16	0.13	2.42
Kribvak 3	7.31	4.08	2.58	1.81	0.70	0.53	0.35	0.33	0.28	2.95
Kribvak 4	5.87	4.32	3.27	1.68	0.64	0.47	0.35	0.28	0.22	3.64
Zwevend	0.38	0.31	0.34	0.26	0.22	0.24	0.21	0.17	0.14	1.31

File	Kribvak	Type schip	Code	Code	Lengte	Breedte	Diepte	Belading	Vaarrichting	Positie	Afstand	Vaarsnelheid	Volume	Tb,c	Tb,w	Tb,tot	Tb,cr	Aandeel c	Aandeel w	Tb,c,sch	Tb,w,sch	Tb,tot,sch	
			fig. 19	fig. 21	[m]	[m]	[m]				[m]	[m/s]	[m ³]	[N/m ²]	[N/m ²]	[N/m ²]	[N/m ²]	[%]	[%]	[N/m ²]	[N/m ²]	[N/m ²]	
mf162411	2	t0 situatie												0,18	0,03	0,18	0,18	85,39%	14,83%				
mf262411	2	t0 situatie												0,08	0,02	0,11	0,18	77,26%	22,85%				
mf162411	2	Duwbak	1o	1	180,00	22,80	0,40	leeg	af	NOa	150,00	5,45	1641,60	0,54	0,24	0,78	0,18	69,10%	30,90%	0,38	0,21	0,59	
mf262411	2	Duwbak	1r	2	180,00	22,80	0,40	leeg	af	NOa	150,00	5,45	1641,60	0,58	0,28	0,83	0,18	68,98%	31,02%	0,49	0,23	0,73	
mf162411	2	Rijnschip	2o	3	110,00	10,50	3,00	vol	af	NOa	150,00	5,24	3485,00	0,92	0,35	1,27	0,18	72,25%	27,75%	0,76	0,33	1,09	
mf262411	2	Rijnschip	2r	4	110,00	10,50	3,00	vol	af	NOa	150,00	5,24	3485,00	1,04	0,44	1,48	0,18	70,52%	29,48%	0,96	0,41	1,37	
mf162413	2	Rijnschip	3o	5	90,00	8,00	3,00	vol	op	ZOa	100,00	2,20	2160,00	0,51	0,51	1,03	0,18	50,02%	49,98%	0,36	0,49	0,84	
mf262413	2	Rijnschip	3r	6	90,00	8,00	3,00	vol	op	ZOa	100,00	2,20	2160,00	0,84	0,70	1,54	0,18	54,43%	45,57%	0,76	0,68	1,44	
mf162412	2	Duwbak	4o	7	180,00	22,80	4,00	vol	op	AS	125,00	2,20	18416,00	0,09	0,03	0,12	0,18	74,41%	25,59%	0,00	0,00	0,00	
mf262412	2	Duwbak	4r	8	180,00	22,80	4,00	vol	op	AS	125,00	2,20	18416,00	0,20	0,06	0,26	0,18	77,42%	22,58%	0,12	0,03	0,15	
mf162710	2	Kanaalschip	5o	9	80,00	9,00	3,00	vol	op	ZOz	40,00	3,20	2160,00	0,63	0,10	0,73	0,18	86,58%	13,42%	0,47	0,07	0,54	
mf262710	2	Kanaalschip	5r	10	80,00	9,00	3,00	vol	op	ZOz	40,00	3,20	2160,00	0,19	0,07	0,26	0,18	74,05%	25,95%	0,11	0,04	0,15	
mf162710	2	Dortmunder	8o	11	68,00	7,20	2,80	vol	op	AS	125,00	2,96	1370,88	0,72	0,10	0,82	0,18	88,31%	11,69%	0,57	0,07	0,64	
mf262710	2	Dortmunder	8r	12	68,00	7,20	2,80	vol	op	AS	125,00	2,96	1370,88	0,28	0,09	0,37	0,18	75,90%	24,08%	0,20	0,06	0,26	
mf162611	2	Kanaalschip	7o	13	80,00	8,20	3,00	vol	af	NO	170,00	5,71	1968,00	0,36	0,16	0,52	0,18	68,82%	31,18%	0,20	0,14	0,34	
mf262611	2	Kanaalschip	7r	14	80,00	8,20	3,00	vol	af	NO	170,00	5,71	1968,00	0,22	0,14	0,36	0,18	61,18%	38,81%	0,14	0,12	0,26	
mf161812	1	Kanaalschip	1o	15	85,00	8,20	3,00	vol	op	ZO	80,00	3,27	2091,00	0,35	0,06	0,41	0,19	86,13%	13,87%	0,19	0,03	0,22	
mf261812	1	Kanaalschip	1r	16	85,00	8,20	3,00	vol	op	ZO	80,00	3,27	2091,00	0,17	0,06	0,23	0,19	75,39%	24,61%	0,09	0,03	0,12	
mf161812	1	Duwbak	2o	17	170,00	22,80	4,00	vol	op	AS	125,00	2,70	15504,00	0,29	0,08	0,37	0,19	79,34%	20,66%	0,13	0,05	0,18	
mf261812	1	Duwbak	2r	18	170,00	22,80	4,00	vol	op	AS	125,00	2,70	15504,00	0,18	0,05	0,23	0,19	78,25%	21,75%	0,10	0,03	0,12	
mf161812	1	Rijnschip	3o	19	91,00	11,50	3,00	vol	op	AS	125,00	3,14	3139,50	0,75	0,32	1,07	0,18	70,30%	29,70%	0,59	0,29	0,89	
mf261812	1	Rijnschip	3r	20	91,00	11,50	3,00	vol	op	AS	125,00	3,14	3139,50	0,36	0,11	0,47	0,19	76,45%	23,55%	0,27	0,09	0,36	
mf161812	1	Rijnschip	4o	21	100,00	10,50	3,00	vol	op	AS	125,00	3,57	3150,00	0,61	0,13	0,74	0,19	82,83%	17,17%	0,45	0,10	0,55	
mf261812	1	Rijnschip	4r	22	100,00	10,50	3,00	vol	op	AS	125,00	3,57	3150,00	0,17	0,05	0,22	0,19	76,55%	23,45%	0,09	0,03	0,12	
mf161911	1	Kanaalschip	5o	23	80,00	9,50	1,00	leeg	af	AS	125,00	7,27	780,00	0,21	0,05	0,26	0,19	80,39%	19,61%	0,05	0,02	0,08	
mf261911	1	Kanaalschip	5r	24	80,00	9,50	1,00	leeg	af	AS	125,00	7,27	780,00	0,17	0,09	0,26	0,19	85,44%	14,56%	0,09	0,06	0,15	
mf162110	1	Duwbak	6o	25	182,00	11,40	4,00	vol	op	ZOa	100,00	2,43	8299,20	0,23	0,10	0,33	0,19	70,94%	29,06%	0,08	0,07	0,15	
mf262110	1	Duwbak	6r	26	182,00	11,40	4,00	vol	op	ZOa	100,00	2,43	8299,20	0,38	0,08	0,46	0,19	82,56%	17,44%	0,30	0,06	0,36	
mf162112	1	Dortmunder	7o	27	87,00	8,20	1,00	leeg	op	ZO	80,00	4,19	549,40	0,17	0,08	0,25	0,19	68,25%	31,75%	0,01	0,06	0,07	
mf262112	1	Dortmunder	7r	28	87,00	8,20	1,00	leeg	op	ZO	80,00	4,19	549,40	0,08	0,06	0,14	0,19	58,50%	41,50%	0,00	0,03	0,03	

Afkortingen:

Vaarpositie van het schip:

NO: noordoever

ZO: zuidoever

AS: rivieras

De toevoegingen n, z en a geven op een tweede niveau een nog nauwkeurigere beschrijving van de vaarpositie en betekenen respectievelijk dichtbij de noordoever, zuidoever en rivieras.

De afstand in meters is de vaarafstand van de schepen tot de oever waar de metingen plaats vinden.

Het volume is het scheepsvolume, berekend door de lengte, breedte en diepteligging van het schip met elkaar te vermenigvuldigen.

Tb,c: de bodemschuifspanning ontstaan door stroming met de op de achtergrond heersende t₀ situatie.

Tb,w: de bodemschuifspanning ontstaan door golven met de op de achtergrond heersende t₀ situatie.

Tb,tot: de bodemschuifspanning ontstaan door stroming en golven met de op de achtergrond heersende t₀ situatie.

Tb,cr: de kritieke bodemschuifspanning.

Tb,c,sch: de bodemschuifspanning ontstaan door stroming zonder de op de achtergrond heersende t₀ situatie, dus alleen stroming ontstaan door het schip.

Tb,w,sch: de bodemschuifspanning ontstaan door golven zonder de op de achtergrond heersende t₀ situatie, dus alleen golven ontstaan door het schip.

Tb,tot,sch: de bodemschuifspanning ontstaan door stroming en golven zonder de op de achtergrond heersende t₀ situatie, dus alleen stroming en golven ontstaan door het schip.

File	Kribvak	Type schip	Code	Code	Lengte	Breedte	Diepte	Belading	Vaarrichting	Positie	Afstand	Vaarsnelheid	Volume	Tb,c	Tb,w	Tb,tot	Tb,cr	Aandeel c	Aandeel w	Tb,c,sch	Tb,w,sch	Tb,tot,sch
			fig. 19 en 20	fig. 21										[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m ³]	[N/m ²]	[N/m ²]	[N/m ²]	[N/m ²]
mf170409	3	Duwbak	1o	29	180.00	22.80	0.40	leeg	af	AS	125.00	4.62	1641.60	0.46	0.18	0.64	0.34	71.76%	29.24%	0.30	0.15	0.46
mf270409	3	Duwbak	1r	30	180.00	22.80	0.40	leeg	af	AS	125.00	4.62	1641.60	0.15	0.07	0.22	0.34	68.17%	31.83%	0.06	0.04	0.11
mf170312	3	Duwbak	2o	31	180.00	22.80	4.00	vol	op	ASz	150.00	2.20	16416.00	0.53	0.10	0.63	0.34	84.41%	15.59%	0.38	0.07	0.45
mf270312	3	Duwbak	2r	32	180.00	22.80	4.00	vol	op	ASz	150.00	2.20	16416.00	0.15	0.06	0.21	0.34	70.31%	29.69%	0.07	0.04	0.11
mf170112	3	Rijnschip	3o	33	95.00	9.50	3.00	vol	op	N	80.00	3.96	2707.50	0.21	0.05	0.26	0.34	82.29%	17.71%	0.05	0.02	0.07
mf270112	3	Rijnschip	3r	34	95.00	9.50	3.00	vol	op	N	80.00	3.96	2707.50	0.19	0.07	0.26	0.34	74.57%	25.43%	0.11	0.04	0.15
mf170409	3	Rijnschip	4o	35	100.00	9.50	1.00	leeg	af	AS	125.00	5.88	950.00	0.34	0.21	0.55	0.34	61.93%	38.07%	0.18	0.18	0.36
mf270409	3	Rijnschip	4r	36	100.00	9.50	1.00	leeg	af	AS	125.00	5.88	950.00	0.19	0.07	0.25	0.34	73.22%	26.78%	0.10	0.04	0.15
mf170412	3	Kanaalschip	5o	37	79.50	9.50	3.00	vol	af	AS	125.00	5.30	2265.75	0.25	0.09	0.33	0.34	74.40%	25.60%	0.09	0.06	0.15
mf270412	3	Kanaalschip	5r	38	79.50	9.50	3.00	vol	af	AS	125.00	5.30	2265.75	0.04	0.02	0.06	0.34	66.35%	33.65%	0.00	0.00	0.00
mf170311	3	Kanaalschip	6c	39	73.00	8.20	3.00	vol	af	Nn	40.00	7.30	1795.80	0.59	0.10	0.69	0.34	85.50%	14.50%	0.43	0.07	0.51
mf270311	3	Kanaalschip	6r	40	73.00	8.20	3.00	vol	af	Nn	40.00	7.30	1795.80	0.20	0.10	0.30	0.34	65.70%	34.30%	0.11	0.08	0.19
mf170311	3	Dortmunder	7o	41	57.00	8.20	2.50	vol	af	Nn	40.00	4.75	1168.50	0.39	0.10	0.50	0.34	79.40%	20.60%	0.24	0.07	0.31
mf270311	3	Dortmunder	7r	42	57.00	8.20	2.50	vol	af	Nn	40.00	4.75	1168.50	0.13	0.07	0.20	0.34	63.80%	36.20%	0.04	0.05	0.09
mf170812	4	Duwbak	1o	43	180.00	22.80	0.40	leeg	af	AS	125.00	4.86	1641.60	0.87	0.22	1.10	0.32	79.51%	20.49%	0.71	0.20	0.91
mf270812	4	Duwbak	1r	44	180.00	22.80	0.40	leeg	af	AS	125.00	4.86	1641.60	0.63	0.17	0.80	0.32	78.54%	21.46%	0.54	0.15	0.69
mf170812	4	Rijnschip	2o	45	105.00	11.00	3.00	vol	op	ASz	150.00	3.50	3465.00	1.37	0.36	1.73	0.32	79.16%	20.84%	1.21	0.33	1.54
mf270812	4	Rijnschip	2r	46	105.00	11.00	3.00	vol	op	ASz	150.00	3.50	3465.00	1.48	0.34	1.82	0.32	81.41%	18.59%	1.40	0.31	1.72
mf170811	4	Rijnschip	3o	47	95.00	9.50	3.00	vol	af	N	80.00	5.59	2707.50	0.57	0.09	0.65	0.32	86.59%	13.41%	0.41	0.06	0.47
mf270811	4	Rijnschip	3r	48	95.00	9.50	3.00	vol	af	N	80.00	5.59	2707.50	0.42	0.08	0.50	0.32	83.89%	16.11%	0.33	0.06	0.39
mf170811	4	Rijnschip	4o	49	86.00	8.20	3.00	vol	op	Zz	210.00	3.07	2115.60	0.54	0.09	0.63	0.32	85.09%	14.91%	0.38	0.07	0.45
mf270811	4	Rijnschip	4r	50	86.00	8.20	3.00	vol	op	Zz	210.00	3.07	2115.60	0.43	0.08	0.51	0.32	83.93%	16.07%	0.34	0.06	0.40
mf170811	4	Dortmunder	5o	51	67.00	8.20	2.80	vol	af	Nas	100.00	5.58	1538.32	0.60	0.07	0.67	0.32	89.99%	10.01%	0.44	0.04	0.48
mf270811	4	Dortmunder	5r	52	67.00	8.20	2.80	vol	af	Nas	100.00	5.58	1538.32	0.42	0.06	0.48	0.32	87.81%	12.19%	0.34	0.03	0.37
mf171011	4	Kanaalschip	6o	53	74.00	8.10	3.00	vol	af	AS	125.00	5.69	1798.20	0.60	0.11	0.71	0.32	84.45%	15.55%	0.45	0.08	0.53
mf271011	4	Kanaalschip	6r	54	74.00	8.10	3.00	vol	af	AS	125.00	5.69	1798.20	0.35	0.07	0.42	0.32	84.13%	15.87%	0.27	0.04	0.31
mf171011	4	Kanaalschip	7o	55	80.00	8.20	3.00	vol	af	Nas	100.00	5.33	1968.00	0.81	0.23	1.04	0.32	77.77%	22.23%	0.65	0.20	0.85
mf271011	4	Kanaalschip	7r	56	80.00	8.20	3.00	vol	af	Nas	100.00	5.33	1968.00	0.56	0.14	0.70	0.32	80.63%	19.37%	0.48	0.11	0.59
mf171011	4	Koppelverban	8o	57	85.00	22.80	0.40	leeg	af	AS	125.00	5.31	775.20	1.54	0.54	2.08	0.32	74.11%	25.89%	1.39	0.51	1.90
mf271011	4	Koppelverban	8r	58	85.00	22.80	0.40	leeg	af	AS	125.00	5.31	775.20	1.23	0.29	1.52	0.32	80.67%	19.33%	1.15	0.27	1.42

Afkortingen:

Vaarpositie van het schip:

NO: noordoever

ZO: zuidoever

AS: rivieras

De toevoegingen n, z en a geven op een tweede niveau een nog nauwkeurige beschrijving van de vaarpositie en betekenen respectievelijk dichtbij de noordoever, zuidoever en rivieras.

De afstand in meters is de vaarafstand van de schepen tot de oever waar de metingen plaats vinden.

Het volume is het scheepsvolume, berekend door de lengte, breedte en diepteligging van het schip met elkaar te vermenigvuldigen.

Tb,c: de bodemschuifspanning ontstaan door stroming met de op de achtergrond heersende t_0 situatie.

Tb,w: de bodemschuifspanning ontstaan door golven met de op de achtergrond heersende t_0 situatie.

Tb,tot: de bodemschuifspanning ontstaan door stroming en golven met de op de achtergrond heersende t_0 situatie.

Tb,cr: de kritieke bodemschuifspanning.

Tb,c,sch: de bodemschuifspanning ontstaan door stroming zonder de op de achtergrond heersende t_0 situatie, dus alleen stroming ontstaan door het schip.

Tb,w,sch: de bodemschuifspanning ontstaan door golven zonder de op de achtergrond heersende t_0 situatie, dus alleen golven ontstaan door het schip.

Tb,tot,sch: de bodemschuifspanning ontstaan door stroming en golven zonder de op de achtergrond heersende t_0 situatie, dus alleen stroming en golven ontstaan door het schip.

Bijlage 3.7
De resultaten van de berekeningen uitgevoerd op de passage van een groep schepen en op individuele passages.

	Code	File	Kribvak	Aantal schepen	Duur passage [mm.sec]	Type schip	Lengte [m]	Breedte [m]	Diepte [m]	Belading	Vaarrichting	Positie	Afstand [m]	Vaarsnelheid [m/s]	Volume [m3]	Tb,c [N/m2]	Tb,w [N/m2]	Tb,tot [N/m2]	Tb,cr [N/m2]	aandeel c	Aandeel w
Een schip	1lo	mf162412		2	1 schip	0.82	180,00	22,80	4,00	vol	op	AS	125,00	2,20	16416,00	0,09	0,03	0,12	0,18	75,00%	25,00%
Een schip	1lr	mf262412		2	1 schip	0.82	180,00	22,80	4,00	vol	op	AS	125,00	2,20	16416,00	0,20	0,06	0,26	0,18	76,92%	23,08%
Meerdere schepen	1Co	mf162412		2	3 schepen	1.19	180,00	22,80	4,00	vol	op	AS	125,00	2,14	16416,00	0,59	0,47	1,06	0,18	55,39%	44,61%
Meerdere schepen	1Cr	mf262412		2	3 schepen	1.19	180,00	22,80	4,00	vol	op	AS	125,00	2,14	16416,00	0,64	0,34	0,98	0,18	65,58%	34,42%
					5 tweede schip		70,00	8,00	2,90	vol	af	Naa	150,00	5,00	1624,00						
					5 tweede schip		70,00	8,00	2,90	vol	af	Naa	150,00	5,00	1624,00						
					4 derde schip		80,00	9,00	3,00	vol	af	N	170,00	5,71	2160,00						
					4 derde schip		80,00	9,00	3,00	vol	af	N	170,00	5,71	2160,00						
Een schip	2lo	mf162611		2	1 schip	0.14	80,00	8,20	3,00	vol	af	N	170,00	5,71	1968,00	0,36	0,16	0,52	0,18	69,23%	30,77%
Een schip	2lr	mf262611		2	1 schip	0.14	80,00	8,20	3,00	vol	af	N	170,00	5,71	1968,00	0,22	0,14	0,36	0,18	61,11%	38,89%
Meerdere schepen	2Co	mf162611		2	3 schepen	2.07	100,00	10,00	3,00	vol	op	Zas	100,00	2,04	3000,00	0,16	0,08	0,24	0,18	68,51%	31,49%
Meerdere schepen	2Cr	mf262611		2	3 schepen	2.07	100,00	10,00	3,00	vol	op	Zas	100,00	2,04	3000,00	0,10	0,06	0,16	0,18	60,09%	39,91%
					3 tweede schip		86,00	10,50	3,00	vol	op	AS	125,00	4,10	2709,00						
					3 tweede schip		86,00	10,50	3,00	vol	op	AS	125,00	4,10	2709,00						
					4 derde schip		80,00	9,00	2,00	half	af	N	170,00	5,33	1440,00						
					4 derde schip		80,00	9,00	2,00	half	af	N	170,00	5,33	1440,00						
Een schip	3lo	mf170312		3	1 schip	0.82	180,00	22,80	4,00	vol	op	ASz	150,00	2,20	16416,00	0,53	0,10	0,63	0,34	84,13%	15,87%
Een schip	3lr	mf270312		3	1 schip	0.82	180,00	22,80	4,00	vol	op	ASz	150,00	2,20	16416,00	0,15	0,06	0,21	0,34	71,43%	28,57%
Meerdere schepen	3Co	mf170312		3	6 schepen	5.36	80,00	9,00	1,00	leeg	af	AS	125,00	6,67	720,00	0,54	0,17	0,70	0,34	76,62%	24,06%
Meerdere schepen	3Cr	mf270312		3	6 schepen	5.36	80,00	9,00	1,00	leeg	af	AS	125,00	6,67	720,00	0,27	0,15	0,42	0,34	64,09%	35,91%
					4 eerste schip		80,00	9,50	3,00	vol	op	Nn	40,00	3,08	2280,00						
					4 tweede schip		80,00	9,50	3,00	vol	op	Nn	40,00	3,08	2280,00						
					1 derde schip		180,00	22,80	4,00	vol	op	Zas	150,00	2,28	16416,00						
					1 derde schip		180,00	22,80	4,00	vol	op	Zas	150,00	2,28	16416,00						
					3 vierde schip		110,00	11,40	1,00	leeg	af	AS	125,00	6,11	1254,00						
					3 vierde schip		110,00	11,40	1,00	leeg	af	AS	125,00	6,11	1254,00						
					6 vijfde schip		55,00	6,60	2,80	vol	af	AS	125,00	5,00	1016,40						
					6 vijfde schip		55,00	6,60	2,80	vol	af	AS	125,00	5,00	1016,40						
					4 zesde schip		80,00	9,00	3,00	vol	op	AS	125,00	3,20	2160,00						
					4 zesde schip		80,00	9,00	3,00	vol	op	AS	125,00	3,20	2160,00						
Een schip	4lo	mf170812		4	1 schip	0.30	105,00	11,00	3,00	vol	op	ASz	150,00	3,50	3465,00	1,37	0,36	1,73	0,32	79,19%	20,81%
Een schip	4lr	mf270812		4	1 schip	0.30	105,00	11,00	3,00	vol	op	ASz	150,00	3,50	3465,00	1,48	0,34	1,82	0,32	81,32%	18,68%
Meerdere schepen	4Co	mf170812		4	3 schepen	1.14	73,00	8,03	2,80	vol	af	AS	125,00	5,21	1641,33	0,83	0,27	1,10	0,32	75,35%	24,65%
Meerdere schepen	4Cr	mf270812		4	3 schepen	1.14	73,00	8,03	2,80	vol	af	AS	125,00	5,21	1641,33	0,84	0,20	1,04	0,32	80,83%	19,17%
					3 tweede schip		110,00	10,50	3,00	vol	op	Z	170,00	3,14	3465,00						
					3 tweede schip		110,00	10,50	3,00	vol	op	Z	170,00	3,14	3465,00						
					5 derde schip		60,00	6,65	2,50	vol	af	AS	125,00	5,00	997,50						
					5 derde schip		60,00	6,65	2,50	vol	af	AS	125,00	5,00	997,50						

Afkortingen:

Vaarpositie van het schip:

NO: noordoever

ZO: zuidoever

AS: rivieras

De toevoegingen n, z en a geven op een tweede niveau een nog nauwkeurigere beschrijving van de vaarpositie en betekenen respectievelijk dichtbij de noordoever, zuidoever en rivieras.

De afstand in meters is de vaarafstand van de schepen tot de oever waar de metingen plaats vinden.

Het volume is het scheepsvolume, berekend door de lengte, breedte en diepteligging van het schip met elkaar te vermenigvuldigen.

Tb,c: de bodemschuifspanning ontstaan door stroming met de op de achtergrond heersende t_0 situatie.

Tb,w: de bodemschuifspanning ontstaan door golven met de op de achtergrond heersende t_0 situatie.

Tb,tot: de bodemschuifspanning ontstaan door stroming en golven met de op de achtergrond heersende t_0 situatie.

Tb,cr: de kritieke bodemschuifspanning.

Bijlage 3.8

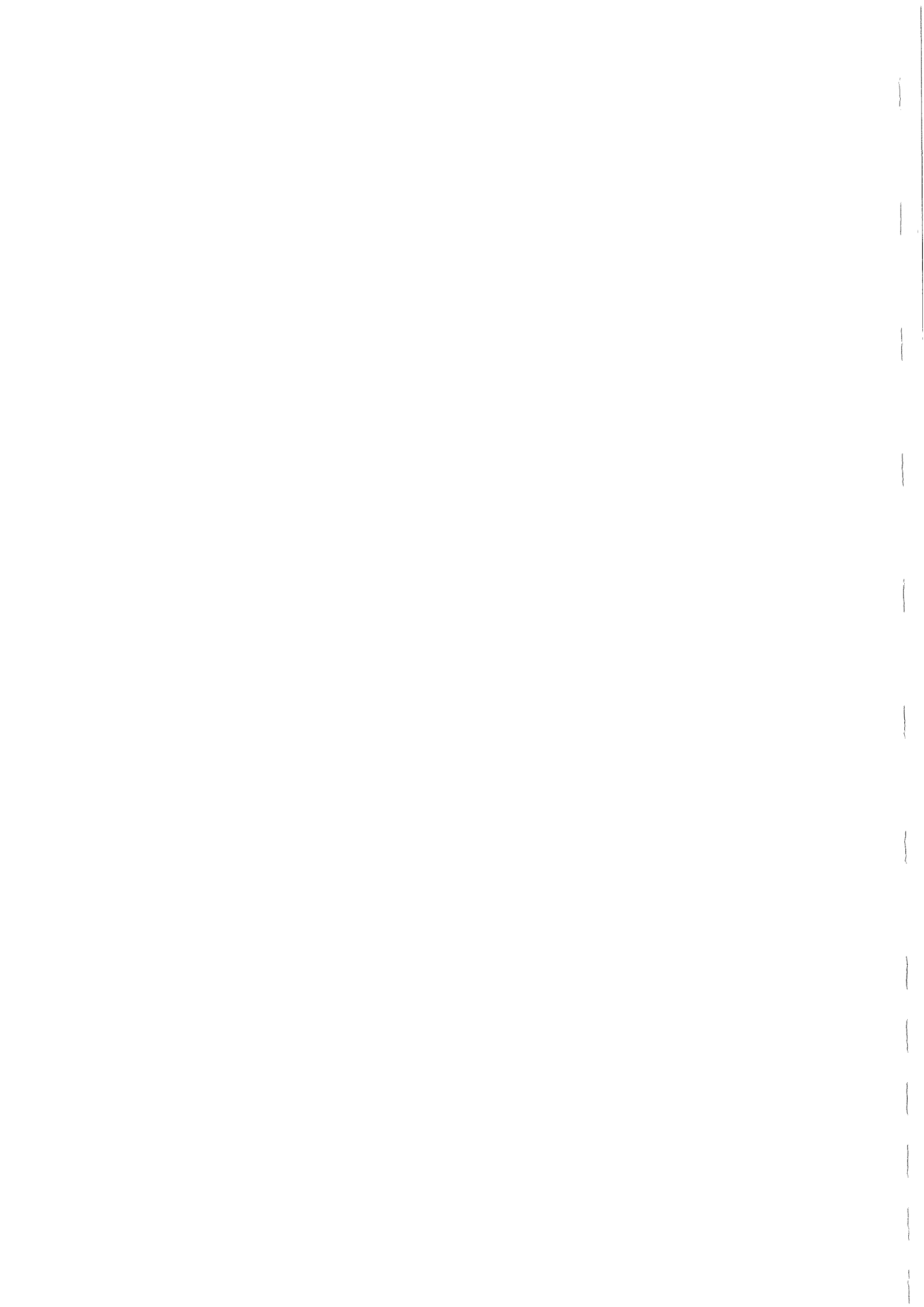
De verschillende bestudeerde type schepen en hun karakteristieken.

Type	Naam	Lengte (m)	Breedte (m)	Diepteligging (m)		
				<i>Vol</i>	<i>Halfvol</i>	<i>Leeg</i>
1	4-Bakduwvaart	max. 180	22,80	4,00	2,00	0,40
2	Koppelverband	max. 180		4,00	2,00	0,40
3	Rijnschip	86-110	9,50	3,00	2,00	1,00
4	Kanaalschip	67-85	9,00	2,50	2,00	1,00
5	Dortmunder	55-67	8,20	2,50	2,00	0,90
6	Kempenaar	50-55	6,60	2,70	2,00	0,75
7	Spits	38-50	5,05	2,50	1,80	0,65
8	Coaster			4,50	3,00	1,75
9	Overige (baggerschip)			3,00	2,00	1,00
10	2-Bakduwvaart	max. 180	22,80 of 11,40	4,00	2,00	0,40
11	3-Bakduwvaart	max. 180	22,80	4,00	2,00	0,40

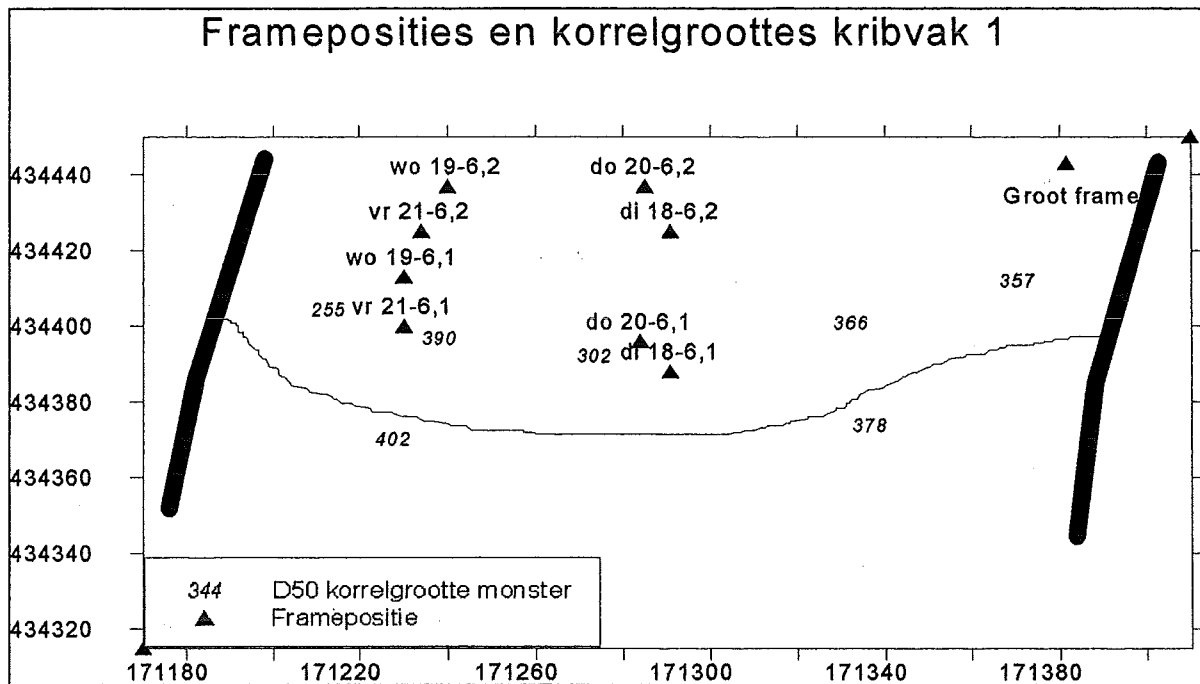
N.B. De waarden voor de lengte en de breedte zijn standaard afmetingen. Wanneer andere waarden aangegeven stonden op het schip, zijn deze genoteerd.



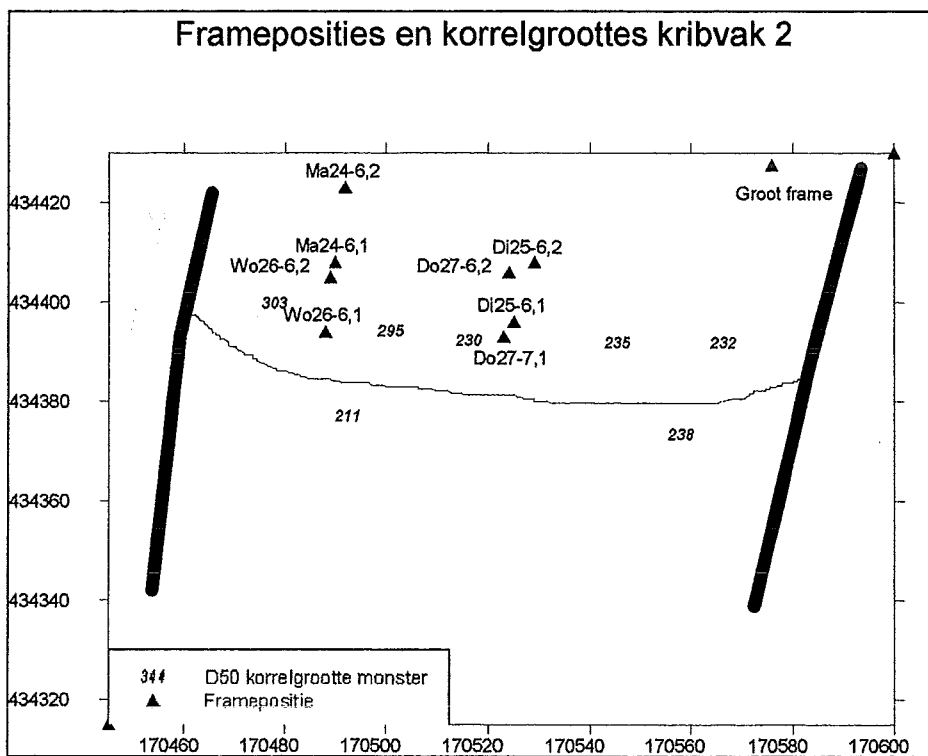
Bijlagen hoofdstuk 4



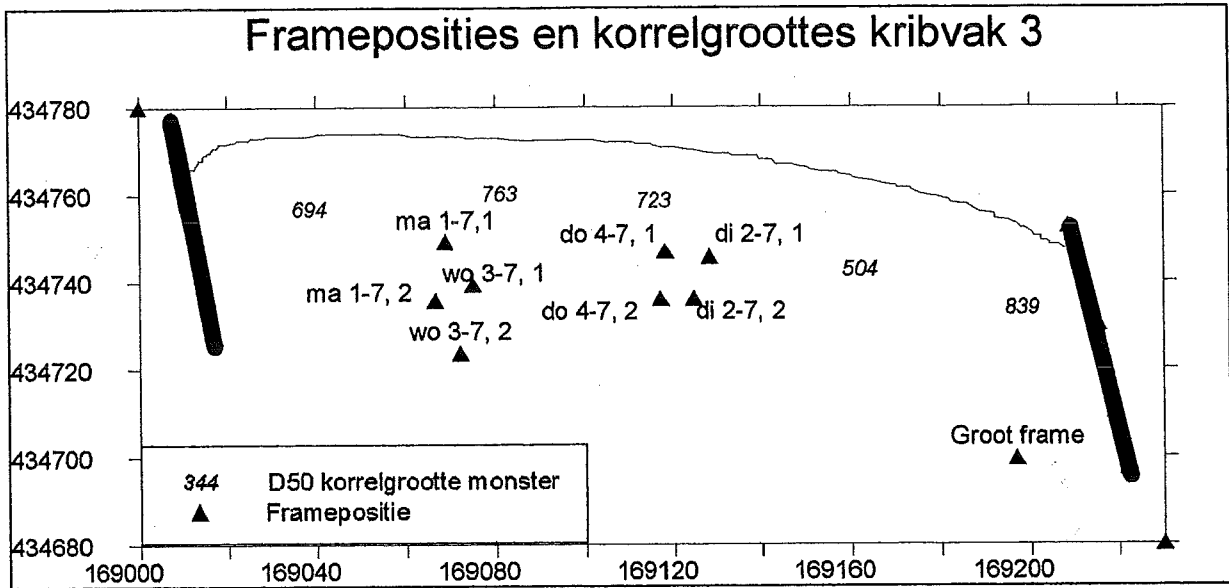
Bijlage 4.1



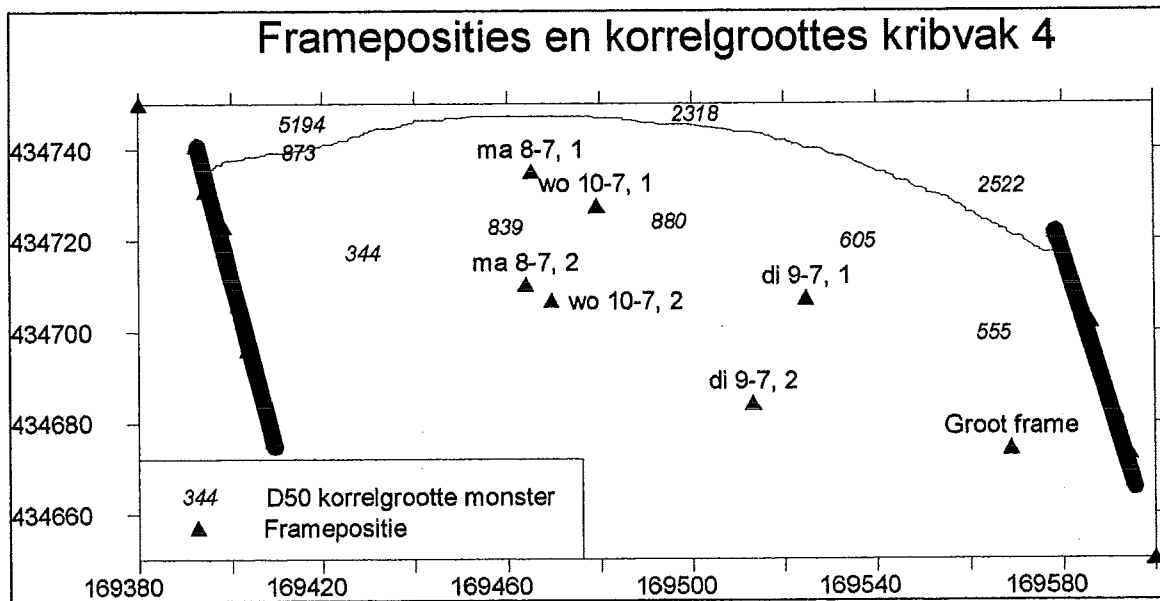
Bijlage 4.1.1 Kribvak 1 met de frameposities en bijbehorende datum, korrelgrootte mediaan (D_{50}) en RDS coördinaten.



Bijlage 4.1.2 Kribvak 2 met de frameposities en bijbehorende datum, korrelgrootte mediaan (D_{50}) en RDS coördinaten.

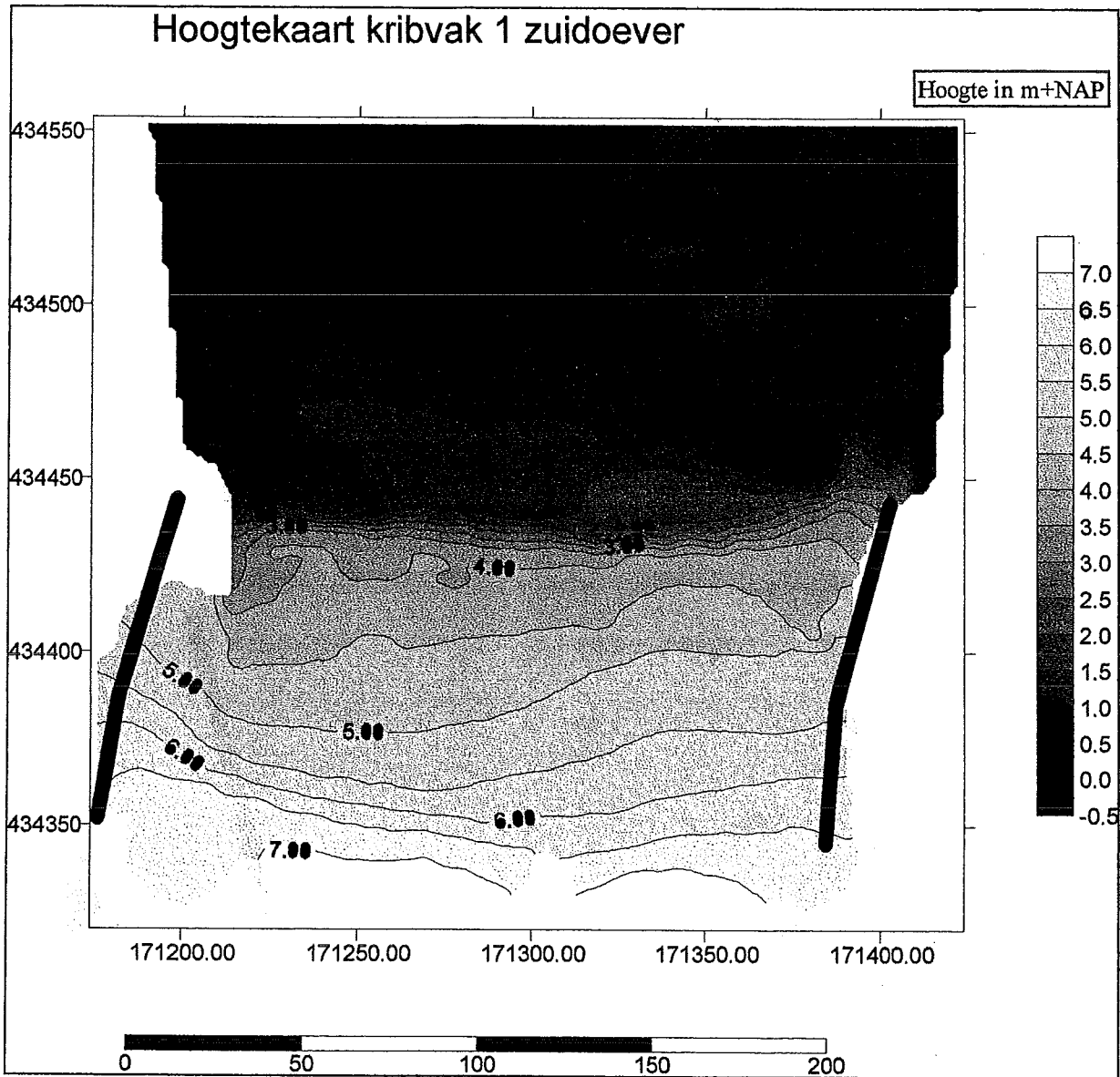


Bijlage 4.1.3 Kribvak 3 met de frameposities en bijbehorende datum, korrelgrootte mediaan (D_{50}) en RDS coördinaten.



Bijlage 4.1.4 Kribvak 4 met de frameposities en bijbehorende datum, korrelgrootte mediaan (D_{50}) en RDS coördinaten.

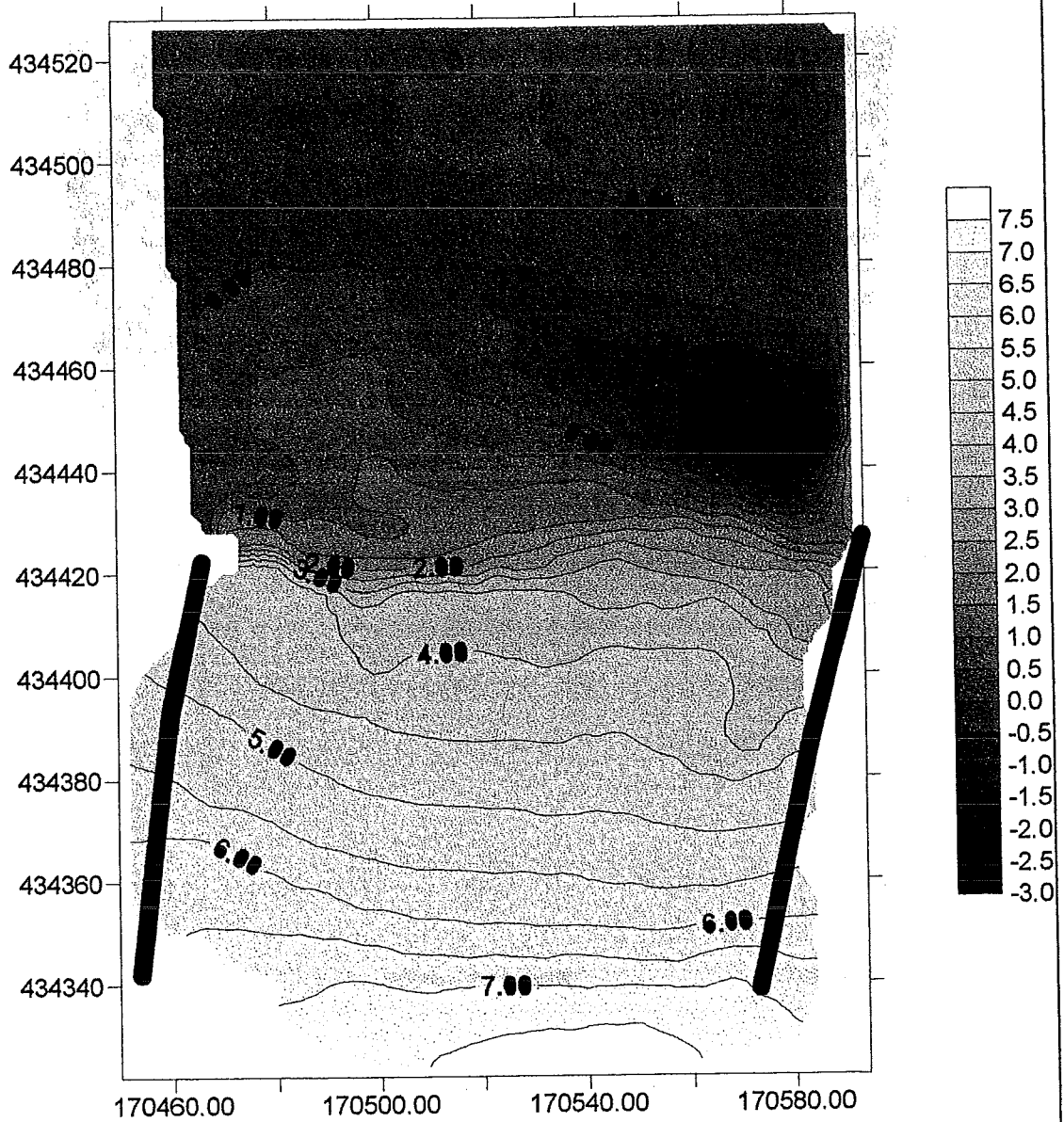
Bijlage 4.2



Bijlage 4.2.1 Hoogtekaart kribvak 1 met RDS coördinaten

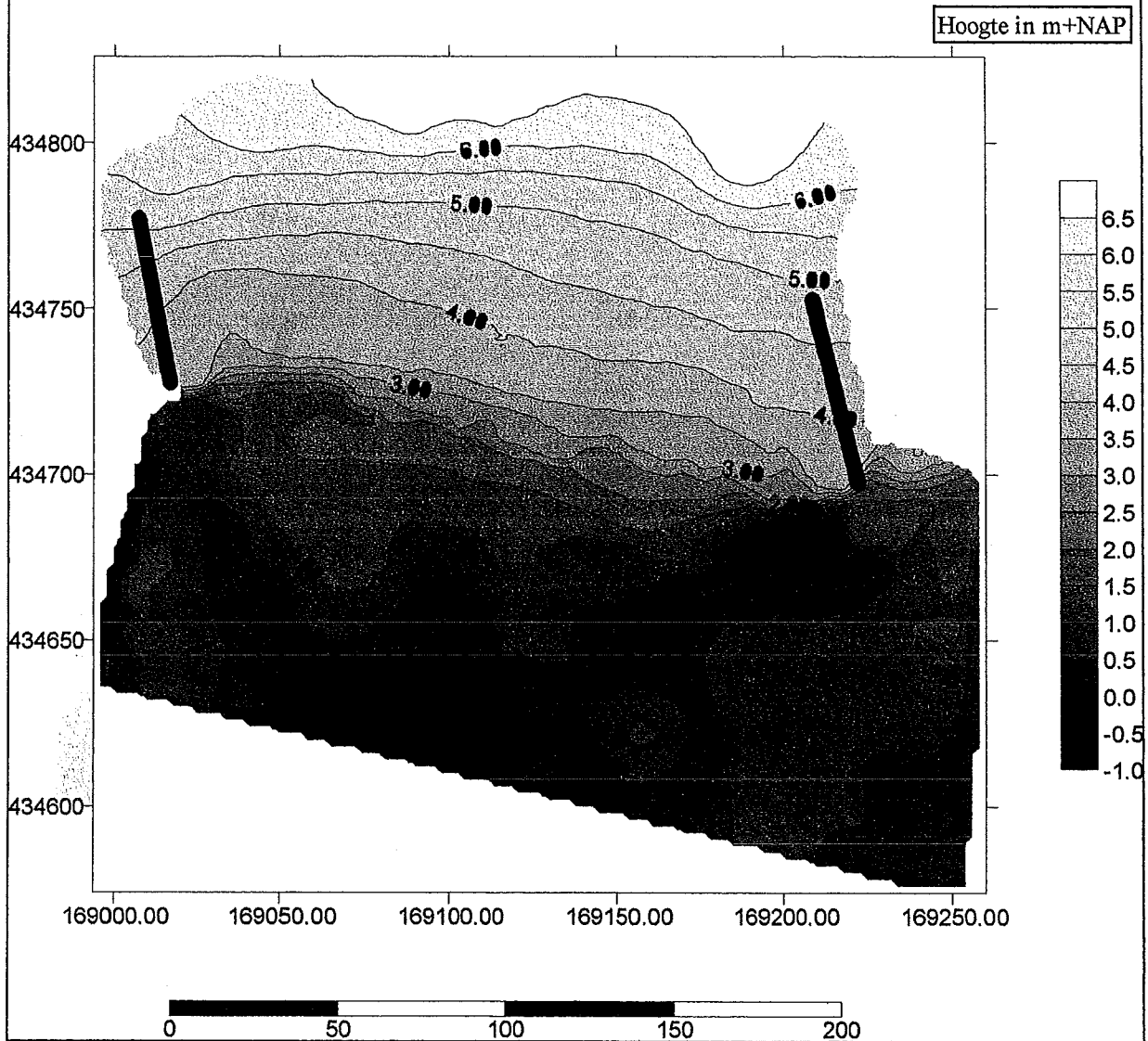
Hoogtekaart kribvak 2 zuidoever

Hoogte in m+NAP

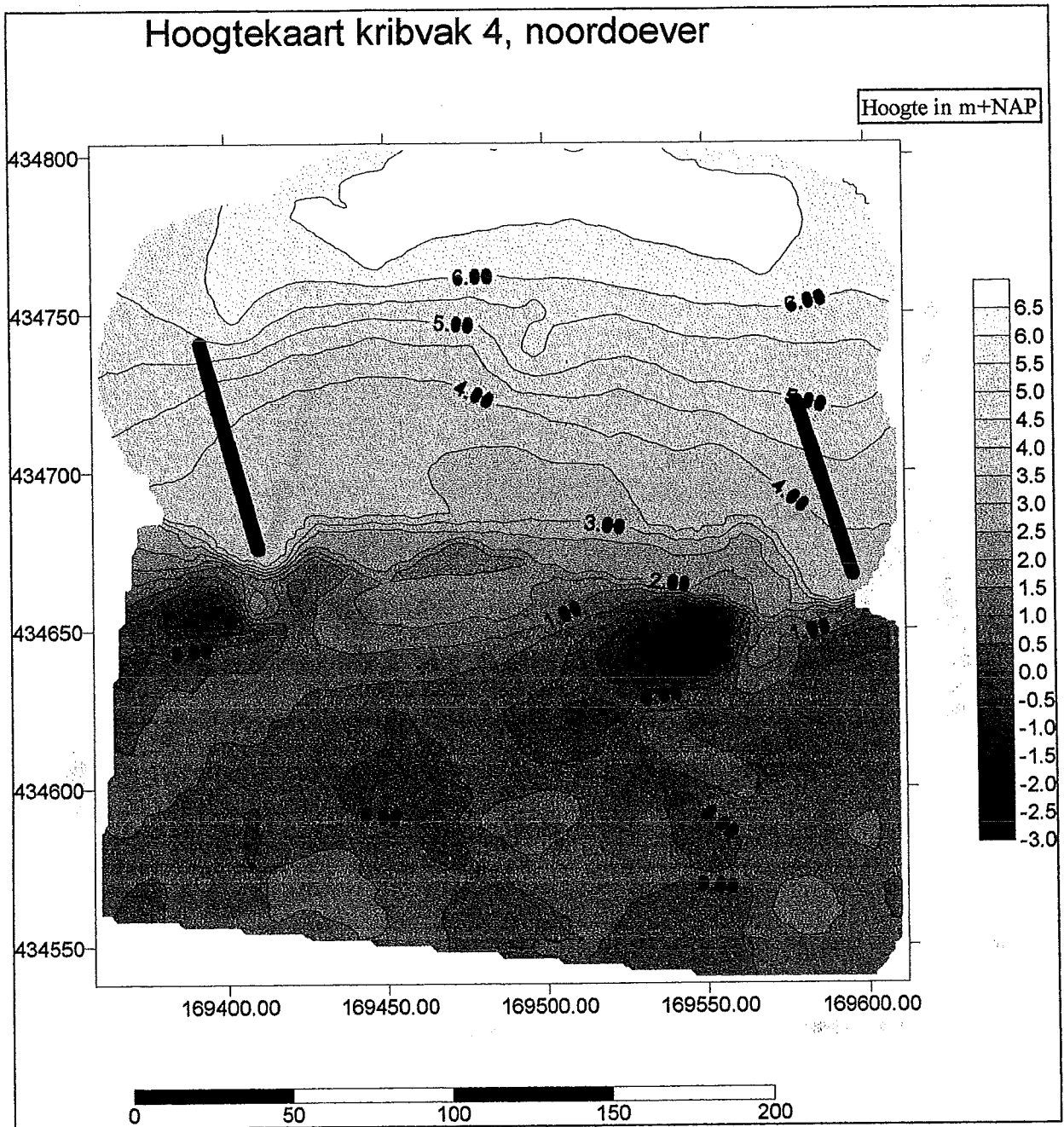


bijlage 4.2.2 Hoogtekaart kribvak 2 met RDS coördinaten

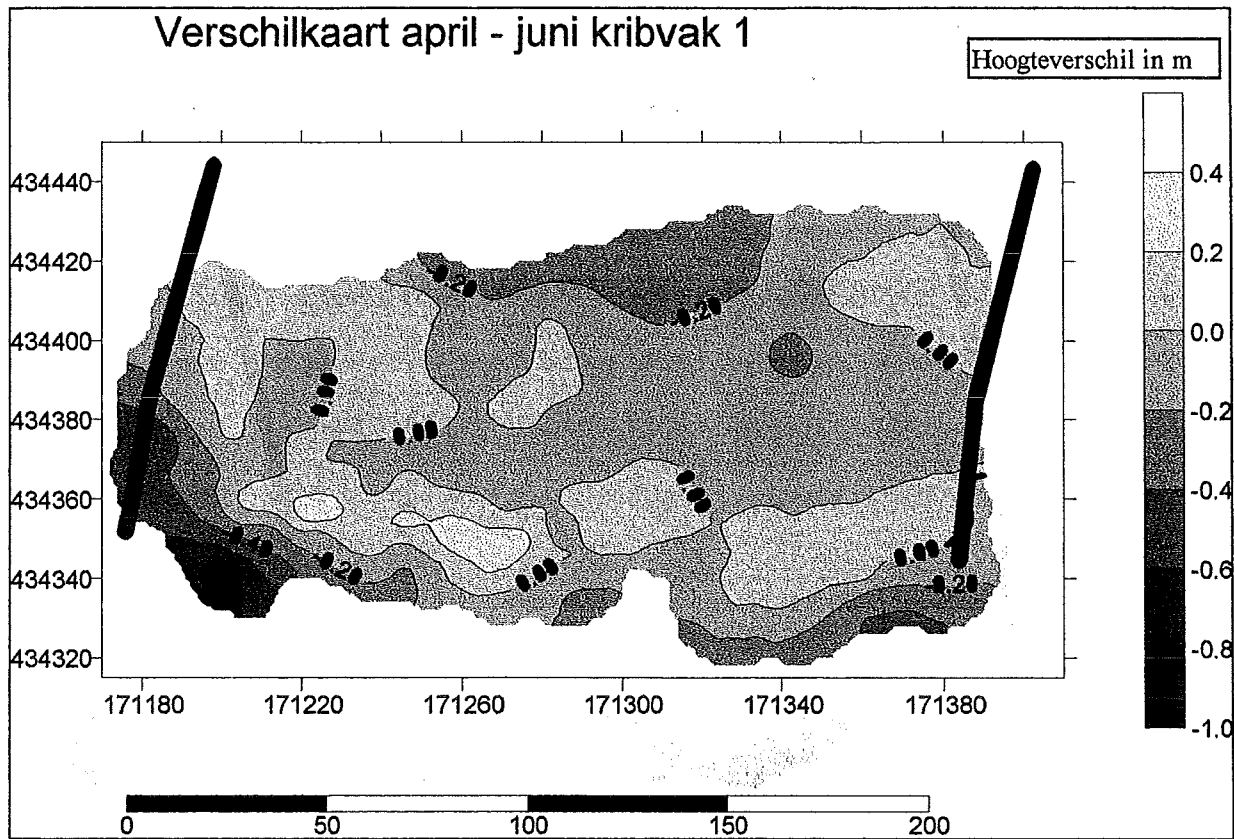
Hoogtekaart kribvak 3 noordoever



bijlage 4.2.3 Hoogtekaart kribvak 3 met RDS coördinaten

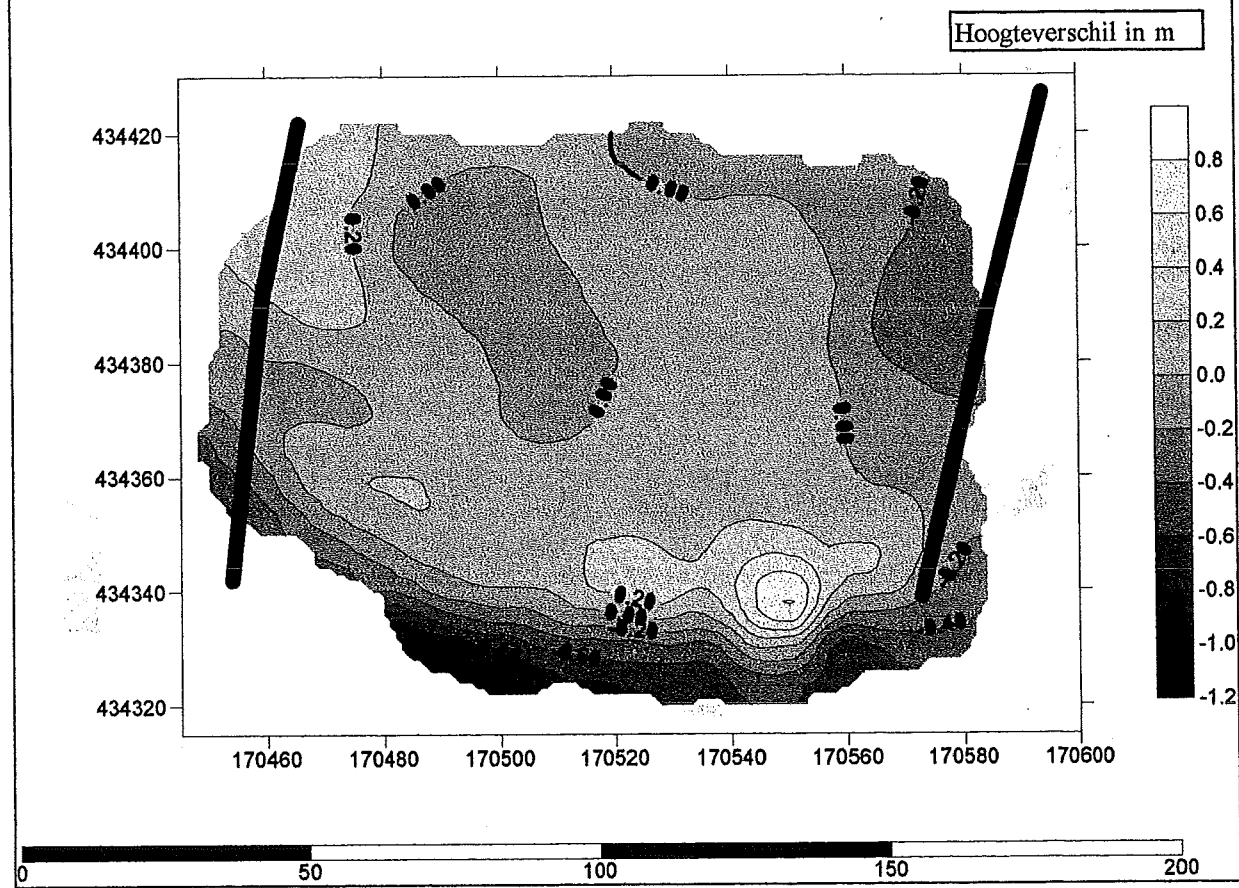


bijlage 4.2.4 Hoogtekaart kribvak 4 met RDS coördinaten

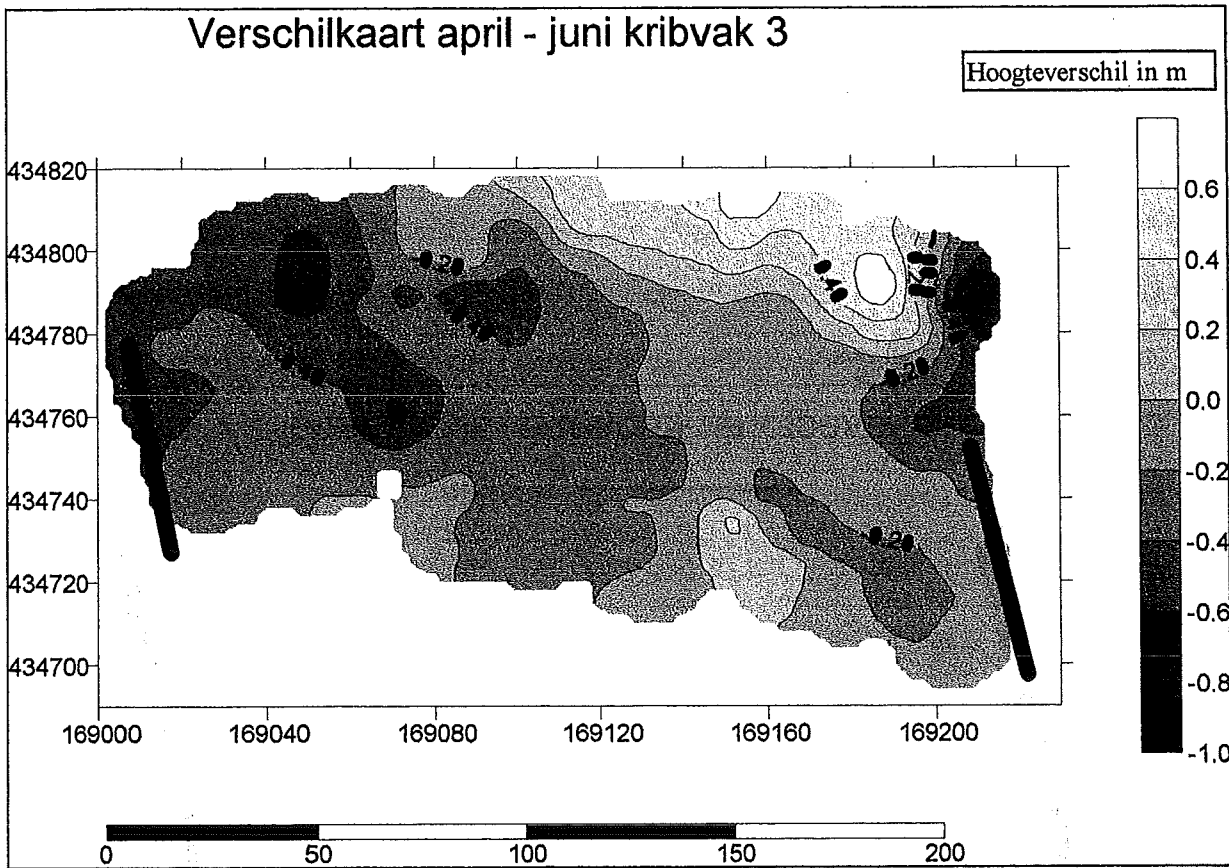


bijlage 4.2.5 Verschilkaart kribvak 1 met RDS coördinaten

Verschilkaart april - juni kribvak 2

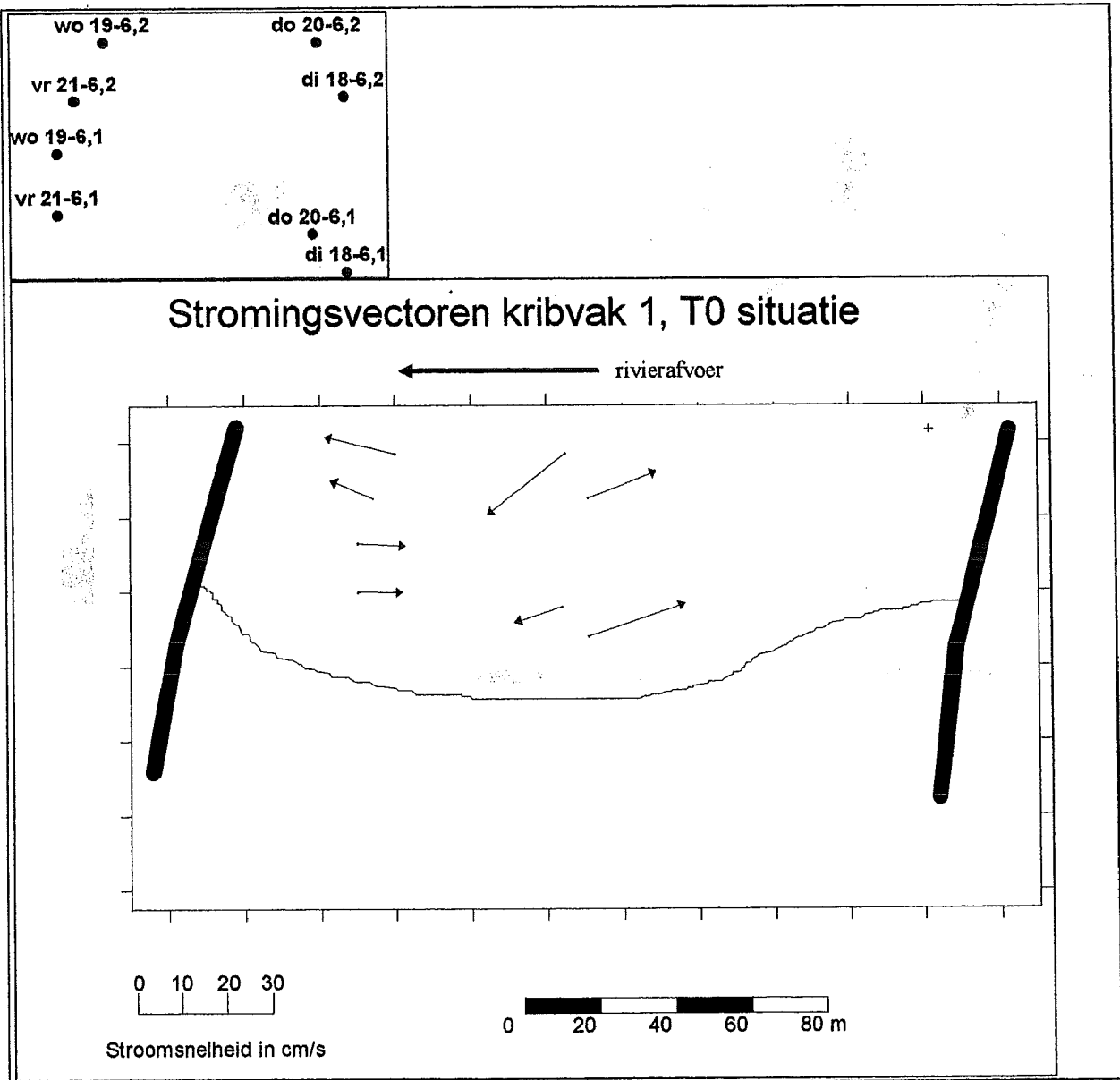


bijlage 4.2.6 Verschilkaart kribvak 2 met RDS coördinaten

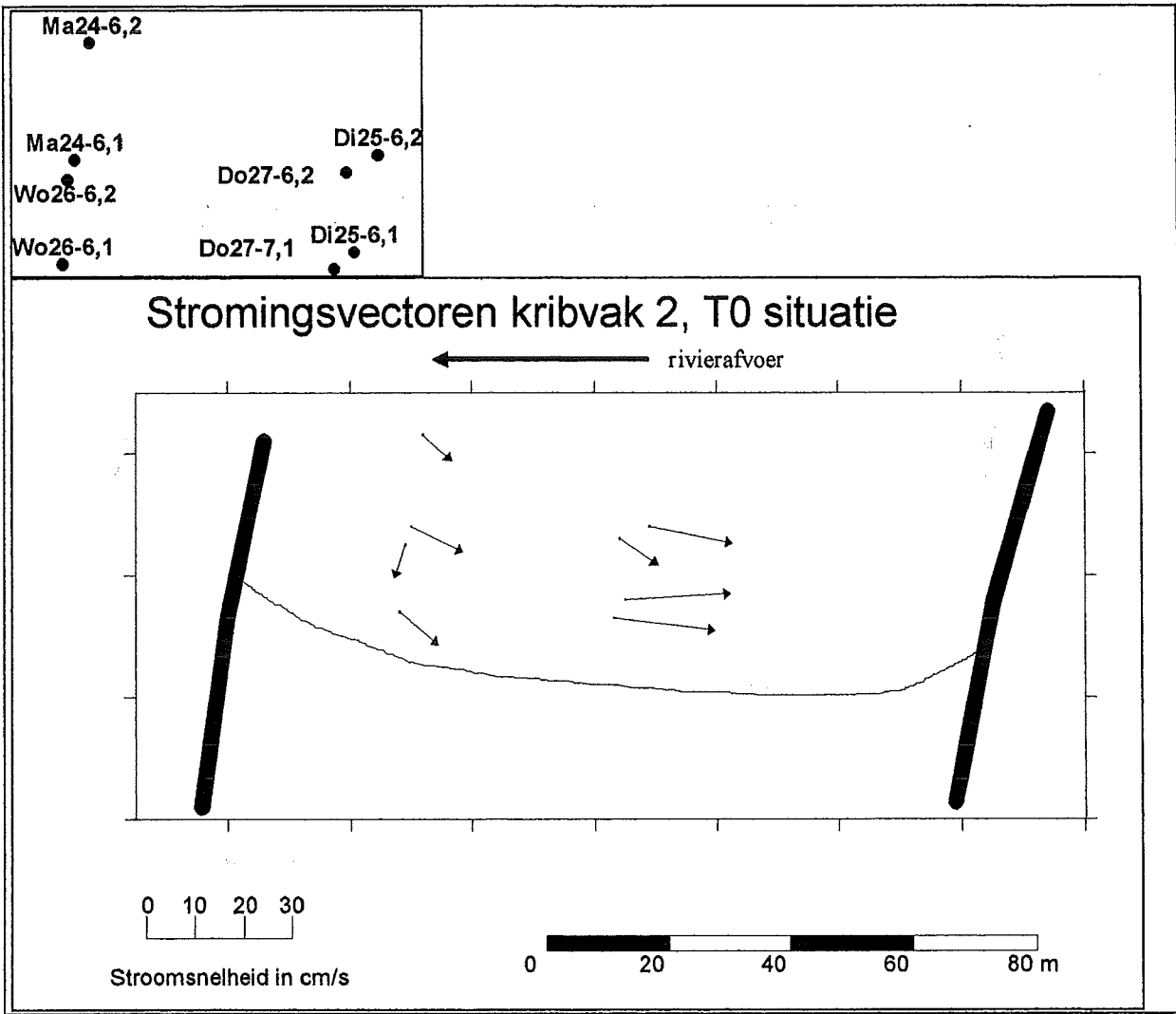


bijlage 4.2.7 Verschilkaart kribvak 3 met RDS coördinaten

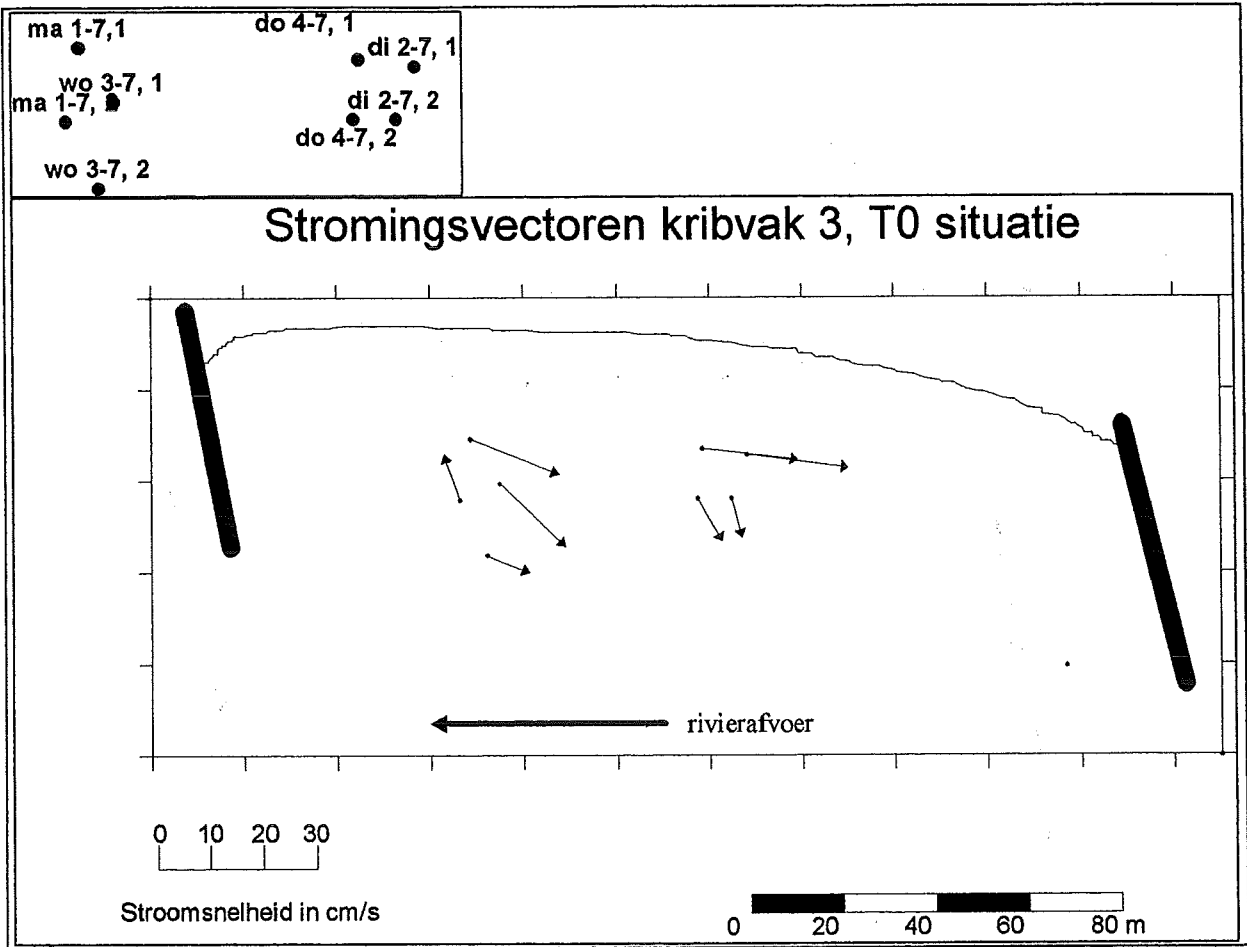
Bijlage 4.3



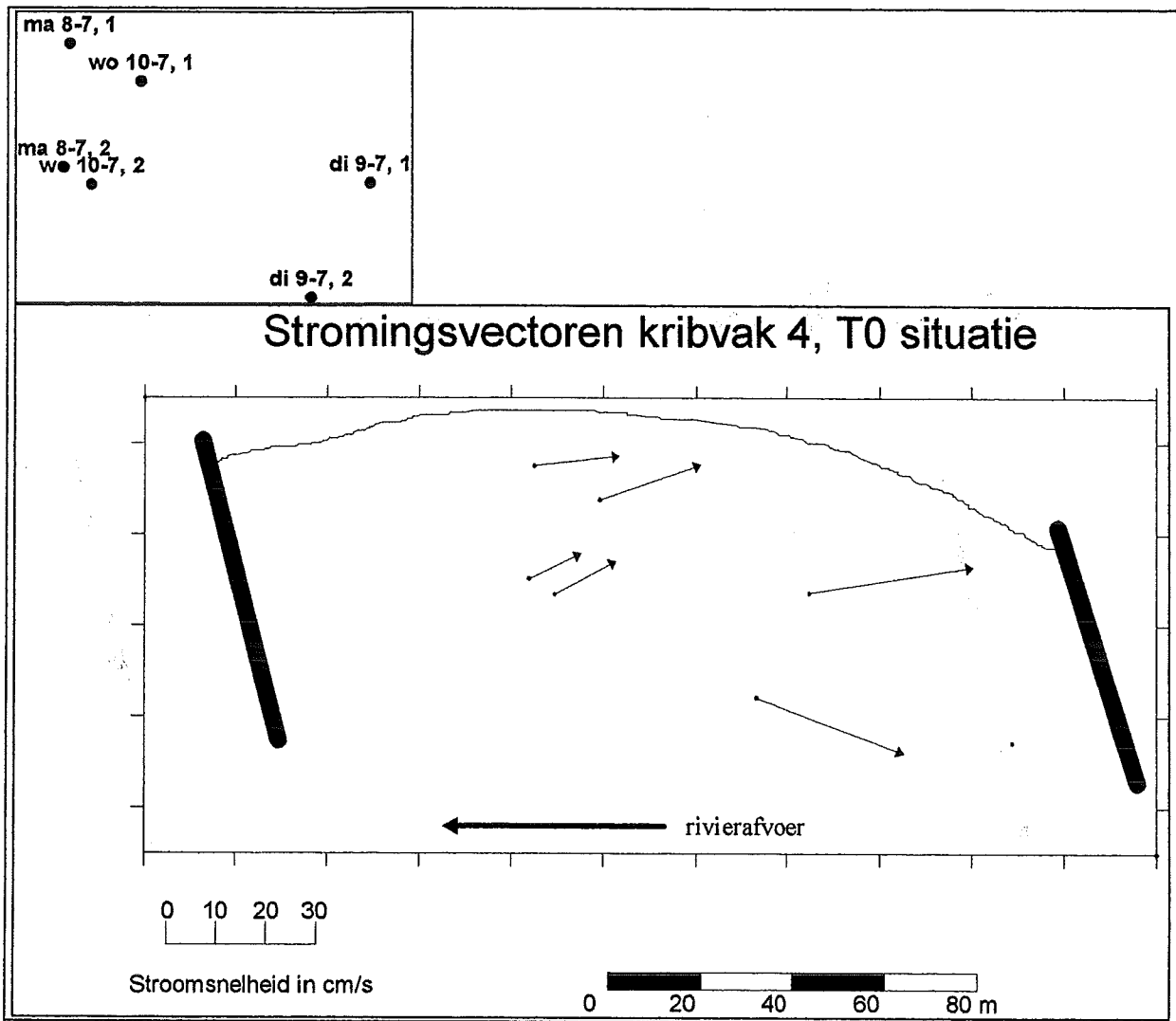
Bijlage 4.3.1 Stromingsvectoren kribvak 1 zonder scheepsinvloeden (inzet: frameposities met datum)



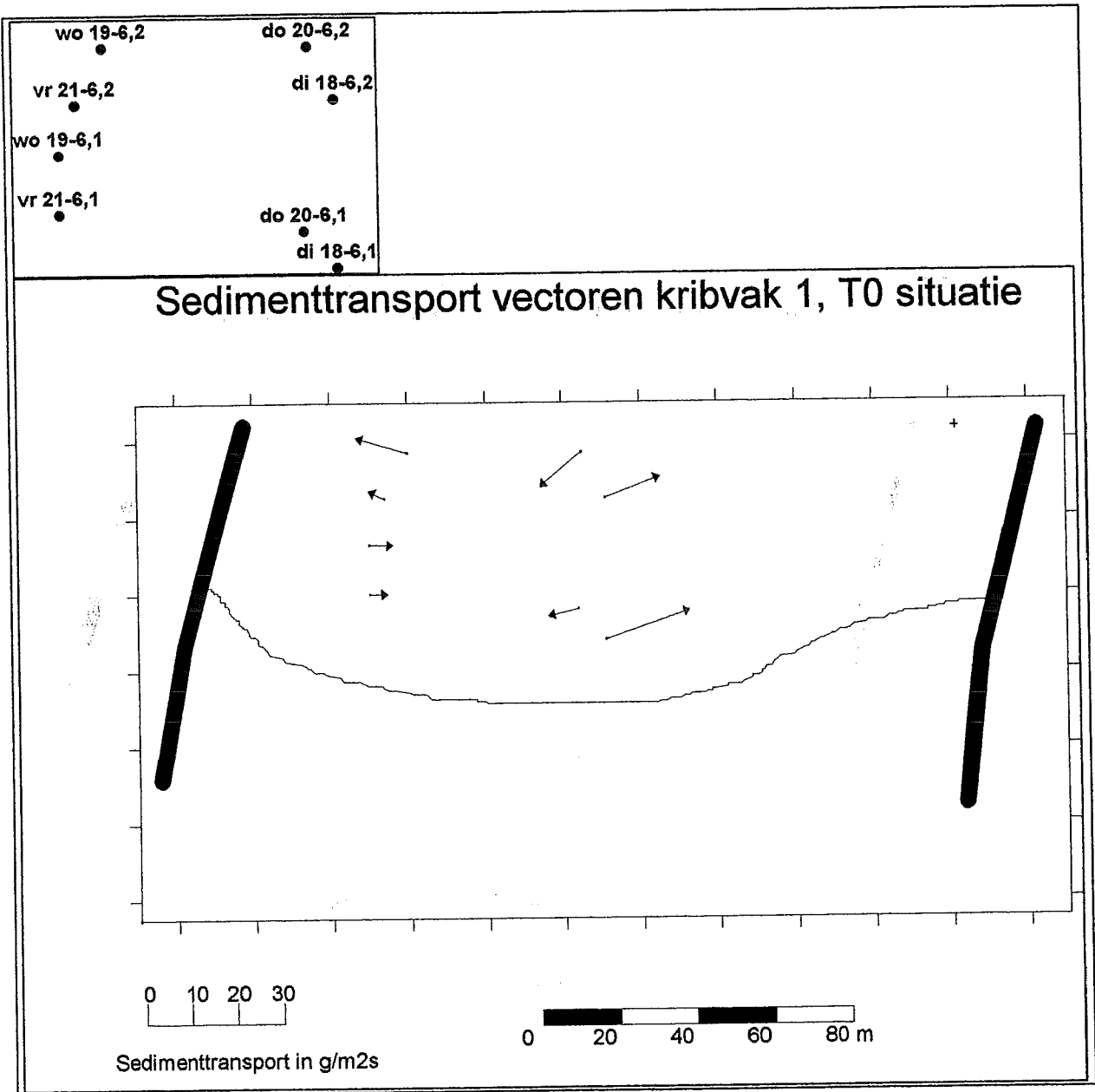
Bijlage 4.3.2 Stromingsvectoren kribvak 2 zonder scheepsinvloeden (inzet: frameposities met datum)



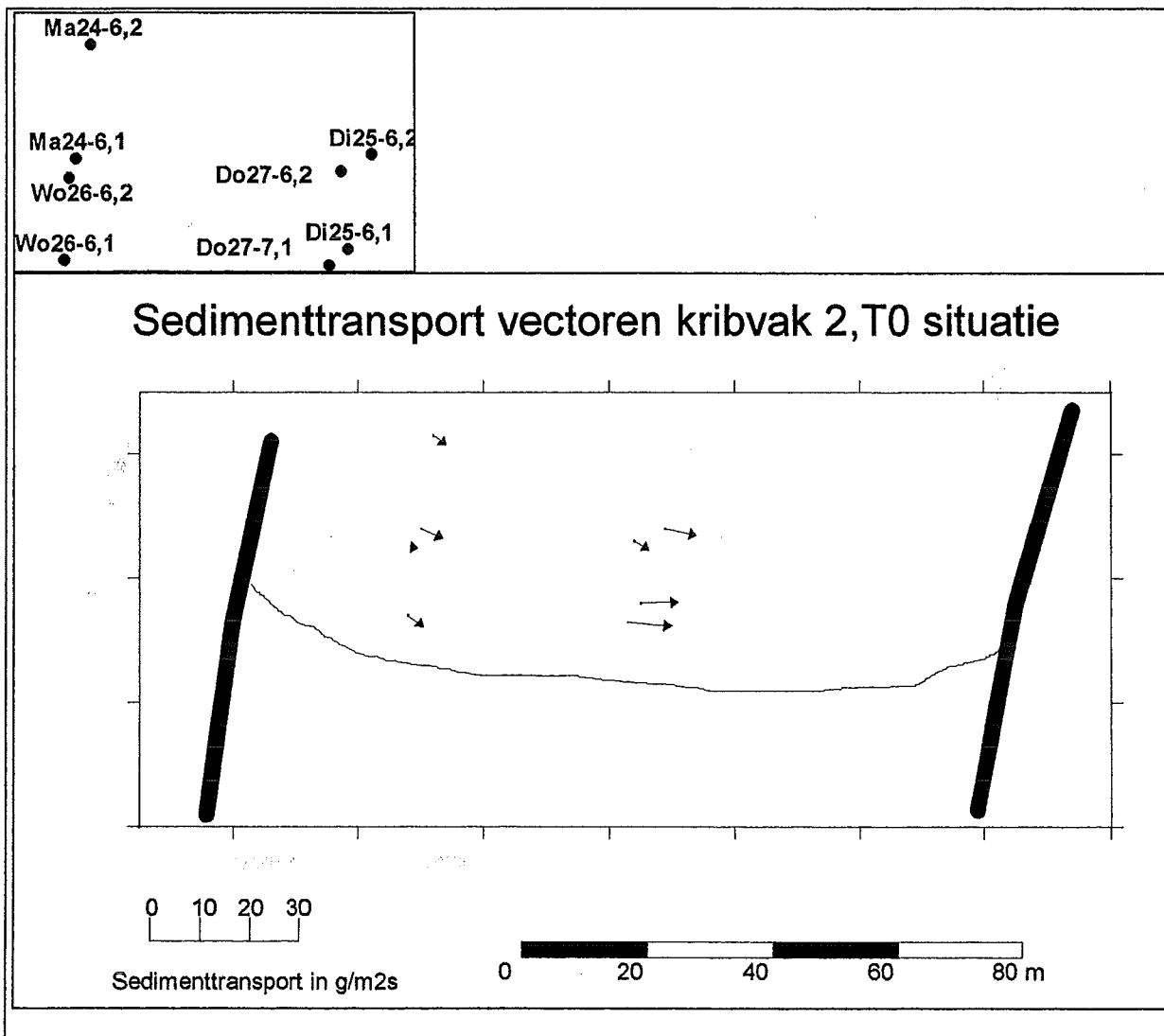
Bijlage 4.3.3 Stromingsvectoren kribvak 3 zonder scheepsinvloeden (inzet: frameposities met datum)



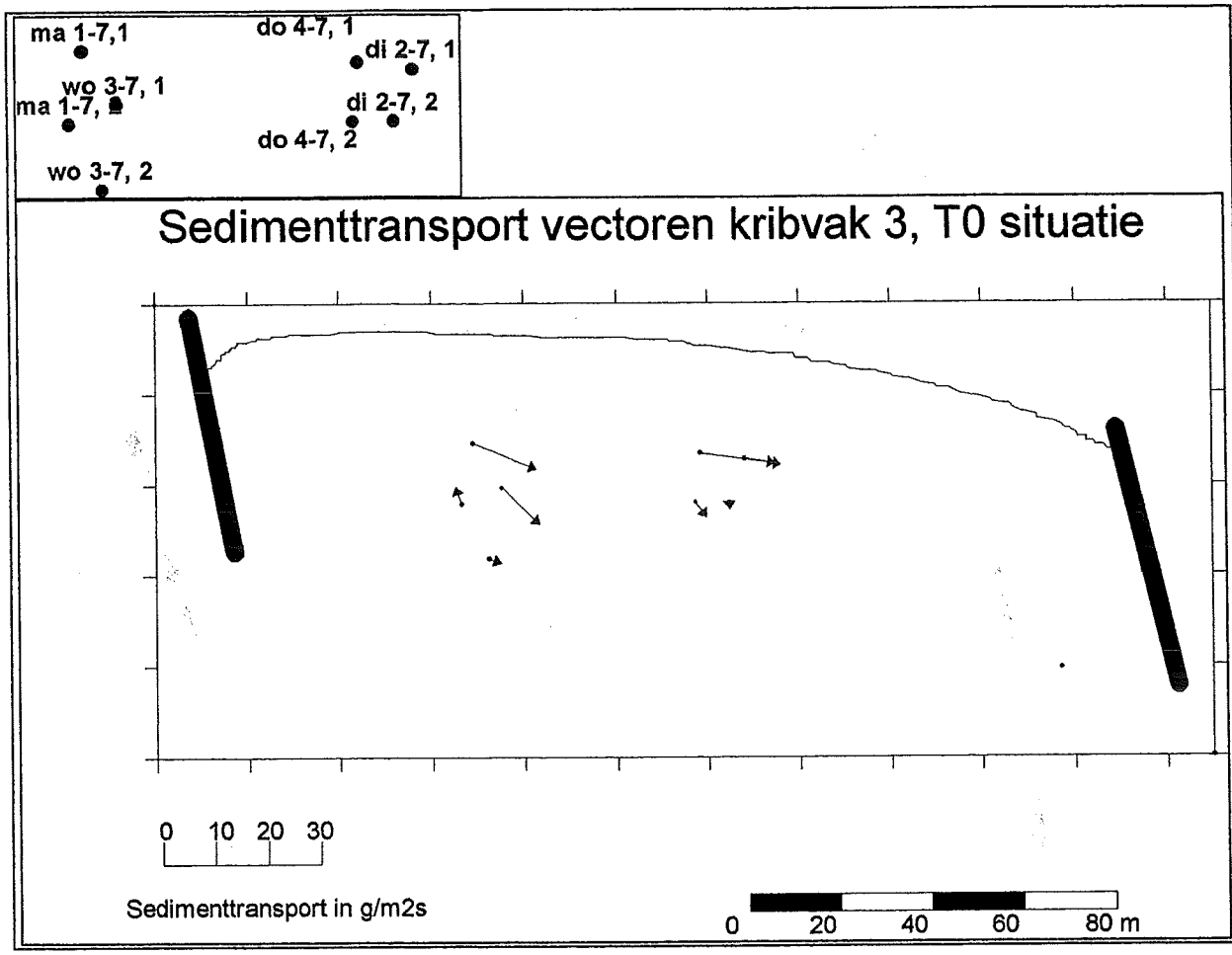
Bijlage 4.3.4 Stromingsvectoren kribvak 4 zonder scheepsinvloeden (inzet: frameposities met datum)



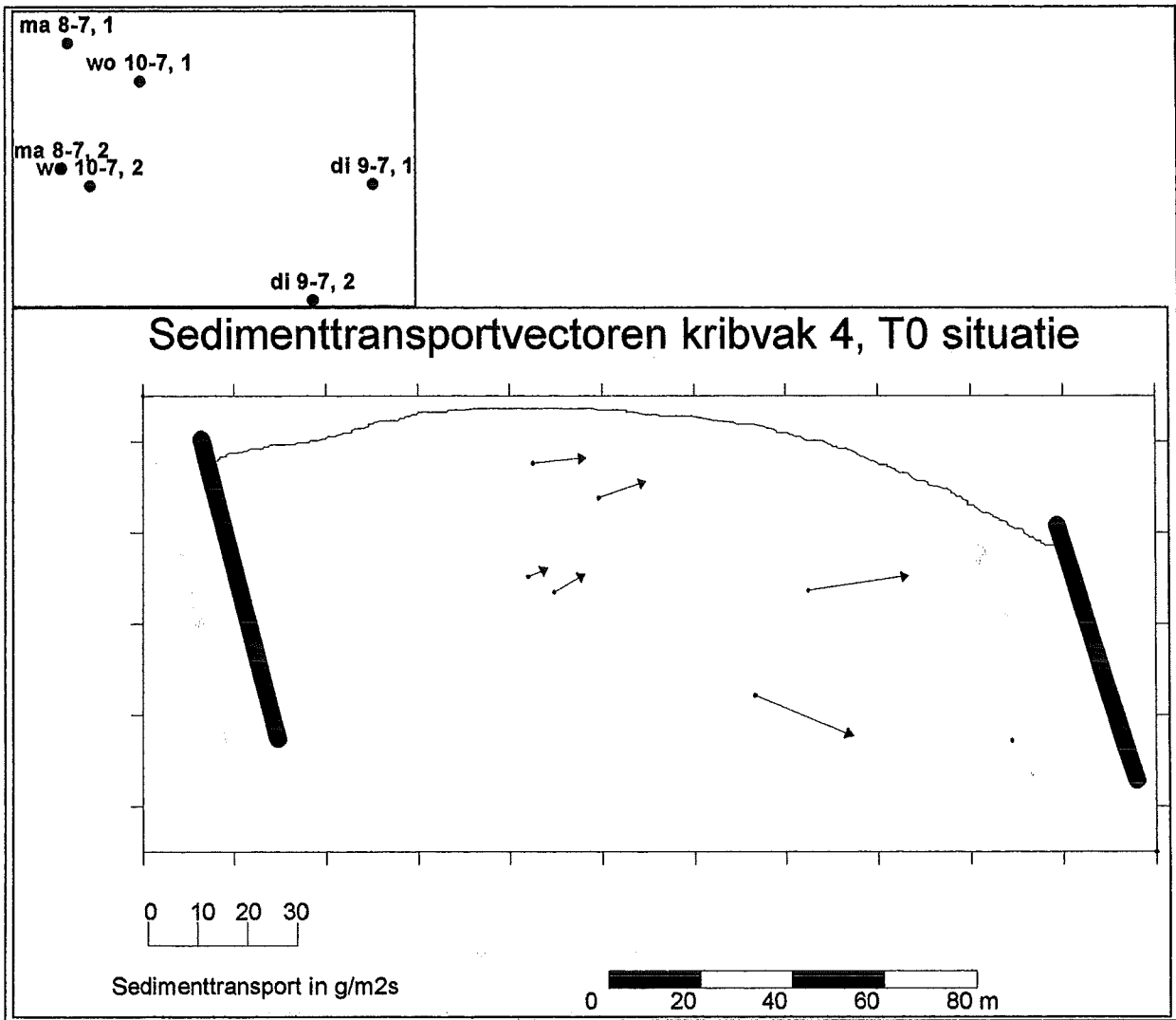
Bijlage 4.3.5 Sediment transport vectoren kribvak 1 zonder scheepsinvloeden (inzet: frameposities met datum)



Bijlage 4.3.6 Sediment transport vectoren kribvak 2 zonder scheepsinvloeden (inzet: frameposities met datum)

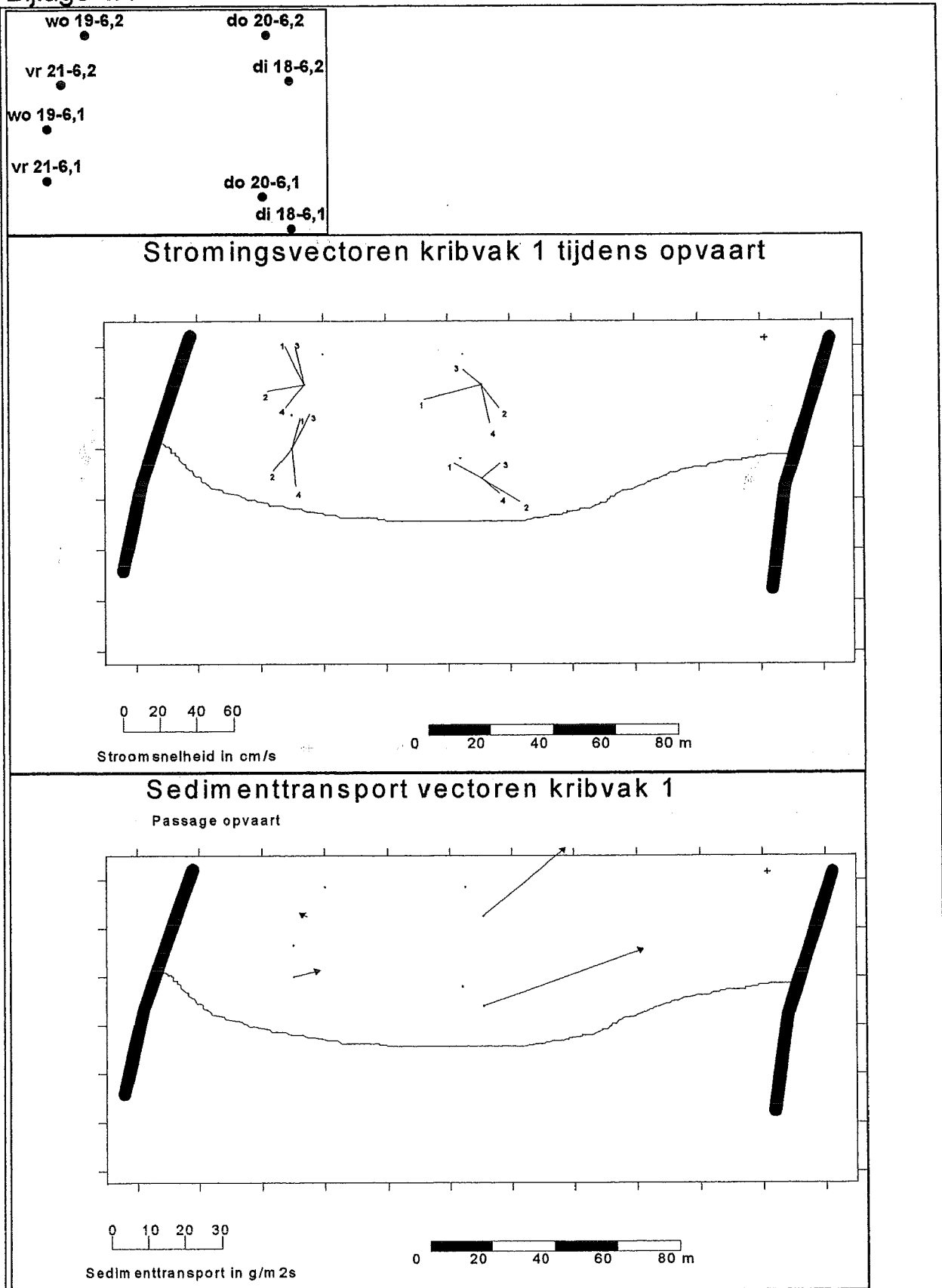


Bijlage 4.3.7 Sediment transport vectoren kribvak 3 zonder scheepsinvloeden (inzet: frameposities met datum)

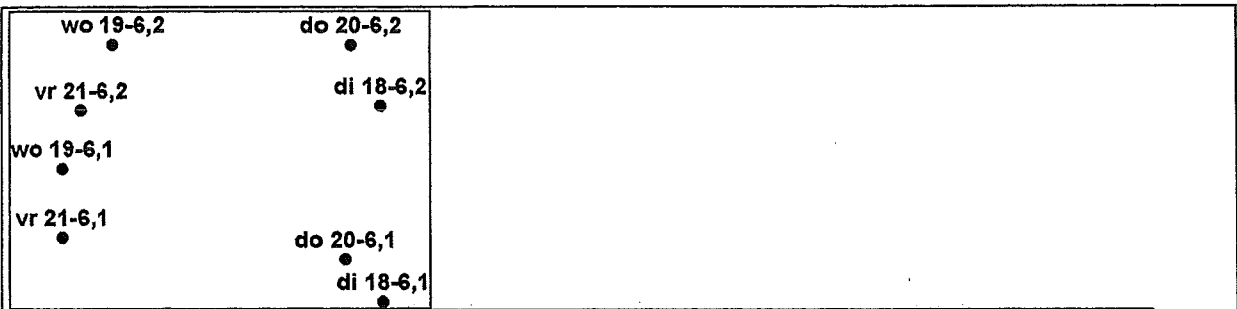


Bijlage 4.3.8 Sediment transport vectoren kribvak 4 zonder scheepsinvloeden (inzet: frameposities met datum).

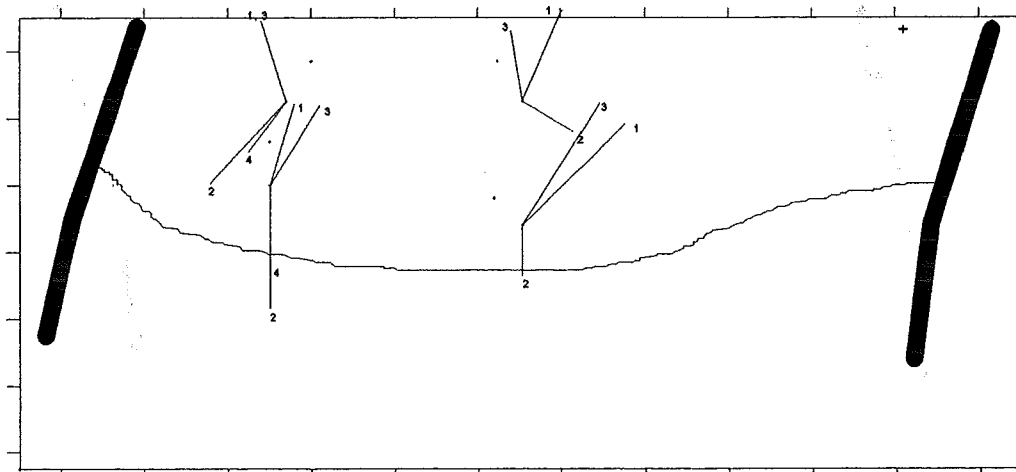
Bijlage 4.4



Bijlage 4.4.1 A Maximale stroomsnelheden tijdens passage opvaart, kribvak 1 (1 = 1^e leegstroom kribvak, 2 = 1^e terugstroom kribvak, 3 = 2^e leegstroom kribvak, 4 = 2^e terugstroom kribvak) en bijbehorende sedimenttransport vectoren. (inzet: frameposities met datum)



Stromingsvectoren kribvak 1 tijdens afvaart

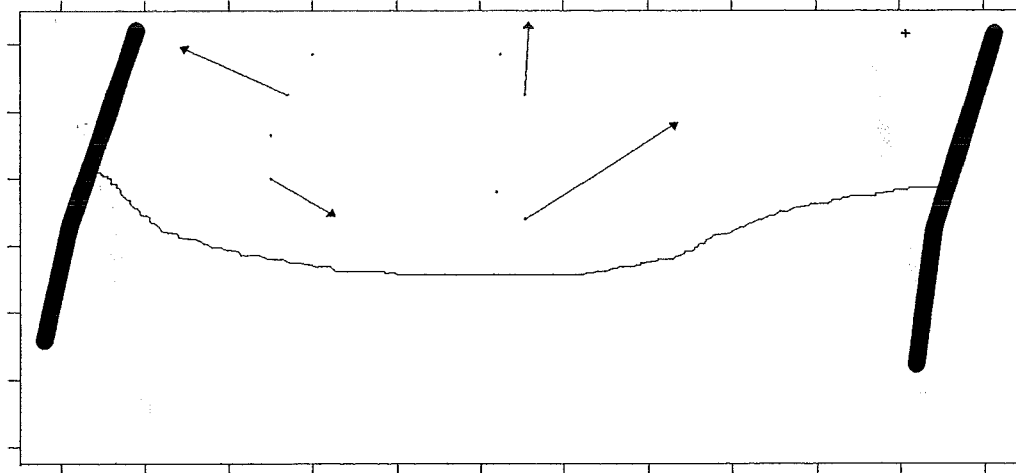


0 20 40 60
Stroomsnelheid in cm/s

0 20 40 60 80 m

Sedimenttransport vectoren kribvak 1

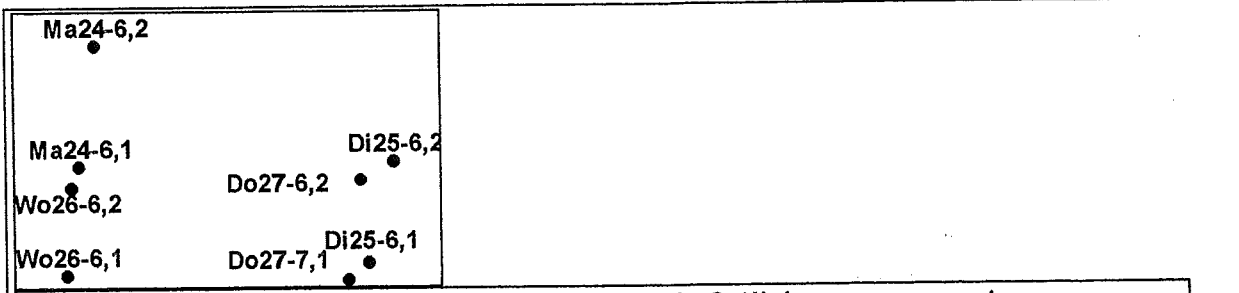
Passage afvaart



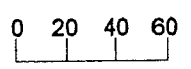
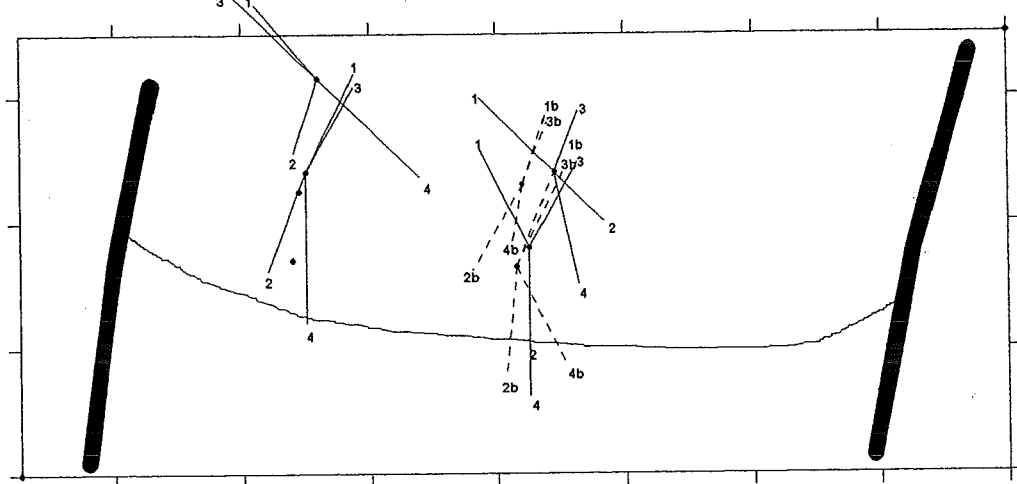
0 10 20 30
Sedimenttransport in g/m²s

0 20 40 60 80 m

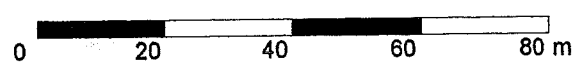
Bijlage 4.4.1 B Maximale stroomsnelheden tijdens passage afvaart, kribvak 1 (1 = 1° leegstroom kribvak, 2 = 1° terugstroom kribvak, 3 = 2° leegstroom kribvak, 4 = 2° terugstroom kribvak) en bijbehorende sedimenttransport vectoren. (inzet: frameposities met datum)



Stromingsvectoren kribvak 2 tijdens opvaart

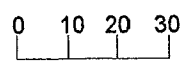
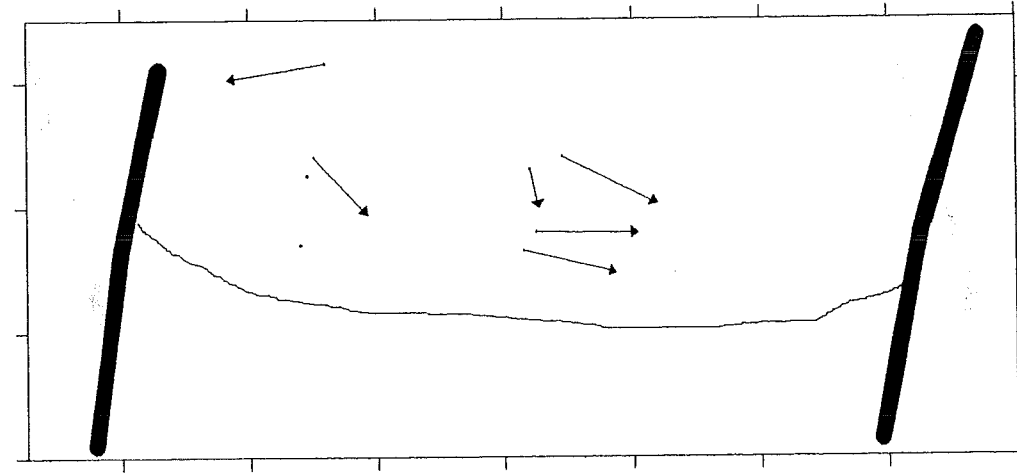


Stroomsnelheid in cm/s

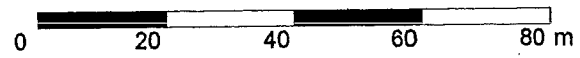


Sedimenttransport vectoren kribvak 2

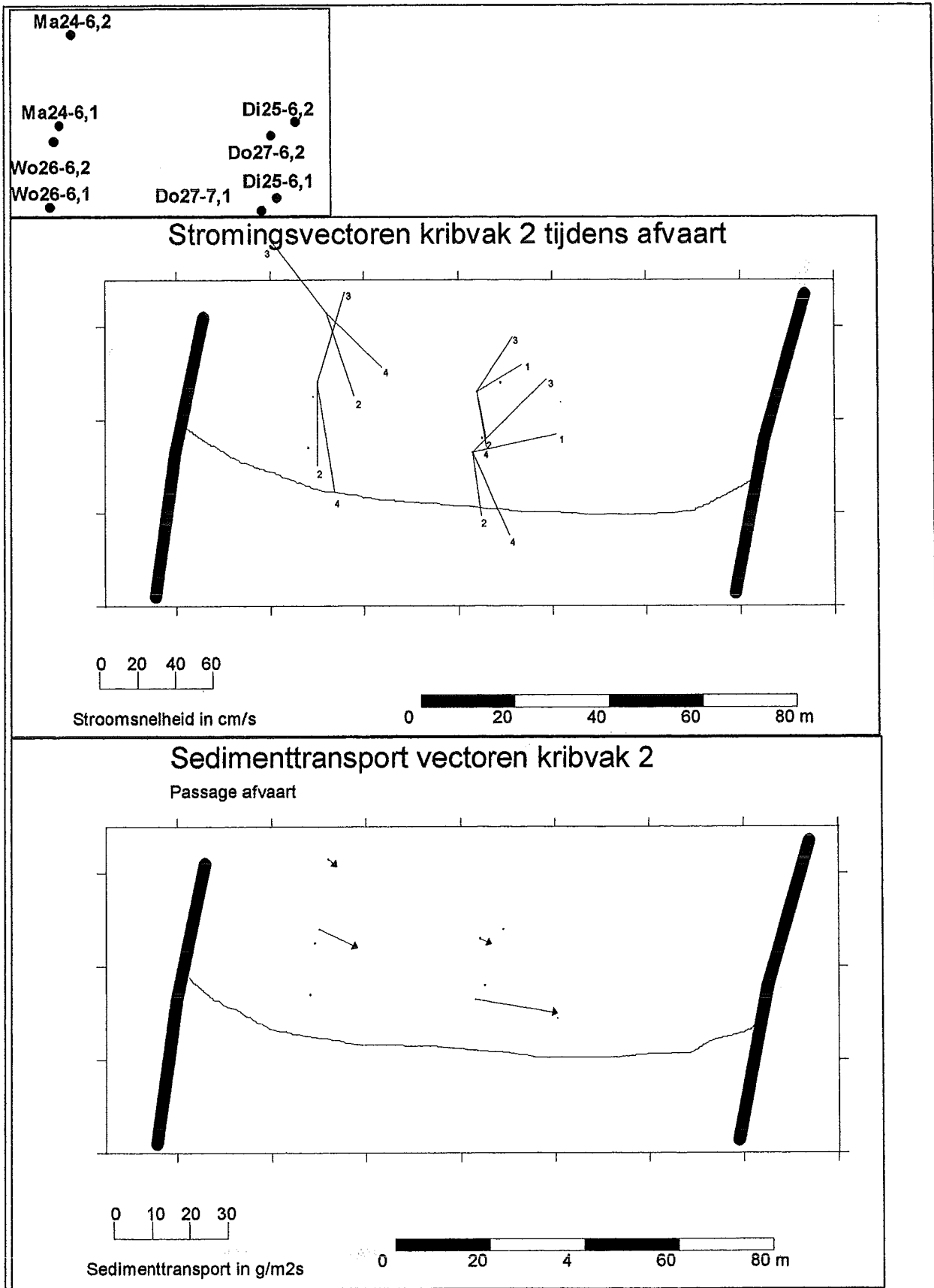
Passage opvaart



Sedimenttransport in g/m2s



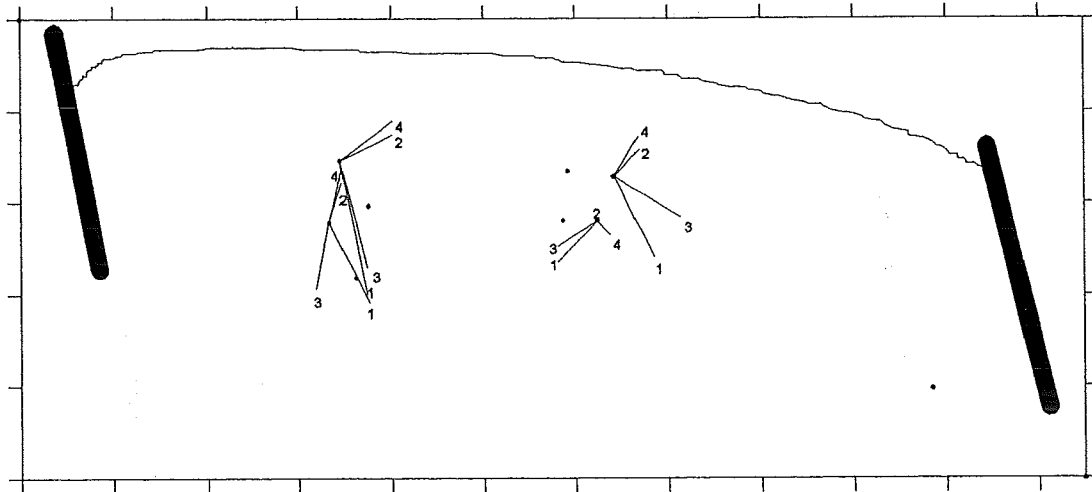
Bijlage 4.4.2 A Maximale stroomsnelheden tijdens passage opvaart, kribvak 1 (1 = 1° leegstroom kribvak, 2 = 1° terugstroom kribvak, 3 = 2° leegstroom kribvak, 4 = 2° terugstroom kribvak) en bijbehorende sedimenttransport vectoren. (inzet: frameposities met datum)



Bijlage 4.4.2B Maximale stroomsnelheden tijdens passage afvaart, kribvak 1 (1 = 1° leegstroom kribvak, 2 = 1° terugstroom kribvak, 3 = 2° leegstroom kribvak, 4 = 2° terugstroom kribvak) en bijbehorende sedimenttransport vectoren. (inzet: frameposities met datum)

ma 1-7,1	do 4-7, 1	di 2-7, 1
wo 3-7, 1		di 2-7, 2
ma 1-7, 2	do 4-7, 2	
wo 3-7, 2		

Stromingsvectoren kribvak 3 tijdens opvaart



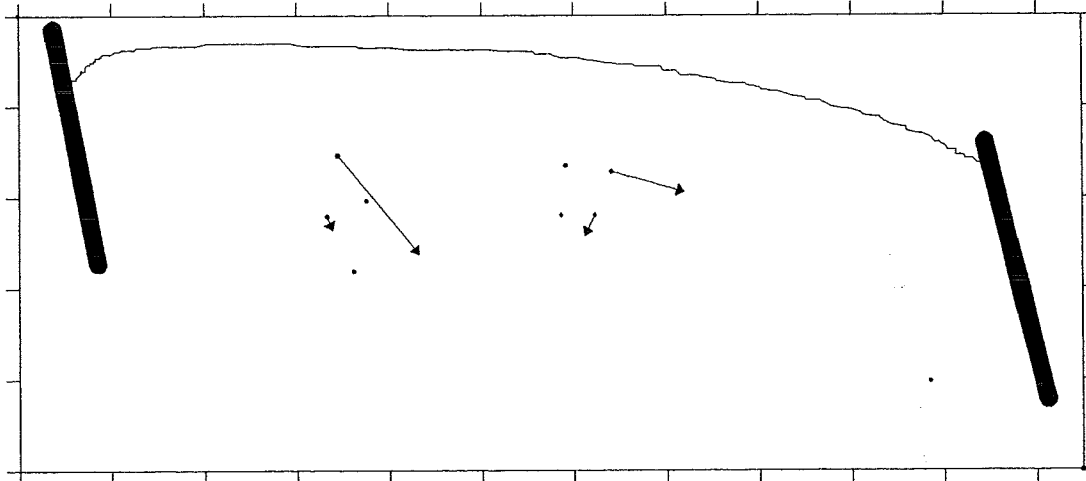
0 20 40 60

Stroomsnelheid in cm/s

0 20 40 60 80 m

Sedimenttransport vectoren kribvak 3

Passage opvaart



0 10 20 30

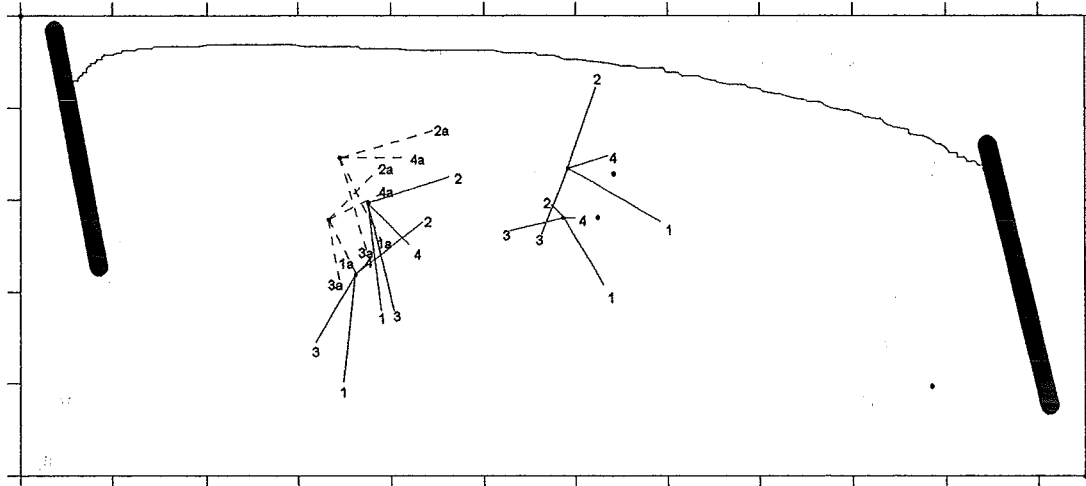
Sedimenttransport in g/m2s

0 20 40 60 80 m

Bijlage 4.4.3 A Maximale stroomsnelheden tijdens passage opvaart, kribvak 1 (1 = 1° leegstroom kribvak, 2 = 1° terugstroom kribvak, 3 = 2° leegstroom kribvak, 4 = 2° terugstroom kribvak) en bijbehorende sedimenttransport vectoren. (inzet: frameposities met datum)

ma 1-7,1	do 4-7, 1	di 2-7, 1
wo 3-7, 1		di 2-7, 2
ma 1-7, 2	do 4-7, 2	
wo 3-7, 2		

Stromingsvectoren kribvak 3 tijdens afvaart



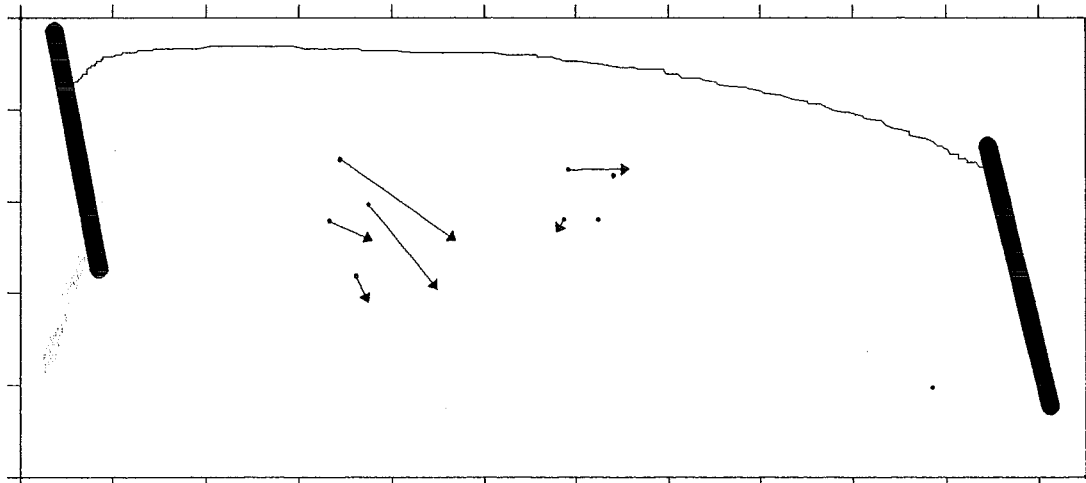
0 20 40 60

Stroomsnelheid in cm/s

0 20 40 60 80 m

Sedimenttransport vectoren kribvak 3

Passage afvaart

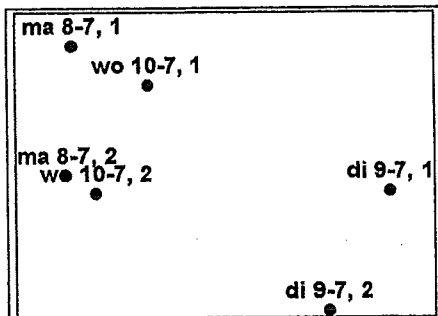


0 10 20 30

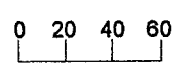
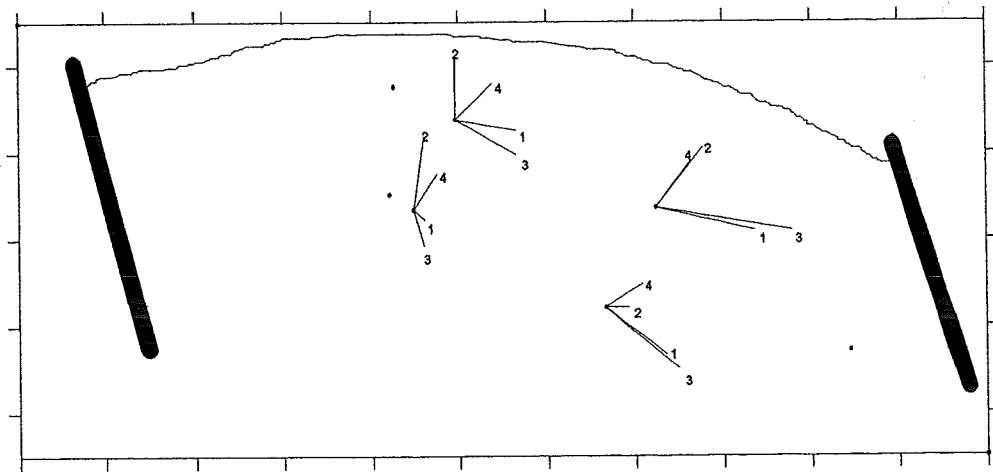
Sedimenttransport in g/m2s

0 20 40 60 80 m

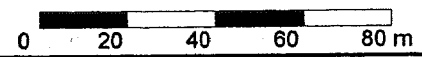
Bijlage 4.4.3 B Maximale stroomsnelheden tijdens passage afvaart, kribvak 1 (1 = 1° leegstroom kribvak, 2 = 1° terugstroom kribvak, 3 = 2° leegstroom kribvak, 4 = 2° terugstroom kribvak) en bijbehorende sedimenttransport vectoren. (inzet: frameposities met datum)



Stromingsvectoren kribvak 4 tijdens opvaart

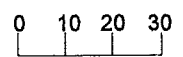
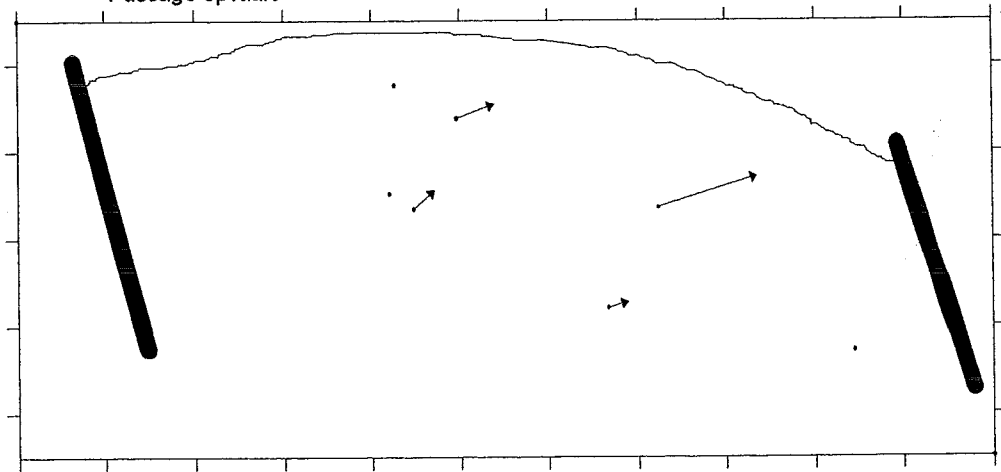


Stroomsnelheid in cm/s

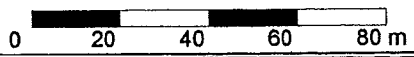


Sedimenttransport vectoren kribvak 4

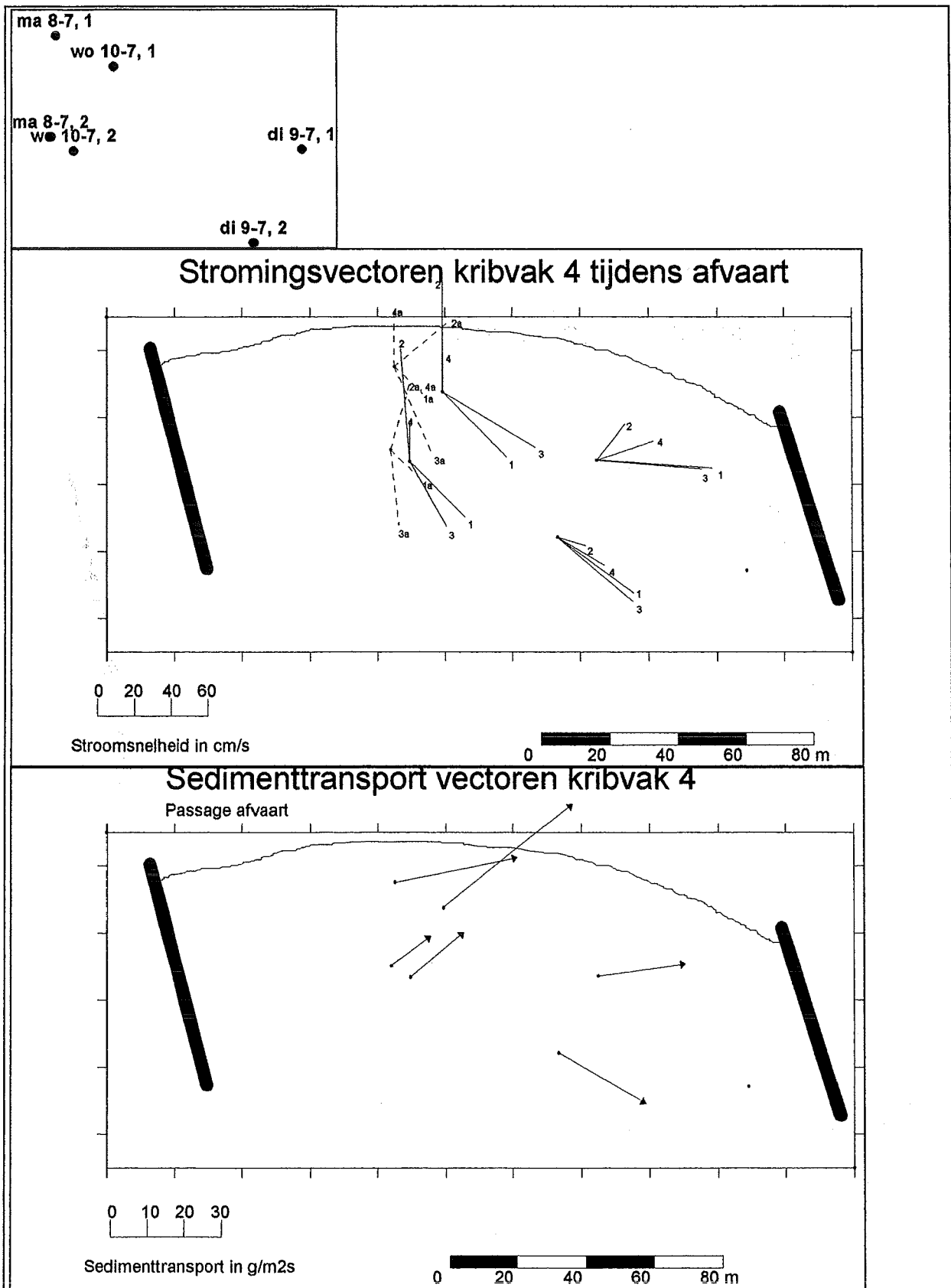
Passage opvaart



Sedimenttransport in g/m²s

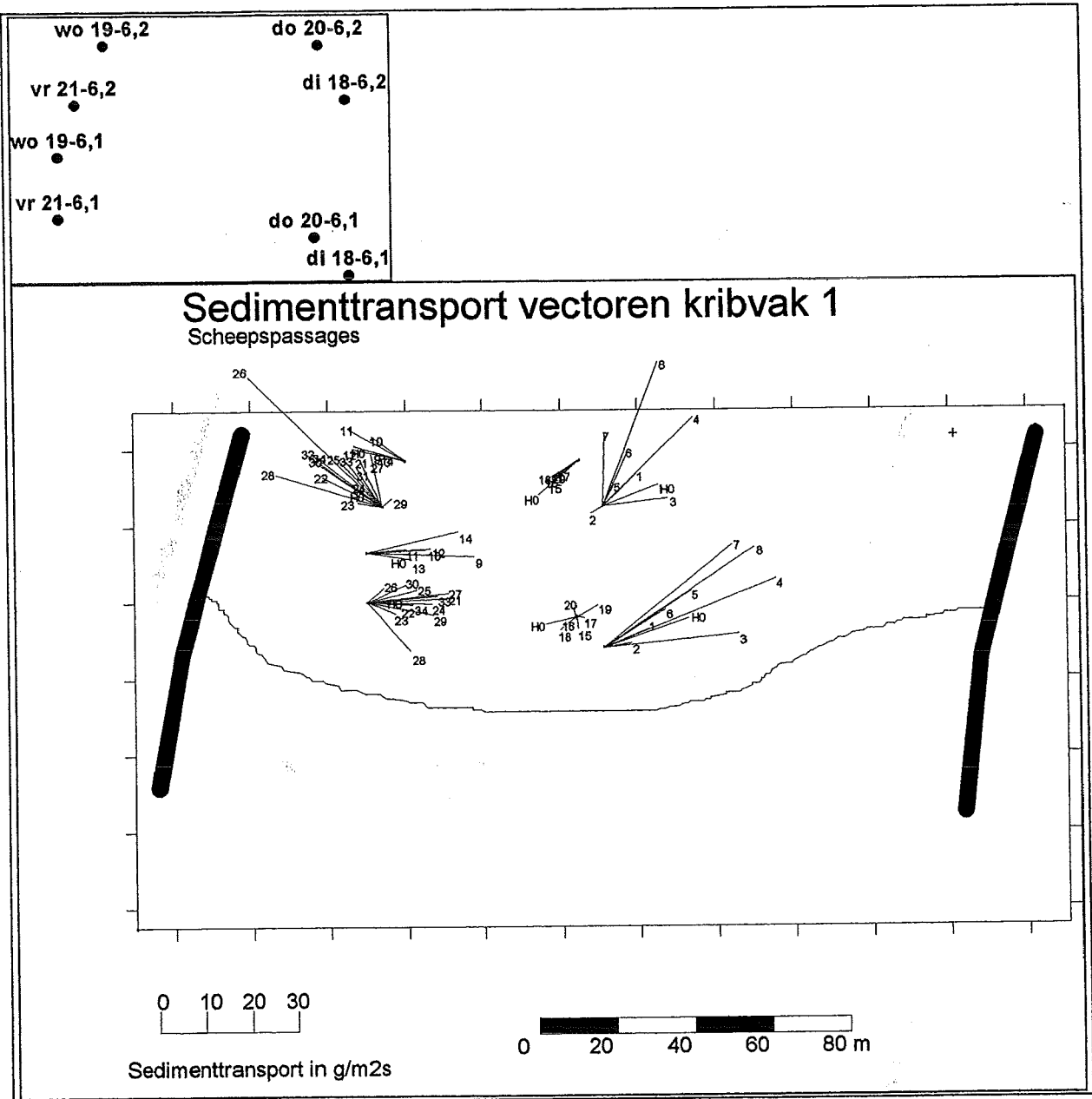


Bijlage 4.4.4 A Maximale stroomsnelheden tijdens passage opvaart, kribvak 1 (1 = 1° leegstroom kribvak, 2 = 1° terugstroom kribvak, 3 = 2° leegstroom kribvak, 4 = 2° terugstroom kribvak) en bijbehorende sedimenttransport vectoren. (inzet: frameposities met datum)



Bijlage 4.4.4 B Maximale stroomsnelheden tijdens passage afvaart, kribvak 1 (1 = 1^o leegstroom kribvak, 2 = 1^o terugstroom kribvak, 3 = 2^o leegstroom kribvak, 4 = 2^o terugstroom kribvak) en bijbehorende sedimenttransport vectoren. (inzet: frameposities met datum).

Bijlage 4.5



bijlage 4.5.1A Sedimenttransport vectoren met nummering van scheepspassage, kribvak 1. (inzet: frameposities met datum)

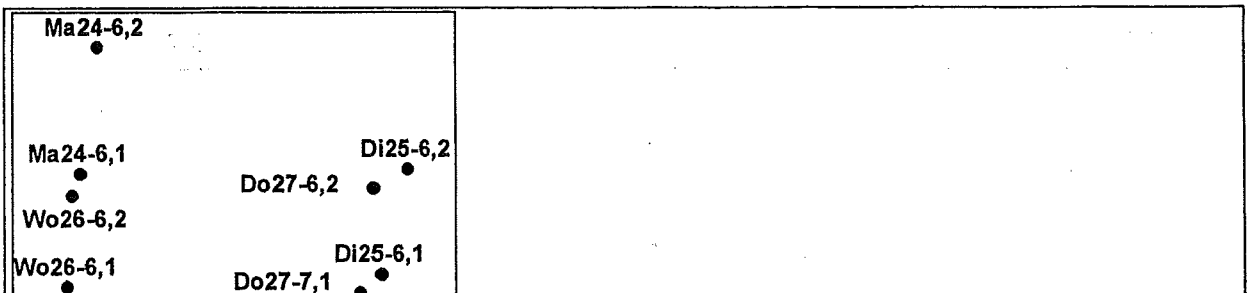
passage	Type schip	lengte (m)	breedte (m)	diepgang (m)	belading	vaart	positie	v (m/s)
X		4	85	8.2	3vol	op	ZO	3.3
1*		3	110	11.4	3vol	af	AS	5.8
*		5	67	8.2	3vol	af	NO	4.8
2		1	170	22.8	4vol	op	AS	2.7
3		9	100	20.5	1leeg	af	NO	5.0
4		3	91	11.5	3vol	op	AS	3.1
5		3	100	10.5	3vol	op	AS	3.6
6		4	85	9.5	1leeg	op	ZO	3.7
X		4	80	9.5	1leeg	op	ZO	3.6
X		3	100	9.5	3vol	op	AS	3.4
7		1	180	22.8	0.4leeg	af	NO	5.8

16		3	110	11.4	3vol	af	NO	6.5
X		6	67	6.6	2.8vol	af	NO	4.5
17		4	80	8.2	3vol	op	ZO	3.1
18		5	67	8.2	2half	af	NO	4.8
X		9	100	11.4	1leeg	op	ZO	2.9
19		4	80	9.5	2half	af	NO	6.7
20		4	80	9.5	3vol	af	NO	3.8
21		3	107	11.4	3vol	af	NO	5.9
22*		5	67	7.1	2.8vol	af	NOa	6.1
*		3	88	10.5	3vol	op	ZOa	3.7
*		5	75	8.2	3vol	op	ZOa	2.9
*		4	85	8.2	1leeg	af	NO	6.1
23		3	100	9.5	3vol	op	ZOa	3.6
24		6	47	6.5	0.7leeg	op	ZOa	3.6
25*		5	60	8.7	0.9leeg	op	ZOz	3.2
*		5	67	8.2	2.9vol	af	NO	4.8
*		4	80	10	1leeg	af	NO	7.3
*		5	67	8	2.9vol	af	NO	4.5
*		6	60	6.6	2.7vol	af	NO	5.5
26		1	182	11.4	4vol	op	ZOa	2.4
X		4	85	9.1	1leeg	op	ZO	3.1
X		5	67	8.2	2.9vol	af	NOa	5.2
X		5	67	8.2	2.9vol	op	ZO	2.5
X		5	55	7.2	2.7vol	af	NO	5.0
27		1	180	22.8	0.4leeg	af	AS	5.1
28		4	75	8.2	2half	af	NO	6.3
X		9	80	8	1leeg	op	ZO	2.4
X		5	67	8.2	2half	af	NO	5.2
29		3	104	10.5	3vol	af	NO	5.2
30*		5	70	8.2	2.9vol	af	NO	5.4
*		5	67	8.2	0.9leeg	af	NO	6.1
*		2	185	10.5	4vol	op	ZO	3.2
*		5	67	8.2	0.9leeg	af	NO	5.6
31		4	81	9.5	3vol	op	AS	3.4
32		4	85	8.2	3vol	op	ZO	3.3
33*		4	85	9.5	3vol	op	AS	3.4
*		3	110	10.5	1leeg	af	NO	6.9
*		3	110	10.5	3vol	af	NO	6.5
*		5	67	8.2	2.9vol	op	ZO	3.0
*		4	73	8.5	1leeg	op	ZO	3.7
*		5	67	8.2	1leeg	op	ZO	4.2
34		1	189	22.8	4vol	op	AS	2.5

Bijlage 4.5.1B Tabel met scheepskenmerken en scheepspassages, kribvak 1. Samenvallende scheepspassages worden weergegeven met een *, scheepspassages zonder merkbare invloed in het meetsignaal worden gemerkt met een X.

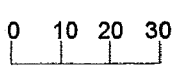
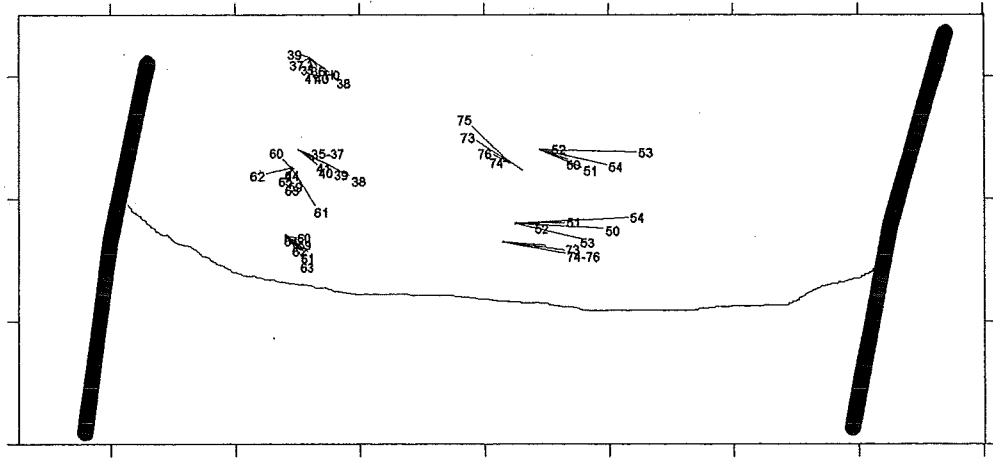
X	5	67	8.2	0.9leeg	op	ZO	4.5
X	5	67	7.3	2half	af	NO	5.6
X	5	57	7.5	2half	op	ZO	3.8
X	3	94	9.5	1leeg	af	NO	7.2
X	4	70	8.5	1leeg	op	ZO	3.3
X	4	80	8.2	3vol	op	AS	3.2
X	5	65	8.2	0.9leeg	af	NO	8.1
8	3	100	10.5	3vol	af	AS	5.6
9*	3	90	10.5	1leeg	af	NO	6.0
*	5	65	8.2	3vol	op	ZO	2.6
*	9	70	0	1leeg	af	NO	4.4
*	4	80	9.5	1leeg	af	AS	7.3
*	5	65	8.2	3vol	af	NO	4.1
*	5	65	8.2	3vol	op	AS	2.5
*	3	90	10.5	2half	af	NO	6.4
*	3	105	10.5	2half	af	NO	5.5
*	5	70	8.2	3vol	af	NO	7.0
*	3	100	10.5	2half	af	AS	6.7
10*	9	85	0	1leeg	op	ZO	2.4
*	9	85	0	3vol	af	NO	4.3
*	3	95	10.5	3vol	af	AS	5.9
X	7	47	5.5	2.5vol	af	AS	3.4
X	7	38	5.5	2.5vol	af	AS	3.5
X	9	75	0	2half	op	ZO	2.4
X	5	67	8.2	3vol	op	AS	3.4
X	5	65	8.2	3vol	af	NO	4.3
X	4	80	8.2	3vol	af	NO	5.7
X	6	55	6.6	2.6vol	af	AS	4.6
11	4	80	9.5	1leeg	af	AS	7.3
X	5	57	8.2	2.9vol	op	AS	2.9
X	4	80	9	3vol	op	AS	3.1
12*	6	52	6.6	2.8vol	af	NO	5.2
*	3	110	11.4	3vol	op	AS	3.7
*	2	172	11.5	4vol	op	ZO	2.9
*	3	87	10.5	3vol	af	NO	6.2
*	6	60	6.6	2.8vol	op	AS	2.6
*	10	100	11.4	0.5leeg	af	NO	2.5
*	5	67	8.2	2.9vol	op	ZO	ERR
X	6	60	6.6	0.8leeg	op	ZO	3.8
X	4	85	8.5	2half	af	NO	6.1
X	4	70	9.2	1leeg	op	ZO	3.5
13	5	67	8.2	2.8vol	af	ZO	3.5
X	4	80	9.5	1leeg	op	ZO	1.7
14	4	80	8.2	3vol	af	NO	5.3
X	4	80	9.2	2half	op	AS	4.0
X	5	57	7	2.8vol	af	NO	7.1
X	5	65	8	0.9leeg	af	NO	8.1
X	5	77	8.2	2.9vol	op	ZO	3.0
15*	3	110	11.4	3vol	op	AS	3.9
*	4	80	8.2	3vol	af	NO	5.0
*	9	85	8	3vol	af	NO	4.3
*	3	85	11.4	1leeg	op	AS	4.5
*	4	85	9.1	2half	op	ZOz	3.0
*	3	108	10.5	1leeg	af	AS	6.0
*	4	85	9.5	1leeg	af	NO	7.1

passage	Type schip	lengte (m)	breedte (m)	diepgang (m)	belading	vaart	positie	v (m/s)
35		9	110	9	1leeg	op	ZOa	3.7
36		4	85	9	3vol	op	AS	3.0
37		8	110	15	4vol	op	AS	2.8
38		1	180	22.8	0.4leeg	af	NOa	5.5
39		3	110	10.5	3vol	af	NOa	5.2
40*		3	95	9.5	3vol	op	ZOa	3.1
*		5	65	8	0.9leeg	op	NOa	3.3
*		5	65	8	2.8vol	af	NOa	2.7
41		5	65	8	0.9leeg	op	ZOa	3.6
42		1	180	22.8	4vol	op	AS	2.2
43		1	180	22.8	4vol	op	AS	2.1
44*		3	110	10.5	3vol	af	NOa	3.1
*		5	70	8.2	0.9leeg	af	NOa	5.0
*		6	49	6	0.8leeg	op	ZOz	2.9
*		5	60	8.2	2.7vol	op	ZOz	2.5
45		3	90	8	3vol	op	ZOa	2.2
46*		3	90	9.5	1leeg	op	AS	4.5
*		3	90	9.5	3vol	af	NO	5.6
X		5	55	8	0.9leeg	op	ZOa	3.4
47*		5	60	8.2	2.8vol	af	NOa	4.3
*		5	71	8.2	2.9vol	op	AS	3.6
*		4	80	8.2	1leeg	af	NOa	6.2
48		3	90	9	3vol	af	NOa	3.9
49		4	85	8.5	3vol	af	NOa	5.7
50		3	110	11.4	2half	af	NOa	6.5
51		5	65	8	2half	af	NOa	5.9
X		6	50	6.6	2.7vol	af	NOa	4.5
X		3	100	9	1leeg	op	ZOa	3.7
52		2	186	11.4	4vol	op	AS	3.8
53*		3	108	10.4	3vol	af	NOa	5.7
*		4	80	8.2	3vol	af	NOa	5.3
*		6	67	6.6	2.8vol	op	ZOz	4.5
54*		3	105	10.5	3vol	op	NOa	3.1
*		4	80	8.2	3vol	af	NOa	5.0
*		1	180	22.8	0.4leeg	af	AS	5.0
*		6	67	6.6	2.8vol	af	NOa	4.5
55		5	70	8	2.9vol	af	NOa	4.1
X		6	54	6.3	0.8leeg	af	NOa	5.4
X		5	62	8	0.9leeg	af	NOa	5.6
X		5	65	8	3vol	af	NO	5.9
56*		10	77	20	4vol	op	ZO	3.5
*		4	75	9	3vol	af	NO	2.3
*		4	80	10.8	3vol	af	NOa	4.2
*		4	85	11	3vol	op	ZO	2.8
X		10	105	22.8	4vol	af	NOa	3.9
X		5	63	7.2	2.8vol	op	ZOa	2.9
57		2	172	11.4	0.4leeg	af	NOa	5.4
58		1	180	22.8	4vol	op	ZOa	2.4
X		6	55	6	0.8leeg	op	AS	3.2
X		7	50	5	0.7leeg	op	NO	4.2
59*		3	110	11.5	1leeg	op	ZOa	4.6
*		3	110	10.5	3vol	af	NO	4.4
60		3	102	9.5	3vol	op	AS	3.0

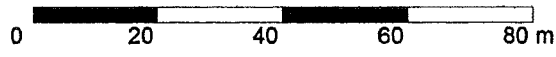


Sedimenttransport vectoren kribvak 2

Scheepspassages

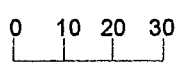
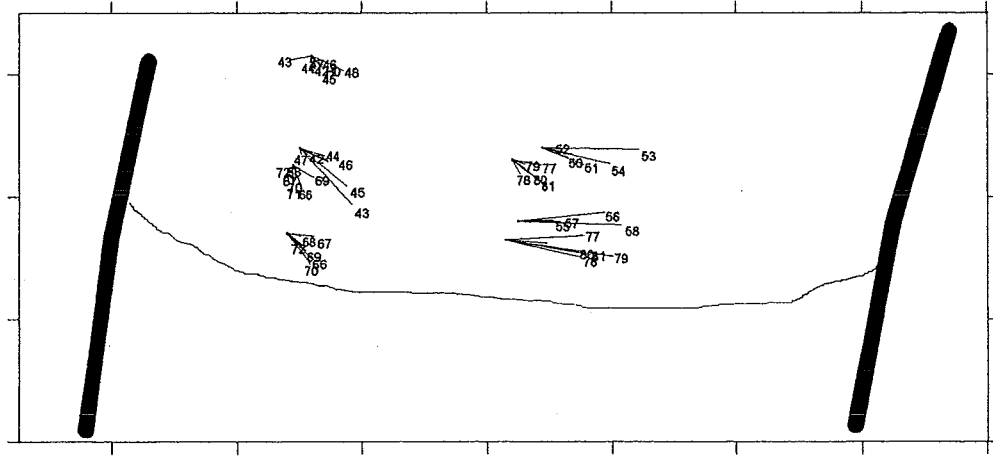


Sedimenttransport in g/m2s

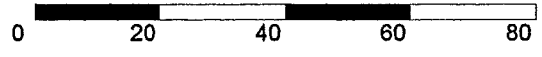


Sedimenttransport vectoren kribvak 2

Scheepspassages



Sedimenttransport in g/m2s

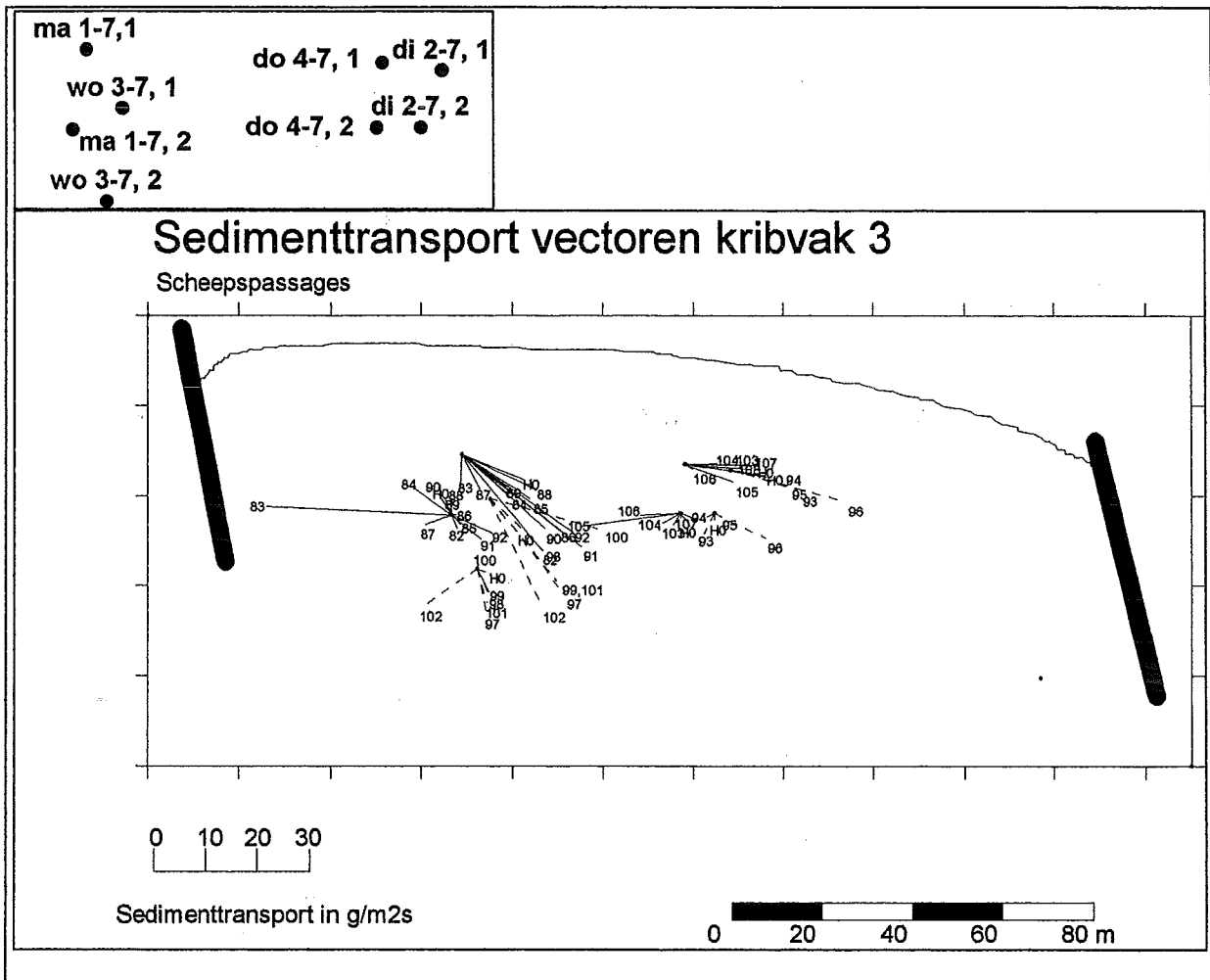


bijlage 4.5.2 A Sedimenttransport vectoren met nummering van scheepspassage, kribvak 2 (inzet: frameposities met datum)

80		9	90	8	3vol	af	NO	3.9
X		5	67	8.2	0.9leeg	op	AS	3.7
X		5	67	8.2	2.8vol	af	AS	6.1
81		3	110	9.5	3vol	op	ZOa	3.1

Bijlage 4.5.2B Tabel met scheepskenmerken en scheepspassages, kribvak 2. Samenvallende scheepspassages worden weergegeven met een *, scheepspassages zonder merkbare invloed in het meetsignaal worden gemerkt met een X.

61		3	110	11	3vol	op	AS	3.2
62*		3	109	10.5	3vol	op	ZOa	3.8
*		8	100	10	1leeg	op	AS	1.3
63		4	80	8.2	3vol	af	NO	5.7
X		5	67	8.2	2.8vol	af	NO	7.4
X		6	67	6.6	2.8vol	op	ZOa	4.5
X		6	47	6.5	2half	op	ZOz	3.6
64		3	109	12	3vol	op	AS	2.7
65*		6	60	6.6	2.7vol	af	NO	4.6
*		4	75	8.5	3vol	op	ZOa	1.3
*		4	85	9	3vol	af	NO	5.0
66*		6	60	6.6	2.7vol	af	NO	4.3
*		3	90	10	3vol	af	NO	5.3
*		3	90	10	3vol	op	AS	3.0
*		4	85	9	3vol	af	NO	5.7
*		3	90	10	3vol	af	AS	6.4
X		5	67	8.6	2.9vol	op	AS	2.7
X		4	85	9.1	1leeg	op	ZOa	3.0
67*		3	100	9.5	3vol	op	ZOa	3.4
*		3	110	10.5	1leeg	af	NOa	4.8
*		3	110	10.5	1leeg	af	ZOa	ERR
*		5	67	8.2	3vol	af	NO	4.2
*	2*4		80	18	3vol	op	NOa	2.8
*		3	90	10	3vol	af	NOa	4.7
68		2	170	11	4vol	op	AS	2.8
X		5	67	8.2	2half	af	NOa	6.1
69		4	85	9.5	3vol	af	NO	4.5
70*		4	80	8.2	3vol	af	NO	5.3
*		4	85	8.5	3vol	af	AS	5.3
*		5	67	8.2	2.8vol	af	NO	4.5
*		5	70	8.2	2.8vol	op	ZOa	2.8
71*		3	86	9.5	3vol	af	NOa	5.7
*		3	110	9.5	3vol	op	AS	3.1
*		3	97	9.1	3vol	af	NO	5.1
72*		3	100	10	1leeg	op	AS	3.8
*		3	105	9.5	3vol	op	AS	3.2
*		9	100	9	3vol	op	NO	3.2
*		6	55	6.6	2.7vol	af	NO	5.5
X		6	60	6.6	0.8leeg	op	ZO	3.3
X		4	80	9	3vol	op	ZOz	3.2
73		3	110	10.5	3vol	op	ZOa	3.4
X		9	90	8	3vol	af	NO	4.3
74		5	68	7.2	2.8vol	op	AS	3.0
75*		2	180	11	4vol	op	ZOz	2.4
*		3	100	10	3vol	op	NOa	3.0
*		5	67	8.2	0.9leeg	op	ZOz	2.5
76*		5	67	7.2	2.8vol	af	NOa	4.8
*		3	108	10.5	3vol	op	AS	3.6
*		3	100	9	1leeg	op	ZOz	3.2
X		9	40	5	3vol	af	NO	4.0
77		4	85	9.5	1leeg	af	NOa	6.5
X		5	70	8.2	0.9leeg	op	ZOa	3.9
78		1	180	22.8	4vol	op	ZOa	1.8
X		6	67	6.6	0.8leeg	af	NOa	9.6
79		4	85	9.5	3vol	af	NO	4.7



Bijlage 4.5.3A Sedimenttransport vectoren met nummering van scheepspassage, kribvak 3 (inzet: frameposities met datum)

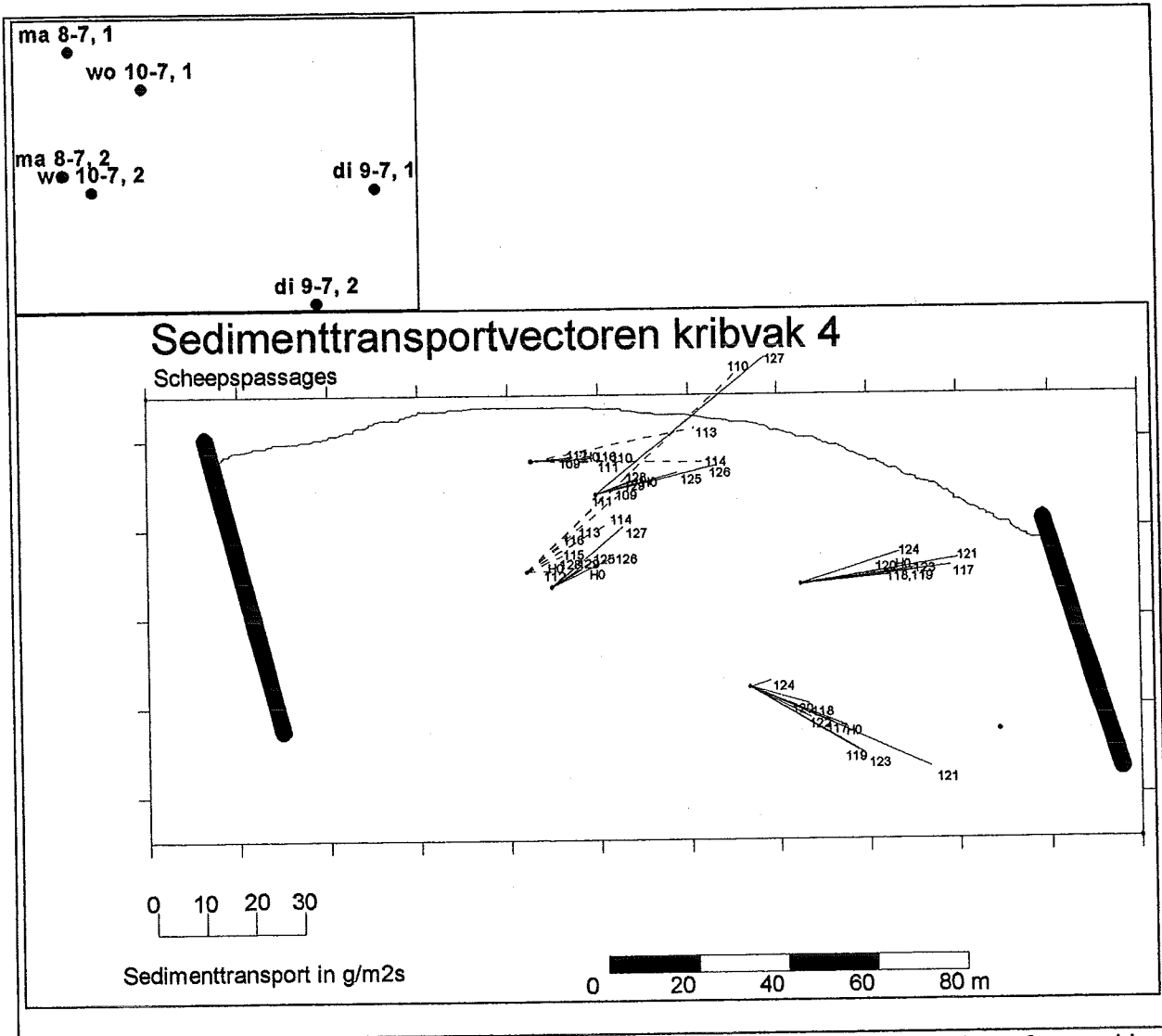
Passage	type schip	lengte (m)	breedte (m)	diepte (m)	belading	vaart	positie	v (m/s)
82		1	180	22.8	4v	op	Z	2.3
83		1	180	22.8	4v	op	ASz	2.3
84		3	109	10.5	3v	op	AS	3.8
85		2	75	18	2hv	op	Z	1.7
	X	6	54	8.2	2.5v	op	Z	4.2
86		4	85	9	3v	af	AS	4.5
	X	6	55	6.7	2.6v	af	ASz	5.0
	X	6	57	8.2	2.5v	af	AS	4.4
87		3	95	9.5	3v	op	N	4.0
88		4	75	8.2	1v	op	Z	3.8
89		4	70	9	9v	af	AS	5.4
90		4	80	12	3v	af	Zas	5.0
91		4	85	9.3	3v	af	AS	5.0
		4	82	8.2	3v	af	AS	4.8
92		1	180	22.8	2hv	af	AS	5.0
93		1	180	22.8	0.4v	op	AS	4.9
	X	6	55	7.2	0.75v	op	Zas	3.2
94		5	67	8.2	2.75v	af	Nas	5.6

	X	6	55	6.6	2.6v	op	Zz	2.6
	X	5	63	7.2	2.5v	op	Z	2.5
	X	6	67	6.6	2.5v	op	Zz	2.7
	X	4	57	7.15	0.75i	op	N	3.6
	X	4	85	8.2	3v	op	Z	3.1
	X	5	57	8.2	2.8v	af	AS	5.2
95		4	84	9.5	1i	af	Nas	6.0
	X	5	67	8.2	3v	op	Zz	2.9
96		4	85	9	1i	af	AS	6.5
97		6	52	8.3	2hv	op	Zas	2.2
98		3	95	11	1i	af	AS	6.8
99		1	180	22.8	0.4i	af	Nn	5.1
100		1	180	22.8	4v	op	ASz	2.2
	X	4	90	9.5	3v	op	Z	2.2
101		4	80	8.2	1i	af	AS	5.3
	X	9	25	3	0.3i	af	Zas	4.2
102		4	80	8.5	3v	af	AS	5.3
103		1	180	22.8	0.4i	af	AS	4.6
	X	5	67	8.2	0.9i	op	Z	3.5
104		3	100	10.5	3v	op	Zas	3.6
105		3	108.45	11.4	3v	op	Nas	3.6
	X	4	78	8.2	3v	af	AS	4.9
	X	5	60	8.2	0.9i	af	AS	5.0
	X	6	55	6.6	2.8v	op	Zz	5.5
	X	3	105	11.4	1i	af	AS	4.8
	X	3	110	11.4	3v	af	AS	5.2
106		3	90	8	3v	op	Z	2.9
	X	9	20	2	0.3i	?	?	10.0
	X	6	67	6.6	2.8v	op	Z	3.5
107		3	100	10.5	1i	af	AS	7.1
108		4	85	8.2	3v	op	AS	2.8

Bijlage 4.5.3.B Tabel met scheepskenmerken en scheepspassages, kribvak 3. Samenvallende scheepspassages worden weergegeven met een *, scheepspassages zonder merkbare invloed in het meetsignaal worden gemerkt met een X.

120		3	110.00	11.40	2.00hv	op	AS	3.8
121	*	1	180.00	22.80	4.00v	op	Zas	2.6
	*	5	67.00	8.20	0.90v	op	AS	2.6
	*	1	180.00	22.40	0.40v	af	AS	5.0
	*	4	84.00	10.50	1.00v	af	AS	7.0
122		4	80.00	8.20	3.00v	op	Zz	3.3
123	*	1	180.00	22.40	0.40v	af	AS	4.9
	*	2	170.00	8.20	2.00hv	?	Zas	4.6
124		3	105.00	11.20	3.00v	op	Z	3.1
125		2	180.00	9.50	4.00v	op	Z	2.4
126	*	3	100.00	9.50	3.00v	op	?	2.9
	*	4	80.00	8.20	3.00v	op	Z	2.9
	*	4	84.00	10.50	3.00v	op	Z	3.5
	*	3	90.00	11.40	1.00v	af	AS	5.3
	*	3	110.00	10.50	3.00v	op	Z	2.8
	*	5	67.00	6.60	2.00hv	af	AS	5.6
	*	3	90.00	8.50	2.00hv	af	?	6.9
	X	5	67.00	8.20	2.80v	af	AS	5.2
127		2	85.00	22.80	0.40v	af	AS	5.3
	X	5	67.00	8.20	2.80v	af	Nas	4.8
	X	4	73.00	8.20	3.00v	af	AS	5.2
128		3	95.00	9.50	3.00v	op	Z	3.7
129		4	80.00	8.20	2.00hv	op	Z	3.5

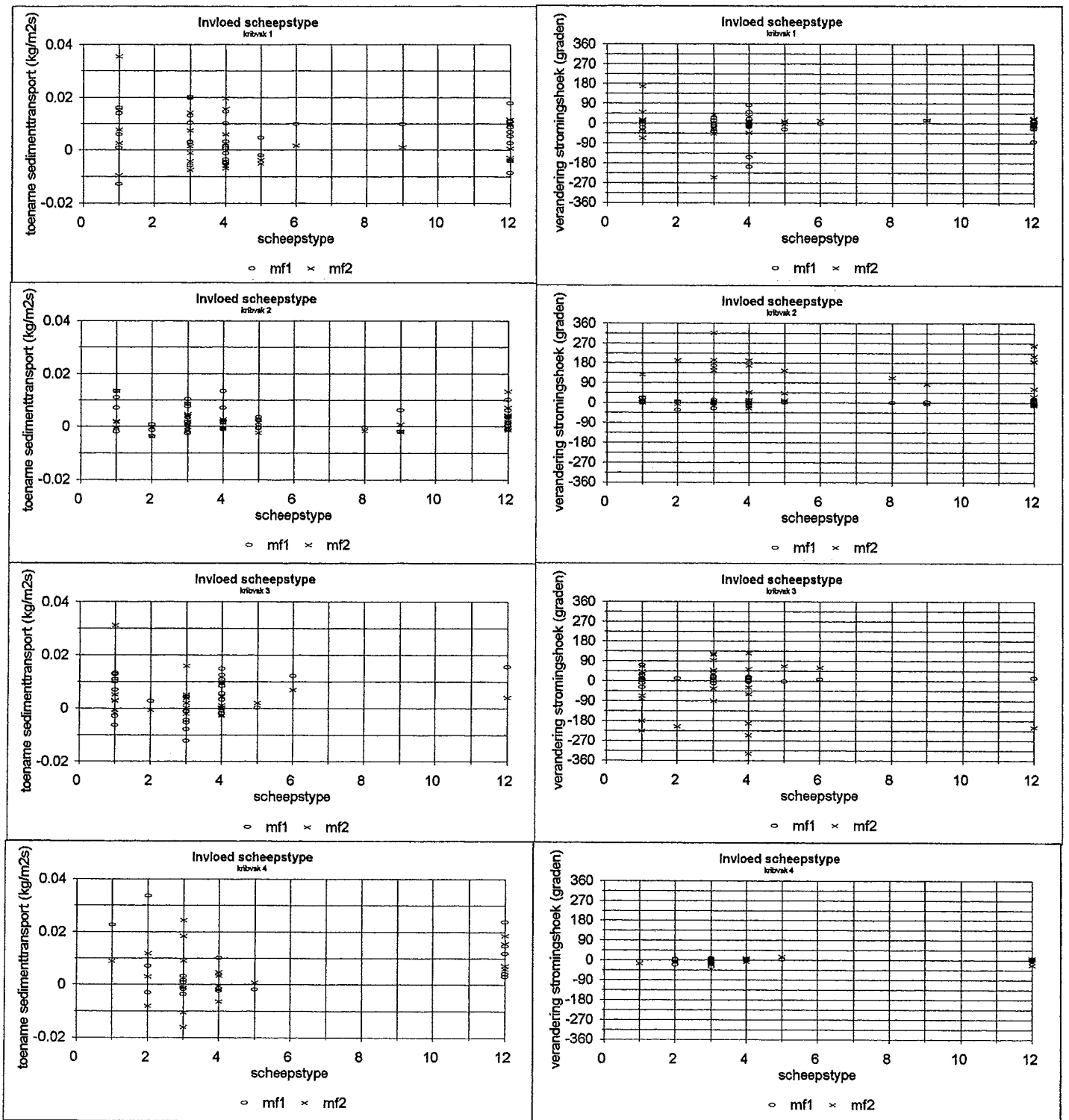
Bijlage 4.5.4B Tabel met scheepskenmerken en scheepspassages, kribvak 4. Samenvallende scheepspassages worden weergegeven met een *, scheepspassages zonder merkbare invloed in het meetsignaal worden gemerkt met een X.



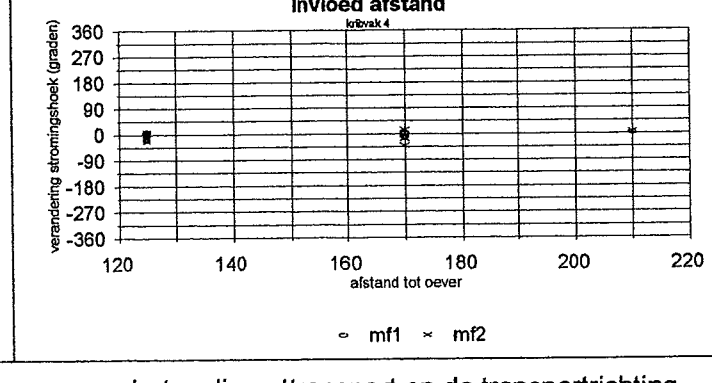
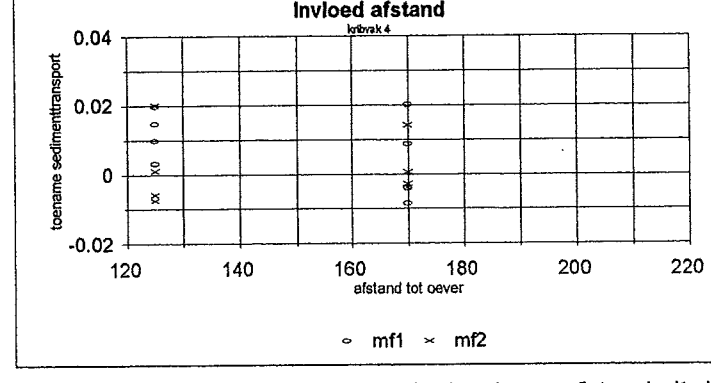
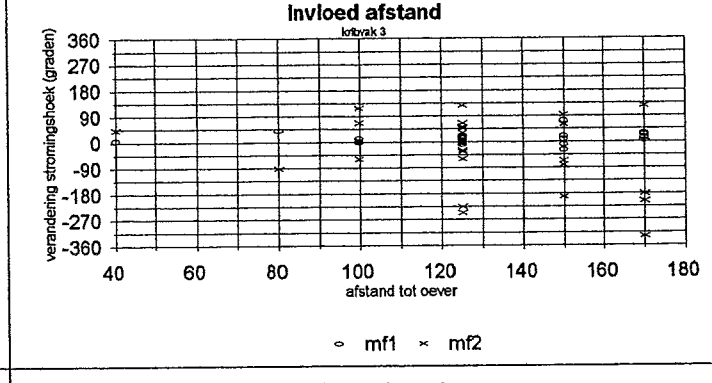
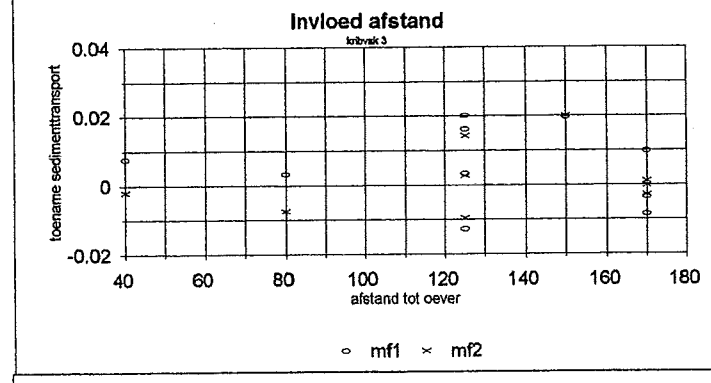
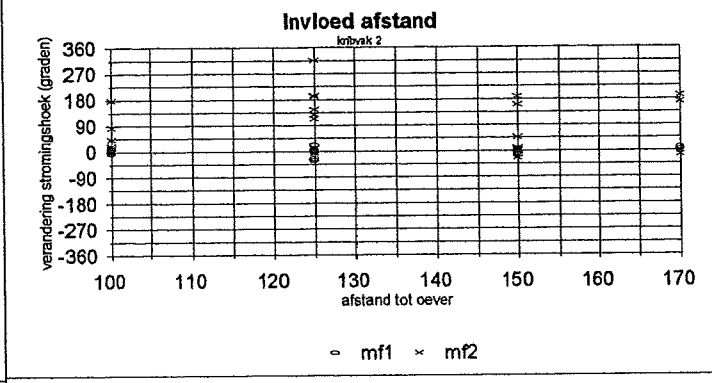
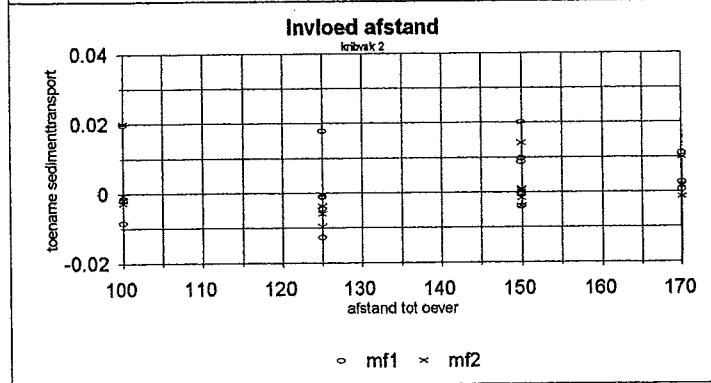
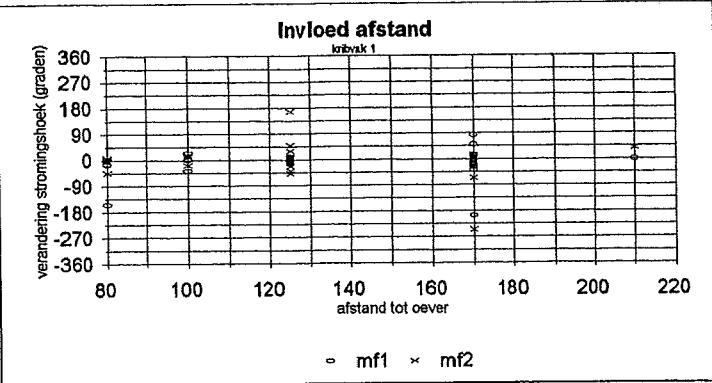
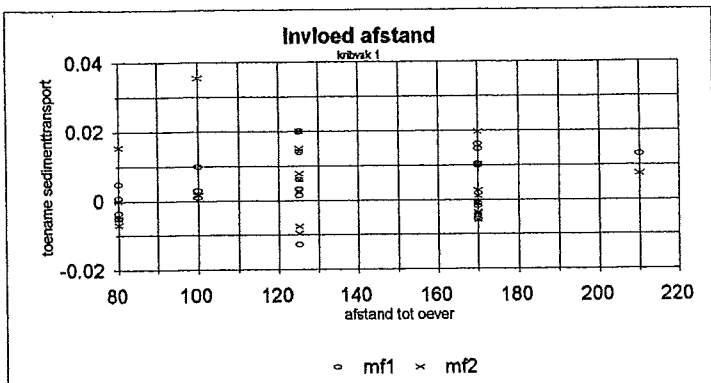
Bijlage 4.5.4A Sedimenttransport vectoren met nummering van scheeps passage, kribvak 4 (inzet: frameposities met datum)

Passage	type schip	lengte (m)	breedte (m)	diepte (m)	belading	vaart	positie	v (m/s)	
109	3	105.00	9.50	3.00	v	op	Z	2.6	
110	*	3	95.00	9.50	3.00	v	af	N	5.6
	*	3	86.00	8.20	3.00	v	op	Zz	3.1
111	3	110.00	10.50	3.00	v	af	AS	5.2	
112	5	67.00	8.20	2.80	v	op	Z	3.9	
	X	4	80.00	8.20	3.00	v	op	Zz	2.9
113	1	180.00	22.80	0.40	v	af	AS	4.9	
114	*	3	105.00	11.00	3.00	v	op	ASz	3.5
	*	6	67.00	6.60	2.80	v	af	AS	3.4
	X	4	80.00	9.00	3.00	v	af	AS	4.7
115	4	73.00	9.00	3.00	v	af	AS	4.3	
116	3	95.00	10.00	3.00	v	op	AS	3.4	
117	4	76.00	5.00	2.50	v	af	AS	3.8	
118	4	80.00	7.52	1.00	v	af	AS	6.2	
119	2	100.00	9.00	1.00	v	op	Z	2.7	
	X	4	85.00	9.50	1.00	v	af	Zas	5.7

Bijlage 4.6

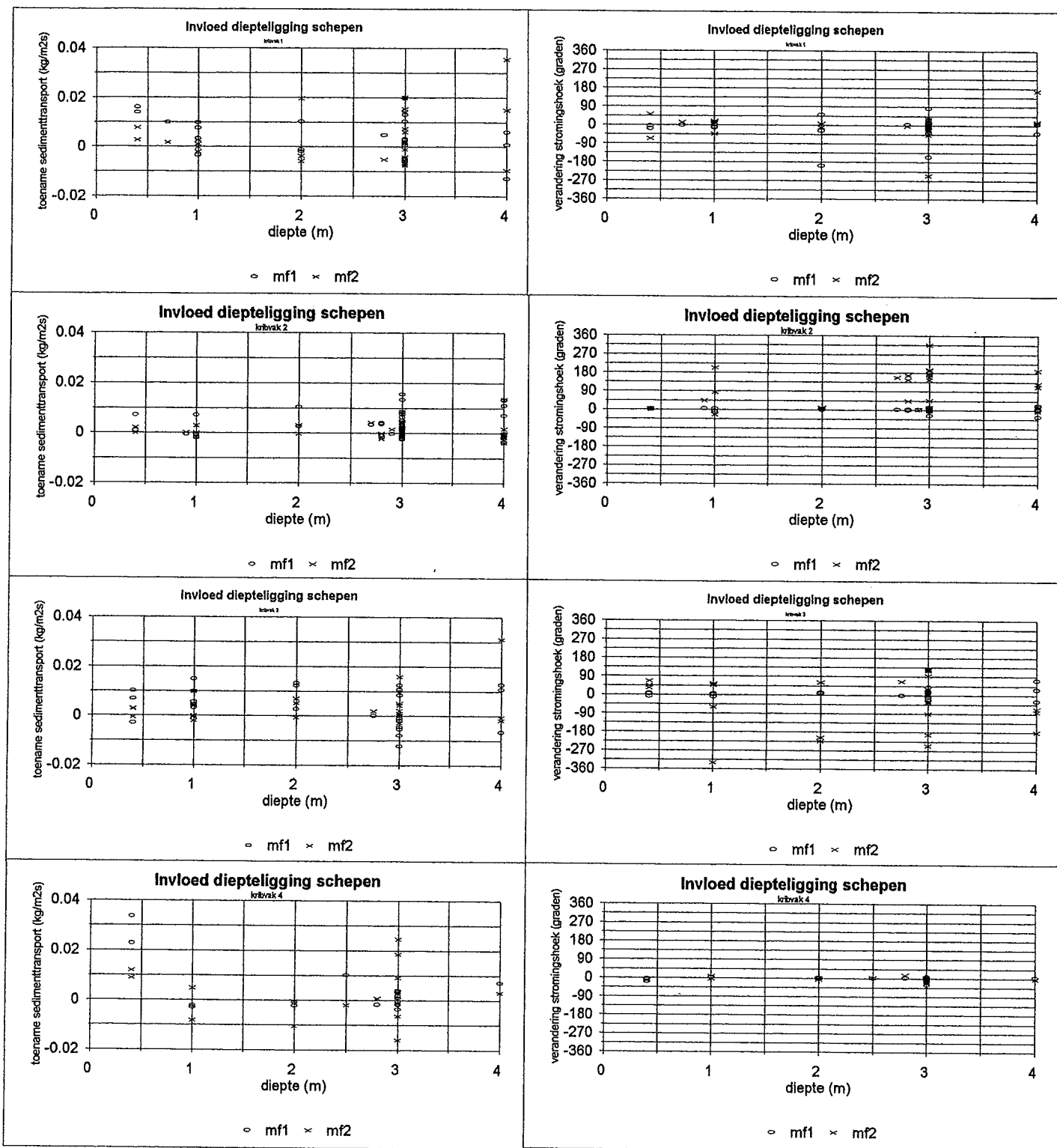


Bijlage 4.6.1 Invloed scheepstype op het sedimenttransport en de transportrichting



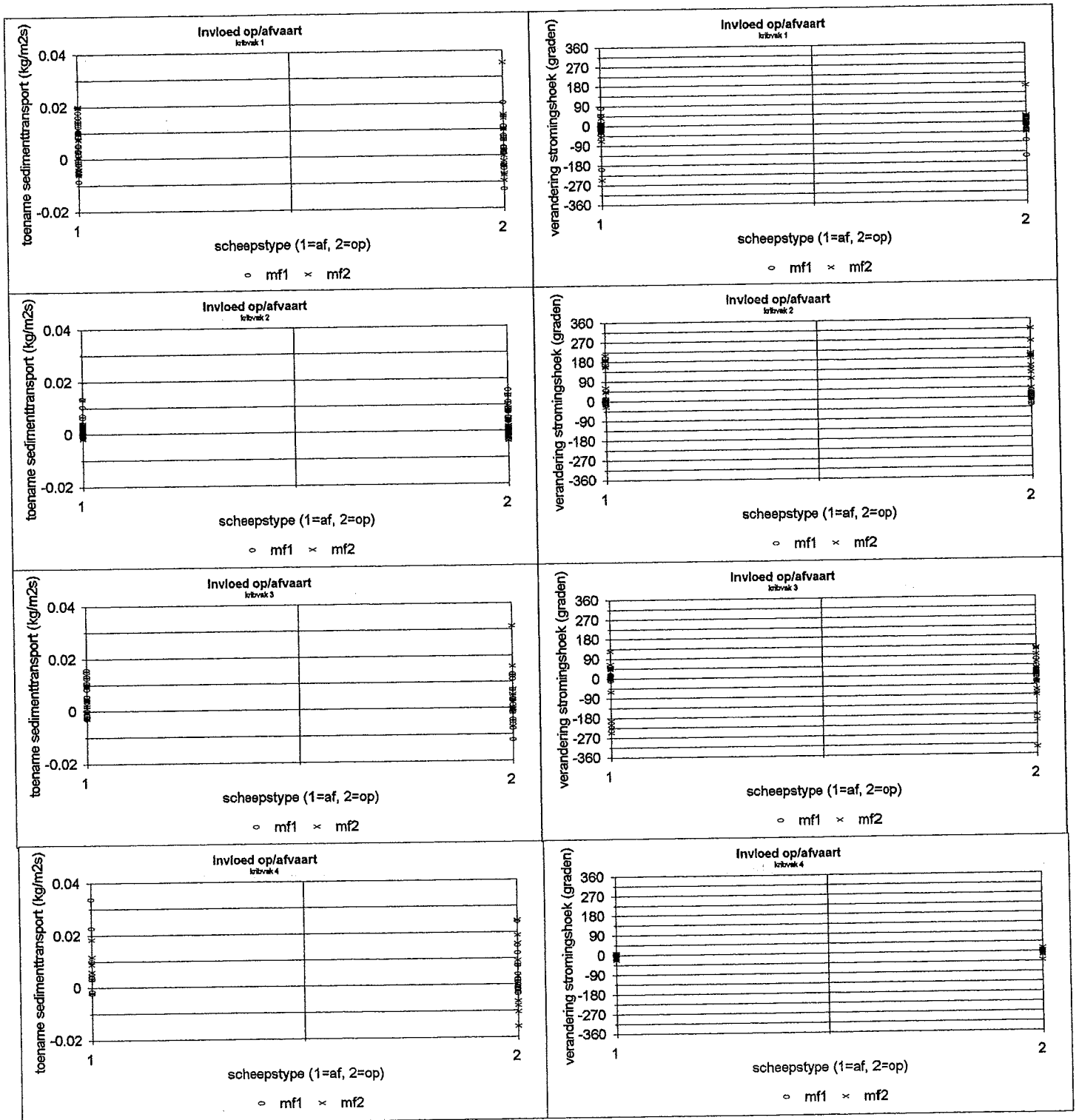
Bijlage 4.6.2

Invloed vaarafstand uit de oever op het sedimenttransport en de transportrichting



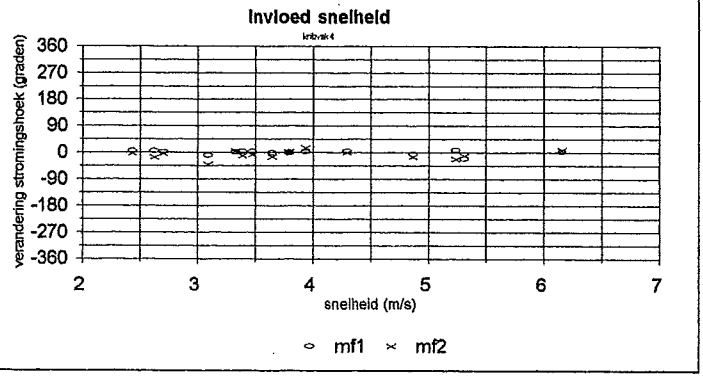
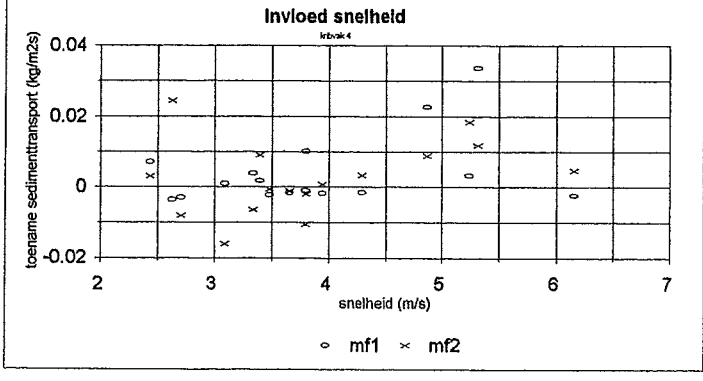
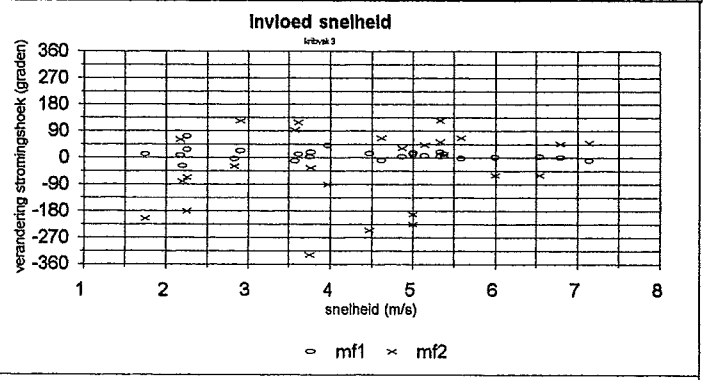
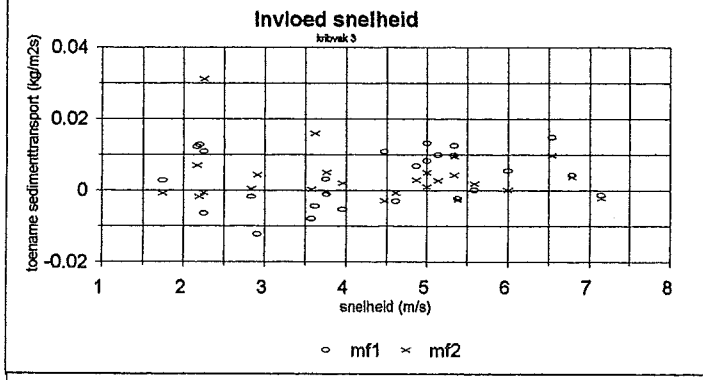
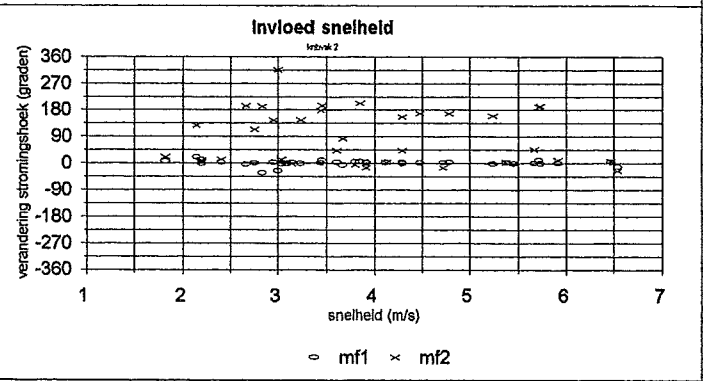
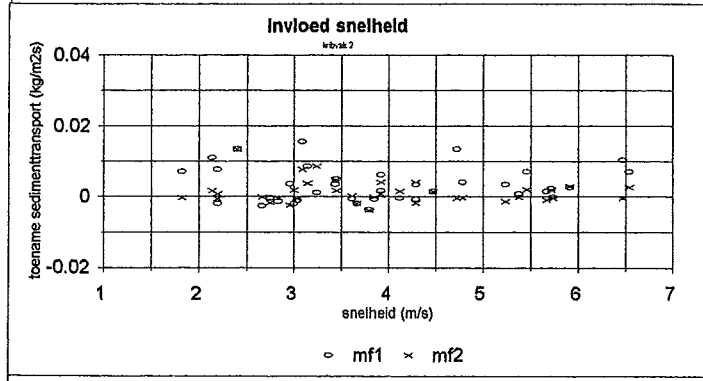
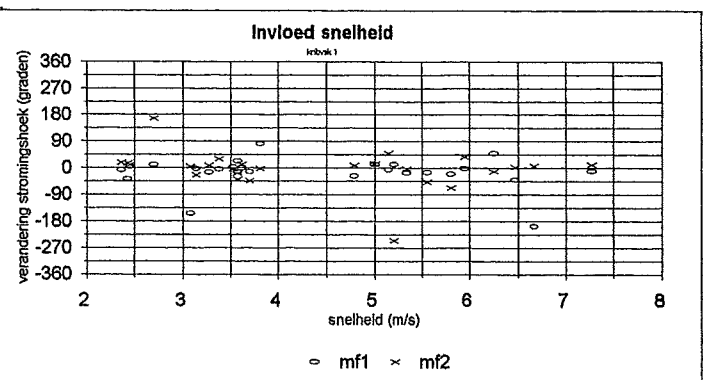
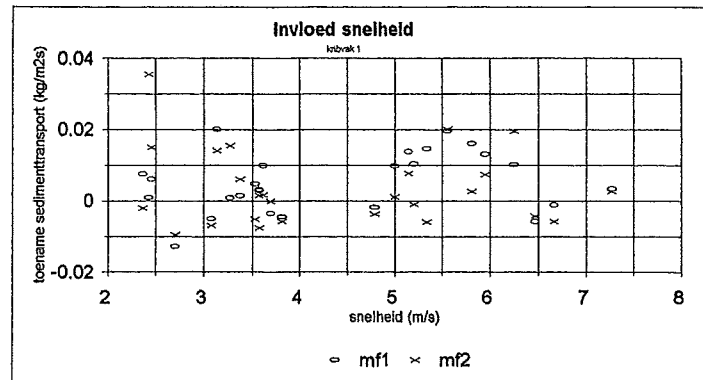
Bijlage 4.6.3

Invloed diepteligging op het sediementtransport en de transportrichting



Bijlage 4.6.4

Invloed vaarrichting op het sedimenttransport en de transportrichting



Bijlage 4.6.5

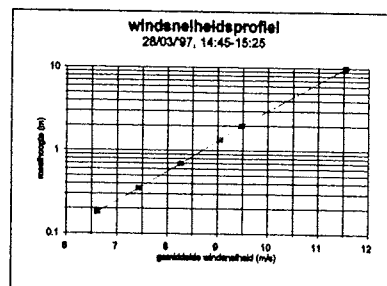
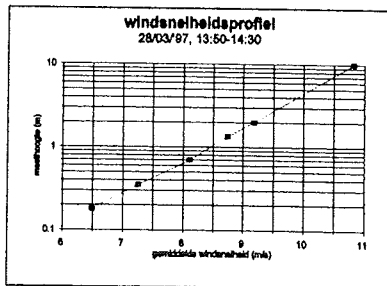
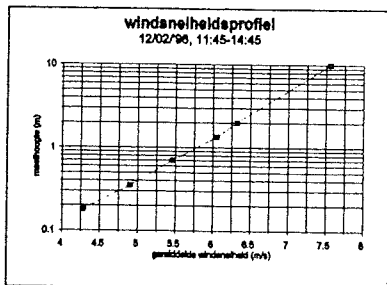
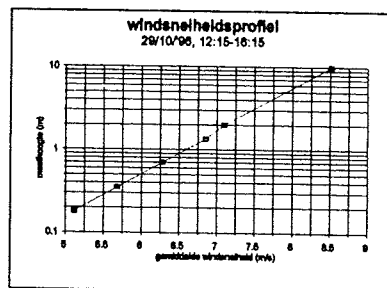
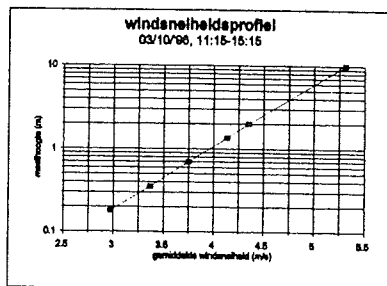
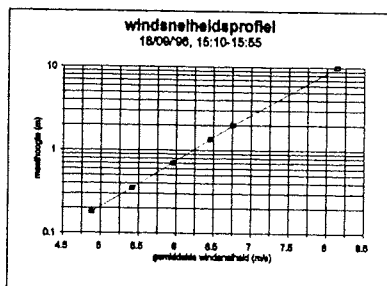
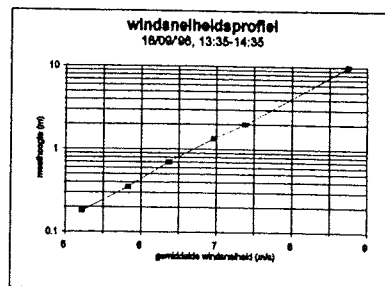
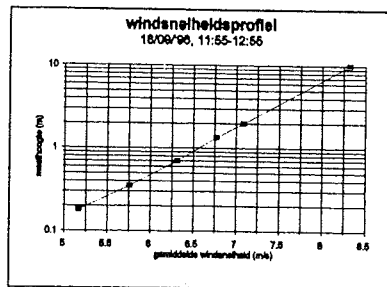
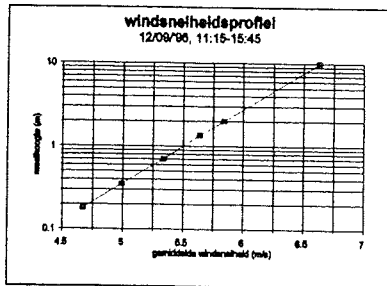
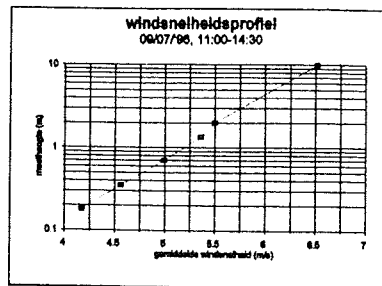
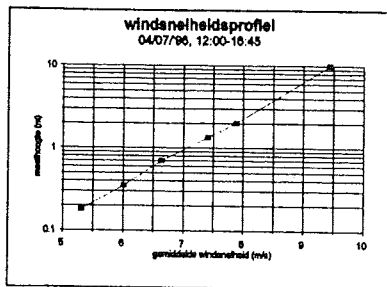
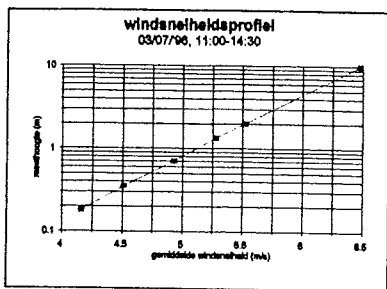
Invloed snelheid op het sedimenttransport en de transportrichting



Bijlagen hoofdstuk 5

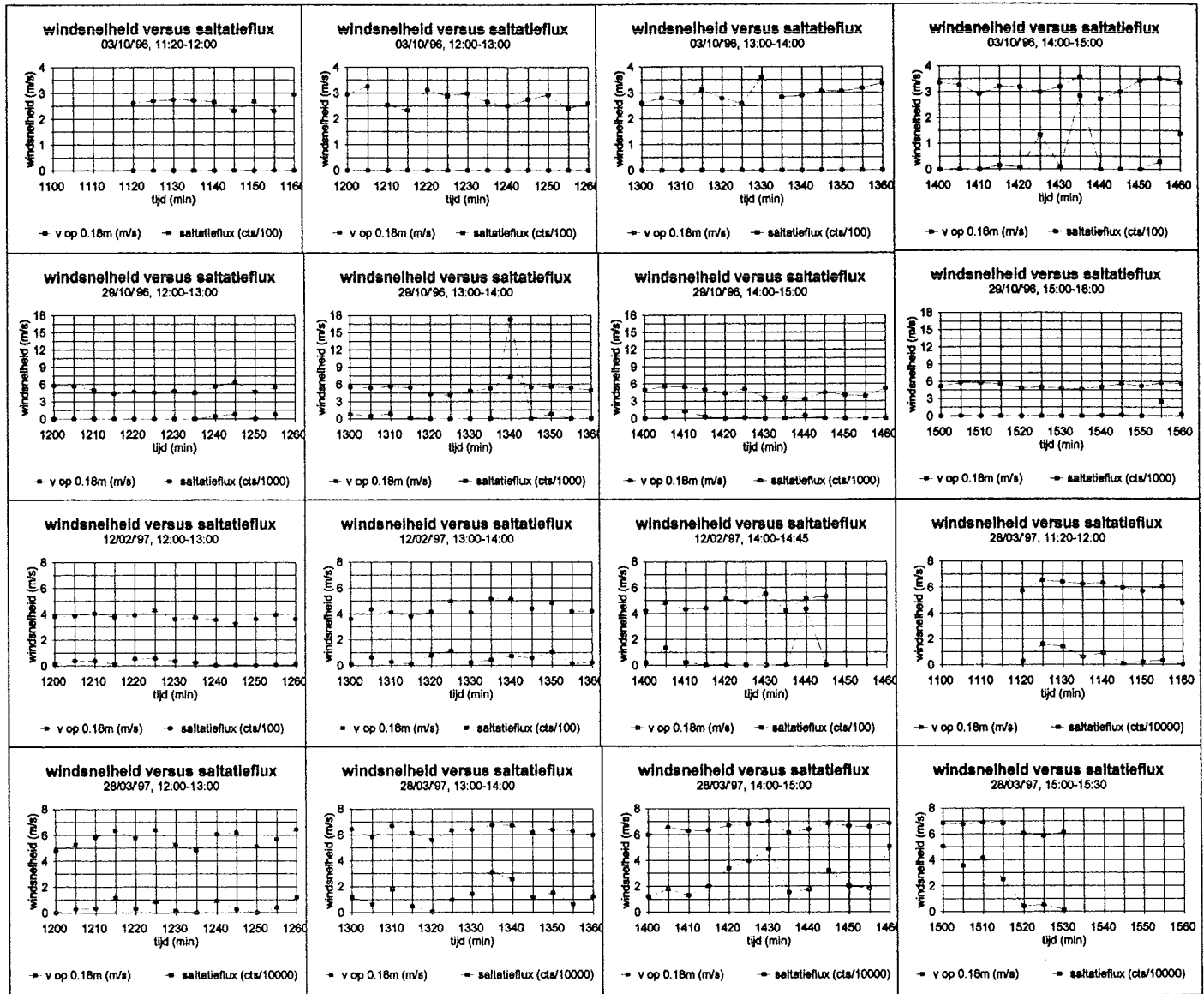


BIJLAGE 5.1 Windsnelheidsprofielen

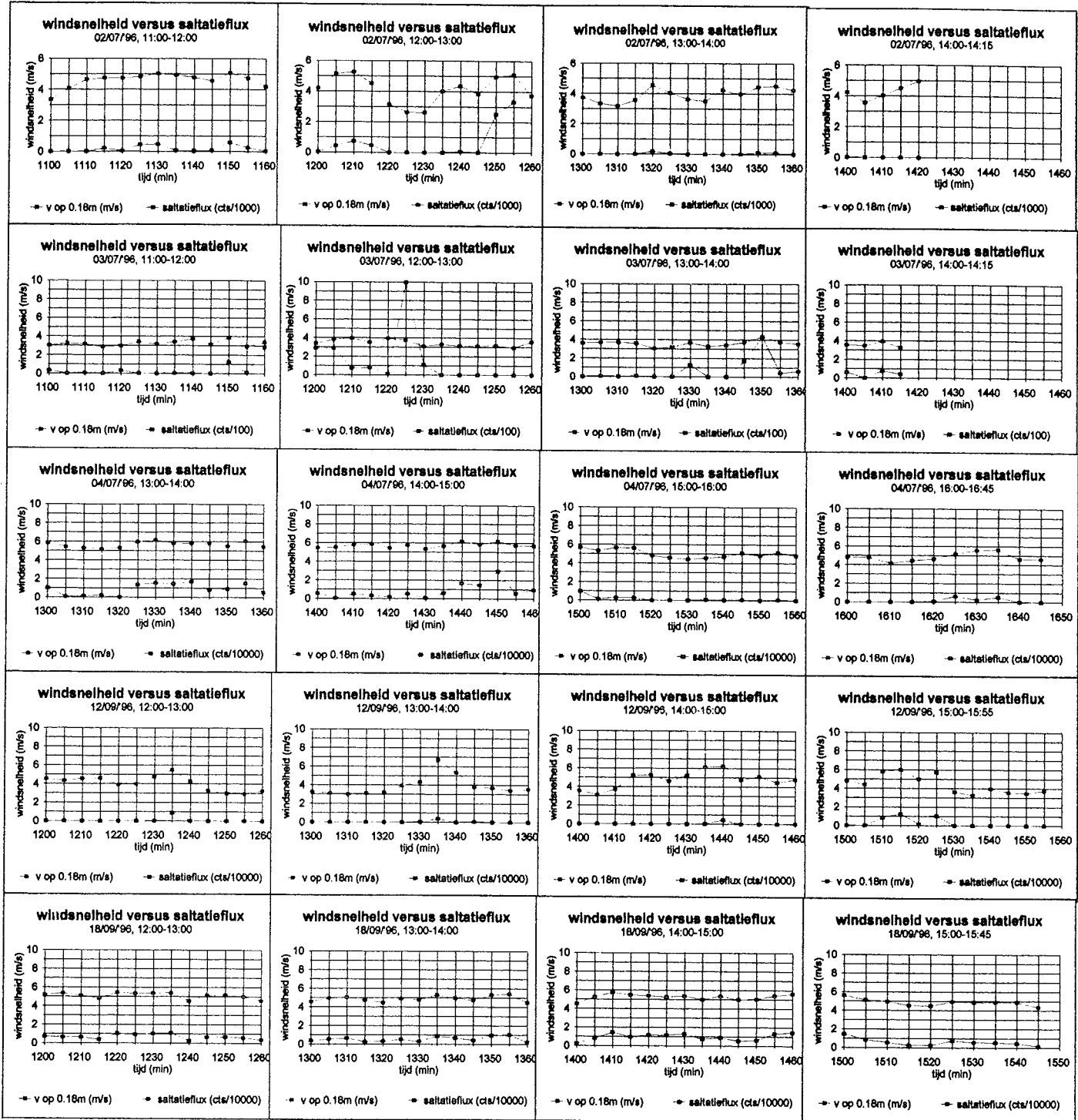


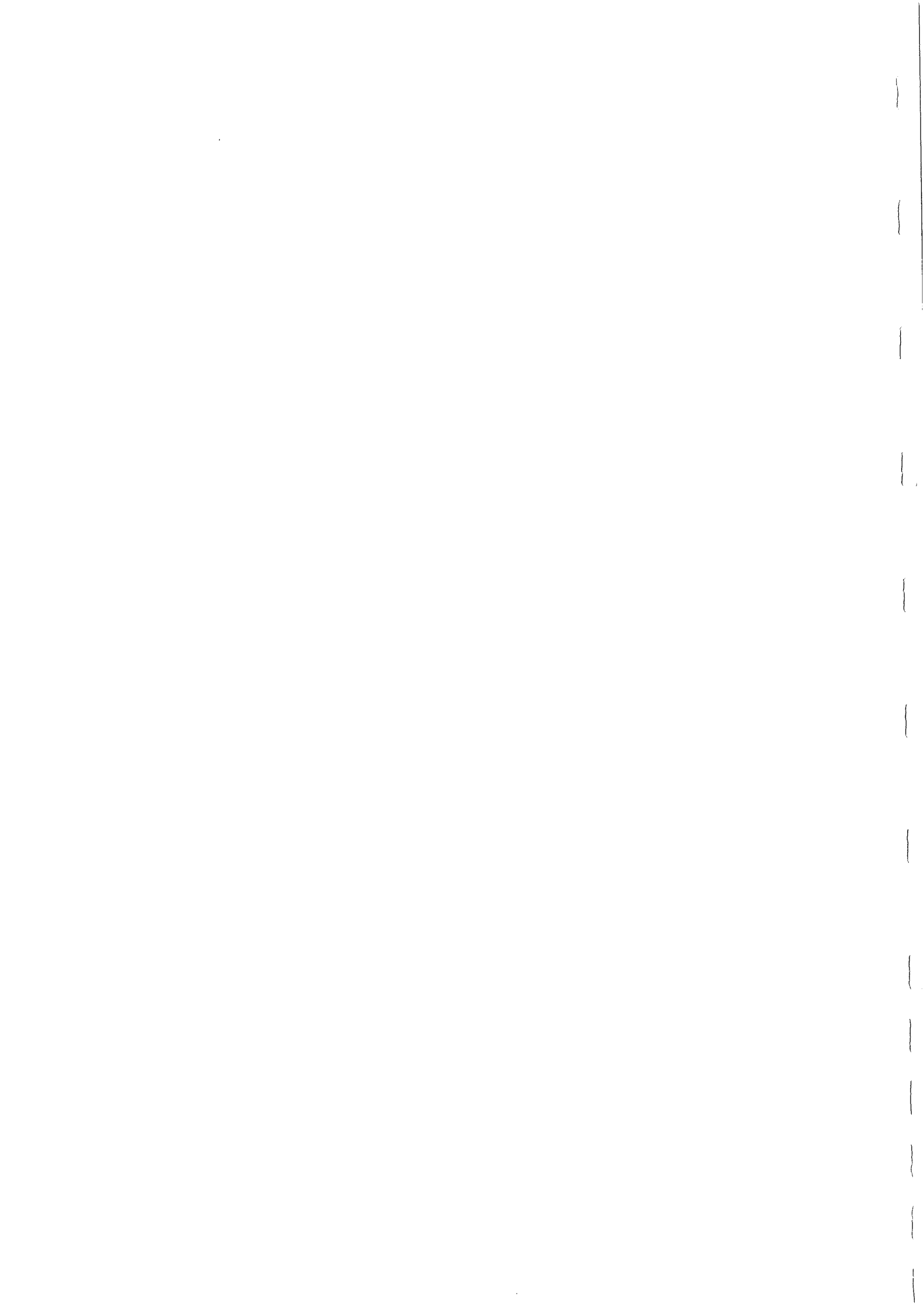
BIJLAGE 5.2 (vervolg)

Verband tussen saltatieflux en windsnelheid op 0.18m

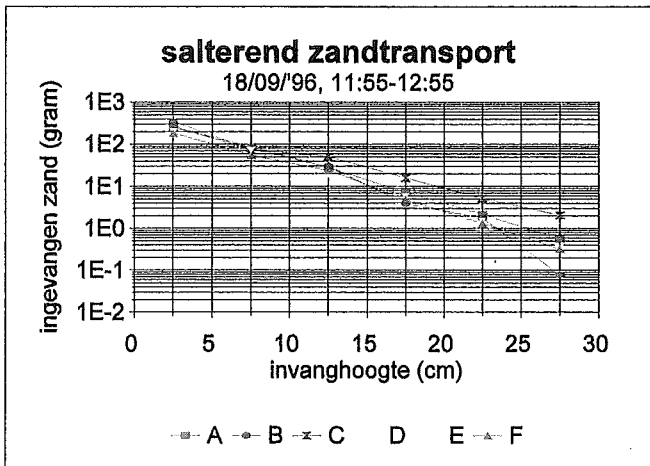
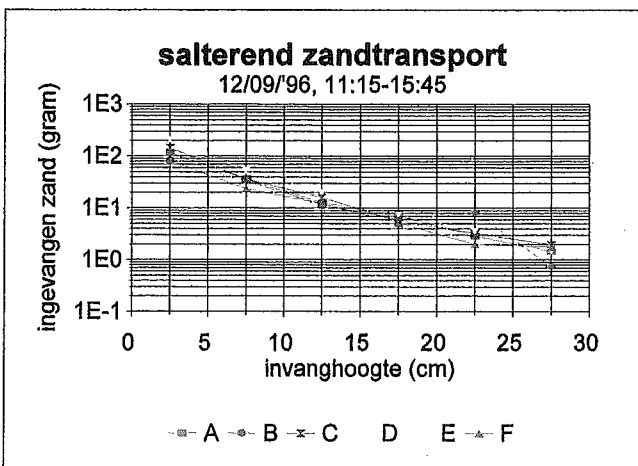
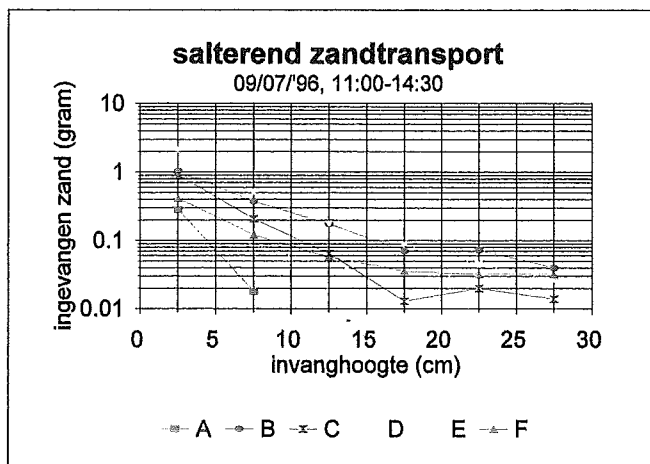
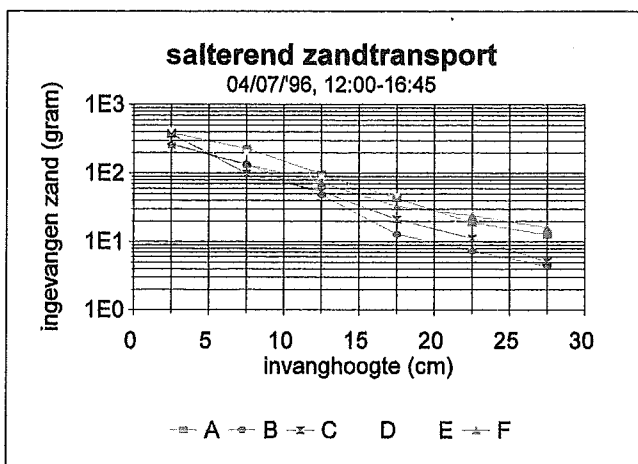
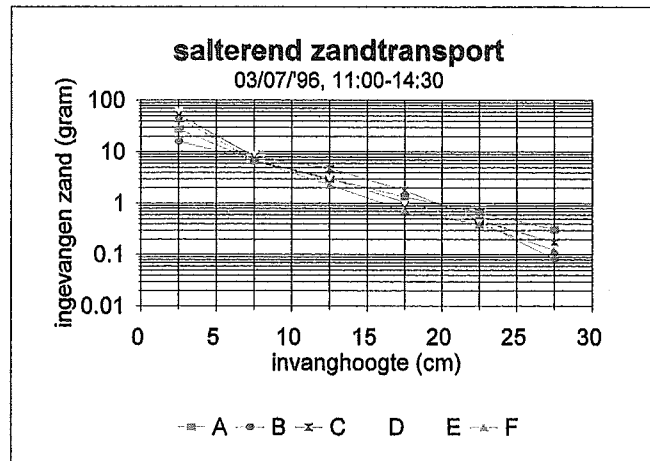
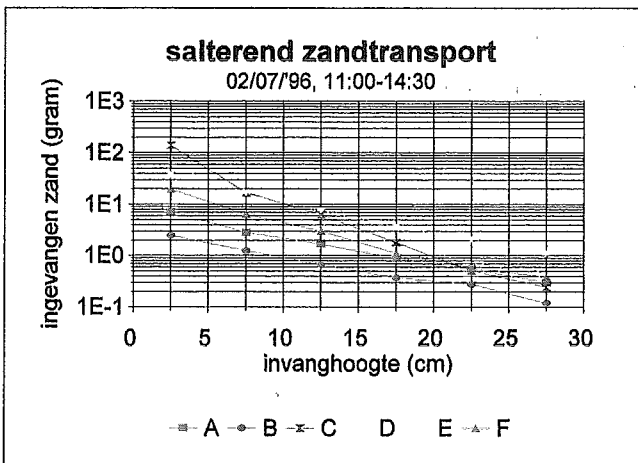


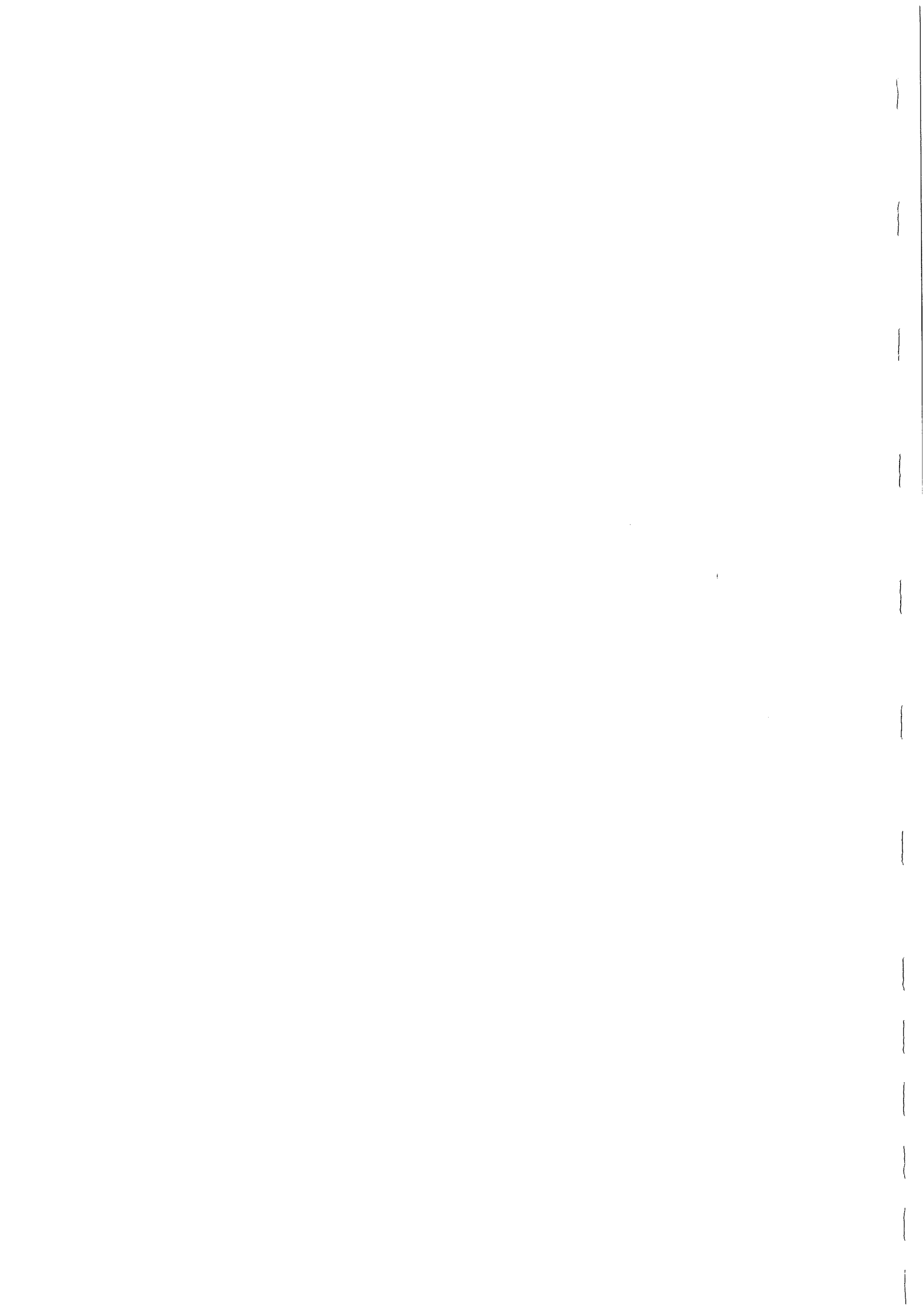
BIJLAGE 5.2 Verband tussen saltatieflex en windsnelheid op 0.18m

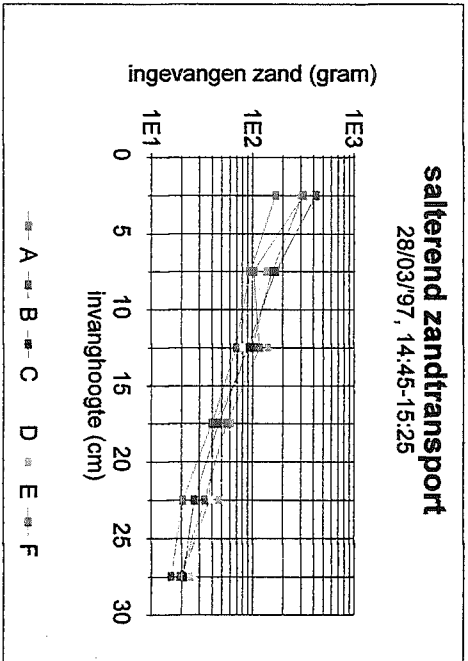
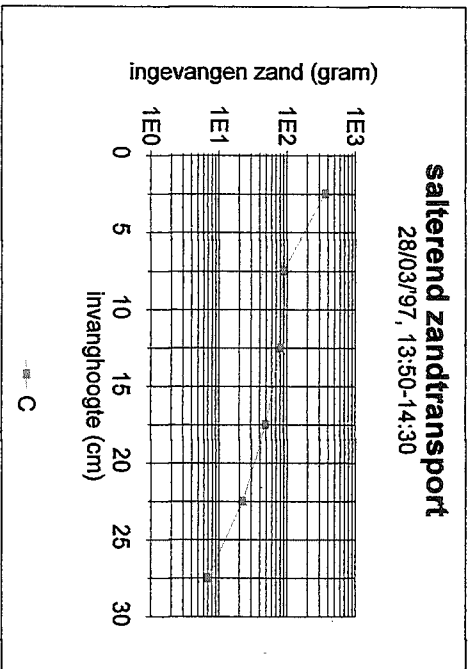
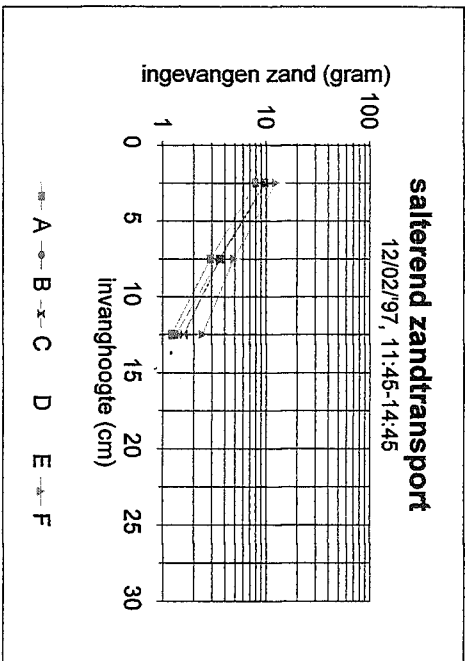
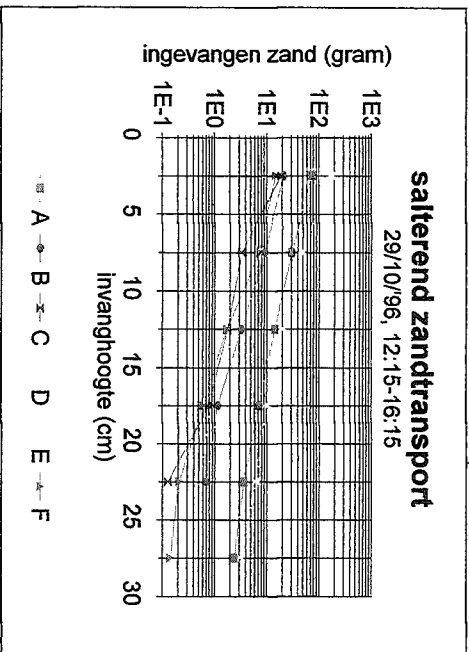
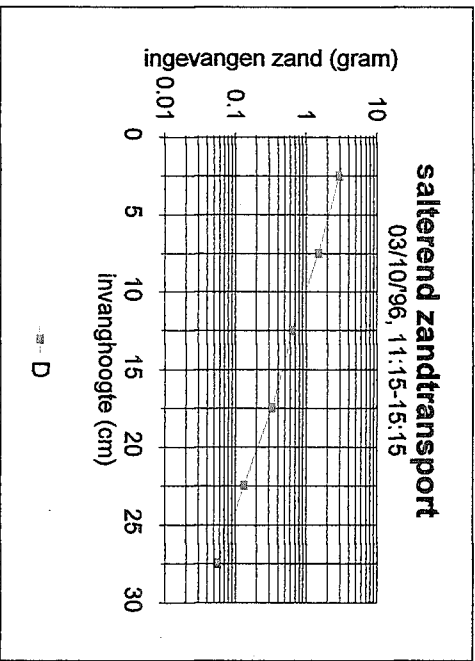
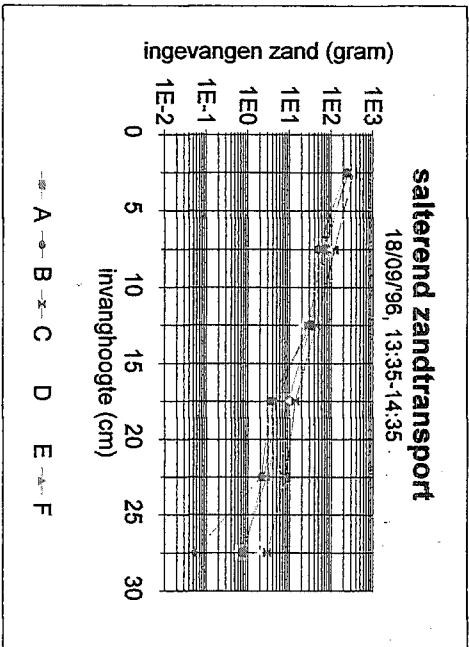




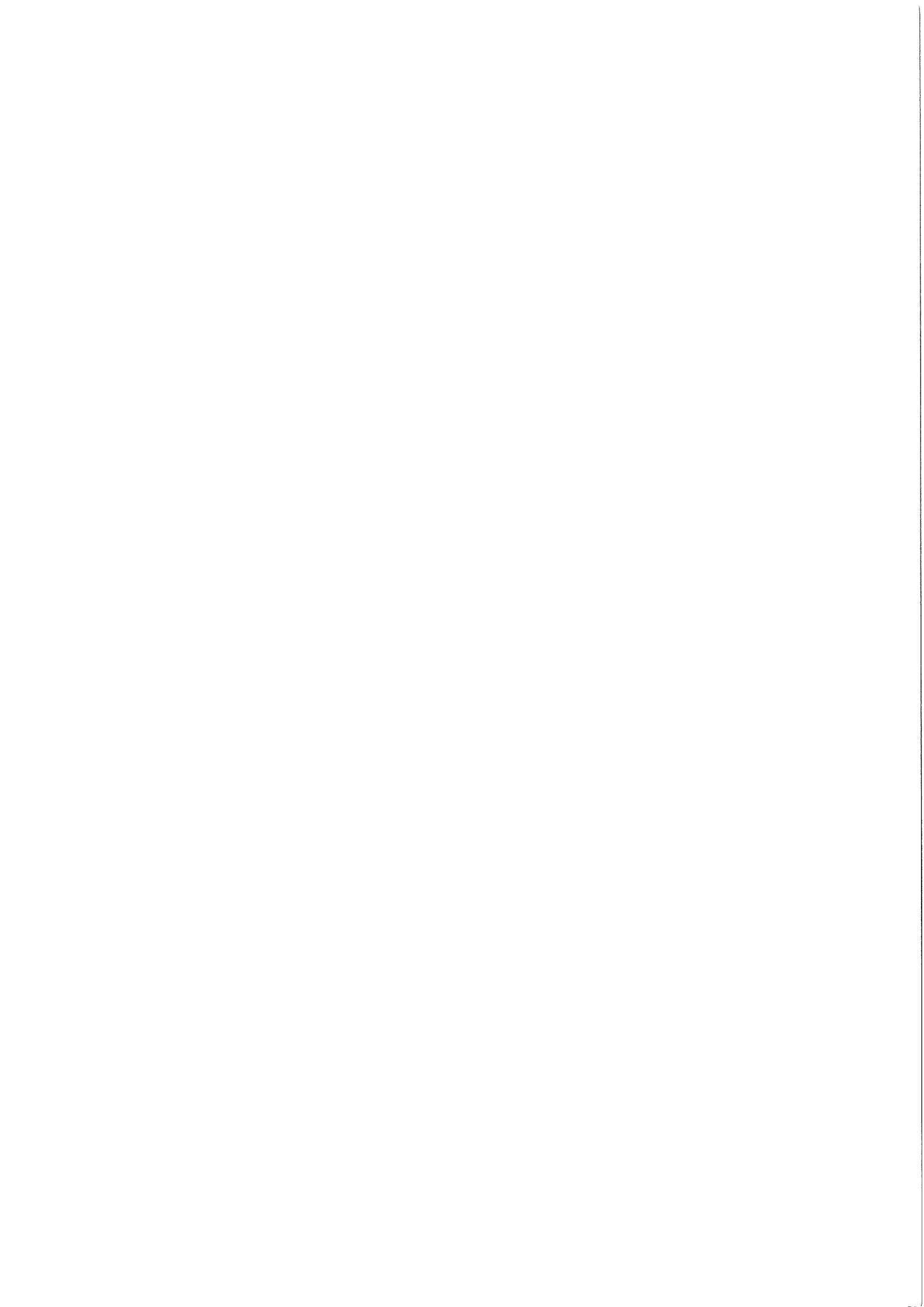
BIJLAGE 5.3 Verband tussen ingevangen hoeveelheid zand en invanghoogte













Appendix 1

Lijst van gebruikte symbolen

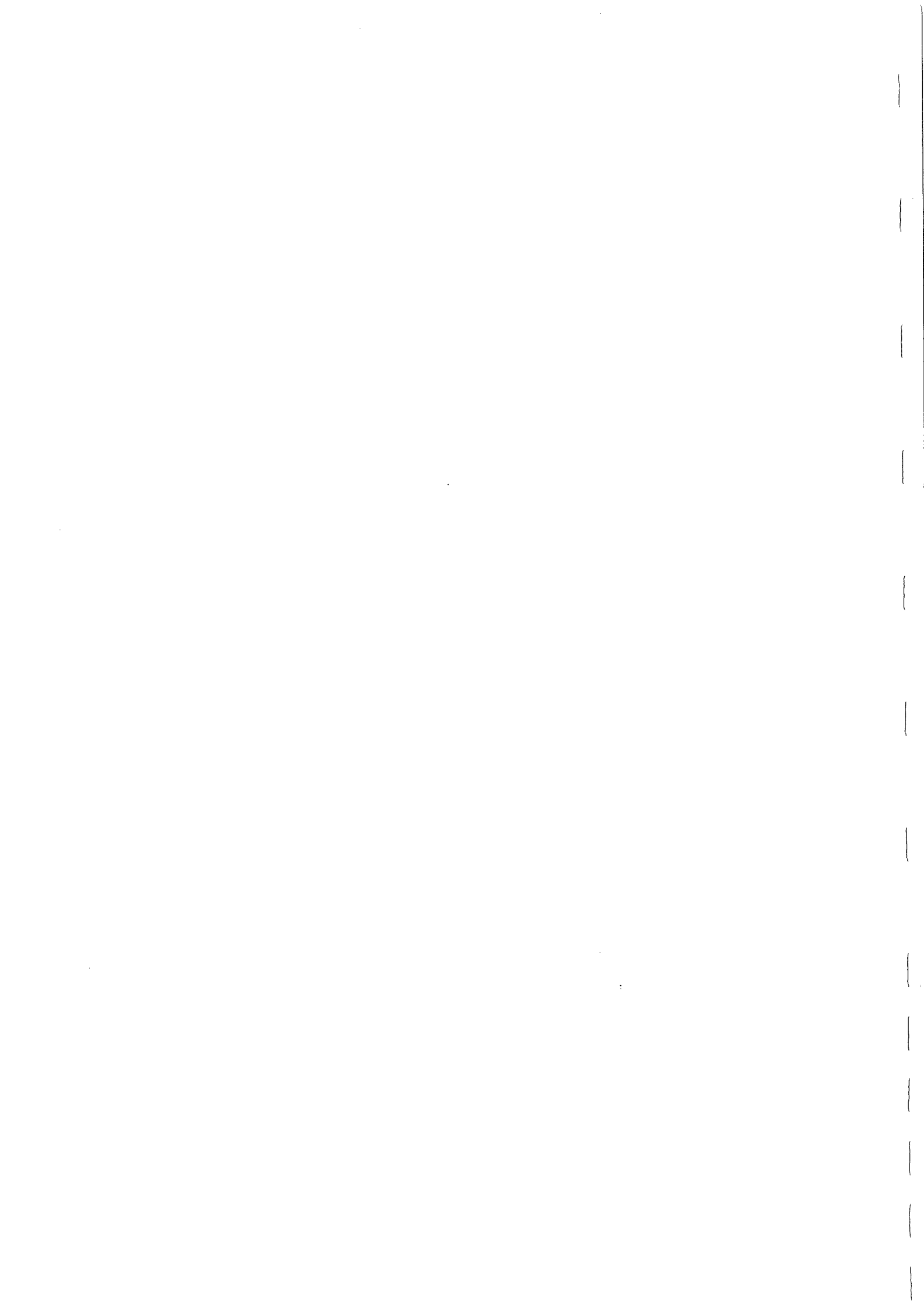
α_i	:hoek tussen windrichting i met de raairichting: $\alpha_i = \beta_i - \gamma$	
β_i	:hoek tussen het geografisch noorden en de richting waarin de wind waait	
γ	:hoek tussen het geografisch noorden en de richting van de raai	
λ_r	golflengte ribbel (m)	
ν	:viscositeit van het water	
π	:constante gelijk aan 3.14 (-)	
θ	:de kritieke waarde van de mobiliteitsparameter voor het begin van beweging volgens Shields (-)	
ρ	:de dichtheid van water (kg/m^3)	
ρ_l	:de dichtheid van lucht (kg/m^3)	
ρ_s	:de dichtheid van sediment (kg/m^3)	
τ	:de schuifspanning (N/m^2)	
$\tau_{b,cr}$:de kritieke bodemschuifspanning (N/m^2)	
$\tau_{b,tot}$:de totale bodemschuifspanning (N/m^2)	
$\tau_{b,c}$:de bodemschuifspanning ontstaan door stroming (N/m^2)	
$\tau_{b,w}$:de bodemschuifspanning ontstaan door golven (N/m^2)	
$\tau_{b,tot,sch}$:de bodemschuifspanning ontstaan door de passage van een schip (N/m^2)	
$\tau_{b,c,sch}$:de bodemschuifspanning ontstaan door de stroming opgewekt door een schip (N/m^2)	
$\tau_{b,w,sch}$:de bodemschuifspanning ontstaan door de golven opgewekt door een schip (N/m^2)	
ϖ	:vochtgehalte (%)	
Δr	:golfhoopte (m)	
a	:de afstand van het schip tot de oever (m)	(hoofdstuk 3)
	:lengte van de raai (m)	(hoofdstuk 5)
A_c	:natte doorsnede van de Waal (m^2)	
A_m	:natte doorsnede van het schip (m^2)	
b	:de scheepsbreedte	
b_m	:de gemodificeerde scheepsbreedte (m)	
B_i	:effectieve invangbreedte van de zandvanger (m)	
C	:sedimentconcentratie (kg/m^3)	
d	:de diepteligging van het schip (m)	(hoofdstuk 3)
	:de gemiddelde korreldiameter (m)	(hoofdstuk 5)
d_{50}	:de mediane korreldiameter (m)	
$d_5, d_{10}, d_{16}, d_{35}, d_{75}, d_{84}, d_{90}, d_{95}$:percentiel cumulatieve korrelgrootte verdeling (m)	
d_{sch}	:de diepteligging van het schip	
D	:referentie korreldiameter van 250 μm (-)	
D_c	:dimensieloze korreldiameter (m)	
E	:efficiëntie zandvanger	
E_0	:aanpassings snelheid dq/dx van het zandtransport q op tijdstip 0 (kg/m)	
f_{ij}	:frequentie van optreden windsnelheid j in windrichting i (s/periode)	
f_w	:golfwrijvingsfactor (-)	
F	:schuifkracht (N)	
Fr_{sch}	:scheeps froudegetal (-)	
g	:de gravitatieconstante (m/s^2)	
h	:de waterdiepte (m)	
I	:impuls (N/m)	
dI	:verandering van impuls (N/s)	
II	:impuls per oppervlakte eenheid in horizontale richting (N/s)	
k_s	:de bodemruwheid (m)	
k_s'	:de korrelruwheid (m)	
k_s''	:de vormruwheid (m)	
K	:de Von Karman constante (0.4)	
l	:mengweg (m)	
l_{sch}	:scheepslengte (m)	
m	:massa (kg)	

n	:aantal korrels (-)
q	:totaal eolisch transport ($\text{kgs}^{-1}\text{m}^{-1}$)
q_c	:rollend transport ($\text{kgs}^{-1}\text{m}^{-1}$)
q_s	:salterend transport ($\text{kgs}^{-1}\text{m}^{-1}$)
q_t	:de totale hoeveelheid zand die de raai passeert (kg/periode)
q_j	:zandtransport bij windsnelheid j ($\text{kgs}^{-1}\text{m}^{-1}$)
qm	:zandtransport, gecorrigeerd voor invangbreedte en efficiëntie ($\text{kg periode}^{-1}\text{m}^{-1}$)
qx	:hoeveelheid zandtransport op afstand x ($\text{kgs}^{-1}\text{m}^{-1}$)
r	:evenredigheidsfactor (-)
r'	:evenredigheidsfactor (-)
s	:de relatieve dichtheid (-)
s'	:evenredigheidsfactor (-)
s_w	:relatieve dichtheid (-)
S	:Sedimenttransport ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
t	:tijd (s)
T0	:uitgangssituatie (-)
T	:de golfperiode (s) (hoofdstuk 3)
	:horizontale component van de steunkrachten (N) (hoofdstuk 5)
u	:stroomsnelheid (m/s)
u_z	:stroomsnelheid op hoogte z (m/s)
\bar{u}	:de diepte gemiddelde stroomsnelheid (m/s)
u_s	:schuifspannings snelheid (m/s)
u_2	:de horizontale component van de eindsnelheid (m/s)
u_{sch}	:de vaarsnelheid van het schip (m/s)
\hat{U}_δ	:de orbitaalsnelheid ter hoogte van de grenslaag (m/s)
v	:snelheid (m/s)
v_s	:schuifspannings snelheid (m/s)
v_{*cw}	:kritische schuifspannings snelheid gecorrigeerd voor vochtgehalte (m/s)
V_s	:de vaarsnelheid van het schip t.o.v. de rivierafvoer (m/s)
w_1	:beginsnelheid (m/s)
w_2	:eindsnelheid (m/s)
w_s	:valsnelheid (m/s)
W_T	:de rivierbreedte (m)
z	:hoogte (m)
z'	:ruwheidsfactor (m)
z_0	:zero velocity level (m)

Appendix 2

Gebruikte software

ANEMO (M.C.G. van Maarseveen, Fysisch Geografisch laboratorium, Universiteit Utrecht)
ANEMO2 (M.C.G. van Maarseveen, Fysisch Geografisch laboratorium, Universiteit Utrecht)
FRSPL3 (K. Houwman, Vakgroep Fysische Geografie, Universiteit Utrecht)
SALTI (D.B. van Dam, Fysisch Geografisch laboratorium, Universiteit Utrecht)
VALKOL2 (D.B. van Dam, Fysisch Geografisch laboratorium, Universiteit Utrecht)
VALKOANA (M.G. Kleinhans, Vakgroep Fysische Geografie, Universiteit Utrecht)





INTERUNIVERSITAIR CENTRUM VOOR GEO-ECOLOGISCH ONDERZOEK

Het ICG onderzoekprogramma richt zich op de volgende thema's gebundeld in het onderzoekprogramma "Patterns and Processes in Changing Environments":

1. "Dynamics and Palaeorecords of Depositional Environments"

- a. "Dynamics and evolution of river- and coastal systems"
- b. "Palaeoclimatology and -ecology of the Quaternary"

2. "Functioning of Landscape Ecosystems"

- a. "Processes and change in terrestrial ecosystems"
- b. "Processes and change in geomorphological systems"

Bij vele onderzoeken wordt gebruik gemaakt van technieken van "Modellering en kwantitatieve analyse van geografische data". Een deel van de ICG medewerkers houdt zich bezig met ontwikkelen en uitvoeren van deze technieken.

De rapporten die in de ICG-reeks verschijnen worden in zeer beperkte oplage gedrukt en worden verspreid onder belangstellenden. Overname van gegevens en/of citeren is alleen toegestaan na overleg met de auteur(s) en/of leider(s) van het onderzoek. Losse afleveringen zijn verkrijgbaar bij onderstaande personen:

Fysische Geografie en Milieukunde
Universiteit Utrecht

Dr. J.H. van den Berg
(030-532752)

Fysische Geografie en Bodemkunde
Universiteit van Amsterdam

Dr. J.J.M. van der Meer
(020-5257420)

Palynologie en Paleo/Actuo-ecologie
Universiteit van Amsterdam

Dr. H. Hooghiemstra
(020-5257857)

Kwartairgeologie en Laaglandgenese
Vrije Universiteit Amsterdam

Dr. C. Kasse
(020-4447381)

TOT NU TOE VERSCHENEN:

- 95/1 Zeeberg, J.J., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *The nature and distribution of Late Pleistocene dunes in the European lowlands and on the Russian platform*
- 95/2 Dinter, M. van, Sorber, A.M. en H.J.A. Berendsen, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Inventarisatie van de sedimentatie van zand op de oeverwallen van de Waal en de Gelderse IJssel tijdens het hoogwater van januari en februari 1995*
- 95/3 Sorber, A.M. en G. de Vaan, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Ruimtelijke variatie van de sedimentaire structuur en textuur van de bedding van de Grensmaas (stuw Borgharen, km. 15.5 - Maaseik, km. 52.7)*
- 95/4 Hessel, R., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Investigation of drought patterns - a case study in Southern Germany*
- 95/5 Meursing, L., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *De hydraulische ruwheid van doorstroomde vegetatie. Analyse van gepubliceerde model- en prototype metingen.*
- 96/1 Asselman, N.E.M., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Suspended sediment concentrations during high discharge events in the river Rhine.*
- 96/2 Makaske, B. en M. Terlien, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Le développement géomorphologique de la partie méridionale du Delta intérieur du Niger.*
- 96/3 Van der Wateren-de Hoog, B., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Adaptation of a daily weather generator to represent long term precipitation persistence.*

- 96/4 Fehse, J. Universiteit van Amsterdam, Sectie Palynologie en Paleo/Actuo-ecologie: *The Chocó biogeographic region - high levels of biodiversity and endemism threatened in Colombia's Pacific lowland.*
- 96/5 Asselman, N.E.M., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Grainsize characteristics used to identify sediment transport pathways on fine grained aggrading floodplains.*
- 96/6 Boer, A. de, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *(Semi)automatische meetssystemen voor het sedimenttransport in rivieren - literatuurstudie.*
- 96/7 Kleinhans, M.G., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Sediment transport in de Nederlandse rijntakken -verwerking metingen 1988-1995 en toetsing transportvergelijkingen.*
- 96/8 Hesselink, A.W., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Eilanden en zandbanken in de Rijntakken rond 1850*
- 96/9 Kleinhans, M.G., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Sediment transport in the dutch Rhine branches - annual transport and interim sediment budget.*
- 97/1 Asselman, N., van Deursen, W., Kwadijk, J., Middelkoop, H. en C. Wesseling (Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie) van Dijk, P. en F. Kwaad. Universiteit van Amsterdam, Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde: *Environmental change and the river Rhine, implications for discharge, sediment supply and water management - progress report 1*
- 97/2 Kabout, J.A.H., Hesselink, A.W. en H.J.A. Berendsen, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Inventarisatie van de sedimentatie van zand op de oeverwallen van de Waal tijdens het hoog water van februari en maart 1997.*
- 97/3 Kleinhans, M.G., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Sedimenttransport in de Waal: betrouwbaarheidsanalyse en meetstrategie.*
- 97/4 Bruinsma, M. en J.C.J. Kwadijk, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Uitbreiding Rhine Flow Model 1902 - 1980*
- 97/5 Storms, J. en J.C.J. Kwadijk, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Verandering van de kans op extreme afvoeren 1990 - 2100 voor het UKHI klimaat scenario.*
- 97/6 Hoek, W.Z., Vrije Universiteit, Sectie Kwartairgeologie en Laaglandgenese: *Reference list of Late glacial and Early Holocene pollen diagrams from The Netherlands and adjacent parts of Belgium and Germany.*
- 97/7 Kleinhans, M.G., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Sedimenttransport in de Waal: hoogwater Maart 1997.*
- 97/8 Wilbers, A., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Duinkarakteristieken en dune tracking tijdens een hoogwater in de Rijntakken.*
- 97/9 Ancker, J.A.M. van den en Jungerius, P.D., Arens Bureau voor Strand- en Duinonderzoek, Universiteit van Amsterdam, Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde: *Eolische processen langs de Waal, zomer 1997.*
- 98/1 Wateren, B. van der, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Een afvoer model gebaseerd op het probability distributed principe.*
- 98/2 Asselman, N.E.M., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *The impact of climatic change on suspended sediment transport in the river Rhine*
- 98/3 Buma, J., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Finding the most suitable slope stability model for the assessment of the impact of climate change on a landslide in South East France*
- 98/4 Buma, J., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *The impact of climate change on a landslide in South East France, simulated using different GCM-scenarios and downscaling methods for local precipitation.*
- 98/5 Buma, J., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Modelling the impact of climate change on a landslide in the Italian Dolomites*

- 98/6 Dijk, P.M. van and Kwaad, F.J.P.M., Universiteit van Amsterdam, Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde: *Estimation of suspended sediment supply to the stream network of the river Rhine under present-day climate and land use*
- 98/7 Hesselink., A.W., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Ontwikkeling van de uiterwaarden langs de Lek. Vanaf de 16e eeuw tot heden*
- 98/8 Imeson, A.C., Cammeraat, L.H. and Bergkamp, G., Universiteit van Amsterdam, Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde: *Mediterranean Desertification and Land Use. Annual report for 1996*
- 98/9 Blom, J. van, Coppus, R., Dekker, L.C. and Sevink, J., Universiteit van Amsterdam, Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde: *De bodems van de loofbossen op de oudere duinen en strandwallen van de Nederlandse kust. Profielontwikkeling en bodemverzuring*
- 98/10 Lenders, R., Maren, B. van and Mol, J.-W., Universiteit van Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Wind-, golf-, en stromingsgeïnduceerd sedimenttransport in kribvakken langs de Waal*

