

Wilfred ten Brinke
24-5-'02

Bodemtransport en duinontwikkeling

Tijdens afvoergolven in de Bovenrijn en Waal

A.W.E. Wilbers
Augustus 1998

II

ICG 98/12

hoopwaaier voor '97

Milthuisen
Waal bij Drenten

Bodemtransport en duinontwikkeling.

*Tijdens afvoergolven in de Bovenrijn en
Waal.*

Drs A.W.E. Wilbers

Augustus 1998
Vakgroep Fysische Geografie
Universiteit Utrecht
Heidelberglaan 2
3584 CS Utrecht

Voorwoord

Het rapport dat voor u ligt bevat de resultaten van een aantal bewerkingen van lodinggegevens van een aantal meetcampagnes in de Rijntakken. Het betreft hier enkele series van peilingen die in verschillende riviertrajecten werden uitgevoerd gedurende een aantal afvoergolven. De veranderingen van de duinen tijdens een hoogwatergolf zijn opgenomen met deze peilingen.

Aanvullend op de expliciet in de opdracht aangegeven wensen zijn nog enkele extra bewerkingen en analyses op deze unieke datasets uitgevoerd. Het resultaat hiervan is in dit verslag opgenomen. Deze extra bewerkingen betreffen een verdere verdieping van het inzicht door alle bekende datasets van de Rijntakken samen te voegen en met elkaar te vergelijken. Verder is, in beperkte mate, de duinontwikkeling in de Bovenrijn en de Waal vergeleken met enkele andere rivieren in het buitenland.

Tenslotte is enige aandacht geschonken aan meer grootschalige verhoging of verlaging van het rivierbed in de opgenomen trajecten. Van enkele buitenlandse rivieren is bekend dat de bodem tijdelijk verlaagt tijdens een hoogwater. Een voorlopige test met data van de Bovenrijn en de Waal toont aan dat dit verschijnsel zich ook voordoet in de Waal maar niet in de Bovenrijn. In een vervolgoopdracht van Rijkswaterstaat, die inmiddels is gegund, zal hieraan nader aandacht worden gegeven.

Uit kennis over de hydraulische ruwheid van duinen in een experimenteel onderzoek zijn, in dit rapport, aanbevelingen opgesteld over de resolutie van peilingen die nodig is om de **hydraulische ruwheid** van duinen in de natuurlijke situatie van de Rijntakken te kunnen bepalen. Bij deze experimenten werd gebruik gemaakt van de Zandgoot van het Waterloopkundig Laboratorium in “de Voorst”,

Mijn dank gaat uit naar Wilfried ten Brinke van het RIZA die door het verstrekken van de opdracht voor de studie mij de gelegenheid gaf dit interessante werk uit te voeren. In mijn dankbetuigingen wil ik verder Janrik van den Berg betrekken voor het regelen van de contractzaken en zijn inhoudelijke review van dit rapport. Verder dank ik André van Gelder, Cees Wesseling en Maarten Kleinhans voor al hun hulp en medewerking. Bianca le Large wil ik zeer hartelijk danken voor het snelle type werk.

Samenvatting

Na het succesvol analyseren van echolodgingen uit 1997 (in de Bovenrijn en de Waal) werd er besloten om enkele oude echolodgingen van hoogwaters tussen 1989 en 1995 op dezelfde manier te analyseren. Uit deze analyse moeten de duinontwikkeling en het bodemtransport in de Bovenrijn en de Waal naar voren komen. Daarvoor wordt gebruik gemaakt van het dune tracking programma DT2D.

In de Bovenrijn zijn bij lage afvoeren alleen kleine duinen aanwezig. Bij afvoeren kleiner dan $7000 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn er alleen kleine veranderingen in de hoogte en de steilheid van de duinen. Bij afvoeren groter dan $7000 \text{ m}^3/\text{s}$ nemen de duinlengte, hoogte en steilheid zeer snel toe. Als het hoogwater weer afneemt blijft de duinlengte toenemen, de hoogte en steilheid nemen wel sterk af. De grote duinen verdwijnen langzaam en worden inactief. Tijdens het dalen van de afvoer verschijnen er plotseling nieuwe kleine duinen gesuperponeerd op de grote duinen. Het bodemtransport door duinen wordt geheel overgenomen door deze kleine duinen.

In de Waal zijn altijd twee soorten duinen aanwezig. De kleine duinen zijn gesuperponeerd op de grote duinen maar komen vooral voor in het diepe deel van de rivier. De grote duinen komen het meeste voor in het ondiepe deel. Bij afvoeren lager dan $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ neemt de duinlengte af en de hoogte en steilheid toe als de afvoer toeneemt. Bij de kleine duinen is het niet duidelijk wat er gebeurt omdat er te weinig informatie is. Bij afvoeren boven $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn de dimensies van beide duinsoorten stabiel. De grote duinen hebben dan een lengte van 55m, een hoogte 1,2m en een lijzijde helling van $4,5^\circ$. De kleine duinen hebben een lengte van 15m, een hoogte van 0,5m en een lijzijde helling van 7° . Zowel de migratiesnelheid als het bodemtransport (uitgezet in een zogenaamd Q-S diagram) blijven toenemen bij een toename van de afvoer maar dat deze toename bij afvoeren groter dan $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ minder snel verloopt.

Summary

After successfully analysing echosoundings from 1997 (from the Rhine and Waal) it was decided to analyse some echosoundings of former floods between 1989 and 1995 in the same way. This analysis should increase the understanding of dune behaviour and bedload transport in the Rhine and Waal. The dune tracking program DT2D is used to do this.

At low discharges only small dunes are present in the Rhine. At discharges smaller than $7000 \text{ m}^3/\text{s}$ there are only small changes in the height and steepness of the dunes. At increasing discharges larger than $7000 \text{ m}^3/\text{s}$ dune wavelength, height and steepness increase very rapidly. As the flood declines the wavelength keeps on increasing whereas, the height and steepness decrease strongly. The large dunes disappear slowly and become inactive. While new small dunes suddenly appear superposed on top of the large dunes. The bedload transport is completely taken over by these small dunes.

In the Waal always two types of dunes present. Small dunes superposed on large dunes are generally found in the deep part of the river. The large dunes are generally found in the shallow part. At discharges below $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ the wavelength decreases and the height and steepness increases when the discharges increase. For the small dunes it is not clear what happens at low discharges due to lack of information. At discharges greater than $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ the dune dimensions are stable. The large dunes have a wavelength of 55m, a height 1.2m and a lee-side slope of 4.5° . The small dunes have a wavelength of 15m, a height of 0.5m and a lee-side slope of 7° . Both the migration rate and the bedload discharge keeps on increasing with increasing discharges but at discharges greater than $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ the increase is less fast.

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Samenvatting	3
Summary	3
Inhoudsopgave	4
Lijst met figuren	6
Lijst met symbolen	8
1. Inleiding	9
2. Gebruikte gegevens	11
3. Gegevens verwerking	13
3.1. <i>Dune tracking programma DT2D</i>	13
3.1.1. Berekening van de duinmigratie	14
3.1.2. Lokaliseren van duinen	15
3.1.3. Berekenen van het bodemtransport	16
3.2. <i>Interpolatie programma SURFIS</i>	17
4. Duinontwikkeling en bodemtransport in de Bovenrijn en Waal	19
4.1. <i>Bovenrijn bij Millingen a/d Rijn</i>	19
4.1.1. Duinontwikkeling	19
4.1.1.1. Hoogwater van 1982	19
4.1.1.2. Hoogwater van 1988	20
4.1.1.3. Hoogwater van 1993	20
4.1.1.4. Hoogwater van 1995	22
4.1.1.5. Hoogwater van 1997	23
4.1.1.6. Conclusie	25
4.1.2. Bodemtransport	25
4.2. <i>Waal bij Druten</i>	25
4.2.1. Duinontwikkeling	26
4.2.1.1. Lage afvoeren tussen 1989 en 1992	26
4.2.1.2. Hoogwater van 1993	28
4.2.1.3. Hoogwater van 1995	28
4.2.1.4. Hoogwater van 1997	28
4.2.1.5. Conclusie	30
4.2.2. Bodemtransport	30
5. Discussie	32
5.1. <i>Duinontwikkeling in andere rivieren</i>	32
5.2. <i>Superpositie modellen</i>	33
5.3. <i>Oorzaken van verschil in duinontwikkeling</i>	34

6. Aanvullende handelingen	35
6.1. <i>Hydraulische ruwheid van beddingvormen</i>	35
6.2. <i>Erosie - aanzanding van de rivierbodem</i>	36
7. Conclusies en aanbevelingen	39
Literatuur	40
Bijlage 1. Duinkarakteristieken en bodemtransport hoogwater 1995 in de Bovenrijn	42
<i>Bijlage 1.1. Veranderingen over de rivierbreedte</i>	43
<i>Bijlage 1.2. Veranderingen in de tijd</i>	44
<i>Bijlage 1.3. Veranderingen ten opzichte van de afvoer</i>	45
<i>Bijlage 1.4. Veranderingen van de duinmigratiesnelheid</i>	46
<i>Bijlage 1.5. Veranderingen van het bodemtransport</i>	47
<i>Bijlage 1.6. Veranderingen van de hydraulische ruwheidsparameters</i>	48
Bijlage 2. Duinkarakteristieken en bodemtransport hoogwater 1997 in de Bovenrijn	49
<i>Bijlage 2.1. Veranderingen in de tijd</i>	50
<i>Bijlage 2.2. Veranderingen van de duinmigratiesnelheid en het bodemtransport</i>	51
Bijlage 3. Duinkarakteristieken en bodemtransport laagwater peilingen 1989 – 1992 in de Waal	52
<i>Bijlage 3.1. Veranderingen over de rivierbreedte</i>	53
<i>Bijlage 3.2. Veranderingen in de tijd</i>	54
<i>Bijlage 3.3. Veranderingen ten opzichte van de afvoer</i>	55
<i>Bijlage 3.4. Veranderingen van de duinmigratiesnelheid</i>	56
<i>Bijlage 3.5. Veranderingen van het bodemtransport</i>	57
Bijlage 4. Duinkarakteristieken en bodemtransport hoogwater 1995 in de Waal	58
<i>Bijlage 4.1. Veranderingen over de rivierbreedte</i>	59
<i>Bijlage 4.2. Veranderingen in de tijd</i>	60
<i>Bijlage 4.3. Veranderingen ten opzichte van de afvoer</i>	61

Lijst met figuren

- Figuur 1 Overzichtskaartjes van de gebieden waar de in dit rapport gebruikte metingen zijn uitgevoerd. 11
- Figuur 2 Hoofdvenster van DT2D met een deel van de middelste raai uit de meting van 31 januari 1995..... 14
- Figuur 3 Schetsmatige voorstelling van de migratie berekening. Het profiel van dag 1 wordt in stappen ter grootte van het sampling interval verschoven totdat de maximale migratie is bereikt. De migratie is de afstand waarover profiel 1 moet worden verschoven om samen te vallen met profiel 2. 15
- Figuur 4 Duinkarakteristieken zoals die door het programma DT2D worden berekend. 16
- Figuur 5 Scherm uit SURFIS met de hoogte data van 7-2-1995 in de Bovenrijn. Ook de grenslijnen en de richtingslijnen worden getoond 17
- Figuur 6 De interpolatie methode binnen SURFIS. 18
- Figuur 7 Veranderingen in duin karakteristieken in de Bovenrijn tijdens het hoogwater van januari – februari 1982. Naar Van Urk (1982). 19
- Figuur 8 Veranderingen in duin karakteristieken in de Bovenrijn tijdens het hoogwater van maart – april 1988. Naar Wijbenga (1991). 20
- Figuur 9 Hoogtemodel van de bedding van de Bovenrijn op 4-2-1995. De duinen zijn vrijwel rechtkamig over de gehele breedte van de rivier. 20
- Figuur 10 De middelste profielen van de lodingen op 24, 28 en 31 januari, 4, 9 en 17 februari in de Bovenrijn uit 1995. 21
- Figuur 11 Veranderingen in het voorkomen van de verschillende duinsoorten. Beide lijnen geven het percentage van de bodemoppervlakte die bedekt is met dat soort duinen. Beide soorten zijn onafhankelijk van elkaar bepaald waardoor het totaal meer dan 100% kan zijn. 23
- Figuur 12 Relaties tussen de duinkarakteristieken en de afvoer in de Bovenrijn. De kromme lijnen geven getekende regressies door de datapunten bij stijgende afvoeren. De andere lijnen geven de ontwikkelingen bij de dalende afvoeren van de hoogwaters. De pijl geeft de algemene richting waarin veranderingen optreden..... 24
- Figuur 13 Hoogtemodel van de Waal waarin de positie en de vorm van drie profielen (uit DT2D) wordt getoond. De grote duinen komen voornamelijk voor in het ondiep deel en de kleine duinen vooral in het diepe deel. 27
- Figuur 14 Relaties tussen de duinkarakteristieken en de afvoer in de Waal. De kromme lijnen geven getekende regressies door de datapunten. 29
- Figuur 15 Relaties tussen de duinmigratiesnelheid (A) en bodemtransport (B) en de afvoer in de Waal. De kromme lijnen geven getekende regressies door de datapunten. 31
- Figuur 16 Duinkamen in de Weser. Naar Nasner (1974)... 33
- Figuur 17 Afvoer, gemiddelde duinhoogte en gemiddelde duinlengte als functie van de tijd in ideale unsteady unidirectionale stromingen. Naar Allen en Collinson (1974). 34

Figuur 18 Hydraulische ruwheid van de grote duinen in de Bovenrijn tijdens het
hoogwater in 1995, berekend volgens de voorspeller van Van den Berg et al
(in druk). 36

Figuur 19 Veranderingen in hoogteligging van duin toppen en troggen ten
opzichte van de gemiddelde ligging..... 38

Lijst met symbolen

β	Bodemtransport coëfficiënt
ϕ	Dimensieloze relatieve waterdiepte (-)
Δ	Duinhoogte (m)
λ	Duinlengte (m)
η	Effect van lange en lage duinen
α	Hoek tussen top en brinkpoint
ξ	Ondiep water correctie
σ	Standaard deviatie
H_b	Brinkpoint hoogte (m)
i	Data paar
j	Duin nummer
k	Aantal duinen
k'	Ruwheidslengte betrokken op de korrels (m)
k''	Ruwheidslengte betrokken op de beddingvormen (m)
k_s	Totale ruwheidslengte (m)
n	Aantal data paren
N	Aantal waarnemingen
q_b	Bodemtransport per eenheid van breedte ($m^3/s/m$)
r	Kruiscorrelatie coëfficiënt
R_b	Hydraulische straal gecorrigeerd voor wand invloeden (Vanoni & Brooks, 1957)
U	Migratiesnelheid (m/s)
v	Gemiddelde absolute verschil
x	Gemiddelde
z_1	z-waarde in profiel 1
z_2	z-waarde in profiel 2

1 Inleiding

Zoals gebruikelijk bij rivieren met een zandige bodem, is het rivierbed van de Bovenrijn en de Waal, met uitzondering van omstandigheden na langdurig lage afvoer, bedekt met duinen. Deze duinen bevatten belangrijke informatie over de hydraulische ruwheid en het sediment transport van zand en grind. De duinverplaatsing geeft een betrouwbare indruk van het bodemtransport door de rivier. De grootte en vorm van de duinen bepaalt het leeuwendeel van de stromingsweerstand. Om deze informatie te verkrijgen worden sinds 1980 (Havinga, 1982) meetprogramma's uitgevoerd, waarbij in een bepaald riviertraject de duinmorfologie met echolodgingen met tussenpozen van 1 of meer dagen wordt opgenomen. Omdat de sedimentverplaatsing vooral plaatsvindt tijdens afvoergolven en de kennis over de hydraulische ruwheid dan ook het meest relevant is, worden deze metingen met name uitgevoerd tijdens de passage van een hoogwatergolf.

Tot nu toe zijn echolodgingen in de Rijntakken onder andere gebruikt door Havinga (1982), Van Urk (1982), Wijbenga (1991), Julien (1992), Julien en Klaassen (1995), De Boer (1996), Wilbers (1997). In de meeste gevallen stond daarbij de duinontwikkeling of het berekenen van het bodemtransport (door dune tracking) centraal. In een enkel geval (bijvoorbeeld Van Urk, 1982, Moll et al, 1987) werd er ook aandacht besteed aan de hydraulische ruwheid.

In 1997 werden er in de Bovenrijn en de Waal echolodgingen uitgevoerd tijdens een klein hoogwater. Met behulp van een nieuw dune tracking programma heeft Wilbers (1997) deze gegevens geanalyseerd. Met deze metingen kon, dankzij een hoge meetdichtheid en -frequentie, de duinontwikkeling en het bodemtransport tijdens een hoogwater beschreven worden.

In het verleden zijn er vaker echolodgingen uitgevoerd tijdens een aantal hoogwaters. Deze gegevens zijn slechts deels gebruikt om de duinontwikkeling en het bodemtransport te onderzoeken. Om een complete database aan te kunnen leggen over de duinontwikkeling en het bodemtransport in de Bovenrijn en de Waal en om deze informatie te kunnen gebruiken bij het opstellen van de zandbalans, kwam het RIZA (Rijksinstituut voor Intergraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling) met het idee deze oudere peilingen op dezelfde manier te verwerken als de metingen uit 1997.

In de opdrachtbrief van het RIZA staat het doel als volgt beschreven: *de analyses moeten wederom het bodemgebonden sedimenttransport op basis van dune tracking opleveren, inclusief de temporele variatie in de duinparameters*. Om dit te bereiken is hetzelfde computerprogramma (DT2D) toegepast dat werd gebruikt door Wilbers (1997). De gegevens die zijn gebruikt bestaan uit peilingen in de Bovenrijn bij Millingen a/d Rijn en in de Waal bij Druten. Deze metingen zijn uitgevoerd tussen 1989 en 1995 en hebben een lagere ruimtelijke resolutie dan de metingen uit 1997. Bij het onderzoek zijn deze vragen aan de orde:

- Hoe veranderen de duinen en het bodemtransport tijdens veranderende stromingcondities?
- Is er een verschil tussen de duinontwikkeling in de Bovenrijn en die in de Waal? Zo ja, wat zijn de mogelijke oorzaken van dit verschil?
- Is de duinontwikkeling in de Bovenrijn en de Waal vergelijkbaar met de ontwikkeling in andere rivieren (zoals die beschreven zijn in de literatuur)?

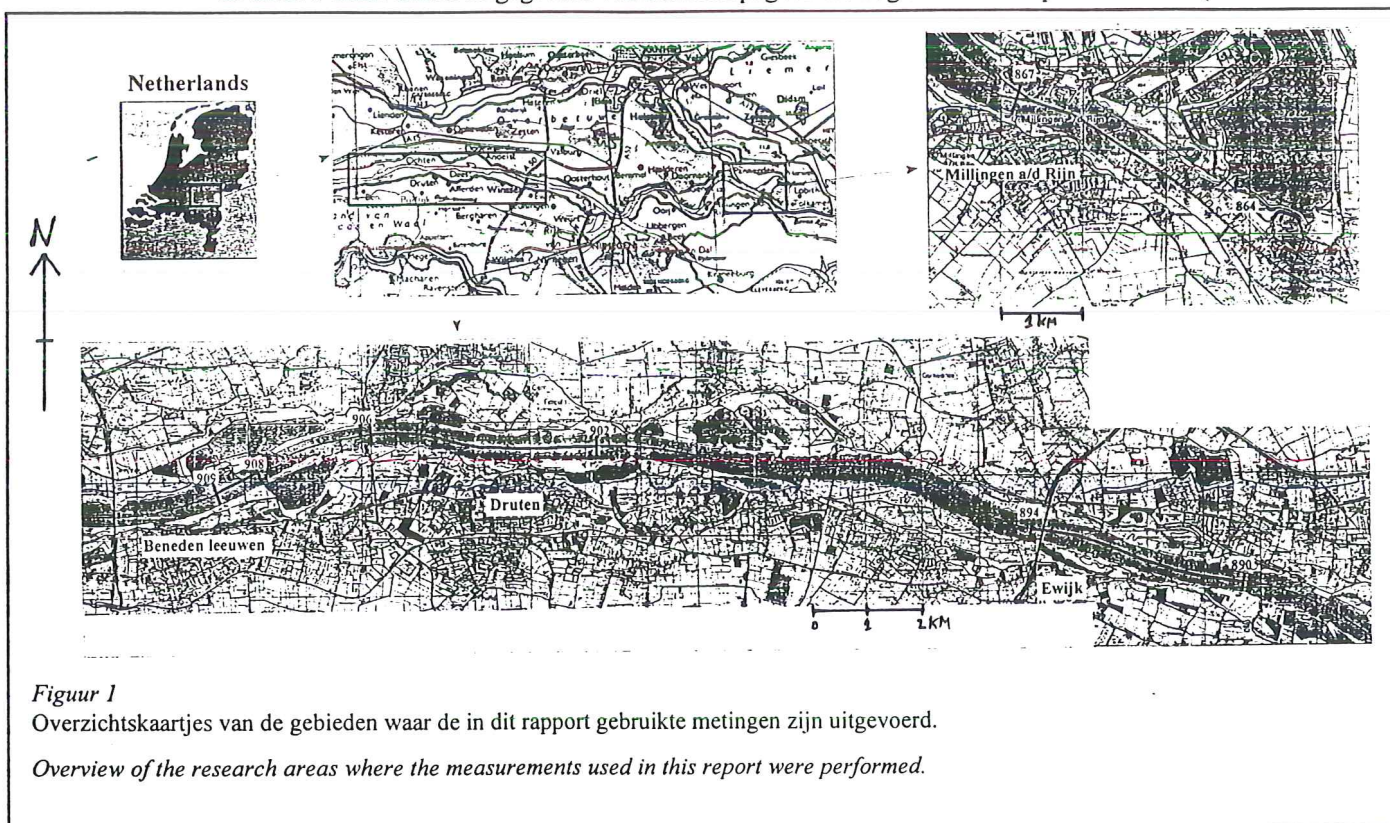
In het volgende hoofdstuk worden de metingen (die in dit onderzoek voor het eerst worden gebruikt) beschreven, samen met de karakteristieken van de meetgebieden en de manier waarop de metingen zijn uitgevoerd. In hoofdstuk 3 worden de belangrijkste onderdelen van de gebruikte computerprogramma's DT2D en SURFIS uitgelegd. Hoofdstuk 4 bevat de beschrijvingen van de duinontwikkelingen en de bodemtransporten tijdens de verschillende meetcampagnes in de Bovenrijn en de Waal. Ook wordt aandacht besteed aan het totale beeld van de duinontwikkeling en het bodemtransport. In hoofdstuk 5 wordt de duinontwikkeling in de Bovenrijn en de Waal vergeleken met andere rivieren. Hoofdstuk 6 bevat enkele extra punten waar aandacht aan is besteed naast het hoofdoel. Daarbij is gekeken naar de hydraulische

ruwheid en erosie / aanzanding van de rivierbodem. Tenslotte worden in hoofdstuk 7 de conclusies en aanbevelingen besproken.

2 Gebruikte gegevens

De echolodgingen die in dit onderzoek worden gebruikt, hebben betrekking op twee verschillende delen van het Nederlandse rivierengebied. Het meest stroomopwaartse gebied ligt in de Bovenrijn bij Millingen a/d Rijn (Figuur 1). De rivier is hier recht, waarbij het diepste deel verschuift van het zuiden stroomopwaarts naar het noorden stroomafwaarts. De mediane korrelgrootte van dit deel van de Bovenrijn ligt tussen 0,7 en 2,5 mm (Ten Brinke, 1997). Het benedenstroomse onderzoeksgebied ligt in de Waal bij Druten. Dit gebied begint bij Ewijk en eindigt bij Beneden-Leeuwen. Zoals uit Tabel 1 kan worden opgemaakt is van dit gebied in elke campagne een ander gedeelte gepeild. Alle gedeeltes hebben echter een rechte loop met het diepste deel in het zuiden. De mediane korrelgrootte van het gedeelte van de Waal bij Ewijk ligt tussen 0,8 en 1,0 mm, dat van het gedeelte bij Druten tussen 0,75 en 1,0 mm en als laatste bij Beneden-Leeuwen tussen 1,0 en 2,0 mm. (Ten Brinke, 1997)

In tabel 1 staan alleen de gegevens van meetcampagnes die nog niet eerder op deze manier (met



DT2D) zijn gebruikt in een dune tracking onderzoek. De oudste data in dit verband zijn de metingen die zijn gedaan in de Waal tijdens lage afvoeren in de jaren 1989, 1990 en 1992. In verschillende maanden werden telkens op drie opeenvolgende dagen echolodgingen verricht. Van het hoogwater van de winter van 1993-1994 werden in de Bovenrijn en Waal tijdens afnemende afvoer metingen verricht. In de Bovenrijn tussen 13 en 20 januari 1994 en in de Waal tussen 17 en 21 januari 1994. Maar niet elke dag was er een meting of werd er op dezelfde trajecten gemeten.

Ook tijdens het extreme hoogwater van februari 1995, één van de hoogste van deze eeuw, werd een programma van echolodgingen uitgevoerd. In de Bovenrijn werden deze metingen verricht vóór, tijdens en ná het hoogwater. Vóór en ná het hoogwater werd over een lengte van 1 km gemeten, tijdens het hoogwater was dat 3 km. In de Waal werden alleen echolodgingen uitgevoerd tijdens het hoogwater en in tegenstelling tot in de Bovenrijn werden niet elke dag dezelfde raaien ingemeten. De ene dag werd de zuidzijde gemeten, de volgende dag de noordzijde.

Tabel 1

Informatie over de gegevens uit meetcampagnes nog niet gebruikt in combinatie met DT2D.

Information about data from measuring programs not yet used in combination with DT2D.

Rivier	Meet periode	Afvoer bereik (m ³ /s)	Kilometer nummer	Meet profielen (m van de rivieras)	Gemiddelde ruimtelijke resolutie (aantal punten / m)	Migratie sampling interval (m)*
Bovenrijn	13 januari 1994 – 20 Januari 1994	3640 – 5415	864 – 867	-75, 0, 75	2.38	0.5
Bovenrijn	20 december 1994 – 26 april 1995**	1999 – 11885	864 – 867	-100, -50, 0, 50, 100	3.35	0.4
Waal	23 januari 1989 – 26 maart 1992***	750 – 2311	903 – 905	-100, -75, -50, -25, 0, 25, 50, 75, 100	0.43	2.5
Waal	17 januari 1994 – 21 januari 1994****	2486 – 2865	890 – 894 and 902 – 905	-75, 0, 75	2.33	0.5
Waal	27 januari 1995 – 21 februari 1995	3242 – 7008	902 – 906	-50, 0, 50	2.50	0.5

* Zie § 3.1.1.

** De periode tussen twee metingen was enkele dagen, met uitzondering van het extreem hoog water (26 januari – 10 februari) toen gemiddeld 1x dag.

*** In de maanden januari, februari, maart, april, mei, juni, juli, september 1989, januari, maart 1990 en maart 1992 zijn er telkens op drie opeenvolgende dagen metingen verricht. Hierover is eerder gerapporteerd door Kamphuis (1990).

**** Alleen op 18 Januari is er in beide secties tegelijkertijd gemeten.

In alle campagnes was de werkwijze hetzelfde. Een meetschip vaart langs een van tevoren bepaalde lijn die evenwijdige loopt aan de rivieras en meet de bodemtopografie. Hierbij wordt de positie van de boot sinds 1993 bepaald met een DGPS (Digital Global Positioning System). Daarvoor werd tussen 1989 en 1993 gebruik gemaakt van het Polartrack systeem. Als de boot afwijkt van de vooraf bepaalde profiellijn dan wordt aan de schipper de gewenste vaarrichting gemeld door de computer om de afwijking te corrigeren. De bodemtopografie werd in alle gevallen gemeten met een ATLAS DESO 25 single beam echoloder (sinds 1988 in gebruik). Hierbij werd steeds een andere ruimtelijke resolutie bereikt. Deze is vermeld in Tabel 1 als het aantal punten per meter profiel lengte. Door logistieke en technische problemen was het niet mogelijk meer dan 1 maal per dag te meten. Vaak zitten er zelfs meerdere dagen tussen twee opeenvolgende metingen.

3 Gegevens verwerking

Om de in het vorige hoofdstuk beschreven gegevens te verwerken, zijn twee verschillende computerprogramma's gebruikt. Met DT2D worden de duinkarakteristieken en de duinmigratiesnelheid berekend. Het andere programma heet SURFIS en wordt gebruikt om van de data digitale hoogtemodellen (DEM's) te interpoleren.

Alle aangeleverde gegevens werden eerst voorbereid om de structuur en bruikbaarheid te onderzoeken. De meeste gegevens werden geleverd in het RWSLOD format, wat het huidige format is bij Rijkswaterstaat om echoloding gegevens in op te slaan. De data, gemeten in de Waal tussen januari 1989 en maart 1992, werd geleverd in het zogenaamde VERLOD standaard. Dit was het data format van het destijds in gebruik zijnde dune tracking programma. Deze metingen waren nooit gecorrigeerd naar hoogtes ten opzichte van NAP. Daarom werden de waterdiepten uit deze metingen gebruikt als z – waarde in DT2D. Dit leverde geen problemen op omdat DT2D relatieve xyz-waarden gebruikt tijdens de berekeningen. VERLOD gegevens zijn geconverteerd naar het RWSLOD format zodat DT2D ze kon gebruiken

Na deze voorbereiding werd DT2D gebruikt om de duinmigratie en de duinkarakteristieken te berekenen zoals dat wordt beschreven in paragraaf 3.1. De ingebouwde interpolatie techniek van DT2D werd niet gebruikt omdat die alleen goed werkt in rechte delen van een rivier die een oost – west richting hebben. De interpolatie techniek, ingebouwd in SURFIS, is speciaal ontwikkeld om gegevens die gemeten zijn in een niet rechte, scheef lopende rivier te kunnen interpoleren. De techniek kan namelijk data, gemeten in profielen, interpoleren terwijl rekening gehouden wordt met de algemene richting van de stroming in de rivier. SURFIS wordt beschreven in paragraaf 3.2.

In de grafieken met duin karakteristieken die in dit rapport worden getoond is, waar mogelijk, ook een aanduiding gegeven voor de spreiding in de gemiddelde waarde. Dit is gedaan met behulp van het 95% waarschijnlijkheidsinterval. Dat interval kan worden beschreven als aangeduid in Vergelijking 1 en betekent dat er 95% kans is dat het gemiddelde van een populatie binnen dit interval ligt. Als het 95% interval klein is, dan komt dat overeen met een kleine spreiding rond het gemiddelde. Niet voor alle karakteristieken was het mogelijk om de standaard deviatie te berekenen. Het 95% interval kan dus ook niet altijd berekend worden.

$$\bar{x} \pm 1.96 \left(\frac{\sigma}{\sqrt{N}} \right)$$

Vergelijking 1

Gemiddelde met 95% waarschijnlijkheidsinterval. \bar{x} = gemiddelde; σ = standaard deviatie; N = aantal waarnemingen.

95% Confidence interval of average. \bar{x} = average; σ = standard deviation; N = number of cases.

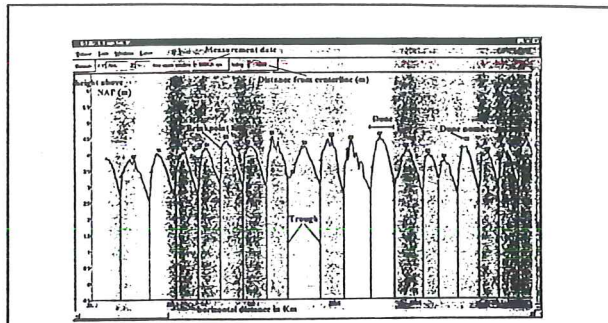
3.1 Dune tracking programma DT2D

Het programma DT2D versie 1.1 is ontworpen door C. Wesseling voor dune tracking in twee dimensies. Deze versie van het programma kan gebruik maken van RWSLOD en multibeam bestanden (deze laatste bestanden zijn alleen bruikbaar samen met een RWSLOD bestand van hetzelfde gebied). De echolodingen moeten zijn gemaakt in een recht stuk van de rivier. Het programma kan dan de duinmigratie tussen twee opeenvolgende echolodingen berekenen. Daarnaast kan het programma duinen herkennen en de duinkarakteristieken (duinlengte, hoogte, helling van loef en lij – zijde, brinkpoint hoogte en helling tussen top en brinkpoint) berekenen. Het programma kan ook nog een DEM (Digital Elevation Model) interpoleren uit elk geïmporteerd bestand waarbij het gebruik maakt van een inverse distance techniek. Voor verder details over deze interpolatie techniek en de in- en uitvoerparameters in DT2D wordt de lezer door verwezen naar de betreffende handleiding (Wesseling en Wilbers, 1997).

De procedure die moet worden gevolgd om de gegevens te verwerken met DT2D gaat als volgt: als eerste moet er een dataset worden gedefinieerd. Hierin wordt opgenomen om wat voor soort

data het gaat en wat de volgorde van de bestanden moet zijn. Daarnaast moeten parameters worden ingevuld die worden gebruikt bij het berekenen van migratie en bij het interpoleren van de DEM's. Daarna voert het programma een aantal basisberekeningen uit waardoor het interactieve gebruik veel sneller en gemakkelijker gaat.

In het interactieve deel van het proces moet de gebruiker de minimale duinlengte aan de door het programma te vinden duinen opgeven. Verschillende vensters (Figuur 2 is het hoofdvenster) helpen de gebruiker de gegevens te bekijken en eventueel de parameters aan te passen voor betere resultaten. Als laatste kunnen alle berekende waarden per meetdag of per duin worden geëxporteerd zodat ze verder kunnen worden gebruikt in een spreadsheet programma.



Figuur 2
Hoofdvenster van DT2D met een deel van de middelste raai uit de meting van 31 januari 1995.

Main window of DT2D with part of the center profile from the measurement of 31 January 1995.

In de volgende paragrafen worden de meest belangrijke onderdelen van het programma nader toegelicht. Dat zijn achtereenvolgens de migratieberekening met behulp van de zogenaamde kruiscorrelatie methode, het lokaliseren van de duinen en het berekenen van de duinkarakteristieken en als laatste het berekenen van het bodemtransport met behulp van dune tracking

3.1.1 Berekening van de duinmigratie

In dit programma wordt de gemiddelde duinmigratie berekend door gebruik te maken van de zogenaamde kruiscorrelatie methode. Bij deze methode is de duinmigratie gelijk aan de minimale afstand waarover een nieuw profiel moet worden verplaatst t.o.v. een oud profiel zodat beide profielen het beste op elkaar passen (De Boer, 1996) in DT2D is de gemiddelde migratie gedefinieerd als de minimale verplaatsing waarbij het gemiddelde absolute verschil in z-waarden tussen twee profielen minimaal is (Vergelijking 2). De kruiscorrelatie coëfficiënt is dan maximaal (Vergelijking 3).

$$v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_{1i} - z_{2i}|$$

Vergelijking 2

v = Gemiddelde absolute verschil; n = aantal data paren; z₁ = z-waarde in profiel 1; z₂ = z-waarde in profiel 2; i = data paar.

v = Average absolute difference; n = number of data pairs; z₁ = z-value of profile 1; z₂ = z-value of profile 2; i = data pair.

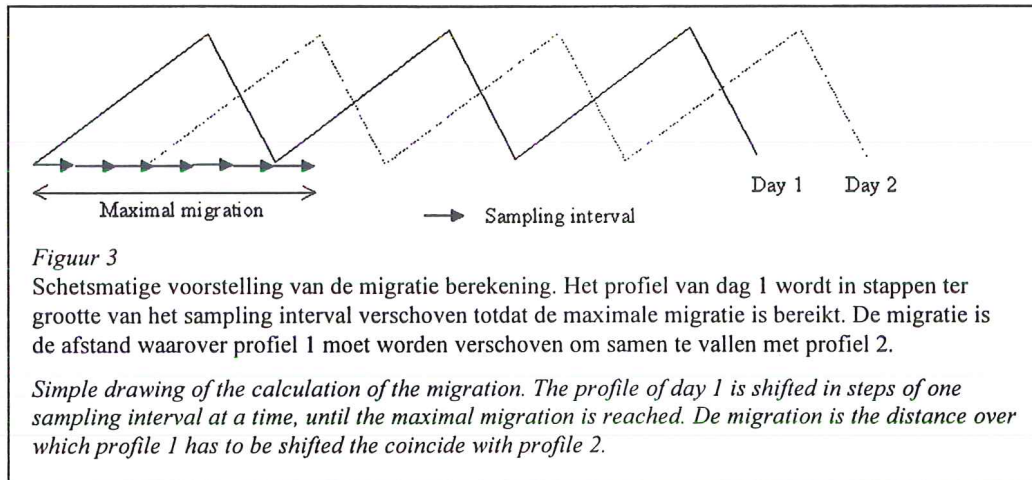
$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n z_{1i} z_{2i} - \sum_{i=1}^n z_{1i} \sum_{i=1}^n z_{2i}}{\sqrt{\left(n \sum_{i=1}^n z_{1i}^2 - \left[\sum_{i=1}^n z_{1i} \right]^2 \right) * \left(n \sum_{i=1}^n z_{2i}^2 - \left[\sum_{i=1}^n z_{2i} \right]^2 \right)}}$$

Vergelijking 3

r = kruis correlatie coëfficiënt; n = aantal data paren; z₁ = z-waarde in profiel 1; z₂ = z-waarde in profiel 2; i = data paar.

r = cross correlation coefficient; n = number of data pairs; z₁ = z-value of profile 1; z₂ = z-value of profile 2; i = data pair.

Voordat de migratie kan worden berekend, moet de gebruiker eerst een waarde geven voor twee parameters, te weten het sampling interval en de maximale migratie. Het sampling interval definieert de stapgrootte van de achtereenvolgende verschuivingen (Figuur 3). De minimale fout in de migratie berekening is de helft van het sampling interval. Als het sampling interval echter kleiner is dan de gemiddelde afstand tussen twee opeenvolgende meetpunten in het profiel dan wordt de rekenkundige methode numeriek onstabiel wat betekent dat de migratiefout te klein of te groot wordt berekend. Het sampling interval moet het optimum zijn tussen een niet te grote fout in de uitkomst en een niet te onstabiele berekening. Uit een visuele inspectie van de gegevens bleek dat het sampling interval een paar procent groter moet zijn dan de gemiddelde afstand tussen twee punten in een profiel. Voor een gedetailleerdere uitleg van de migratieberekening wordt hier verwezen naar Wilbers (1997).



De maximale migratie bepaalt de grootste waarde van het bereik van mogelijke migraties (Figuur 3). De maximale migratie moet groter zijn dan de duinlengte van de grootste (nog interessante) duin in de dataset. De uiteindelijk berekende migratie zal dus liggen tussen 1 sampling interval en de maximale migratie.

Nadat deze twee invoerwaarden zijn gegeven worden de profielen eerst genormaliseerd. Dat gebeurt door van de z-waarde van elk afzonderlijk punt de gemiddelde z-waarde van het profiel af te trekken. De migratie wordt nu in twee stappen berekend. In de eerste stap wordt voor elk sampling interval de gemiddelde kompashoek van de profielen bepaald. De kompashoek van het sampling interval waarin de berekende migratie valt, wordt gebruikt om alle gegevens van de dataset te draaien naar een oost-west lijn (270°). Nadat de data is gedraaid wordt opnieuw de migratie berekend.

In veel van de datasets is het onmogelijk om de migraties te berekenen. Meestal komt dat omdat de aanwezige duinen meer dan 1 duinlengte verplaatsen of te sterk van vorm veranderen tussen 2 metingen.

Uit de metingen in 1997 vond Wilbers (1997) dat de grote duinen met een gemiddelde lengte van 30 – 60 m, een migratiesnelheid hadden van ongeveer 10m per dag. Dit betekent dat deze duinen $\frac{1}{6}$ tot $\frac{1}{3}$ van hun lengte per dag afleggen. Daarom zijn ze gemakkelijk te herkennen en te volgen van dag tot dag. Voor kleine duinen met een lengte van ongeveer 10m vond Wilbers (1997) echter een migratiesnelheid van 20 tot 30m per dag. En dat onder dezelfde stromingscondities. Dat betekent dat deze kleine duinen 2 tot 3 maal hun eigen lengte afleggen in 1 dag en daarbij sterk van vorm veranderen. Daarom is het voor het programma DT2D onmogelijk de migratiesnelheid van deze kleine duinen te bepalen. In dit soort gevallen zijn de berekende migraties zwaar onderschat.

3.1.2 Lokaliseren van duinen

Na de basis berekeningen en de berekening van de migratie, kan het interactieve deel van het programma gebruikt worden om duinen te lokaliseren en de duinkarakteristieken te berekenen. Om dit te doen moet de gebruiker de volgende invoerwaarden geven: de minimale lengte van de te vinden duinen (de afstand tussen twee troggen), de definitiehelling van het brinkpoint (de

hoek van het steilste deel van de lij-zijde in graden) en de minimale hoogte van de lijzijde van een duin (het hoogteverschil tussen top en trog aan de lij-zijde).

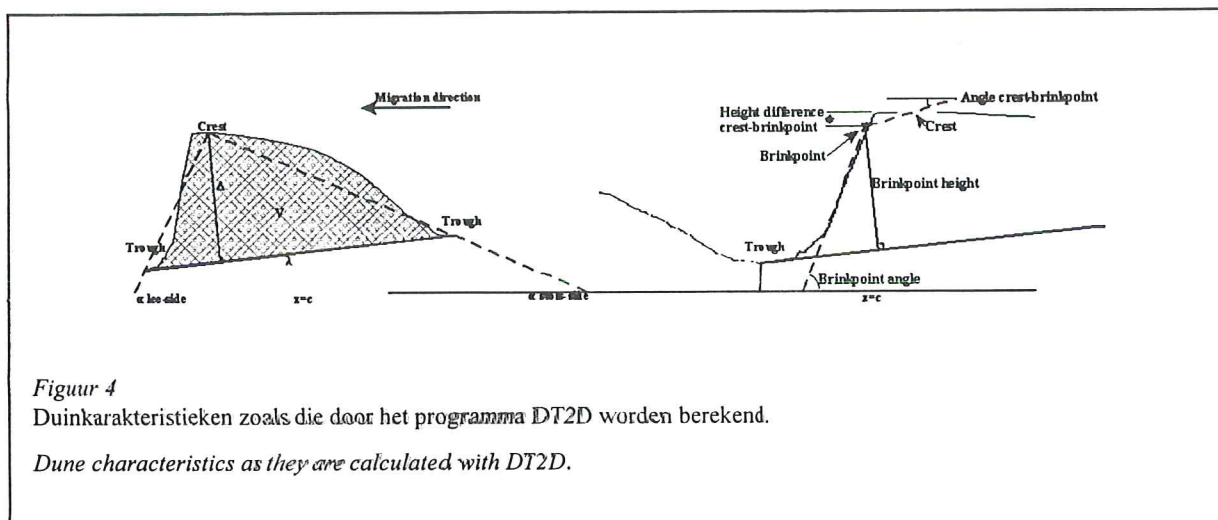
Binnen DT2D geeft de minimale duinlengte de minimale afstand tussen de twee troggen van een duin. Een duin is dan gedefinieerd als elke vorm met een top tussen twee troggen. Tussen de top en de trog markeert het zogenaamde brinkpoint de overgang van een flauw hellend gebied naar een steile helling. De betekenis van het brinkpoint wordt verder uitgewerkt in paragraaf 6.1. In deze paragraaf is de operationele definitie die wordt gebruikt binnen DT2D voldoende. Volgens die definitie is het punt benedenstrooms van de top van een duin waar de helling van de lijzijde groter of gelijk is aan de definitiehelling, het brinkpoint. Door de lage resolutie van de hier gebruikte rivier data wordt de definitiehelling gesteld op 25°. Als laatste wordt de minimale hoogte van de lijzijde gebruikt binnen het hieronder genoemde duinfilter en om brinkpoints van kleinere (niet gewilde) duinen of ruis gesuperponeerd op de grote duinen te elimineren.

Om de ruis die aanwezig is in een meting niet mee te nemen in het lokaliseren van duinen wordt een filter toegepast. Alle vormen die voldoen aan de volgende voorwaarden worden verwijderd.

- Een vorm opgebouwd uit minder dan 10 punten.
- Een vorm met minder dan 2 punten op de lijzijde (exclusief het hoogste en de laagste gemeten punten, die respectievelijk gedefinieerd zijn als de top en trog punten).
- Een vorm met een lagere hoogte dan de opgegeven minimale hoogte van de lijzijde.

Deze voorwaarden zijn experimenteel gevonden door Wilbers (1997).

Elke vorm die na deze filterprocedure wordt benoemd als duin krijgt een uniek identificatie nummer. Daarna worden de duinlengte, hoogte en alle andere duin karakteristieken van iedere geïdentificeerde duin berekend. Alle duin karakteristieken die worden berekend zijn gedefinieerd in Figuur 4.



3.1.3 Berekenen van het bodemtransport

Om duinen te verplaatsen moet er materiaal getransporteerd worden van de ene naar de andere plaats. Materiaal wordt opgenomen van de loefzijde van een duin en afgezet in de trog aan de lijzijde. De duin zal hierdoor migreren. Door te berekenen hoeveel materiaal daarbij van positie wisselt, kan het bodemtransport berekend worden.

Voor deze berekening zijn de duinhoogte en de migratiesnelheid van de duinen nodig. DT2D levert de waarden voor deze twee karakteristieken zodat het bodemtransport kan worden berekend in een spreadsheet programma. In dit onderzoek wordt daarbij Vergelijking 4 gebruikt. Deze vergelijking is door Ten Brinke et al (in druk) gedetailleerd beschreven.

$$q_b = \beta U \bar{\Delta} = \beta * U * \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \Delta_j$$

Vergelijking 4

Bodemtransport door duinmigratie. q_b = bodemtransport per eenheid van breedte ($m^3/s/m$); β = bodemtransport coëfficiënt (-); U = migratiesnelheid (m/s); Δ = duinhoogte (m); k = aantal duinen (-); j = duin nummer (-).

Bedload transport caused by dunes. q_b = bedload transport per unit width ($m^3/s/m$); β = bedload coefficient (-); U = migration rate (m/s); Δ = duneheight (m); k = number of dunes (-); j = dune number (-).

De vergelijking bestaat uit drie onderdelen; de migratiesnelheid (U), de duinhoogte (Δ) en een bodemtransport coëfficiënt (β). De laatste term is noodzakelijk om twee problemen te corrigeren:

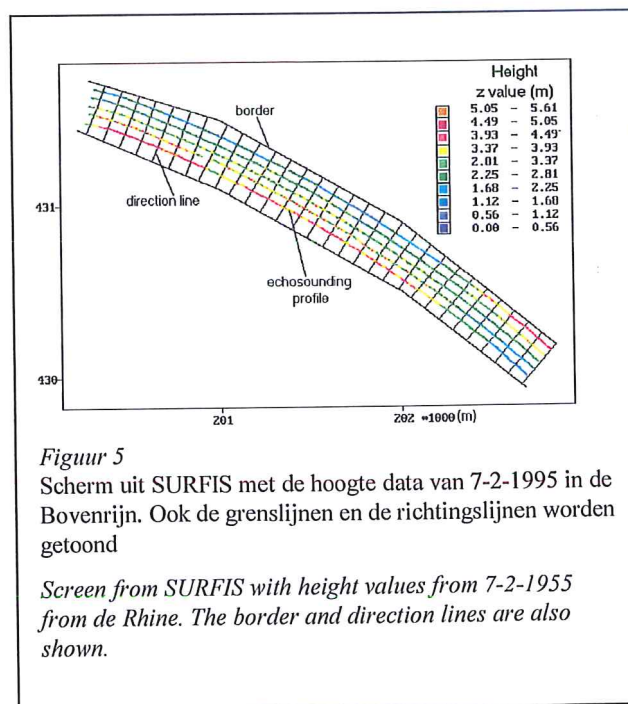
- Niet alle korrels die worden opgenomen aan de loefzijde worden ook weer afgezet in de trog aan de lijzijde. Sommige korrels worden opgenomen in het suspensietransport en worden niet meer afgezet binnen het meetgebied.
- Niet alle korrels die aan de lijzijde worden afgezet komen van erosie op de loefzijde. Ook suspensief materiaal wordt soms afgezet in de troggen.

Uit gepubliceerde experimenten en veldmetingen kan een waarde van 0,55 worden gevonden voor de gecombineerde bodemtransport coëfficiënt (β) die als goede schatting geldt voor de Bovenrijn en Waal (Ten Brinke, in druk).

3.2. Interpolatie programma SURFIS

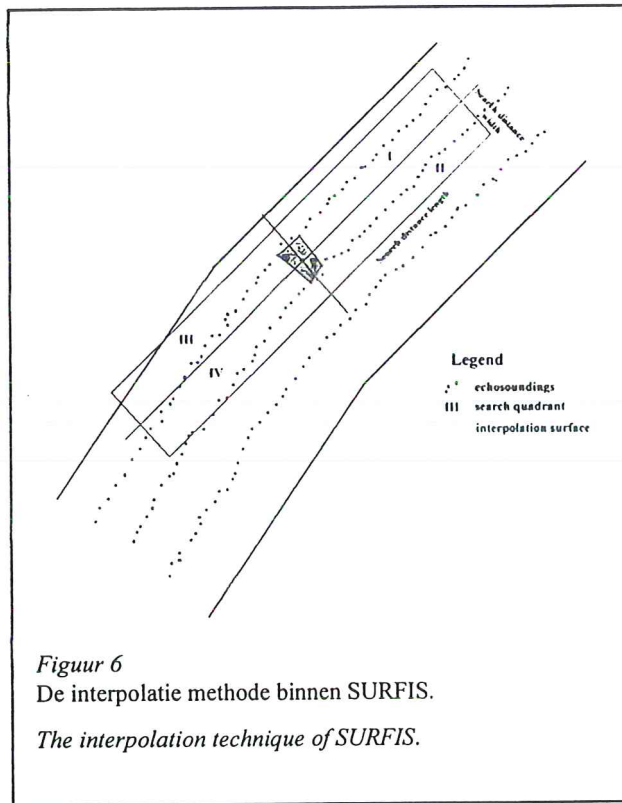
SURFIS (v 2.0) is een interpolatie programma met een nieuwe interpolatie techniek. Deze techniek is speciaal ontwikkeld om gegevens te interpoleren die zijn verzameld in een smalle band (zoals een rivier of kanaal) die een bepaalde richting (zoals een stromingsrichting) bezit. Om te kunnen interpoleren in deze richting moet de gebruiker een bestand geven dat de coördinaten bevat van de grenzen van die smalle band (bijvoorbeeld rivieroever).

Gegevens buiten deze grenzen worden niet gebruikt bij de interpolatie. Tussen de grenzen worden lijnen getrokken die loodrecht staan op de grenzen en de richting van de band. Deze lijnen zijn te zien in Figuur 5 en de afstand tussen die lijnen wordt opgegeven door de gebruiker. Deze richtingslijnen worden bij het interpoleren gebruikt om op elke plaats in het raster te bepalen in welke richting het zoekgebied moet wijzen.



In Figuur 6 wordt een voorbeeld gegeven van het zoekgebied en het interpolatievlak dat wordt gebruikt om voor de zwarte cel (in het midden van het zoekgebied) de z-waarde te bepalen. Dit zoekgebied is gemaakt met behulp van, door de gebruiker opgegeven, waarden voor de lengte en breedte. Deze waarden zijn afhankelijk van de breedte van de rivier en de verdeling van de

punten daarbinnen. Als de raaien bijvoorbeeld 50m uit elkaar liggen, zou als breedte van het zoekgebied bijvoorbeeld 75m genomen kunnen worden. In de breedte is het zoekgebied evenwijdig aan de dichtstbijzijnde richtingslijn. Het zoekgebied wordt verdeeld in vier kwadranten met de te interpoleren cel in het kruispunt. Binnen ieder kwadrant wordt het dichtstbijzijnde punt gekozen. Deze punten worden verbonden tot een vierhoek. Uit het vlak dat wordt beschreven door deze vierhoek wordt de benodigde z-waarde voor de cel berekend. Het vlak wordt opgebouwd met een multiple lineaire regressie tussen de vier hoekpunten. Naast dat er een z-waarde wordt berekend, kan ook de toevallige fout van die berekende waarde worden berekend. Deze toevallige fouten zijn onafhankelijk van de systematische meetfouten in de dataset (Fioole, 1996a en 1996b).



Figuur 6
De interpolatie methode binnen SURFIS.
The interpolation technique of SURFIS.

Omdat deze interpolatie techniek gebruik maakt van de stromingsrichting van een rivier, als de opgegeven richting waarin wordt gezocht naar de te gebruiken datapunten, werkt deze techniek goed op de gemeten gegevens uit de Bovenrijn en Waal. Naast dit voordeel heeft de techniek ook een aantal problemen. Als eerste is dat het kiezen van de breedte en lengte van het zoekgebied. Beide waarden moeten zo klein mogelijk zijn zonder gaten te veroorzaken in de kaart omdat niet overal 4 punten gevonden kunnen worden. Het tweede probleem is het goed definiëren van de interpolatie grenzen. Als in deze grenzen scherpe hoeken of veel knikpunten zitten, is het vaak onmogelijk om goed richtingslijnen te maken. Hierdoor ontstaan ook gaten in de uiteindelijke kaart.

Het programma SURFIS en de ingebouwde interpolatie techniek

zijn in dit onderzoek gebruikt om digitale hoogte modellen (DEMs) te maken van de metingen uit 1995 in de Bovenrijn. Figuur 9 geeft hiervan een voorbeeld. De rastergrootte was hierbij 5m, de richtingslijnen lagen 10m uit elkaar en de breedte en lengte van het zoekgebied was respectievelijk 75m en 5m. Deze DEMs zijn vooral gebruikt om computer animaties (Animated GIFs) mee te maken. Deze computer animaties visualiseren de ontwikkeling van de bodemtopografie tijdens het hoogwater.

4 Duinontwikkeling en bodemtransport in de Bovenrijn en Waal

In dit hoofdstuk worden de duinontwikkeling en het bodemtransport in gedeeltes van de Bovenrijn en de Waal beschreven. In deze beschrijving worden alle beschikbare gegevens over de duinontwikkeling gebruikt. De gegevens die komen uit de literatuur bestaan alleen uit waarden voor de duinlengte en duinhoogte. Gegevens berekend door DT2D bevatten ook informatie over de helling van de loef- en lijzijde.

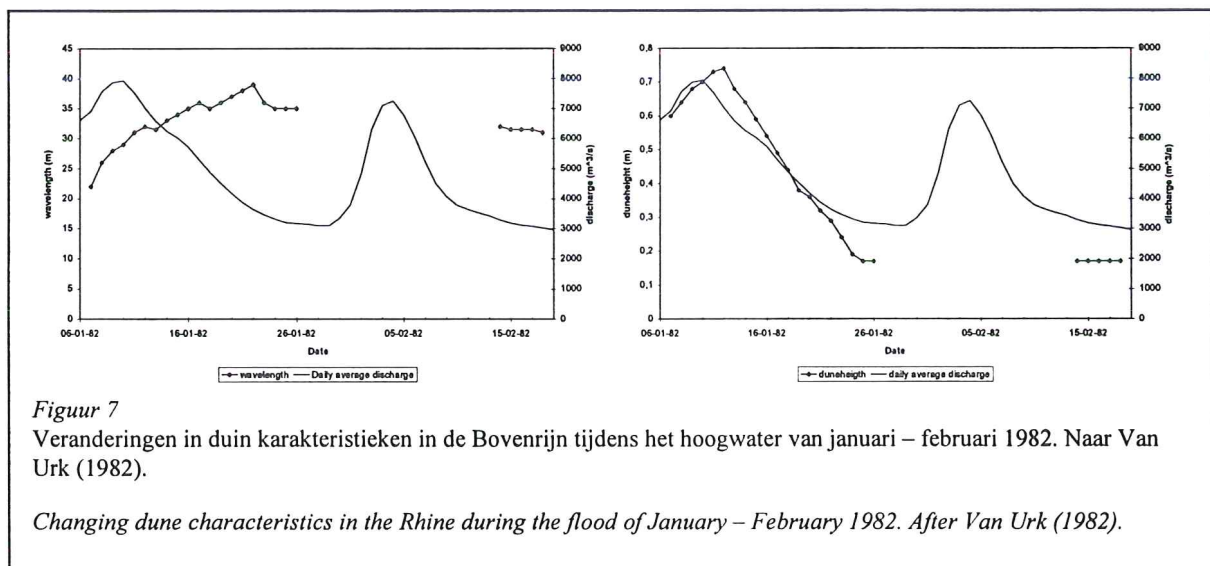
4.1 Bovenrijn bij Millingen a/d Rijn

In dit deel van de Bovenrijn zijn verschillende hoogwatermetingen uitgevoerd. Naast de in Tabel 1 beschreven gegevens zijn er in deze paragraaf ook nog 3 rapporten met gegevens over andere hoogwaters gebruikt. Dat zijn de dataset van het hoogwater uit 1997, zoals die werd gebruikt door Wilbers (1997). Daarnaast gaat het om gegevens gepubliceerd door Van Urk (1982) over een hoogwater uit 1982 en de resultaten van Wijbenga (1991, in Julien, 1992) over een hoogwater uit 1988.

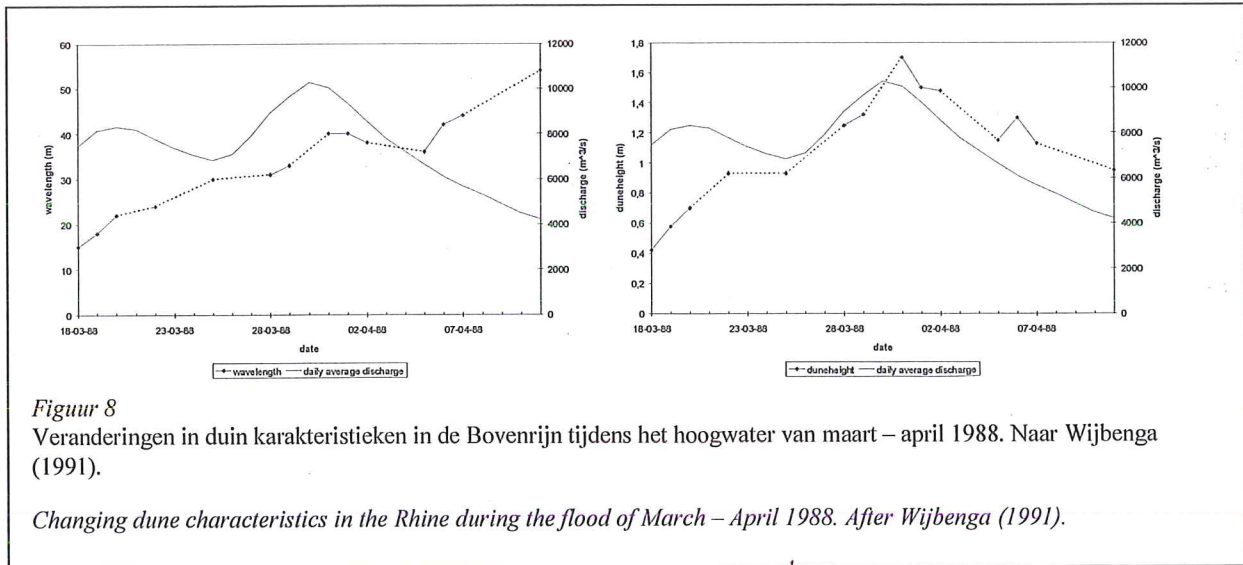
4.1.1 Duinontwikkeling

4.1.1.1 Hoogwater van 1982

Van Urk (1982) rapporteerde maar één soort duin (geclassificeerd op grond van de grootte) tijdens het hoogwater van 1982. Dit hoogwater had een maximale afvoer van ongeveer 7900 m³/s op 10 januari 1982, met een tweede piek van 7250 m³/s op 4 februari 1982. In het rapport van Van Urk is een fout opgetreden waardoor het hoogwater twee dagen later gebeurt dan in werkelijkheid het geval was. Kleine duinen en grootschalige vormen werden op voorhand uit de gegevens gefilterd. Op grond hiervan concludeerde Van Urk dat de bodem vóór het hoogwater vlak was. Tijdens de piek van de afvoer waren er grote duinen die tijdens de afname van de afvoer langzaam verdwenen.



De duinlengte van de grote duinen groeide tot lang na de eerste piek afvoer, zoals kan worden gezien in Figuur 7. Na een najling van ongeveer 12 dagen werd de duinlengte maar een beetje kleiner. De duinhoogte werd groter tijdens de stijgende afvoer en verminderde weer 2 dagen nadat de afvoer begon te verminderen.



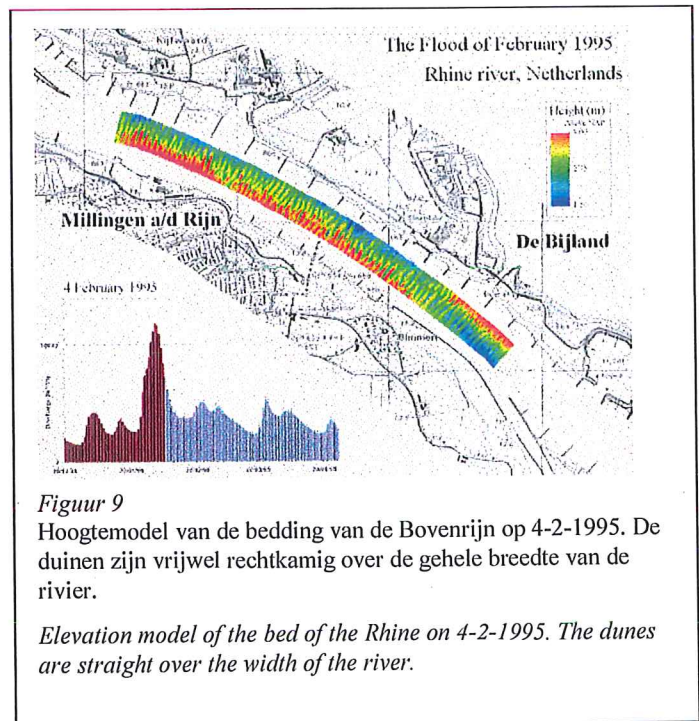
4.1.1.2. Hoogwater van 1988

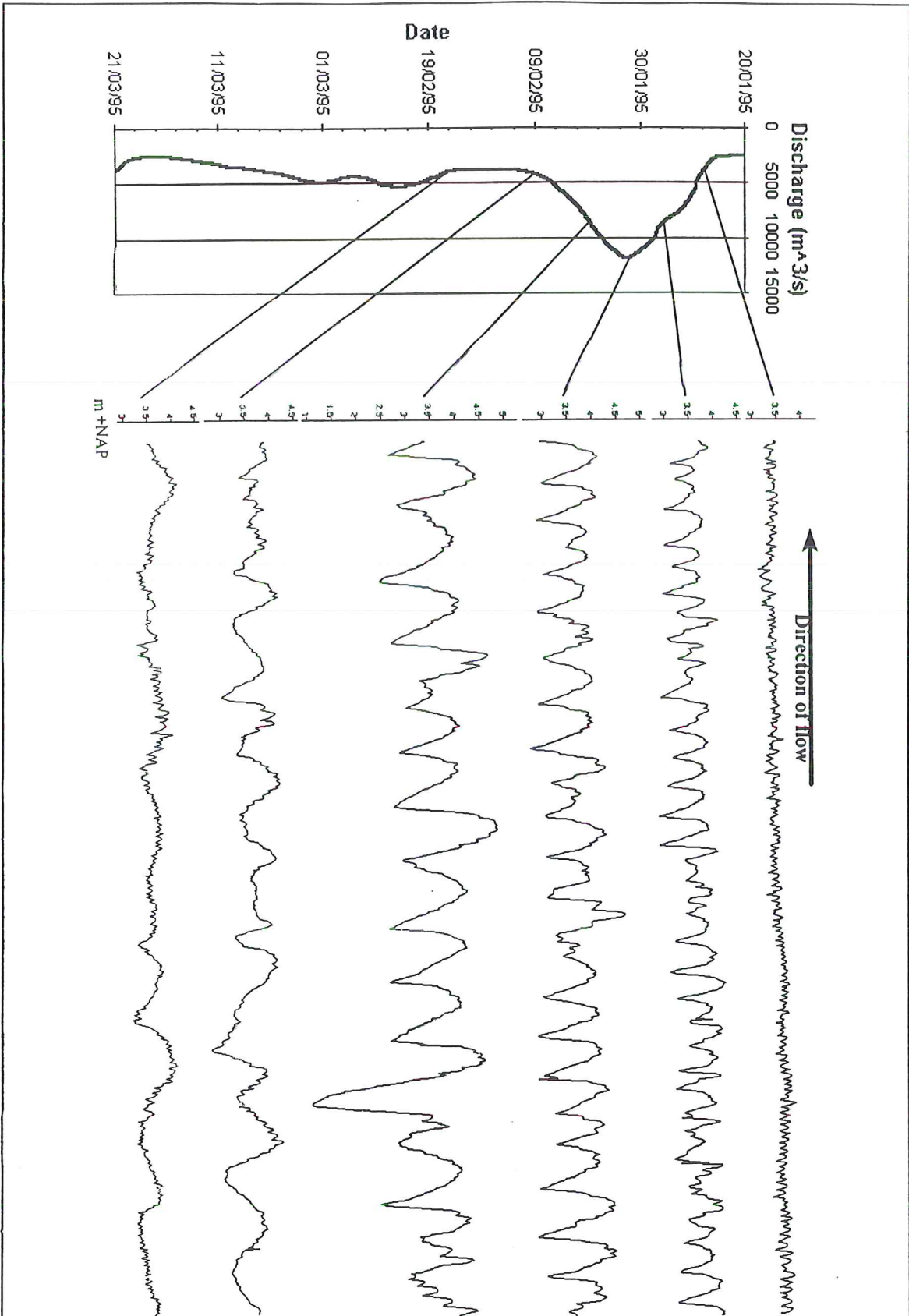
Wijbenga (1991) gebruikte metingen die werden uitgevoerd tijdens een hoogwater in maart 1988. De maximale afvoer werd geregistreerd op 30 maart 1988 en was ongeveer $10250 \text{ m}^3/\text{s}$. In Juliën (1992) worden de resultaten van Wijbenga gerapporteerd met enkele grafieken. Deze grafieken, die de duinontwikkeling laten zien, zijn opnieuw bewerkt en getoond in Figuur 8. Net als Van Urk (1982) had Wijbenga ook maar een soort duinen gevonden. De duinlengte werd groter tijdens de stijgende afvoer maar bleef toenemen ook tijdens de dalende afvoer. De duinhoogte ijelde 1 dag na op het afvoerverloop. De duinhoogte nam toe tot en met 31 maart 1988 waarna het weer af nam.

4.1.1.3. Hoogwater van 1993

Tijdens Kerstmis 1993 was er in de Bovenrijn een hoogwater. De maximale afvoer van $10950 \text{ m}^3/\text{s}$ werd gemeten op 25 december 1993. Tijdens de dalende fase van dit hoogwater werd er op 3 dagen een meting verricht. Dat was op 13, 14 en 20 januari 1994. De bodem bestond uit grote rechthoekige duinen die loodrecht op de hoofdstroming stonden. Net als tijdens het hoogwater van 1995, zoals te zien is in Figuur 9. Boven op deze grote duinen waren kleine duinen gesuperponeerd.

Omdat er maar 3 dagen was gemeten zijn er geen grafieken gemaakt om de duinontwikkeling te illustreren. De enige verandering trad op in de duinhoogte die afnam van $0,77\text{m}$ op 13 januari tot $0,35\text{m}$ op 20 januari 1994. De gemiddelde duinlengte tijdens deze periode was 33m , de gemiddelde helling van de loefzijde was $3,4$ graden en die van de lijzijde was $4,0$ graden.





Figuur 10

De middelste profielen van de lodingen op 24, 28 en 31 januari, 4, 9 en 17 februari in de Bovenrijn uit 1995.

The centre profiles of echosoundings in the Rhine, made on 24, 28 and 31 January, 4, 9 and 17 February 1995.

4.1.1.4 Hoogwater van 1995

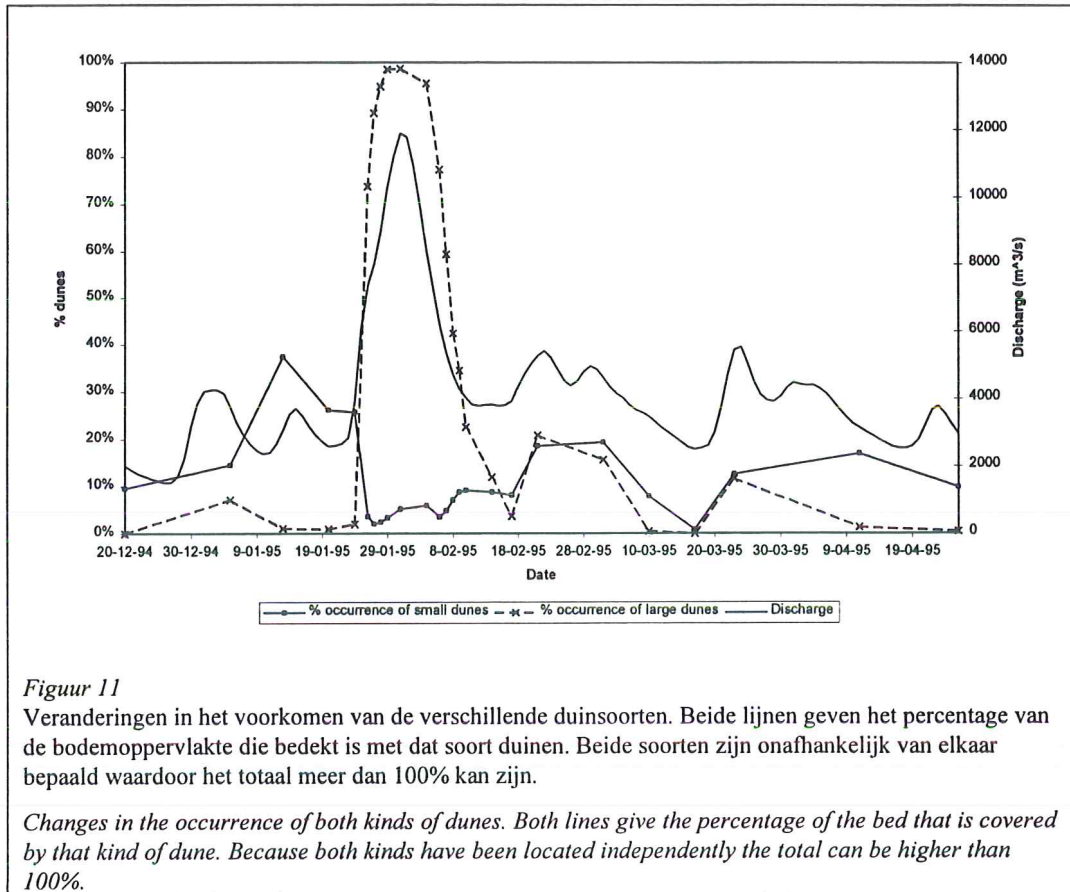
In 1995 werden er in de Bovenrijn gedurende een lange periode echolodingen gemaakt. In die periode viel ook een extreem hoogwater met een piek afvoer van $11900 \text{ m}^3/\text{s}$ op 31 januari 1995. Met al deze metingen kan het gedrag van de duinen worden beschreven vóór, tijdens en ná het hoogwater.

In december 1994 en het eerste deel van januari 1995 was de bodem van de Bovenrijn bedekt met kleine duinen met een gemiddelde hoogte van 0,2m. Dit is te zien in het eerste profiel van Figuur 10 en de grafieken van bijlage 1.1, 1.2 en 1.3. Uit de lijnen die staan voor de duinen op 24 januari, in bijlage 1.1 kan worden opgemaakt dat de duinen in het zuidelijke deel van de rivier korter en steiler waren dan die in het noordelijke deel.

Een dag of twee nadat de afvoer toe begon te nemen (op 24 januari) begonnen ook de kleine duinen te groeien. Op 28 januari was de bodem bedekt met duinen met een gemiddelde hoogte van 0,7m en een lengte van 20m (bijlage 1.2 en profiel 2 in Figuur 10). Over de hele breedte van de rivier waren de duinen even groot. Alleen hadden de duinen aan de zuidzijde steilere lijzijden dan die aan de noordzijde zoals valt te zien in bijlage 1.1.

De maximale afvoer van dit hoogwater werd bereikt op 31 januari (profiel 3 in Figuur 10). In deze fase waren de duinkammen loodrecht op de stroming en rechtekammig over de hele breedte van de rivier (zie Figuur 9). Zelfs na de maximale afvoer bleven de duinen groeien in grootte. Op 2 februari waren de duinen het hoogst en het steilst. De maximale duinhoogte was gemiddeld 1,4m, de duinlengte was toegenomen tot ongeveer 32m (bijlage 1.2 en 1.3). Na 2 februari namen de duinhoogte en steilheid weer af maar bleef de duinlengte toenemen. Dit is te zien in bijlage 1.2 en 1.3 en profiel 4 van Figuur 10.

Tijdens de dalende fase van het hoogwater en ná het hoogwater werd de duinlengte van de grote duinen nog steeds langer, maar de duinhoogte en de steilheid van de loef- en lijzijde namen sterk af. Deze grote duinen werden steeds meer symmetrisch en vervaagden snel. Ze werden inactief (migratiesnelheid werd sterk verminderd) en hun bodemtransport capaciteit werd overgenomen door de kleine duinen die op ze gesuperponeerd waren. Als grote duinen heel lang worden en steeds lager, waarbij er ook nog kleine duinen op gesuperponeerd zijn, dan kan DT2D deze duinen niet meer als dusdanig herkennen. Het opkomen en vervagen van deze grote duinen en het terugkomen van de kleine duinen kan worden gezien in Figuur 11 en bijlage 1.2 en 1.3. Figuur 11 is gemaakt door de gemiddelde lengte van een grote of kleine duin te vermenigvuldigen met het aantal duinen en te delen door de totale raailengte (uitgedrukt in een percentage).

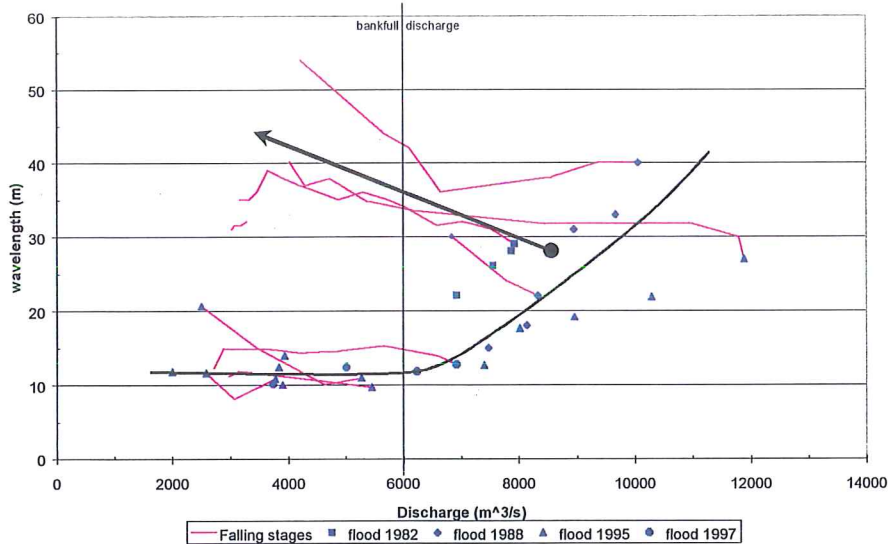


De najling van de duinlengte van de grote duinen kan niet met zekerheid worden bepaald omdat de duinlengte bleef toenemen tot aan het punt van verdwijnen. Waarschijnlijk was de najling ongeveer 10 tot 14 dagen. Na die periode werden de grote duinen inactief en werden de kleine duinen belangrijk. De najling van de duinhoogte en de helling van de loef- en lijzijde was respectievelijk 2 dagen, 2 dagen en 1 dag.

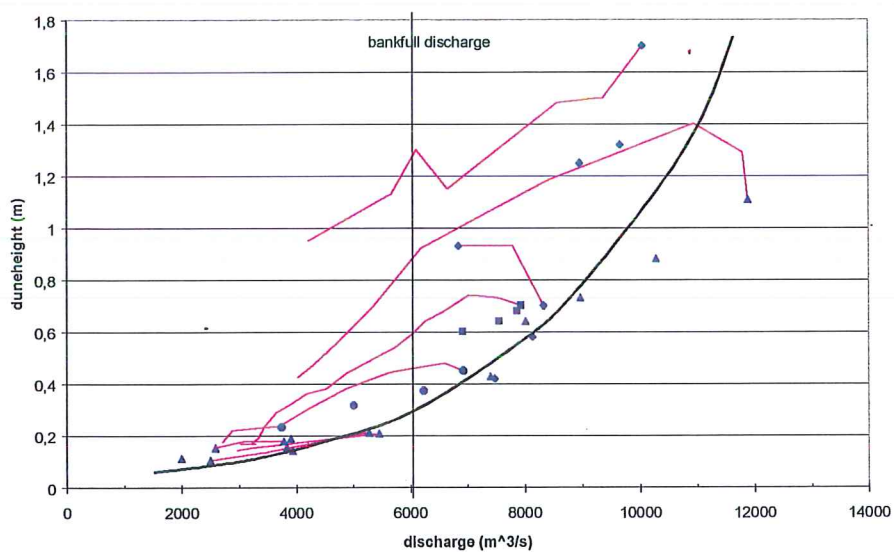
In de tijd na de passage van de afvoergolf gebeurde er niet veel. De bodem was bedekt met kleine duinen gesuperponeerd op de restanten van de grote duinen. De kleine duinen reageerden nog wel op kleine stijgingen van de afvoer door langer en hoger te worden. In tegenstelling tot de grote duinen werden ze ook weer kleiner toen de afvoer weer afnam. Deze kleine veranderingen kunnen het beste worden gezien in de veranderingen van de loef- en lijzijde helling en de duinhoogte (bijlage 1.2 en 1.3).

4.1.1.5 Hoogwater van 1997

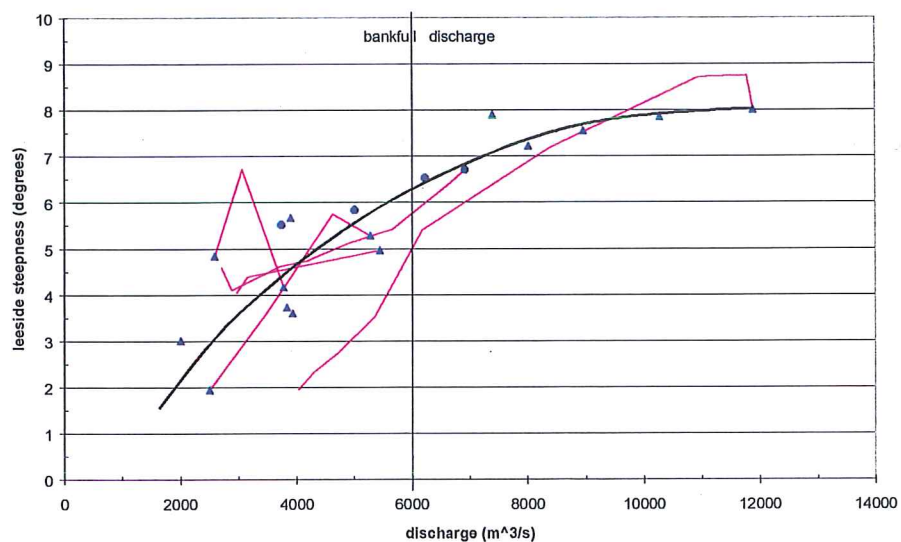
De duinontwikkeling in de Bovenrijn tijdens een klein hoogwater in 1997 (met een maximale afvoer van 6950 m³/s op 2 maart 1997) werd onderzocht door Wilbers (1997). De bodem van de rivier was bedekt met kleine duinen. Tijdens de stijgende afvoer werd de lengte, hoogte en steilheid van deze duinen groter. Na respectievelijk 5-8 dagen, 1 dag en minder dan 1 dag, tijdens het dalen van de afvoer, werden de duinen weer kleiner en meer symmetrisch. Deze veranderingen zijn te zien in bijlage 2.1.



A



B



C

Figuur 12

Relaties tussen de duinkarakteristieken en de afvoer in de Bovenrijn. De kromme lijnen geven getekende regressies door de datapunten bij stijgende afvoeren. De andere lijnen geven de ontwikkelingen bij de dalende afvoeren van de hoogwaters. De pijl geeft de algemene richting waarin veranderingen optreden.

Relations between dune characteristics and discharge in the Rhine. The curves are drawn regressions of the datapoints during rising discharges. The other lines give what happens during falling stages. The arrow gives the direction of change.

4.1.1.6 Conclusie

Al de gegevens van de hierboven beschreven hoogwaters zijn samengevoegd en uitgezet tegen de verschillende afvoeren om zo een totaal beeld van de duinontwikkeling in de Bovenrijn te verkrijgen. In Figuur 12 worden de gemiddelde waarden die bij een stijgende afvoer gemeten zijn, afgebeeld met een symbool. De veranderingen tijdens een afnemende afvoer wordt per hoogwater weergegeven met een lijn.

Bij lage afvoeren komen er in de Bovenrijn kleine duinen voor. Als de afvoer toeneemt dan neemt ook de hoogte en de steilheid van deze duinen toe. Bij afvoeren kleiner dan $7000 \text{ m}^3/\text{s}$ (dat is kleiner dan de bankfull afvoer) verandert er weinig aan de duinlengte. Bij hogere afvoeren worden de duinen snel groter als de afvoer verder stijgt. Zowel de duinlengte als de hoogte stijgen snel. De steilheid van de lijzijde stabiliseert zich op ongeveer 8 graden.

Als de afvoer van een extreem hoogwater begint af te nemen dan blijft de lengte van de grote duinen toenemen. Dit wordt getoond door de bovenste pijl in Figuur 12a die de algemene richting van die verandering aangeeft. De duinhoogte neemt weer af maar is wel groter dan tijdens een stijgende afvoer. De helling van de lijzijde neemt ook af maar is juist kleiner dan tijdens een stijgende afvoer. Zoals gebeurde bij het hoogwater van 1995 gaan de grote duinen na het hoogwater langzaam vervagen en ontstaan er kleine duinen gesuperponeerd bovenop op deze restanten.

4.1.2 Bodemtransport

Voor de meeste datasets van de Bovenrijn was het niet mogelijk om de gemiddelde migratiesnelheid van de duinen te berekenen. Hierdoor kon ook het bodemtransport niet worden berekend volgens de dune tracking methode (paragraaf 3.1.3). Alleen voor een paar dagen tijdens het hoogwater van 1995 (tussen 24 januari en 10 februari) worden de migratie snelheden getoond in bijlage 1.4. Dit zijn de snelheden zoals die met DT2D zijn berekend. Voor en na het hoogwater berekent DT2D migratiesnelheden van 1 à 2 m per dag. De kleine duinen in de rivier bewogen waarschijnlijk veel sneller dan dat maar dat kan niet worden bepaald met behulp van de kruiscorrelatie methode (paragraaf 3.1.1).

Om te zien of de berekende migratie snelheden tijdens het hoogwater wel goed werden berekend door DT2D, is er een handmatige controle uitgevoerd. Hiervoor werd een aantal duinen gevolgd en werd hun migratie tussen twee metingen berekend met behulp van de horizontale verschuiving van de lijzijde. In de onderste twee grafieken van bijlage 1.4 worden de resultaten van deze handmatige controle getoond naast de door DT2D berekende waarden. De migratiesnelheden komen overeen op alle dagen behalve op 31 januari en 1 februari.

De migratiesnelheid steeg in 1995 tijdens stijgende afvoer van ongeveer 20 m/dag tot 50 m/dag bij de piek afvoer. De maximale migratiesnelheid werd waarschijnlijk bereikt op 31 januari of 1 februari. Maar omdat de metingen op 1 en 2 februari niet op dezelfde manier waren uitgevoerd als alle andere metingen kon er geen goede migratiesnelheid berekend worden tussen 31 januari en 1 februari en tussen 2 en 4 februari.

Gebruik makend van de berekende migratiesnelheden (door DT2D en met de hand) kan worden berekend dat tussen 29 januari en 10 februari ongeveer 18900 m^3 (handmatig) tot 14500 m^3 (DT2D) sediment werd getransporteerd als bodemtransport. Dat geeft een gemiddeld bodemtransport van $2100 \text{ m}^3/\text{dag}$ (handmatig) tot $1450 \text{ m}^3/\text{dag}$ (DT2D) tijdens het hoogwater van 1995 met een maximum van $5400 \text{ m}^3/\text{dag}$ (handmatig) tot $5600 \text{ m}^3/\text{dag}$ (DT2D) tijdens de piekafvoer.

Het bodemtransport was tijdens het hoogwater van 1995 in de Bovenrijn evenwichtig verdeeld over de breedte van de rivier. Het maximum lag in het midden van de rivier. Dit te zien in bijlage 1.4.

4.2 Waal bij Druten

Naast de data die beschreven zijn in hoofdstuk 2 wordt in dit hoofdstuk ook nog gebruik gemaakt van de data over het hoogwater in 1997 zoals die door Wilbers (1997) zijn verwerkt. Uit alle bruikbare datasets van de Waal bij Druten blijkt dat er 2 soorten duinen voorkomen.

Kleine duinen met een gemiddelde lengte van 10 tot 20 m en een gemiddelde hoogte van 0,3 tot 0,8m. deze kleine duinen zijn vooral aanwezig in het diepe deel van de rivier (de zuidelijke helft). In het meer ondiepe deel van de rivier (de noordelijke helft) komen vooral grote duinen voor. Deze hebben een gemiddelde lengte van 30 tot 80 m en zijn gemiddeld 0,5 tot 1,5 m hoog. In het midden van de rivier komen beide duin soorten voor. De kleine duinen zijn gesuperponeerd op de grote duinen. Dit is te zien aan de profielen die in Figuur 13 zijn getekend naast een kaart van de bodem van de Waal.

4.2.1 Duinontwikkeling

4.2.1.1 Lage afvoeren tussen 1989 en 1992

In de jaren 1989, 1990 en 1992 werden er verschillende echopeilingen uitgevoerd in de Waal bij lage afvoeren (de afvoeren lagen tussen 500 en 3000 m³/s). In verschillende maanden werd er op 3 opeenvolgende dagen gemeten. Dit werd gedaan met een single-beam echolood en met een lage resolutie. Door deze lage resolutie konden alleen de grote duinen gelokaliseerd worden met DT2D. Er waren kleine duinen aanwezig maar die konden niet precies gelokaliseerd worden. In bijlage 3.1 tot en met 3.3 worden de berekende duinparameters gebruikt in verschillende grafieken. Vanwege de grote tijdsperiode tussen de laatste meting in 1990 en de metingen in 1992 worden deze laatste metingen niet getoond.

Zoals in bijlage 3.1 tot en met 3.3 kan worden gezien veranderde de duinlengte van de grote duinen nauwelijks over de breedte van de rivier en tijdens kleine afvoer veranderingen. De grote duinen waren een beetje hoger en steiler in het noordelijk deel ten opzichte van het zuidelijke deel. De duinhoogte en de helling van de loef- en lijzijde veranderde vooral samen met de geleidelijke veranderingen van de afvoer over de seizoenen. Hiervan kon echter geen nauwkeuring berekend worden.

4.2.1.2 Hoogwater van 1993

Tijdens kerstmis 1993 was er in de Waal een extreem hoogwater. De maximale afvoer was 6900 m³/s op 26 december 1993. Tijdens de dalende fase van dit hoogwater werden er 5 metingen uitgevoerd. Op 17, 18 en 21 januari in de kilometervakken 890 tot 894 en op 18 en 19 januari in de kilometervakken 902 tot 905. In beide secties werden zowel grote als kleine duinen aangetroffen en hun karakteristieken werden berekend. Beide duinsoorten veranderden zo weinig over deze dagen dat er geen grafieken van deze veranderingen zijn gemaakt. De grote duinen hadden een gemiddelde lengte van ongeveer 55 m en een hoogte van ongeveer 1 m. De enige geregistreerde verandering trad op in de helling van de lijzijde die daalde van 4,4° tot 3,2°. De kleine duinen hadden een gemiddelde lengte van 15 m en een hoogte van ongeveer 0,4 m. De helling van de lijzijde van deze duinen veranderde van 6,5° naar 5,7°.

4.2.1.3 Hoogwater van 1995

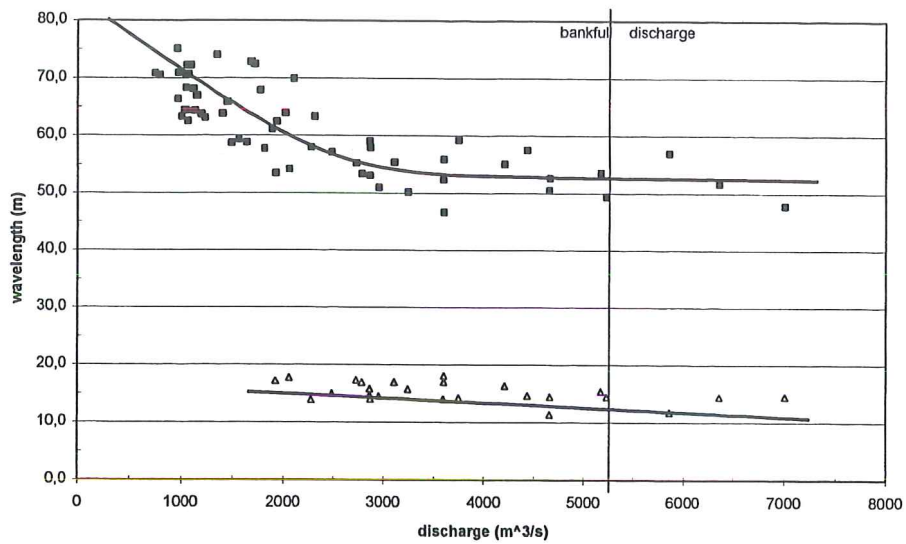
Het hoogwater van 1995 is in de Waal niet zo intensief bemeaten als in de Bovenrijn. Er werd alleen gemeten op een paar dagen tijdens het hoogwater. De maximale afvoer in de Waal was 7000 m³/s op 2 februari 1995. De veranderingen die optraden in de duin karakteristieken worden getoond in de grafieken van bijlage 4.1 tot en met 4.3.

Hoewel dit een extreem hoogwater was veranderde geen van de duin karakteristieken voor, tijdens of na het hoogwater. De grote duinen hadden een gemiddelde duinlengte van 55 m, een hoogte van 1,2 m, een loefzijde helling van 3° en een lijzijde helling van ongeveer 4,7°. De kleine duinen hadden gemiddelde duinlengte van 15 m, een hoogte van 0,55 m, een loefzijde helling van 4,5° en een lijzijde helling van ongeveer 7°.

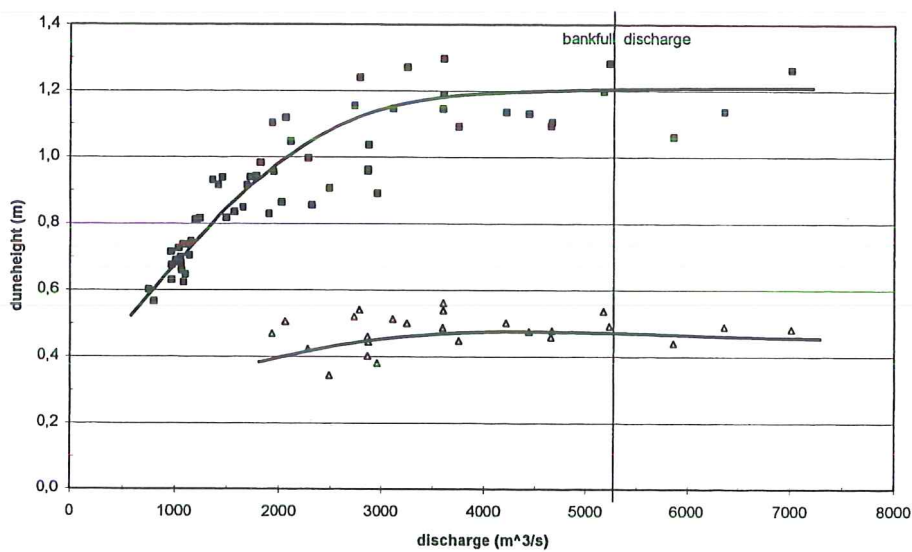
4.2.1.4 Hoogwater van 1997

De duinontwikkeling in de Waal tijdens een klein hoogwater in 1997 wordt uitgebreid beschreven door Wilbers (1997). Het hoogwater had een maximale afvoer van 4650 m³/s op 3 maart 1997.

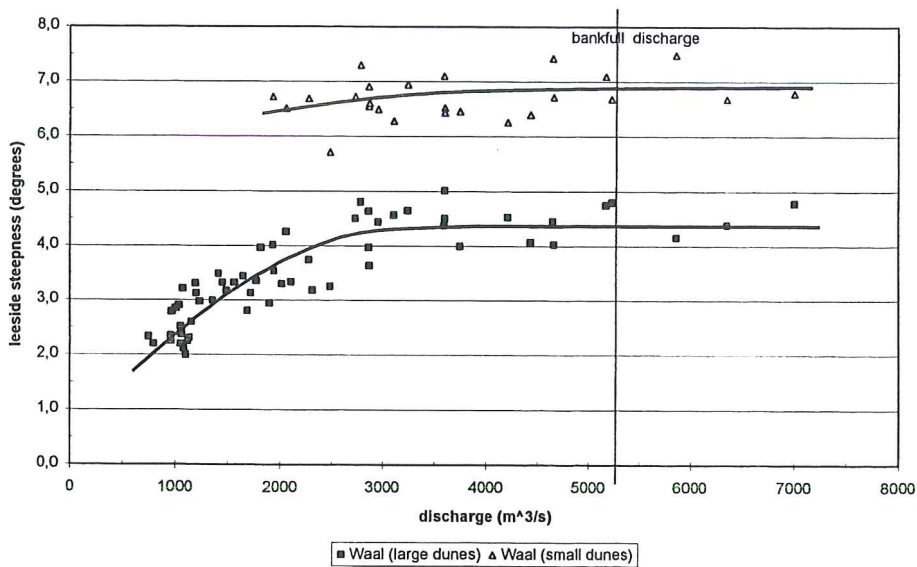
Tijdens de stijgende afvoer rapporteerde Wilbers (1997) een kleine toename van de duinlengte, duinhoogte en de steilheid van beide duinsoorten. Toen de afvoer weer begon af te nemen bleef de duinlengte van beide duinsoorten nog steeds toenemen. De duinhoogte en de steilheid namen voor beide weer af. De veranderingen in de duinhoogte en de helling van de loef- en lijzijde ijlen ongeveer 2 dagen na. Dit was moeilijk te zien omdat de veranderingen klein waren, zeker als ze vergeleken werden met de variaties rond de gemiddelden.



A



B



C

Figuur 14

Relaties tussen de duinkarakteristieken en de afvoer in de Waal. De kromme lijnen geven getekende regressies door de datapunten.

Relations between dune characteristics and discharge in the Waal. The curves are drawn regressions of the datapoints.

4.2.1.5 Conclusie

Al deze observaties over het duingedrag in de Waal geven samen een compleet beeld. Tijdens alle metingen waren er twee soorten duinen aanwezig. Kleine duinen vooral in het diepe zuidelijke deel en de grote duinen in het ondiepe noordelijke deel (Figuur 13).

In Figuur 14 worden de berekende karakteristieken uitgezet tegen de verschillende afvoeren. Als de afvoer in de Waal toeneemt tot ongeveer 3000 m³/s dan neemt de duinlengte van de grote duinen af maar hun hoogte en steilheid neemt toe. Voor de kleine duinen zijn er geen gegevens beschikbaar bij lage afvoeren. Bij afvoeren groter dan 3000 m³/s treden er geen veranderingen meer op in de duinlengte, hoogte en steilheid van zowel de kleine als grote duinen. De grote duinen stabiliseren op een duinlengte van ongeveer 55 m, een hoogte van 1,2 m en een lijzijde helling van 4,5°. De kleine duinen hebben dan een lengte van gemiddeld 15 m, een hoogte van 0,5 m en een steilheid van 7°.

4.2.2 Bodemtransport

Omdat beide duinsoorten in de Waal actief zijn is het minder ernstig dat de migratiesnelheid van de kleine duinen niet bepaald kan worden. Het bodemtransport van de kleine duinen is namelijk even groot als dat van de grote duinen. De kleine duinen migreren doordat er materiaal wordt opgenomen op de loefzijde en weer wordt afgezet op de lijzijde. De grote duinen bewegen doordat er op de loefzijde kleine duinen ontstaan die het loefzijde materiaal verplaatsen naar de lijzijde van de grote duinen waar de kleine duinen weer verdwijnen.

Tabel 2

De migratiesnelheid en bodemtransport tijdens de hoogwaters van 1993 en 1995.

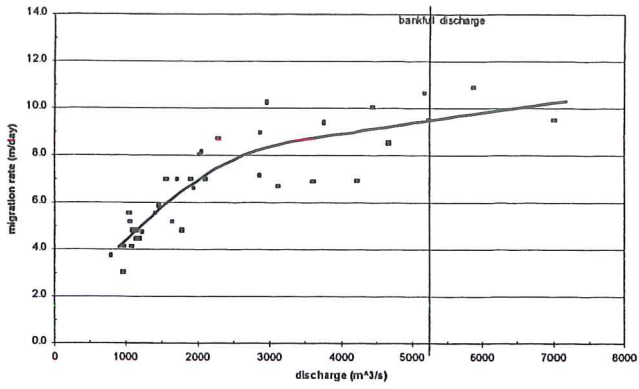
The migration rate and bedload transport during the floods of 1993 and 1995.

Hoogwater	Gemiddelde migratiesnelheid (m/dag)	Bereik migratiesnelheid (m/dag)	Gemiddelde bodemtransport (m ³ /dag)	Bereik bodemtransport (m ³ /dag)
1993	8,7	7,1 – 10,3	870	750 – 1000
1995	10,1	9,5 – 10,9	1300	1150 – 1440

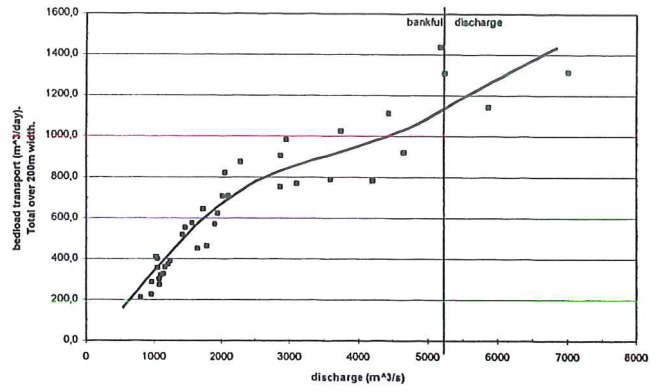
De migratiesnelheid van de grote duinen is berekend door DT2D. Dit kon worden gedaan voor alle meetcampagnes maar niet tussen alle metingen omdat de tijd tussen twee metingen vaak te groot was of omdat de metingen niet op dezelfde manier waren uitgevoerd.

De migratie snelheden en bodemtransporten voor de metingen bij lage afvoeren worden getoond in bijlage 3.4 en 3.5. De gemiddelde waarden voor de hoogwaters van 1993 en 1995 worden getoond in Tabel 2. Tijdens het hoogwater van 1997 heeft Wilbers (1997) gevonden dat de migratiesnelheid van de grote duinen toenam van 8,5 tot 10 m/dag tijdens de toename van de afvoer. Tijdens de dalende fase nam de migratiesnelheid weer af tot 6,5 m/dag. Hetzelfde trad op bij het bodemtransport. Beide veranderingen worden getoond in bijlage 2.2.

Net als is gedaan met de duin karakteristieken zijn ook de migratiesnelheid en het bodemtransport uitgezet tegen de afvoer. Uit Figuur 15a en b blijkt dat zowel de migratiesnelheid als het bodemtransport (uitgezet in een zogenaamd Q-S diagram) blijven toenemen bij een toename van de afvoer maar dat deze toename bij afvoeren groter dan 3000 m³/s minder snel verloopt.



A



B

Figuur 15

Relaties tussen de duinmigratiesnelheid (A) en bodemtransport (B) en de afvoer in de Waal. De kromme lijnen geven getekende regressies door de datapunten.

Relations between dune migration rate (A) and bedload transport (B) and discharge in the Waal. The curves are drawn regressions of the datapoints.

5 Discussie

De manier waarop de duinen in de Waal zich ontwikkelen is zeer verschillend van de ontwikkeling in de Bovenrijn, zoals is aangetoond in hoofdstuk 4. In de volgende paragraaf worden deze twee manieren van duinontwikkeling vergeleken met de duinontwikkeling in andere rivieren. In paragraaf 5.2 wordt het superpositie model van Allen en Collinson (1974) vergeleken met de superpositie van duinen in de Waal en de Bovenrijn. In de laatste paragraaf wordt daarna ingegaan op de mogelijke oorzaken van de verschillen tussen de Waal en de Bovenrijn.

5.1 Duinontwikkeling in andere rivieren

Om het gedrag van de duinen in de Waal en Bovenrijn te vergelijken met andere rivieren worden een aantal voorbeelden van duinontwikkeling in andere rivieren gepresenteerd. In Tabel 3 worden enkele basisgegevens van de rivieren en de duinen die er in voorkomen beschreven.

Tabel 3

Informatie over andere rivieren en de duinen die daar zijn gevonden. Gemiddelde waarden zijn gegeven als een enkel getal, anders is het bereik van waarden gegeven.

Information about other rivers and the dunes that were found there. Averages are given as a single value, otherwise a range of values are given.

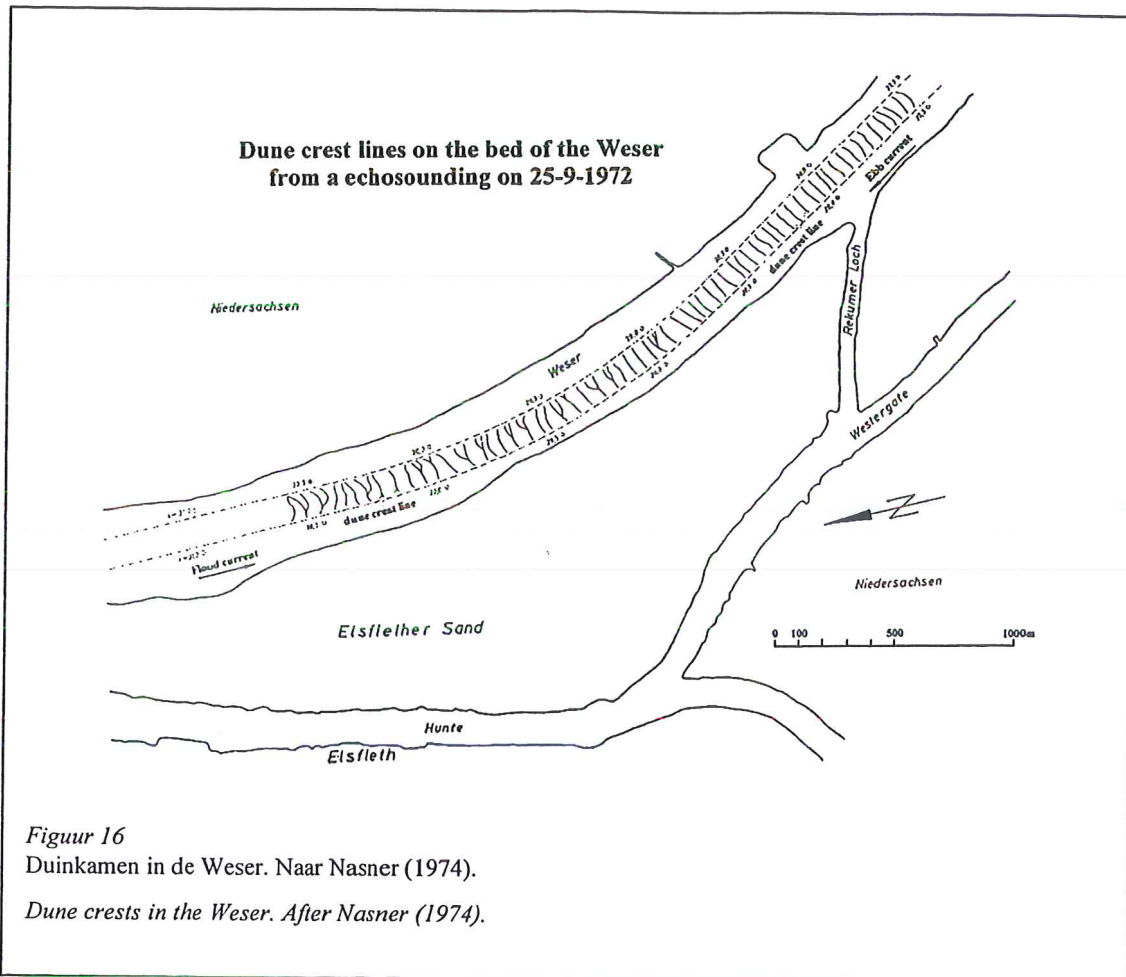
Rivier	Korrel grootte (D ₅₀ in mm)	Afvoer (m ³ /s)	Waterdiepte (m)	Bedding vorm	Duinlengte (m)	Duinhoogte (m)	Migratiesnelheid (m/dag)
North Fork Toutle, USA (Dinehart, 1989)	5 – 10	25 – 310	0.8 – 2.2	Duinen	6 – 7	0.1 – 0.2	~3 cm/s
Rio Paraná, Argentinië (Stückrath, 1969)	0.38	5000 – 35000	11 – 14	Duinen	95 (40 – 200)	2.2	0.2 – 2.6
Brahmaputra, Bangladesh (Coleman, 1969)	Fijn zand	-	3 – 30	Mega ribbels	3 – 150	0.3 – 1.5	24 – 225
				Duinen	42 – 480	1.5 – 7.5	30 – 110
Weser, Duitsland (Nasner, 1974)	0.35 – 0.5	200 – 800	11 – 12	Duinen	44 – 61	1.0 – 2.6	0.1 – 1.5
Fraser, Canada (Pretious and Blench, 1951)	0.25 – 0.32	3400 (hoogwater > 11000)	-	Duinen	4 – 100	0.3 – 4.0	-

De meeste rivieren in deze vergelijking hebben vooral grote duinen. De Rio Paraná, de Weser en de Fraser hebben allemaal duinen van dezelfde grootte als de grote duinen in de Bovenrijn en de Waal. In de Brahmaputra beschreef Coleman (1969) vier verschillende soorten bedding vormen (van ribbels tot zandgolven). De categorie megaribbels (zoals Coleman ze noemde) had dezelfde grootte als de duinen in de Bovenrijn en Waal. De Toutle is een klein riviertje waarin Dinehart (1989) kleine actieve duinen aantrof.

In zowel de Toutle, de Rio Paraná, de Brahmaputra als in de Weser vonden de verschillende onderzoekers geen relaties tussen de veranderingen in stromingscondities en de duin lengte en hoogte. Er was echter wel een duidelijke relatie tussen de afvoer en de duinmigratiesnelheid. Als de afvoer toenam dan gingen de duinen sneller bewegen. Dit is hetzelfde als in de Waal waar de duinkarakteristieken niet veranderen als de afvoer groter wordt dan 3000 m³/s.

In de Fraser werd door Pretious en Blench (1951) gevonden dat de duinen hun dimensies systematisch aanpassen aan de veranderingen in de afvoer, maar wel met een duidelijke naijling (Allen en Collinson, 1974). Dit geldt ook voor de duinen in de Bovenrijn.

Zowel in de Weser (Figuur 16) als in de Fraser hebben de grote duinen rechte kammen loodrecht op de stroomrichting (Nasner, 1974; Kostaschuk en Villard, 1996). Ook dit is gelijk aan de situatie die zich tijdens een hoogwater in de Bovenrijn voordoet (Figuur 9).

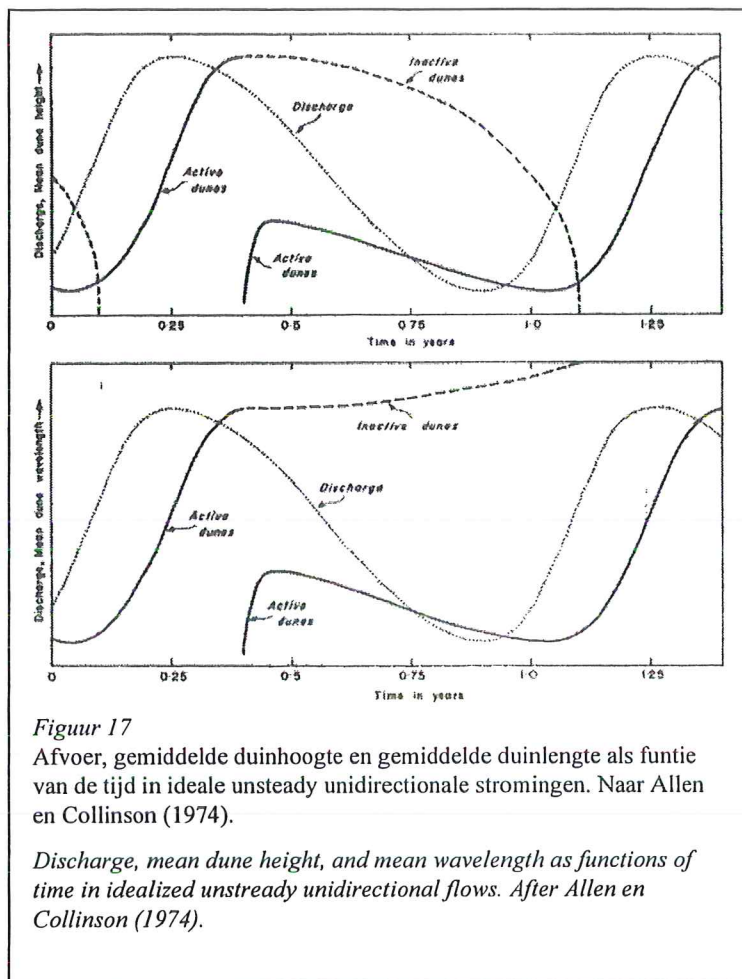


Figuur 16
Duinkamen in de Weser. Naar Nasner (1974).
Dune crests in the Weser. After Nasner (1974).

5.2 Superpositie modellen

In het superpositie model van Allen en Collinson (1974) groeien kleine duinen geleidelijk uit tot grote duinen tijdens de stijgende afvoer fase van een hoogwater. De grootste duinen zijn enige tijd na de piek afvoer aanwezig. Als de afvoer blijft afnemen dan verschijnen er plotseling kleine duinen op de grote duinen. Deze kleine duinen worden groter over een initiële periode, terwijl de afvoer blijft afnemen. Later nemen ze weer af in grootte als de laagwater condities worden bereikt. Tegelijkertijd verandert er maar weinig aan de duinlengte van de grote duinen terwijl de hoogte afneemt en het dwarsprofiel wordt afgerond. Restanten van deze grote duinen kunnen lokaal lange tijd na een hoogwater nog worden teruggevonden (Allen en Collinson, 1974). Allen en Collinson (1974) ontwikkelde dit superpositie model op grond van waarnemingen door Pretious en Blench (1951) in de Fraser. In Figuur 17 is de duinontwikkeling te zien die samengaat met dit superpositie model.

Uit dit model concludeerden Allen en Collinson (1974) dat als er in een rivier gesuperponeerde duinen voorkomen dan zijn alleen de kleinste duinen actief. Dit komt voor in de Fraser en in de Bovenrijn maar in de Waal zijn beide duinsoorten samen actief. De grote duinen vooral in de ondiepe delen en de kleine duinen vooral in de diepe delen van de rivier, maar altijd zijn er kleine duinen gesuperponeerd op de grote duinen. Dit soort van superpositie werd ook gevonden in de Toutle (door Dinehart, 1989) en in de Wabash (door Jackson, 1975) en wordt ook wel evenwicht superpositie genoemd.



Figuur 17

Afvoer, gemiddelde duinhoogte en gemiddelde duinlengte als functie van de tijd in ideale unsteady unidirectionale stromingen. Naar Allen en Collinson (1974).

Discharge, mean dune height, and mean wavelength as functions of time in idealized unsteady unidirectional flows. After Allen en Collinson (1974).

5.3 Oorzaken van verschil in duinontwikkeling

Met behulp van de huidige beschikbare gegevens is het niet mogelijk om een oorzaak te vinden voor het verschil in duinontwikkeling tussen de Waal en de Bovenrijn. Beide manieren van duinontwikkeling en superpositie komen ook voor in andere rivieren. De Bovenrijn en de Waal hebben beide vrijwel hetzelfde verhang, rivier breedte en afvoer regime. In de Waal is de afvoer wel kleiner dan in de Bovenrijn. Waarschijnlijk het korrelgrootte verschil tussen de Bovenrijn en de Waal een belangrijke rol. In de Bovenrijn is de bedding opgebouwd uit grof zand en fijn grind. In de Waal bestaat de bedding alleen maar uit zand. Dit heeft invloed op het sedimenttransport, wat op zijn beurt invloed heeft op de snelheid waarmee duinen kunnen groeien of verdwijnen.

Een andere oorzaak voor het verschil in duinontwikkeling kan betrekking hebben op lokale effecten: de positie en grootte van kribben, zomerdijken, winterdijken, beschermde oevers en plassen kunnen van invloed zijn op de lokale stromingspatronen en omstandigheden. Het is met andere woorden niet duidelijk in hoeverre de resultaten in de bemeten riviertrajecten representatief zijn voor een groter deel van de rivier.

6 Aanvullende handelingen

6.1 Hydraulische ruwheid van beddingvormen

Gebruik makend van proeven met vaste houten duinen en bewegende duinen van fijn zand hebben Van den Berg et al (in druk) een ruwheidsvoorspeller voor bodemvormen gemaakt en gevalideerd (Vergelijking 5), waarin de duinvorm meer aandacht krijgt dan in de tot nu toe gepubliceerde voorspellers. Daarbij stellen zij dat de ruwheid van een duin voor een belangrijk deel wordt bepaald door de positie van het brinkpoint van een duin. Het brinkpoint is het punt waar de stroming loslaat van de duinoppervlak en een neer ontstaat. De parameters van het

$$\frac{k''}{H_b \tan(45^\circ - \alpha)} = \xi \left(1 - e^{0.707\eta H_b / \lambda}\right)$$

$$\xi = 1 + 141 * 10^{-6} \Phi^{-2.08} \quad \Phi = \frac{R_b}{[1 - (\Delta - H_b)]\lambda / H_b}$$

$$\eta = 1 - e^{58H_b / \lambda}$$

Vergelijking 5

Ruwheidsvoorspeller voor bodemvormen (van den Berg et al, in druk). k'' = ruwheidslengte met betrekking op de beddingvormen (m); H_b = brinkpoint hoogte (m); α = hoek tussen top en brinkpoint; ξ = de ondiep water correctie; η = effect van lange en lage duinen; λ = duinlengte (m); ϕ = dimensieloze relatieve waterdiepte (-); R_b = hydraulische straal gecorrigeerd voor wand invloeden met behulp van de Vanoni & Brooks (1957) methode; Δ = duinhoogte (m).

Bedform roughness predictor (van den Berg et al, in preparation). k'' = bedform roughness (m); H_b = brinkpoint height (m); α = angle between crest and brinkpoint; ξ = the shallow water correction; η = effects of long and low dunes; λ = wavelength (m); ϕ = dimensionless relative waterdepth (-); R_b = hydraulic radius corrected for side wall roughness by the Vanoni & Brooks (1957) method; Δ = duneheight (m)

brinkpoint, zoals die door DT2D worden bepaald, worden gedefinieerd in Figuur 4. Vergelijking 5 kan niet worden toegepast op gegevens van de Bovenrijn of Waal, omdat de resolutie van de uitgevoerde peilingen onvoldoende is om met voldoende nauwkeurigheid de parameters H_b en α te bepalen. Alleen van de grote duinen konden in een aantal gevallen trendmatige veranderingen worden vastgesteld in de waarde van deze en de andere voor de hydraulische ruwheid belangrijke parameters. Hoewel de nauwkeurigheid van de bepaling van deze parameters te wensen overlaat, kan met de resultaten toch een indicatie worden gegeven voor het verloop van de hydraulische ruwheid die verbonden is aan de grotere duinen.

Omdat de invloed van de relatieve waterdiepte parameter alleen van belang is onder omstandigheden dat de waterdiepte dezelfde orde grootte heeft als de duinhoogte is deze parameter hier niet van belang. De parameters waarin het brinkpoint een rol speelt kunnen alleen berekend worden als een duin een brinkpoint heeft en als DT2D dit brinkpoint kan vinden. Om een brinkpoint te vinden moet de resolutie van de meting hoog genoeg zijn om het steilste stukje van de lijzijde te vinden. Dit stukje zit net beneden het brinkpoint. Volgens de literatuur moet dit stukje een helling hebben van 30° of meer. Vanwege de lage resoluties van de metingen in de natuur is in dit onderzoek deze definitiehelling verlaagd naar 25° . Maar ondanks deze verlaging hadden alleen de metingen tijdens het hoogwater van 1995 in de Bovenrijn een resolutie die hoog genoeg was om de parameter waarden van de grote duinen te bepalen. Slecht gemeten kleine duinen of ribbels op de lijzijde van een duin kunnen er echter voor zorgen dat het brinkpoint te laag of te hoog worden gevonden.

In bijlage 1.6 worden de ruwheids parameters uit de Bovenrijn getoond zoals die voorkwamen tussen 24 januari en 10 februari 1995. In deze grafieken worden de kleine duinen buiten

beschouwing gelaten vanwege de resolutie problemen. De vier grafieken tonen achtereenvolgens; het percentage duinen dat, ten opzichte van alle (grote) duinen, een brinkpoint bevatte, de gemiddelde brinkpoint hoogte, de gemiddelde tangens van de hoek tussen top en brinkpoint en als laatste de verhouding tussen de brinkpoint hoogte en de duinlengte. Van den Berg et al (in druk) stelt dat een duin zonder brinkpoint geen extra ruwheid toevoegt aan de korrelruwheid. De totale hydraulische ruwheid wordt wel uitgedrukt als de equivalente ruwheidshoogte (k_s) die is opgebouwd uit de korrelruwheid (k') en de vormruwheid (k''), zoals wordt getoond in Vergelijking 6.

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

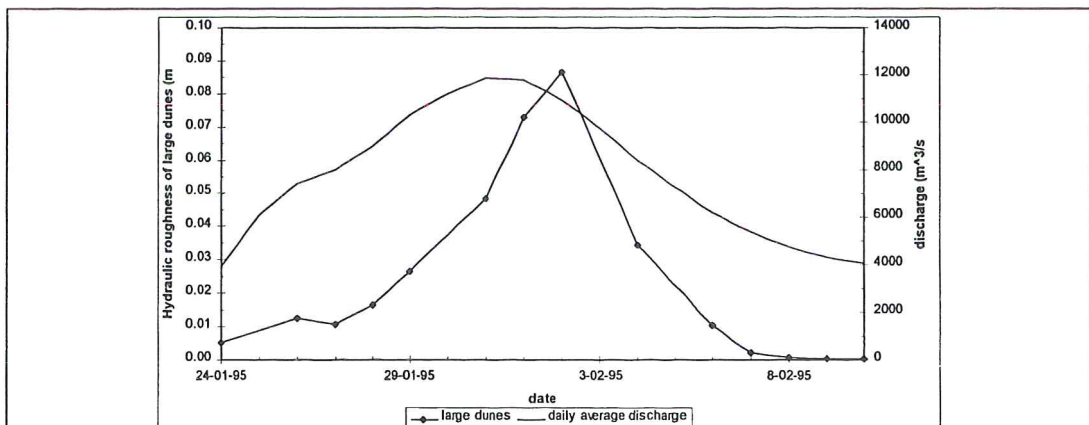
Vergelijking 6

Totale equivalente ruwheidshoogte. k_s = totale ruwheidshoogte (m); k' = ruwheidshoogte met betrekking op de korrels (m); k'' = ruwheidshoogte met betrekking op de beddingvormen (m).

Total equivalent roughness height. k_s = total roughness length (m); k' = roughness length of the grains (m); k'' = roughness length of the bedforms (m)

Als Vergelijking 5 wordt gebruikt als leidraad dan wordt duidelijk dat de ruwheid van een duin (met een brinkpoint) toeneemt als de brinkpoint hoogte toeneemt en als de verhouding tussen brinkpoint hoogte en duinlengte toeneemt. Als de helling tussen top en brinkpoint toeneemt dan neemt de ruwheid af. De ruwheid neemt echter het sterkst toe als er meer duinen met een brinkpoint voorkomen.

Deze richtlijnen kunnen worden gebruikt om iets te zeggen over de veranderingen van de ruwheid in de Bovenrijn. Uit de grafiek in Figuur 18 blijkt dat de ruwheid die wordt veroorzaakt door de grote duinen toenam tijdens de toename van de afvoer. Deze grafiek is gemaakt met behulp van de gegevens van de grafieken van bijlage 1.6 en Vergelijking 5.



Figuur 18

Hydraulische ruwheid van de grote duinen in de Bovenrijn tijdens het hoogwater in 1995, berekend volgens de voorspeller van Van den Berg et al (in druk).

Hydraulic roughness of the large dunes in the Rhine during the flood of 1995, calculated according to the predictor of Van den Berg et al (in prep.).

Toen na de piek van het hoogwater de afvoer weer afnam, namen ook het percentage duinen met brinkpoint, de gemiddelde brinkpoint hoogte en de verhouding van de brinkpoint hoogte en de duinlengte sterk af. Ondanks een kleine toename in de tangens van de helling tussen top en brinkpoint nam de ruwheid van deze grote duinen dus ook snel af. De najling van de vier ruwheidsparameters die hier gebruikt zijn was ongeveer 1 dag. Waarschijnlijk betekent dit dat de najling van de ruwheid in de Bovenrijn ook ongeveer 1 dag is.

6.2 Erosie - aanzanding van de rivierbodem

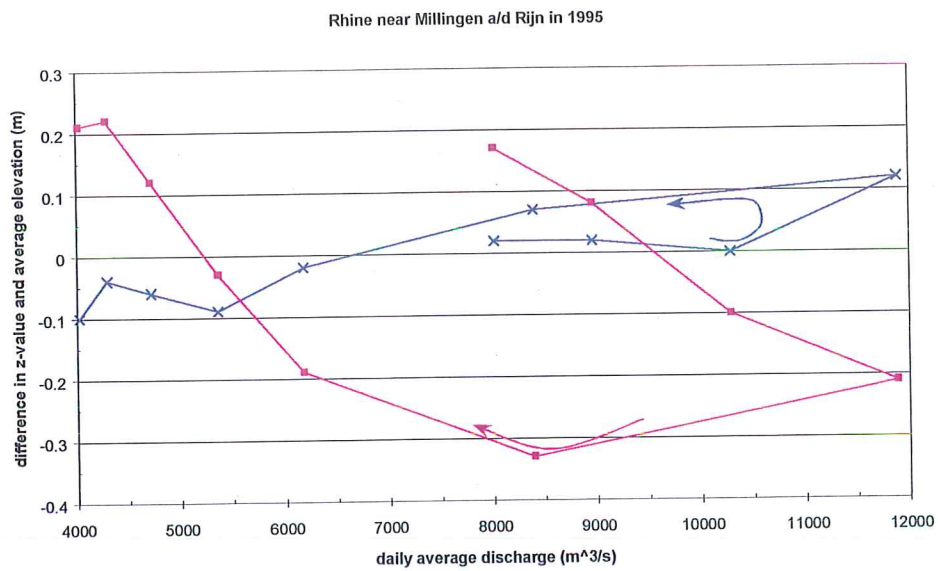
Bij het vergelijken van de duinontwikkeling in de Bovenrijn en de Waal met andere rivieren kwam een relatie met de afvoer naar voren die nog niet in de Bovenrijn of de Waal was getest.

In de doelstelling van dit onderzoek was dit aspect ook niet expliciet opgenomen. Het gaat hierbij om het feit dat, onder andere in de Rio Paraná en in de Brahmaputra, er een duidelijke relatie was tussen de afvoer en de erosie of aanzanding van de rivierbodembodem. Als de afvoer toenam dan daalde de gemiddelde bodemligging van de rivier. Zonder dat de duinen van vorm veranderden kwamen ze lager te liggen ten opzichte van een relatief nulpunt. Als de afvoer dan weer afnam dan herstelde de oorspronkelijke bodemligging zich weer.

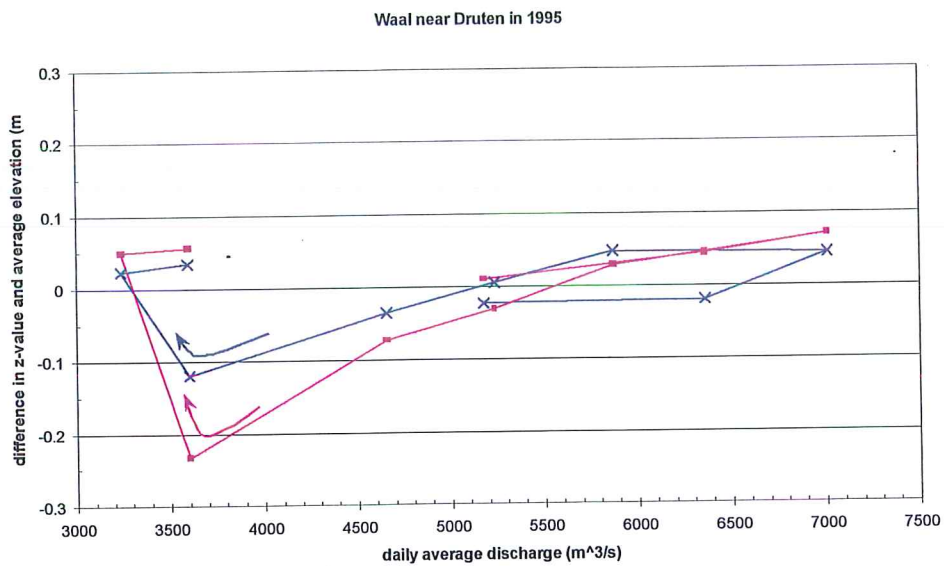
Om te zien of dit ook in de Waal en de Bovenrijn optreedt zijn de meest geschikte gegevens gebruikt. In de Bovenrijn was dit de dataset van het hoogwater uit 1995. In de Waal waren dat de gegevens van de hoogwaters uit 1995 en 1997. Daarbij is de gemiddelde hoogteligging ten opzichte van NAP van alle toppen en troggen per meting bepaald. Deze hoogteligging is in Figuur 19 uitgezet als afwijking ten opzichte van de gemiddelde hoogteligging over alle metingen. Uit Figuur 19a blijkt dat er in de Bovenrijn geen sprake was van erosie van de bodem tijdens het stijgen van de afvoer. De duinentoppen kwamen omhoog en de troggen gingen omlaag, samen betekent dat de duinen hoger werden.

Tijdens het hoogwater van 1995 in de Waal waren er wel veranderingen in de gemiddelde hoogteligging van de toppen en troggen van de duinen, maar er was geen duidelijke relatie met de veranderingen in de afvoer. Dit is te zien in Figuur 19b. Dezelfde relatie als werd gevonden in de Rio Paraná en de Brahmaputra was wel aanwezig tussen de gemiddelde bodemligging en de afvoer van het hoogwater uit 1997 in de Waal. Uit Figuur 19c blijkt dat zowel de duintoppen als de duintroggen lager kwamen te liggen toen de afvoer toenam. Bij piek afvoer bedroeg de gemiddelde erosie van de bodem 0.1 m. Tijdens de stijgende afvoer zande ook de bodem weer aan.

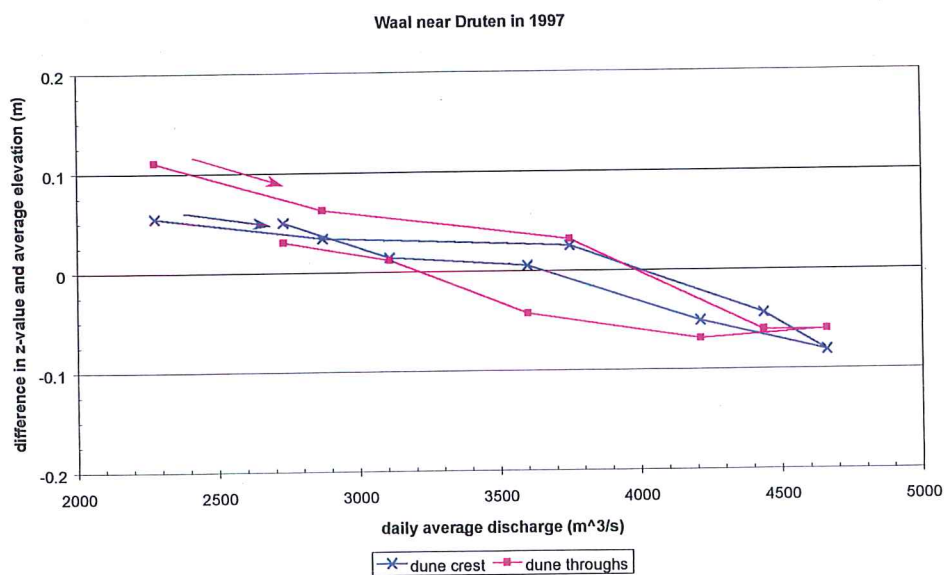
Deze erosie – aanzanding van de rivierbodembodem wordt waarschijnlijk vooral veroorzaakt door lokale omstandigheden. Daarom kon de relatie in de Waal wel worden waargenomen in het hoogwater van 1997 en niet tijdens die van 1995, ondanks dat beide metingen maar enkele kilometers uit elkaar lagen. De lokale geometrie van de rivier is in beide gebieden duidelijk verschillend, zie ook Figuur 1. Een gedetailleerder onderzoek naar dit fenomeen in de Waal zal worden onderzocht met behulp van de metingen over 10 km in de Waal tijdens het hoogwater van 1997. Het RIZA heeft hiervoor intussen een vervolgoopdracht uitgegeven.



A



B



C

Figuur 19
 Veranderingen in hoogteligging van duin toppen en troggen ten opzichte van de gemiddelde ligging.
 Changes in elevation of dune crests and troughs against the average elevation.

7 Conclusies en aanbevelingen

De duinontwikkeling in de Bovenrijn is totaal verschillend van die in de Waal. In de Bovenrijn zijn bij lage afvoeren alleen kleine duinen aanwezig. Bij afvoeren kleiner dan 7000 m³/s zijn er alleen kleine veranderingen in de hoogte en de steilheid van de duinen. Bij afvoeren groter dan 7000 m³/s nemen de duinlengte, hoogte en steilheid zeer snel toe. Als het hoogwater weer afneemt blijft de duinlengte toenemen, de hoogte en steilheid nemen wel sterk af. De grote duinen verdwijnen langzaam en worden inactief. Tijdens het dalen van de afvoer verschijnen er plotseling nieuwe kleine duinen gesuperponeerd op de grote duinen. Deze kleine duinen nemen de bodemtransport activiteit over. Dit werkt dus gelijk aan het superpositie model van Allen en Collinson (1974).

In de Waal zijn altijd twee soorten duinen aanwezig in evenwicht superpositie. De kleine duinen zijn gesuperponeerd op de grote duinen maar komen vooral voor in het diepe deel van de rivier. De grote duinen komen het meeste voor in het ondiepe deel. Bij afvoeren lager dan 3000 m³/s neemt de duinlengte af en de hoogte en steilheid toe als de afvoer toeneemt. Bij de kleine duinen is het niet duidelijk wat er gebeurt omdat er te weinig informatie is. Bij afvoeren boven 3000 m³/s zijn de dimensies van beide duinsoorten stabiel. De grote duinen hebben dan een lengte van 55m, een hoogte 1,2m en een lijzijde helling van 4,5°. De kleine duinen hebben een lengte van 15m, een hoogte van 0,5m en een lijzijde helling van 7°. Als de afvoer toeneemt dan neemt ook de migratiesnelheid en het bodemtransport toe, maar bij afvoeren groter dan 3000 m³/s verloopt deze toename minder snel. Er is ook een indicatie dat de bedding erodeert tijdens de stijgende afvoer en aanzandt tijdens dalende afvoer.

Om het beeld van de duinontwikkeling in de Bovenrijn en in de Waal te complementeren wordt aanbevolen om ook tijdens lage afvoeren metingen uit te voeren. Daarbij moet de resolutie wel drastisch omhoog omdat in de Bovenrijn bij lage afvoeren waarschijnlijk alleen kleine duinen voorkomen. Ook in de Waal zijn er bij lage afvoeren kleine duinen aanwezig.

Eveneens is het verhogen van de resolutie van de metingen aan te raden. Om het bodemtransport in de Bovenrijn goed te kunnen bepalen moet er vaker dan 1 maal per dag worden gemeten bij een hoogwater. Ook moet de ruimtelijke resolutie omhoog om ook de kleine duinen te kunnen volgen. Met behulp van een multibeam echoloder kan de totale rivierbodem in 5 of 6 maal varen worden bemeaten met de hoogst mogelijke resolutie (ongeveer 7 punten per meter). Één meting is op deze manier binnen enkele uren uit te voeren, waardoor dezelfde meting 2 of misschien zelfs 3 maal herhaald kan worden in 1 dag.

In paragraaf 6.1 is geprobeerd na te gaan hoe de hydraulische ruwheid van beddingvormen in de Bovenrijn tijdens het hoogwater van 1995 zich ontwikkelde. Hierbij bleek dat de ruwheid van de duinen in de Bovenrijn waarschijnlijk toenam tijdens de stijgende afvoer en bij dalende afvoer weer afnam bij een najling van 1 dag. Dit beeld kon niet worden gecontroleerd omdat er geen informatie is over de werkelijk ontwikkeling van de ruwheid in de Bovenrijn tijdens dat hoogwater. Daarom wordt het aanbevolen om een project op te zetten waarbij naast de bodempeilingen ook de ruwheid wordt gemeten (of in ieder geval de parameters die noodzakelijk zijn om de ruwheid te berekenen, zoals het waterverhang en stroomsnelheid). Deze informatie kan daarna gebruikt worden om de beschikbare schatters voor de ruwheid van duinen te controleren of om een nieuwe schatter speciaal voor de Nederlandse rivieren te ontwikkelen.

Literatuur

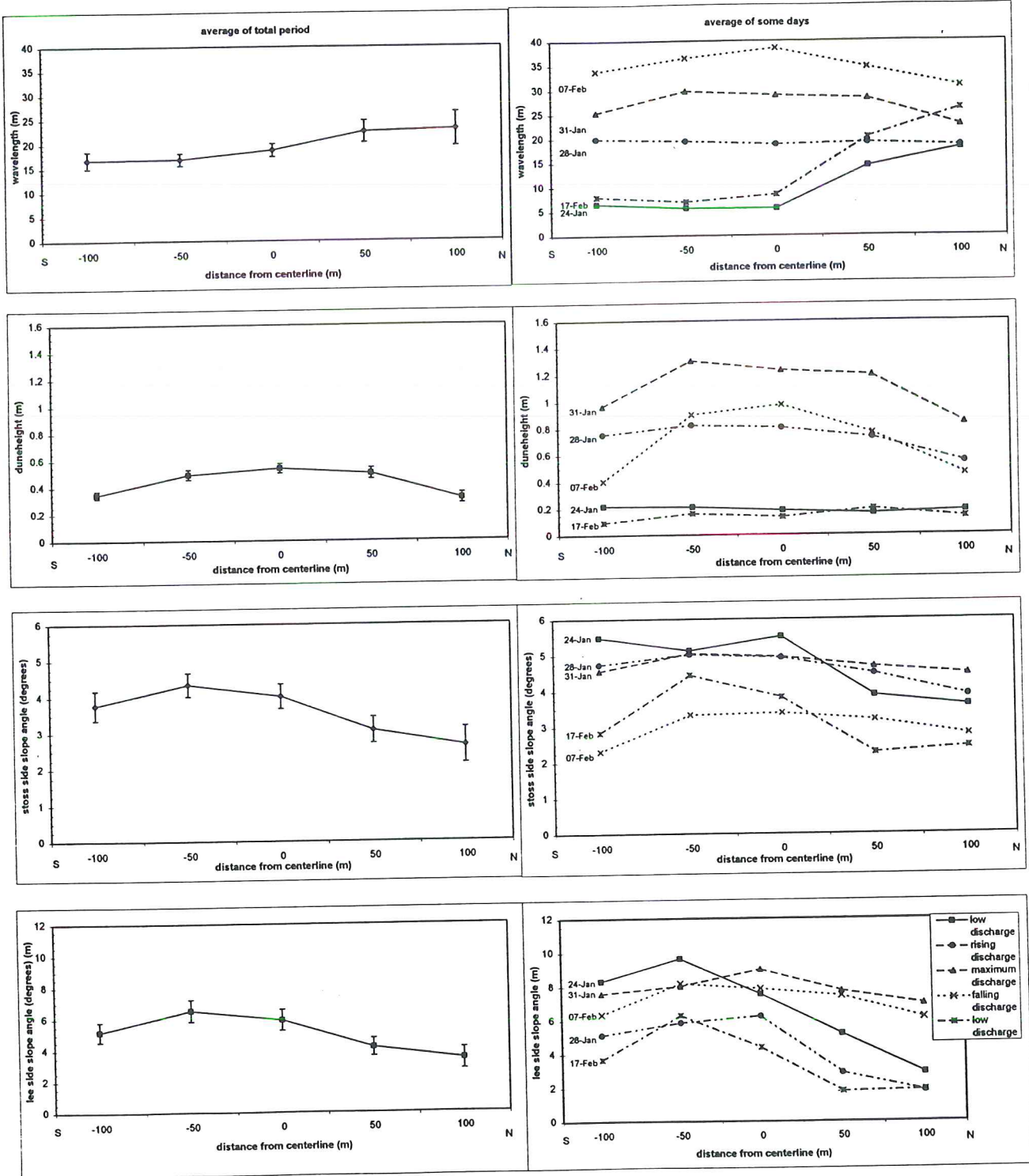
- Allen, J.R.L. en J.D. Collinson; 1974; The superimposition and classification of dunes formed by unidirectional aqueous flows; *Sedimentary Geology*; 12; pp. 169 – 178
- Allen, J.R.L.; 1984; *Sedimentary structures, their character and physical basis.*; *Developments in sedimentology*; 30A; Elsevier; Amsterdam; 593 pp.
- Berg, J.H. van den, A.W.E. Wilbers en A. van Gelder; in druk; Hydraulic roughness of subaqueous sand dunes.
- Boer, A.G. de; 1996; *De bruikbaarheid van de duin voortplantingsmethode*; Stage verslag; Universiteit Utrecht
- Boersma, J.R.; 1967; Remarkeble types of mega cross-stratification in the fluvial sequence of a subrecent distributary of the Rhine. Amerongen. The Netherlands.; *Geologie & Mijnbouw*; pp. 217 – 235
- Bovenrijn, L.C. van; 1984; Sediment transport. Part 3: Bed forms and alluvial roughness.; *Journal of hydraulic engineering*; 110; pp. 1733 – 1754
- Brinke, W.B.M. ten; 1997; *De bodemsamenstelling van de Waal en IJssel in de jaren 1966, 1976, 1984 en 1995*; RIZA rapport 97.009
- Coleman, J.M.; 1969; Brahmaputra river: channel processes and sedimentation; *Sedimentary Geology*; 3; pp. 129 – 239
- Dinehart, R.L.; 1989; Dune migration in a steep, coarse-bedded stream; *Water resources research*; vol. 25; nr. 5; pp. 911 – 923
- Engel, P. en Y.L. Lau; 1980; Computation of bedload using bathymetric data; *Journal of the hydraulics division of the American society of civil engineers*; nr. 106; pp. 369 – 380
- Fioole, A.; 1996a; *Gebruikershandleiding van het ruimtelijk interpolatieprogramma SURFIS (V 1.0)*; Rijkswaterstaat RIZA; werkdocument 96133x
- Fioole, A.; 1996b; *De nauwkeurigheid bij het ruimtelijk interpoleren met SURFIS*; Rijkswaterstaat RIZA; concept nota
- Havinga, H.; 1982; *Bedload determination by dune tracking.*; Technical report; ISO/TC 113/SC 6N 155; Proceedings international standards organization/Technical committee; 113; New Delhi
- Havinga, H.; 1982; *Bedload determination by dune tracking*; nota 82.3; Rijkswaterstaat, dienst binnewateren/RIZA; 15 pp.
- Jackson, R.G.; 1975; Hierarchical attributes and a unifying model of bed forms composed of cohesionless material and produced by shearing flow.; *Geological Society of America Bulletin*; 86; pp. 1523 – 1533
- Julien, P.Y. en G.J. Klaassen; 1995; Sand-dune geometry of large rivers during floods; *Journal of Hydraulic Engineering*; Vol. 121; Nr. 9; pp 657 – 663
- Julien, P.Y.; 1992; *Study of bedform geometry in large rivers*; Report Q1386; Delft hydraulics.
- Kamphuis; 1990; *Sediment transportmetingen Rijntakken*; DBW/RIZA; nota 90.075
- Kostaschuk, R. en P. Villard; 1996; Flow and sediment transport over large subaqueous dunes: Fraser River, Canada.; *Sedimentology*; 43; pp. 849 – 863
- Moll, J.R., T. Schilperoort and A.J. de Leeuw; 1987; Stochastic analysis of bedform dimensions. *Journal of Hydraulic Research* 25; 465-478

- Nasner, H.; 1974; über das verhalten von transportkörpern im tidegebiet; Mitteilungen des Franzius-Instituts für grund- und Wasserbau der Technischen Universität Hannover; heft 40; pp. 1 – 149
- Ogink, H.J.M.; 1988; Hydraulic roughness of single and compound bed forms.; Delft Hydraulics; Report Q786; 80 pp.
- Pretious, E.S. en T. Blench; 1951; Final report on special observations of bed movement in the lower Fraser River at Ladner reach during 1950; Freshet. Natl. Res. Council. Can.; Vancouver; 12 pp.
- Stückrath, T.; 1969; Die bewegung von grossrippeln an der sohle des Rio Parana; Mitteilungen des Franzius-Instituts für grund- und Wasserbau der Technischen Universität Hannover; heft 32; pp. 267 – 293
- Urk, A. van; 1982; Bedforms in relation to hydraulic roughness and unsteady flow in the Rhine branches. (the Netherlands); in: Mechanics of sediment transport; Ed. by B. Mutla Sumer en A. Muller; pp. 151 – 157; Istanbul
- Vanoni, U.A. en N.H. Brooks; 1957; Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams.; Sedimentation Laboratory, California institute of technology; report E-68; ASCE; New York
- Wesseling, C. en A.W.E. Wilbers; 1997; Handleiding DT2D versie 1.0. Software voor dune tracking in twee dimensies.; Universiteit Utrecht; 17 pp.
- Wijbenga, J.H.A.; 1991; Analyse prototype-metingen (niet-) permanente ruwheid. Verslag onderzoek; Delft hydraulics; Q1302
- Wilbers, A.W.E.; 1996; De Grensmaas over de jaren. Een onderzoek naar de morfologische veranderingen in de bedding van de Grensmaas over de periode 1978 tot en met 1995.; Stage verslag; Universiteit Utrecht
- Wilbers, A.W.E.; 1997; Duinkarakteristieken en dune tracking tijdens een hoogwater in de Bovenrijntakken, Verwerking van gegevens bij Druten en de Pannerdensche Kop met DT2D; ICG 97/8; Universiteit Utrecht

Bijlage 1 Duinkarakteristieken en bodemtransport hoogwater 1995 in de Bovenrijn

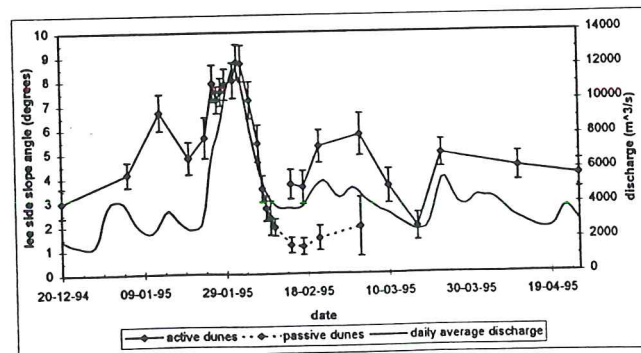
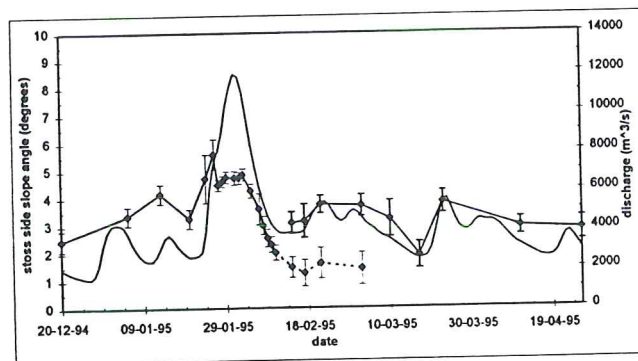
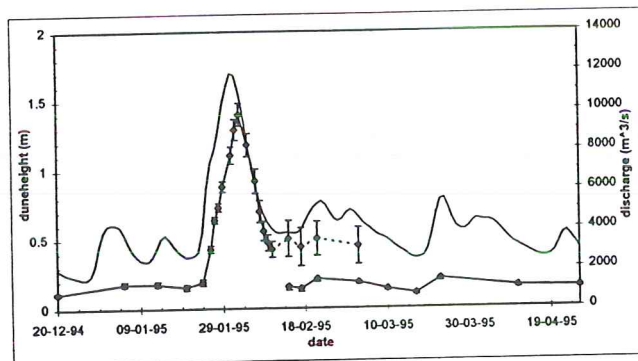
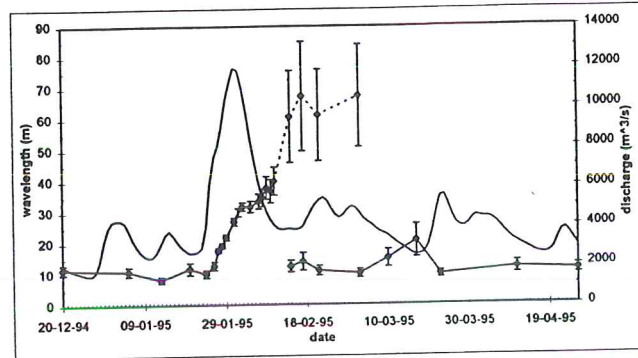
Bijlage 1.1 Veranderingen over de rivierbreedte

Change in dune characteristics over the river width
In the Bovenrijn during the flood of February 1995.



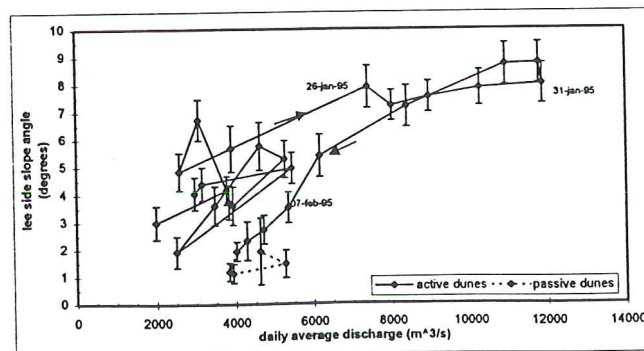
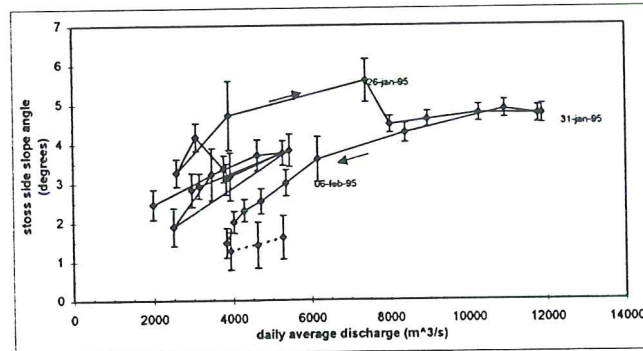
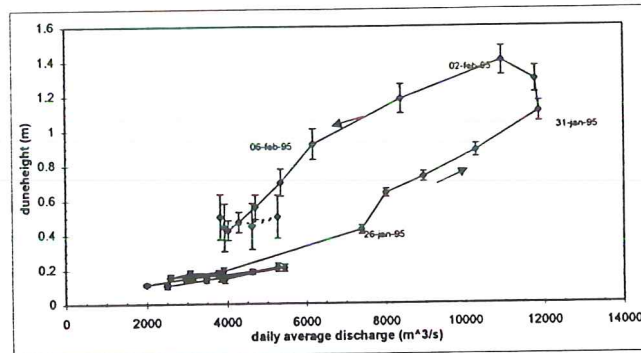
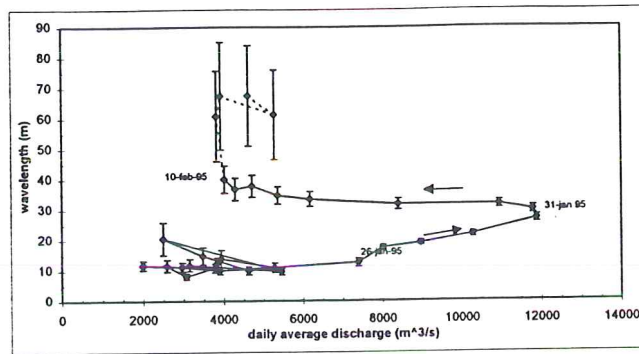
Bijlage 1.2 Veranderingen in de tijd

Change in dune characteristics over time. In the Bovenrijn during the flood of February 1995.



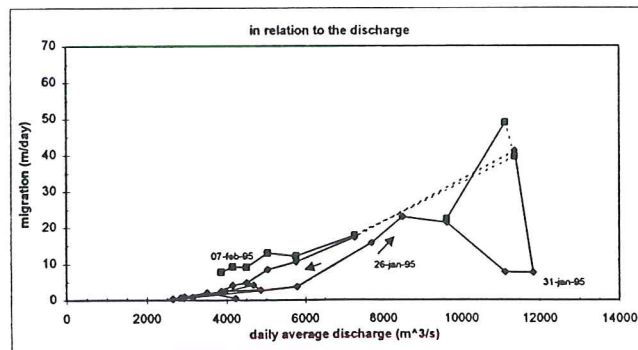
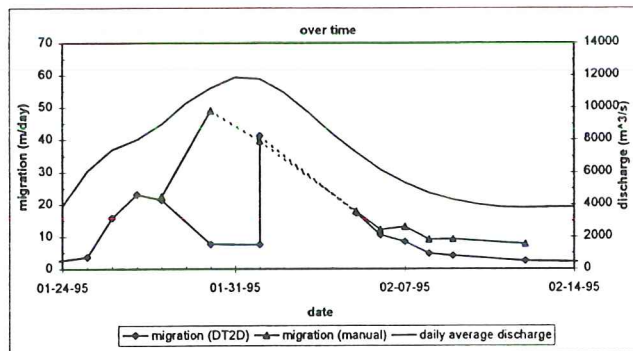
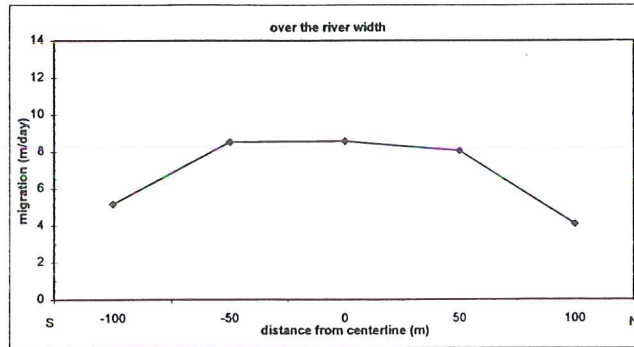
Bijlage 1.3 Veranderingen ten opzichte van de afvoer

Change in dune characteristics in relation to the discharge.
In the Bovenrijn during the flood of February 1995.



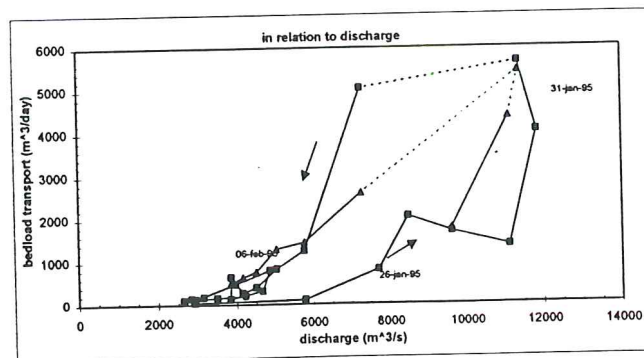
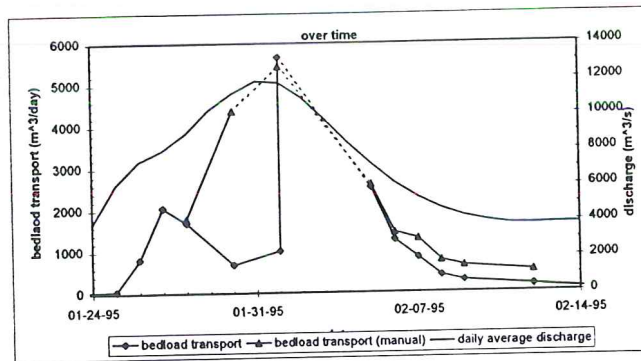
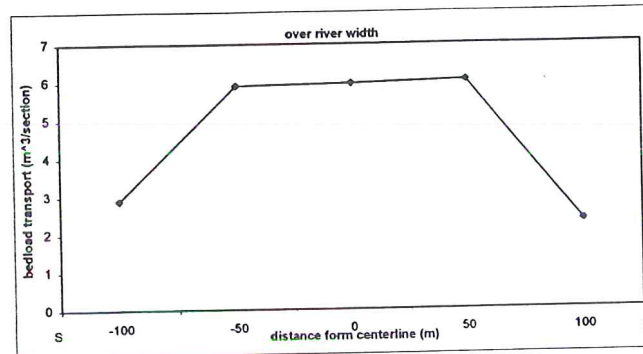
Bijlage 1.4 Veranderingen van de duinmigratiesnelheid

Changes in dune migration In the Bovenrijn during the flood of February 1995.



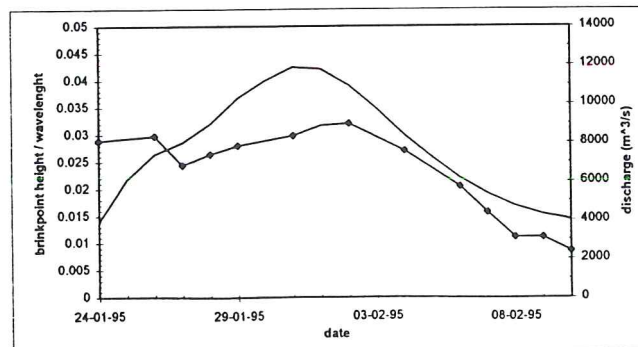
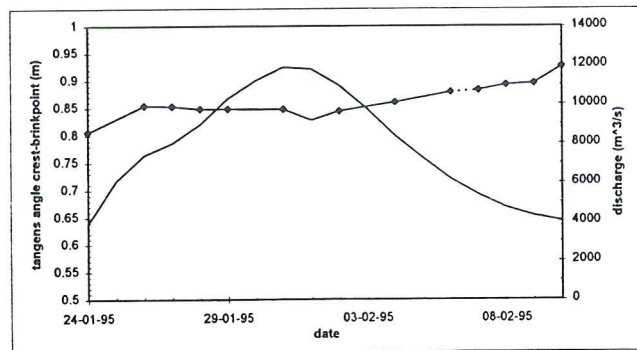
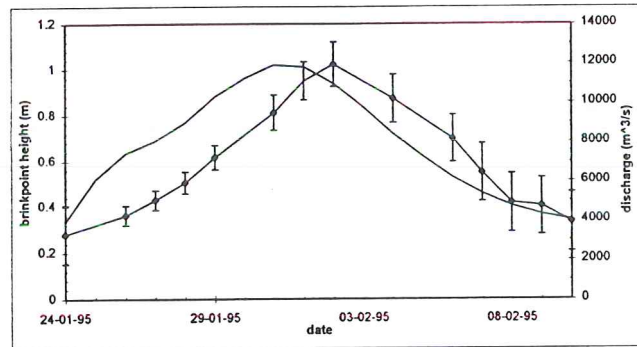
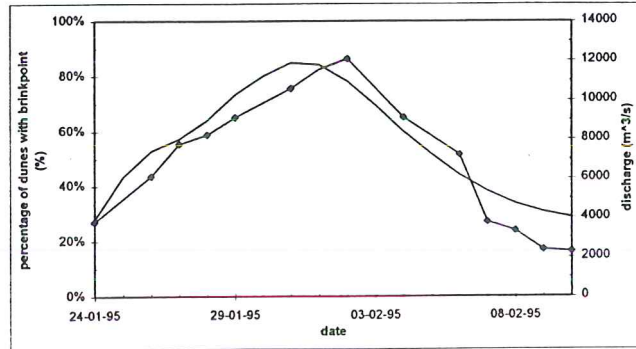
Bijlage 1.5 Veranderingen van het bodemtransport

Changes in bedload transport
In the Bovenrijn during the flood of February 1995.



Bijlage 1.6 Veranderingen van de hydraulische ruwheidsparameters

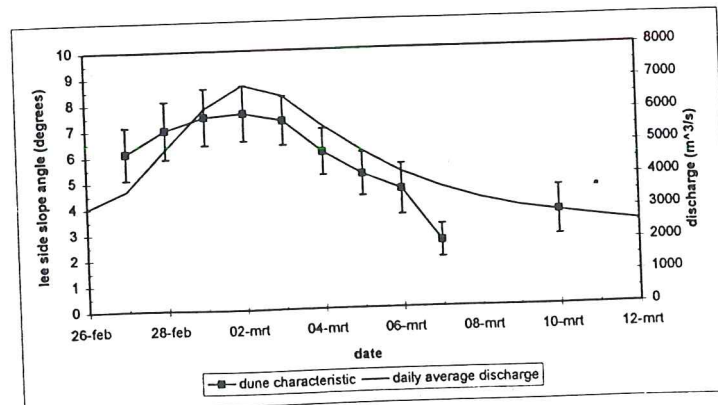
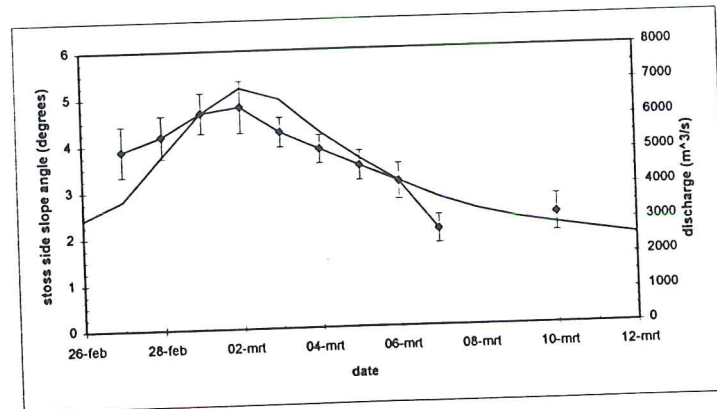
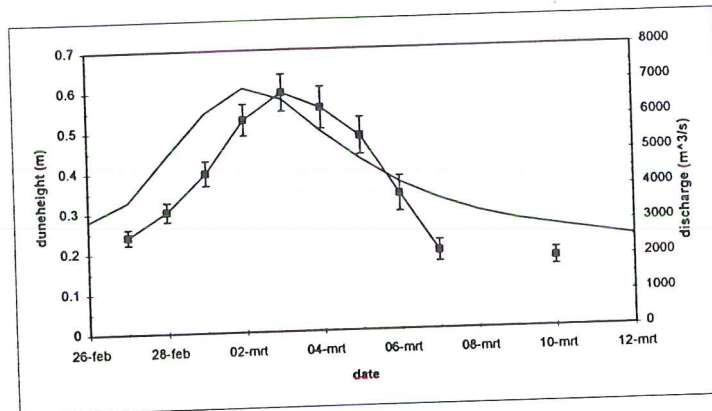
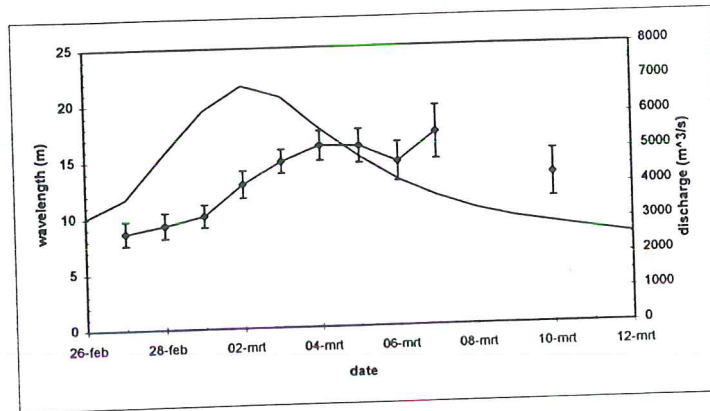
Change in dune roughness characteristics over time.
In the Bovenrijn during the flood of February 1995.



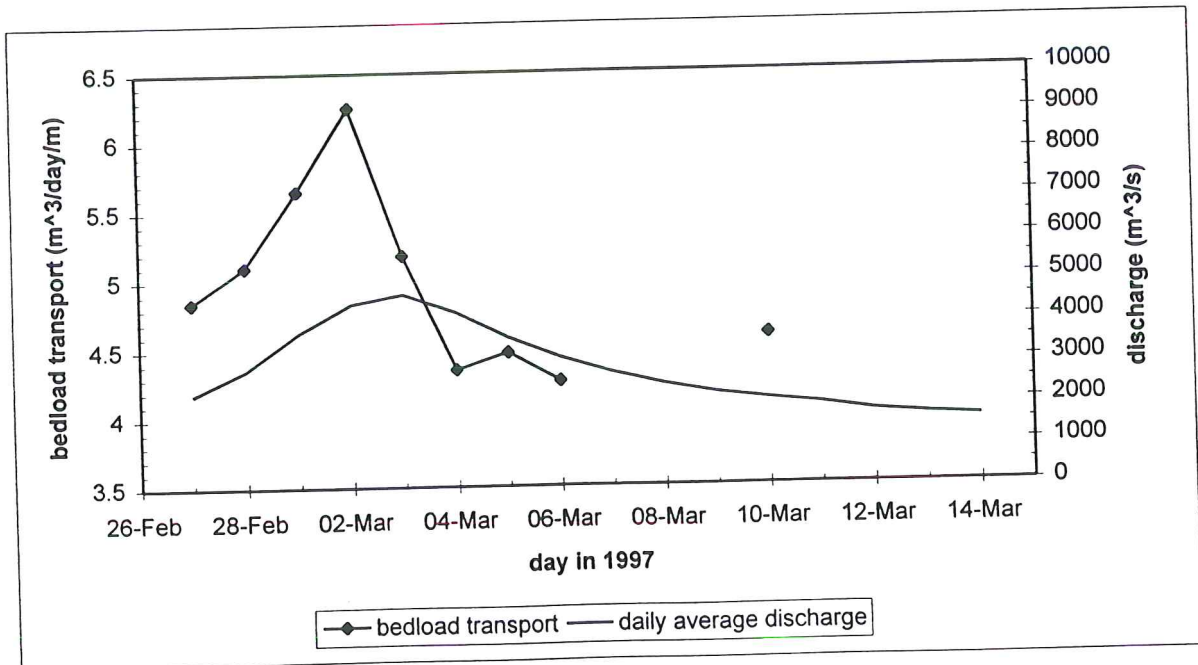
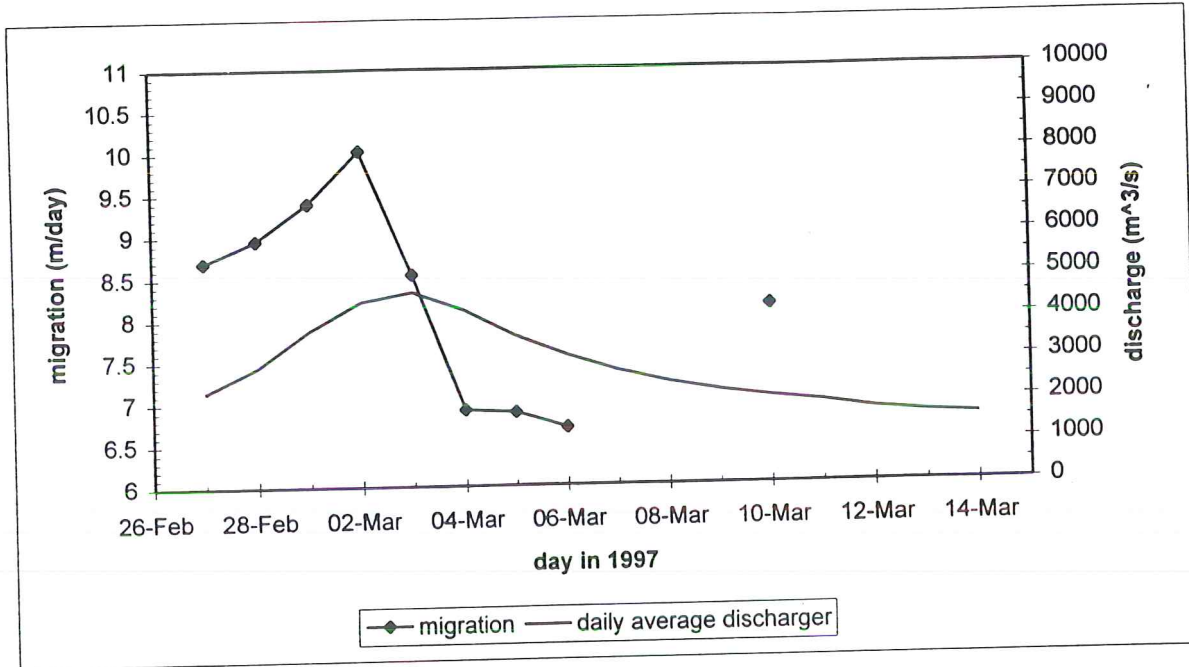
Bijlage 2 Duinkarakteristieken en bodemtransport hoogwater 1997 in de Bovenrijn

Bijlage 2.1 Veranderingen in de tijd

Change in dune characteristics over time
In the Bovenrijn during the flood of March 1997



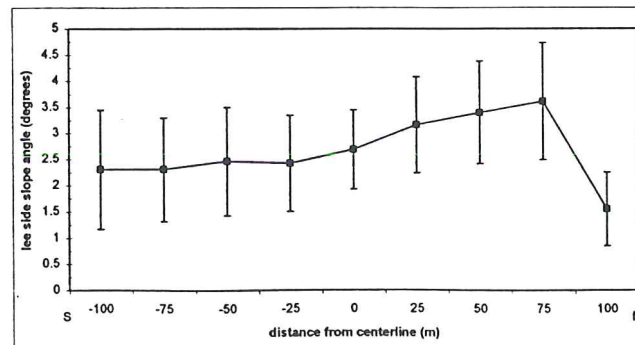
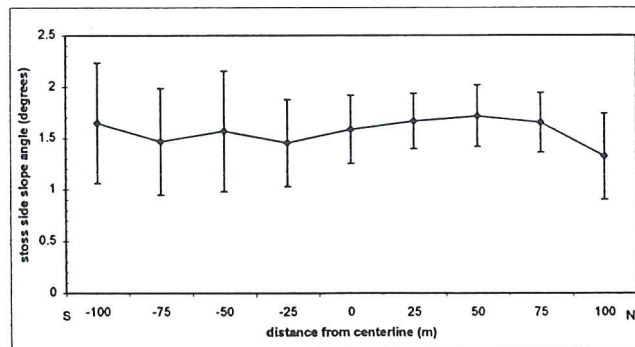
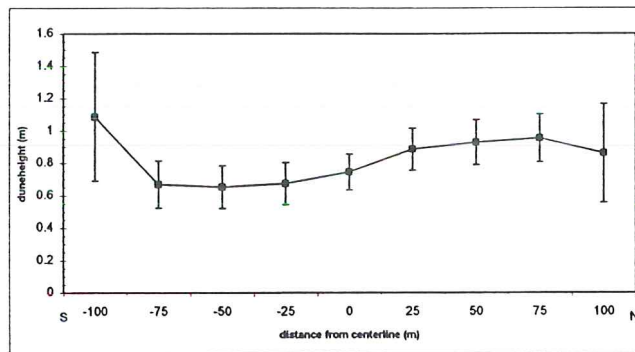
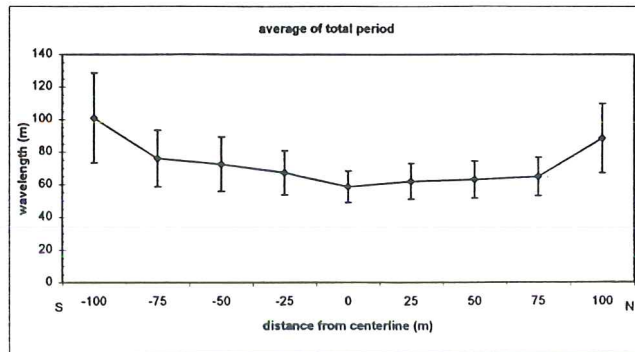
Bijlage 2.2 Veranderingen van de duinmigratiesnelheid en het bodemtransport



**Bijlage 3 Duinkarakteristieken en bodemtransport laagwater peilingen 1989 –
1992 in de Waal**

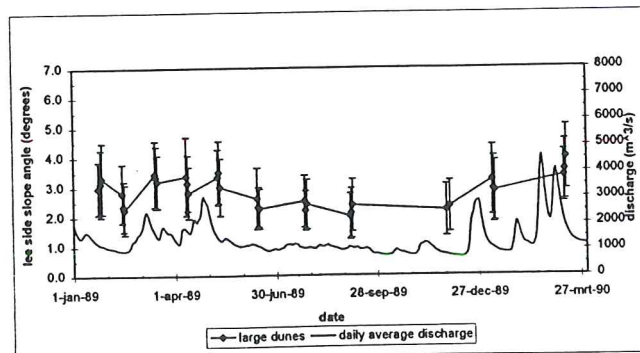
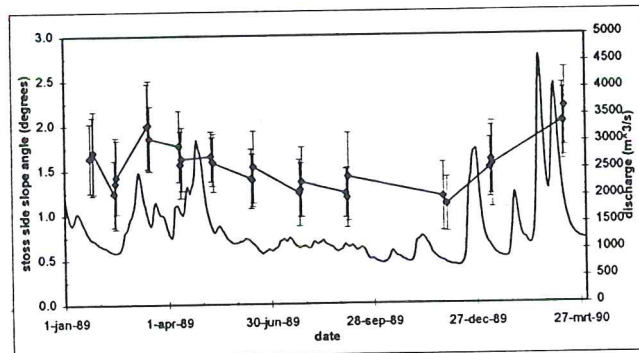
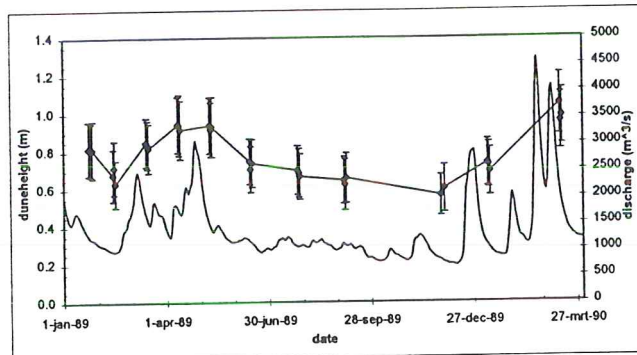
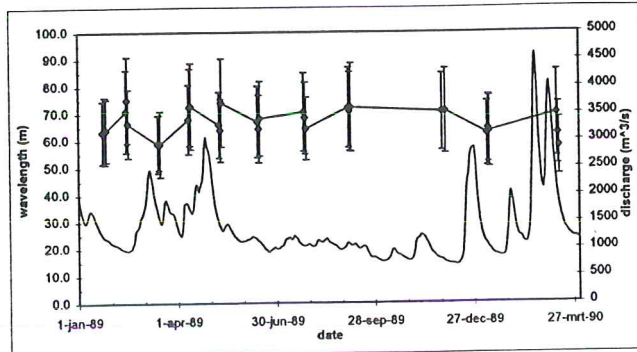
Bijlage 3.1 Veranderingen over de rivierbreedte

Change in dune characteristics over the river width In the Waal near Druten during low discharge stages in 1989 - 1992



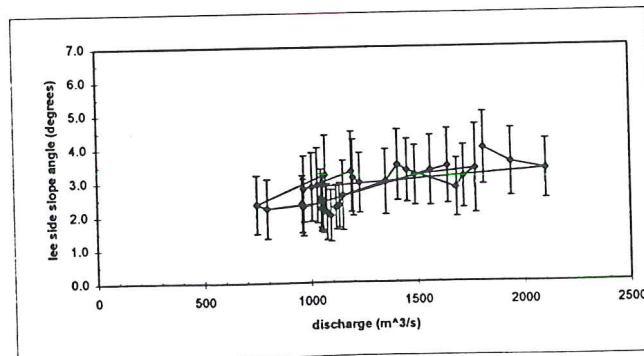
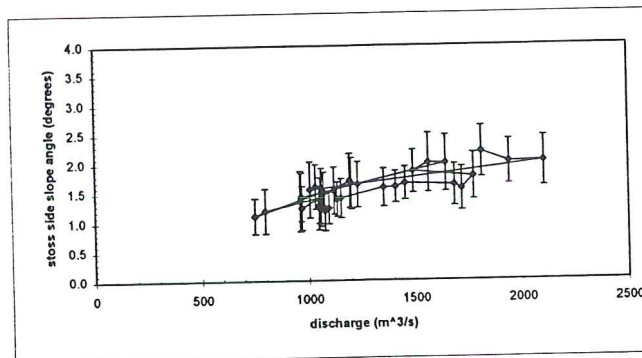
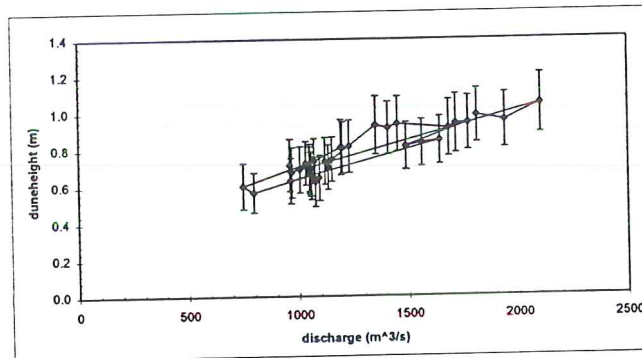
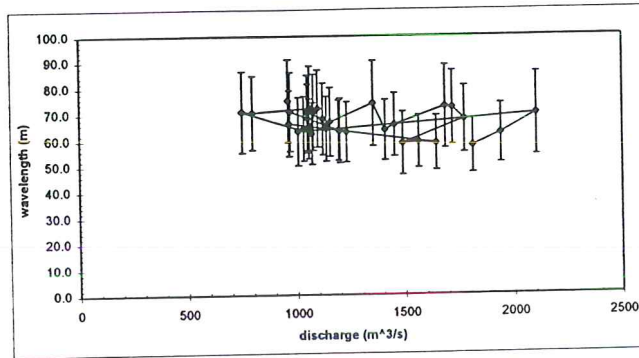
Bijlage 3.2 Veranderingen in de tijd

Change in dune characteristics over time In the Waal near Druten during low discharge stages in 1989 - 1992



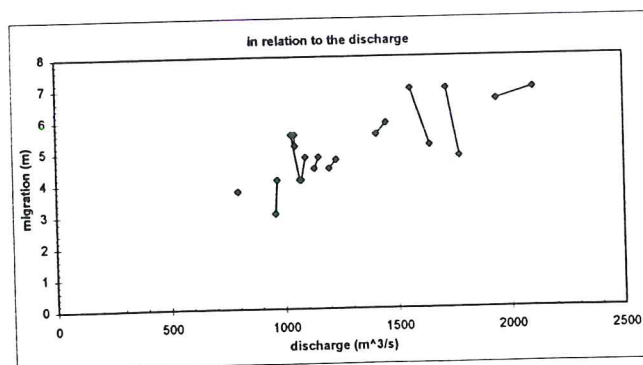
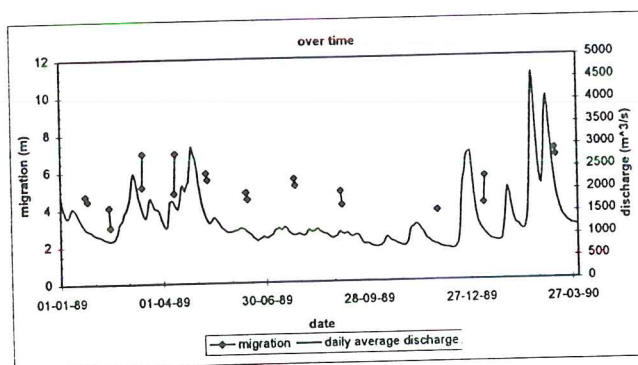
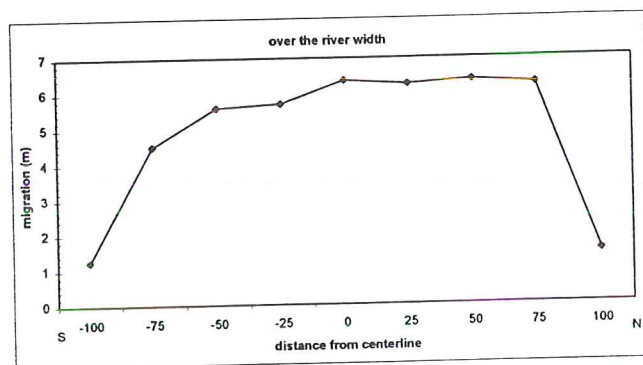
Bijlage 3.3 Veranderingen ten opzichte van de afvoer

Change in dune characteristics in relation to the discharge In the Waal near Druten during low discharge stages in 1989 - 1992



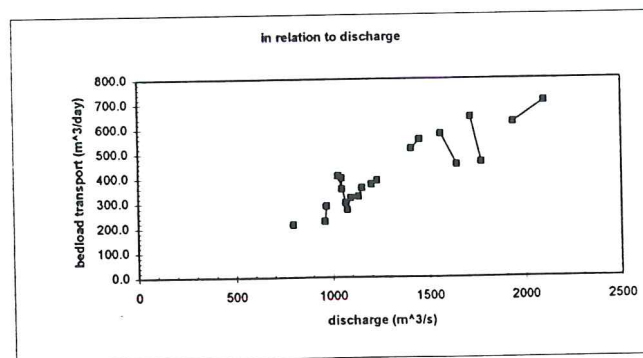
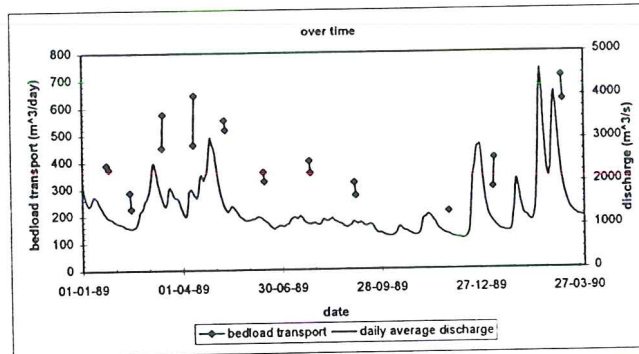
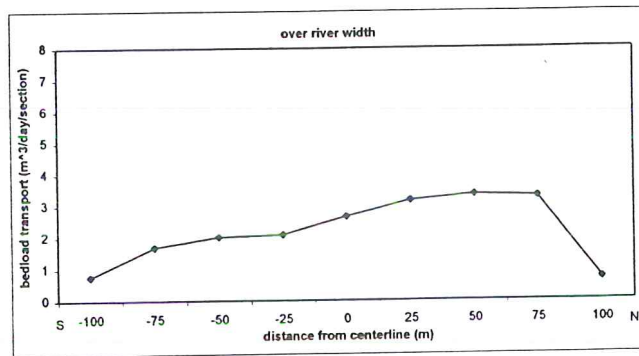
Bijlage 3.4 Veranderingen van de duinmigratiesnelheid

Changes in dune migration In the Waal near Druten during low discharge stages in 1989 - 1992



Bijlage 3.5 Veranderingen van het bodemtransport

Changes in bedload transport In the Waal near Druten during low discharge stages in 1989 - 1992

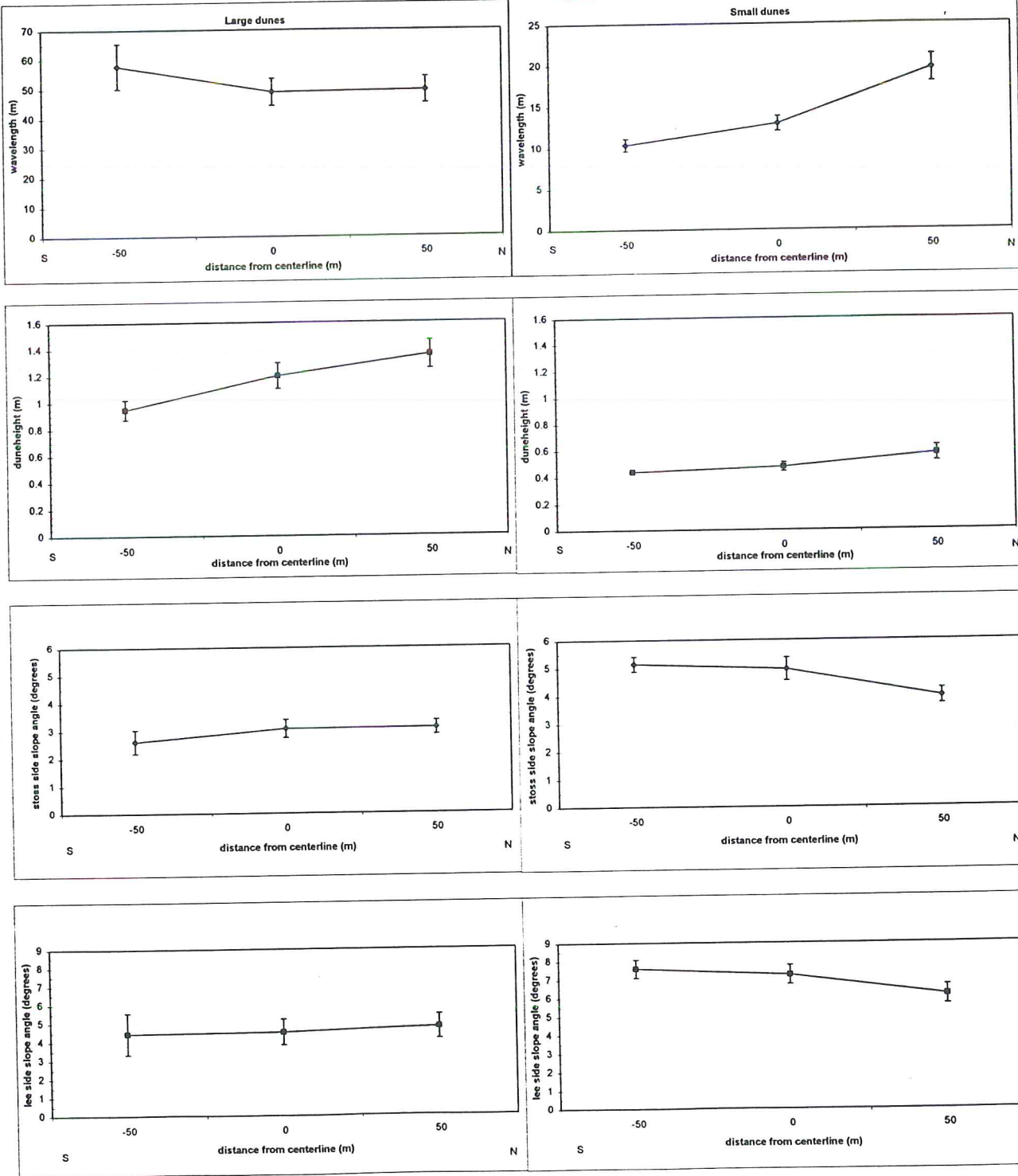


Bijlage 4 Duinkarakteristieken en bodemtransport hoogwater 1995 in de Waal

Bijlage 4.1 Veranderingen over de rivierbreedte

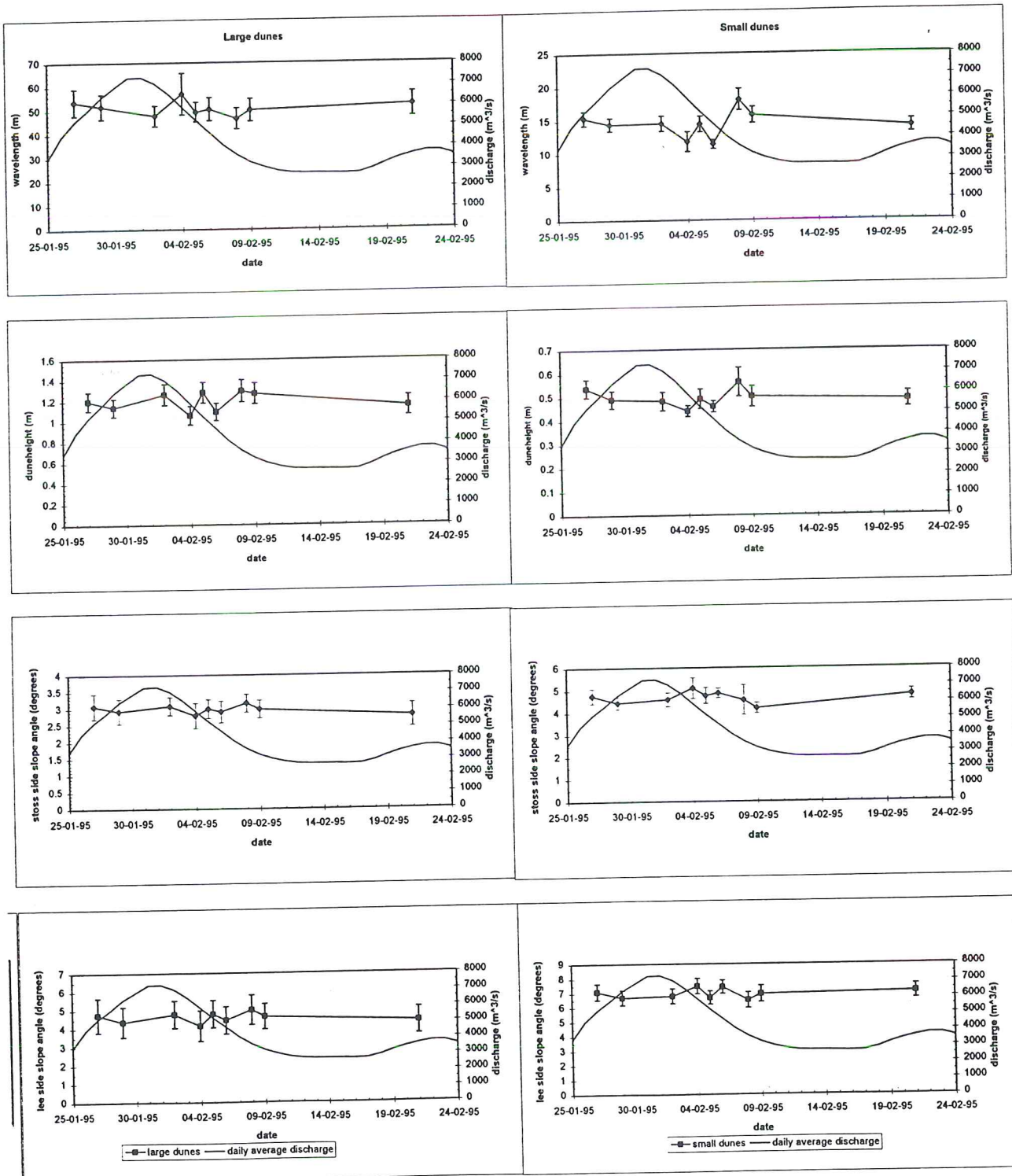
Change in dune characteristics over the river width
 In the river Waal near Druten during the flood of February 1995.

Average of total period



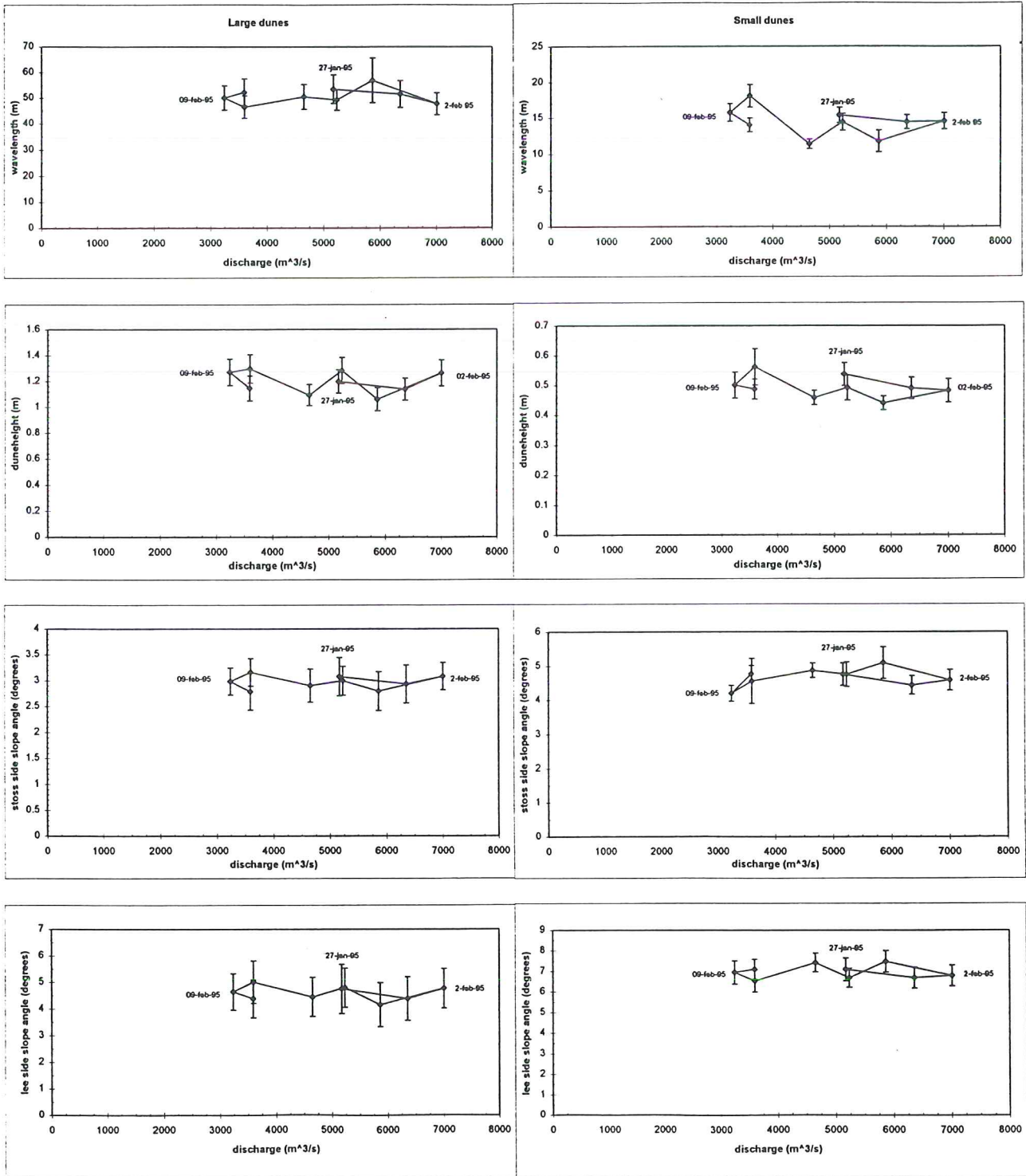
Bijlage 4.2 Veranderingen in de tijd

Change in dune characteristics over time In the river Waal near Druten during the flood of February 1995.



Bijlage 4.3 Veranderingen ten opzichte van de afvoer

Change in dune characteristics in relation to the discharge
In the river Waal near Druten during the flood of February 1995.





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.*

- 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*
- 98/11 Lev, T., M. van der Perk, A. Gillett, J.P. Absalom, N.M.J. Crout and G. Voigt, Universiteit van Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *GIS-based modelling of radiocaesium transfer to agricultural food products in the Chernigov region, Ukraine.*
- 98/12 Wilbers, A., Universiteit van Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Bodemtransport en duinontwikkeling tijdens afvoergolven in de Rijn en Waal.*