

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

Voorspelling bodemligging en herstelrelaties voor baggeren op de Waal

Eenvoudige relaties en benodigd onderzoek

rapport

september 2000

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

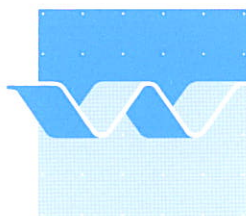
Voorspelling bodemligging en herstelrelaties voor baggeren op de Waal

Eenvoudige relaties en benodigd onderzoek

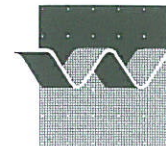
G.J. Klaassen, C.J. Sloff

rapport

september 2000



wL | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER: Rijkswaterstaat RIZA

TITEL: Voorspelling bodemligging en herstelrelaties t.b.v. baggeren op de Waal.
Eenvoudige relaties en benodigd onderzoek

SAMENVATTING:

Ten behoeve van de ontwikkeling naar het beslissingsondersteunend systeem voor baggeren op de Waal (BOS Baggeren) is een studie uitgevoerd naar morfologische voorspelling van bodemligging en naar herstelrelaties. De resultaten van deze studie zijn in dit rapport gepresenteerd.

REFERENTIES: BOS Baggeren, RIZA overeenkomst RI-3016

VER.	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
0.1	ir. G.J. Klaassen	sept. 2000		dr.ir. C.J. Sloff	
0.2	G.J. Klaassen/C.J. Sloff	jan. 2001		dr.ir. E. Mosselman	prof.ir. E. van Beek
PROJECTNUMMER:		Q2669			
TREFWOORDEN:		Baggeren, Morfologische voorspelling, Waal			
INHOUD:	TEKST	TABELLEN	FIGUREN	APPENDICES	
STATUS:	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG <input type="checkbox"/> CONCEPT <input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF				

Inhoud

1	Inleiding	1-1
1.1	BOS-Baggeren	1-1
1.2	Parallelstudie Bodemligging en Herstelrelaties en gerelateerde activiteiten.....	1-2
1.3	Eerdere studies.....	1-3
1.4	Aanpak	1-6
2	Benodigde morfologische voorspellingen in kader van BOS Baggeren.....	2-1
2.1	Inleiding	2-1
2.2	Ondieptes en baggeren op de Waal	2-1
2.3	Ondersteunende metingen	2-4
2.4	Type beslissingen.....	2-5
2.5	Benodigde voorspellingen	2-6
3	Verandering natuurlijke bodemligging Waal tijdens val	3-1
3.1	Inleiding	3-1
3.2	Optredende verschijnselen	3-2
3.3	Opgedrongen verschijnselen	3-8
3.3.1	Inleiding.....	3-8
3.3.2	Bodemligging opgedrongen door geometrie zomerbed	3-8
3.3.3	Bodemligging opgedrongen door geometrie hoogwaterbed	3-12
3.3.4	Bodemligging opgedrongen door kribben en kribvakken	3-12
3.3.5	Vaste lagen in de Waal.....	3-15
3.4	Vrije verschijnselen	3-16
3.4.1	Inleiding.....	3-16
3.4.2	Hoogwaterafzettingen	3-17
3.4.3	Alternerende banken	3-18
3.4.4	Beddingvormen	3-19
3.5	Invloed scheepvaart	3-19

3.6	Belang van verschillende verschijnselen in de Waal	3–21
3.7	Discussie	3–26
4	Herstel van Waal na baggeren en storten	4–1
4.1	Inleiding	4–1
4.2	Baggeren en terugstorten op de Waal	4–1
4.3	"Soorten" herstel	4–2
4.4	Herstel van opgedrukte bodemligging	4–3
4.4.1	Inleiding	4–3
4.4.2	Gebaggerde geulen in binnenbochten	4–4
4.4.3	Overgangen	4–5
4.4.4	Aanzanding benedenstrooms van binnenbocht bij verondiepte buitenbocht	4–5
4.4.5	Erosie van in ontgrondingskuilen gestort materiaal	4–6
4.5	Herstel vrije verschijnselen	4–6
4.5.1	Inleiding	4–6
4.5.2	Hoogwaterafzettingen	4–6
4.5.3	Alternerende banken	4–6
4.5.4	Beddingvormen	4–7
4.6	Invloed scheepvaart en nalevering vanuit kribvakken	4–8
4.7	Relatieve belang van verschillende typen herstel	4–8
5	Mogelijke methoden voor bodemvoorspelling en herstelrelaties	5–1
5.1	Inleiding	5–1
5.2	Lange termijnvoorspelling ten behoeve van anticiperen op profiel- baggeren	5–2
5.3	Middellange termijn voorspelling ten behoeve van profielbaggeren	5–3
5.4	Korte-termijn voorspelling ten behoeve van knelpuntbaggeren	5–6
6	Benodigd onderzoek	6–1
6.1	Inleiding	6–1
6.2	Onderzoek op basis van Proef Morfologie en vervolgmetingen in prototype	6–1
6.3	Onderzoek met 2-D morfologische (numerieke) modellen	6–3
6.4	Overig onderzoek	6–4

7	Conclusies en aanbevelingen.....	7-1
	Literatuur	Lit.-1

Bijlagen

A	Voortplanting, groei en demping van 2-D morfologische verschijnselen.....	A-1
A.1	Inleiding	A-1
A.2	Niet-stationaire oplossing van de 2-D-beddingvervorming.....	A-3
A.3	Kanteling dwarsprofiel als gevolg van variatie afvoer	A-4
A.4	Vrije banken.....	A-6
A.5	Verstoring door baggeren.....	A-6
A.6	Verschijnselen op de overgangen	A-6
A.7	Gedrag van bodem benedenstrooms van vaste lagen in een buitenbocht	A-7
A.8	Aanbeveling	A-7
B	Sedimenttransport en beddingvormen in de Waal.....	B-1
B.1	Inleiding	B-1
B.2	Sedimenttransport op de Waal.....	B-2
B.3	Optreden, afmetingen en voortplantingssnelheden van beddingvormen op de Waal.....	B-5
B.4	Aanpassing van beddingvormen	B-7
B.5	Literatuur.....	B-8
C	Onderzoek op basis van prototype verschijnselen met behulp van ArcView .	C-1
C.1	Inleiding	C-1
C.2	Voorgestelde analyses voor onderzoek natuurlijke situatie	C-1
C.3	Voorgestelde analyses voor toetsen herstelrelaties.....	C-2
D	Mogelijk onderzoek met 2-D morfologische (numerieke) modellen	D-1

D.1	Inleiding	D-1
D.2	Eisen te stellen aan te gebruiken model	D-1
D.3	Voorgestelde simulaties voor onderzoek natuurlijke situatie	D-2
D.4	Voorgestelde simulaties voor toetsen van herstelrelaties	D-3

I Inleiding

I.1 BOS-Baggeren

Het BOS (Beslissing Ondersteunend Systeem) Baggeren wordt ontwikkeld in het kader van het project Baggeren. Dit is gestart als onderdeel van het Waalprogramma. De doelstelling van het project Baggeren is de ontwikkeling van een baggerstrategie en de realisatie van een ‘Draaiboek baggeren’ dat over enkele jaren aan de waterbeheerder kan worden overgedragen (Kruitwagen, 1997). Het Draaiboek baggeren dient handvatten aan te reiken voor de uitvoering en optimalisatie van jaarlijks terugkerende baggerwerkzaamheden op de Waal. Het Draaiboek baggeren bestaat vooralsnog grofweg uit de volgende onderdelen (Smedes, 1999):

- Programma van eisen voor uitvoering;
- Monitoring;
- Beslissen;
- Evaluatie;
- Aanpassing draaiboek.

Het BOS baggeren maakt deel uit van het Draaiboek en wordt ondergebracht bij het onderdeel ‘beslissen’.

Het RIZA (afdeling rivieren) heeft in november 1997 een projectvoorstel geschreven omtrent de mogelijkheden voor de ontwikkeling van een (BOS) ten behoeve van de toekomstige (onderhouds-)baggerwerkzaamheden op de Waal (Douben, 1997). Vervolgens is het project BOS baggeren in februari 1998 gestart met een initiatief- en definitiefase, waarvan in het verslag van deze fase (RA & WL, 1998) verslag is uitgebracht. De resultaten van de definitiefase zijn gebruikt voor het opstellen van een ontwikkeltraject (cyclisch ontwerp, bouw en test) van het BOS Baggeren. Het projectprogramma beschrijft een groot aantal activiteiten voor de ontwikkeling van het BOS Baggeren. De eerste activiteiten vinden plaats in het kader van de ontwerpfase van het BOS Baggeren.

Het BOS baggeren wordt beschouwd als een ‘expertsysteem’ (bestaande empirische kennis gecombineerd met data en modellen) en dient bij de invoering van het baggerprogramma over enkele jaren operationeel te zijn. Het BOS baggeren richt zich onder andere op de voorspelling van morfologische ontwikkelingen na een hoogwater, tijdens de laagwaterperiode en na de uitvoering van een baggerwerk.

Het primaire doel van de ontwerpfase bestond uit het opstellen van een (eenvoudig) ontwerp voor het BOS baggeren. Verder werd een eerste eenvoudige versie van het BOS Baggeren ontwikkeld, die kan worden ingezet bij het baggerprogramma van 2000. In de eenvoudige versie wordt wel een simpele voorspelling van de afvoer gedaan, maar morfologische voorspellingen zijn nog niet opgenomen.

Dat betekent dat bij de bepaling van te baggeren hoeveelheden geen veranderingen van de bodemligging tussen het moment van de laatste peiling, die in het BOS Baggeren ter beschikking is, en het moment van analyse in rekening worden gebracht.

Het is de bedoeling om in de nabije toekomst het BOS Baggeren uit te breiden met een module die het mogelijk maakt om voorspellingen te doen van veranderingen in de bodemligging, zowel als gevolg van natuurlijke processen als door baggeren en terugstorten. Daartoe is besloten tot een Parallelstudie Bodemligging en Herstelrelaties, die parallel wordt uitgevoerd aan de verdere ontwikkeling van het BOS Baggeren. De bedoeling van deze parallelstudie is om te komen tot voorstellen voor voorspellingsmethoden die in het BOS Baggeren geïmplementeerd kunnen worden.

De parallelstudie is opgesplitst in een aantal fasen. De eerste fase is een inventarisatie van mogelijke voorspellingsmethoden, waarbij de nadruk ligt op simpele voorspellers (omdat in het BOS Baggeren alleen relatief simpele voorspellers gebruikt zullen kunnen worden). Dit is gebeurd door in globale zin de morfologische verschijnselen op de Waal zonder en met baggeren te analyseren en gebruik te maken van de huidige kennis op het gebied van 2-D riviermorfologie en van beddingvormen. In dit verslag zijn de resultaten van deze fase vastgelegd. In een volgende fase zullen de geselecteerde voorspellingsmethoden worden getoetst aan metingen in de Waal (zie hierna).

1.2 Parallelstudie Bodemligging en Herstelrelaties en gerelateerde activiteiten

Het doel van de gehele Parallelstudie Bodemligging en Herstelrelaties is om te komen tot voorstellen voor het opnemen van morfologische voorspellingen in het BOS Baggeren. Een betere voorspelling van morfologische veranderingen in de Waal met en zonder baggeren is nodig om te komen tot (in volgorde van prioriteit):

- een voorspellingsmethode om na te gaan hoe lang het (positieve) *effect van baggeren* merkbaar zal zijn;
- een voorspelling van de verandering van de bodemligging door *natuurlijke processen*, om daaruit te bepalen waar baggeren binnenkort nodig zal zijn;
- een *betere schatting van de te baggeren hoeveelheden* sediment door rekening te houden met de morfologische veranderingen sinds de laatste peilingen;
- een methode om het *effect van het in de rivier terugstorten* van het gebaggerde sediment te bepalen;
- een methode die helpt te bepalen of het zinvol is om *overdiepte* te creëren;
- een methode om de meest *optimale volgorde* van baggeren en terugstorten in de verschillende morfologische eenheden te vinden.

De huidige studie, die beperkt is tot een inventarisatie van mogelijke voorspellingsmethoden en suggesties voor benodigd onderzoek naar deze relaties, is uitgevoerd door G.J. Klaassen en C.J. Sloff, en begeleid door N. Douben. Verder zijn er bijdragen geleverd door N. Struiksma, die het grootste deel van Bijlage A heeft geschreven, en door E. Mosselman.

Naast de parallelle studie Bodemligging en Herstelrelaties, maar er wel duidelijk mee gerelateerd, worden voorts in dit jaar twee afstudeeropdrachten uitgevoerd. De ene is inmiddels afgerond en heeft een verslag op CD-rom in het engels en een afstudeerverslag in het Duits opgeleverd (Siegfried, 2000a en 2000b). In dit onderzoek zijn een aantal tamelijk praktische zaken onderzocht, namelijk:

- de morfologische veranderingen van de vaargeulbreedte na baggeren;
- wat er gebeurt met sediment dat is teruggestort in diepe (krib)erosiekuilen in de buitenbocht;
- beschikbare ruimte voor terugstorten in de rivier.

Enkele resultaten van dit onderzoek worden in dit verslag gebruikt.

Het andere onderzoek (zie Schepman (2000a) voor de opzet van dit onderzoek) betreft een onderzoek waarin enkele in het voorliggende verslag aanbevolen voorspellingsmethoden worden getoetst aan de prototype metingen die in het kader van de Proef Morfologie en het vervolg er op worden uitgevoerd.

1.3 Eerdere studies

De Parallelstudie Bodemligging en Herstelrelaties is bepaald niet de eerste studie die zich bezighoudt met de morfologie van de Waal en de invloed van baggeren. Hieronder wordt een kort overzicht gegeven van relevante eerdere studies. Daarbij is een onderscheid gemaakt tussen studies die zich met de morfologie van de Waal in het algemene zin bezighouden en studies die specifiek met baggeren te maken hebben.

Morfologie van de Waal

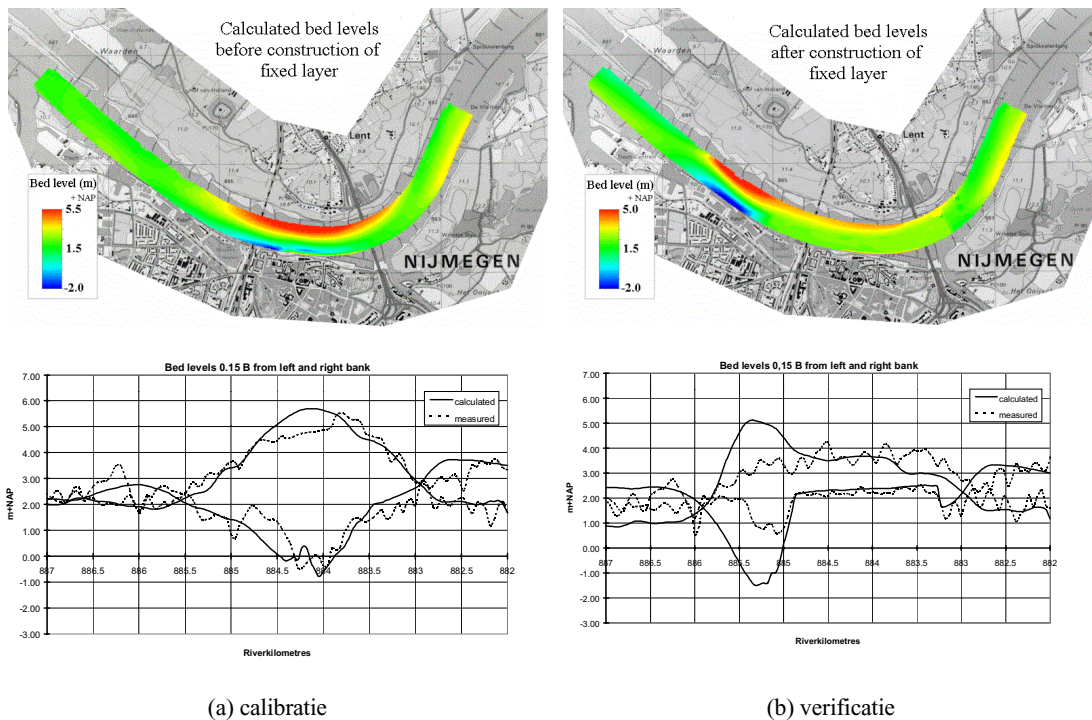
Voor de Parallelstudie Bodemligging en Herstelrelaties zijn met name twee onderwerpen erg interessant:

- tweedimensionale (2-D) morfologie van de Waal;
- beddingvormen in de Waal.

Belangrijke vooruitgang in het onderzoek naar de *2-D morfologie* is in Nederland vooral geboekt in de 80-er jaren in het kader van het TOW Rivieren en een aantal promotieonderzoeken. Resultaten van dit onderzoek zijn te vinden in enkele artikelen, namelijk Struiksma et al (1985), Struiksma en Crosato (1989), zie ook Ikeda en Parker (1989), en in Talmon et al (1995). Het betreft het optreden van verschillende 2-D verschijnselen (bochten, banken), groei en demping en voortplantingssnelheden, allemaal op basis van analyses van gelineariseerde vergelijkingen. Een samenvatting van de relevante literatuur is gegeven in Bijlage A.

Sinds enkele jaren is opnieuw een versterkte interesse ontstaan in toepassing van het 2-D rekeninstrumentarium voor de Nederlandse rivieren. Een voorbeeld hiervan is het project “Kennisonwikkeling 2-D-morfologie” van RIZA, waarbij gezamenlijk met WL het instrumentarium Delft2D-Rivieren wordt toegepast en verder wordt verbeterd voor de Nederlandse situatie.

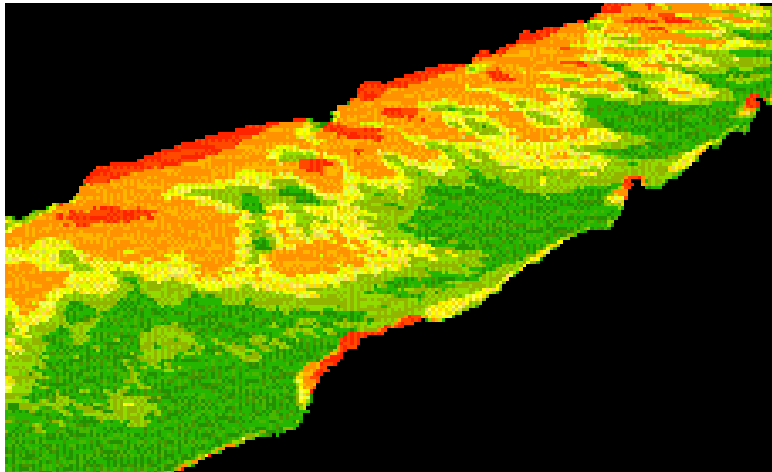
Case-studies die in het kader van dit project zijn uitgevoerd zijn onder andere de 2-D morfologische simulatie van de vaste laag bij Nijmegen zoals geïllustreerd in figuur 1.1 (Wolters, 1998), de 2-D simulatie van morfologische hoogwatereffecten ten gevolge van de stroming in uiterwaarden in de Midden-Waal bij Tiel, de 2-D berekening en analyse van de bodemontwikkeling ter plaatse van splitsingspunt de Pannerdense Kop (Mosselman en Sloff, 1998, Mosselman et. al., 1999) en de morfologische ontwikkeling ter plaatse van de verlaagde uiterwaard bij Ewijk (in uitvoering).



Figuur 1.1: Calibratie en verificatie van het model van de bocht bij Nijmegen.

Naast deze projecten zijn bij WL eveneens ontwikkelingen lopende met betrekking tot simulatie van de effecten van bodemschermen op de 2-D morfologie in de Waalbochten, en de implementatie van alluviale ruweheidsvoorspellers en de relatie met beddingvormen in de Waal.

Diepgaander onderzoek naar *beddingvormen* op de Waal is eveneens begonnen tijdens het TOW Rivieren, en met name is toen aandacht besteed aan naijlen van beddingvormafmetingen. Belangrijke en nog relevante artikelen en rapporten uit die periode zijn onder andere Havinga en van Urk (1980), Wijbenga en Klaassen (1981), Ogink (1984, 1989), Wijbenga (1990, 1991) en Julien en Klaassen (1995). In de 90-er jaren is er een hernieuwde interesse ontstaan in sedimenttransport en beddingvormen op de Bovenrijn en de Waal, en wordt mede door het ter beschikking komen van verbeterde meetmethoden intensief prototype-onderzoek gedaan door RIZA, in samenwerking met vooral de Universiteit van Utrecht. Belangrijke resultaten zijn te vinden in Wilbers en ten Brinke (1999) en ten Brinke et al (1999a), gebaseerd op studies van Wilbers (1997, 1998a en 1998b), en verder studies van Lai (1998) en Kleinhans (1999). Veel van de onderzoeken worden tegenwoordig gedaan met zogenaamde multi-beam peilingen, waarmee een gedetailleerd beeld van de bodem van de rivier wordt opgebouwd. Een illustratie van de resultaten van verwerking van multi-beam metingen is gepresenteerd in figuur 1.2.



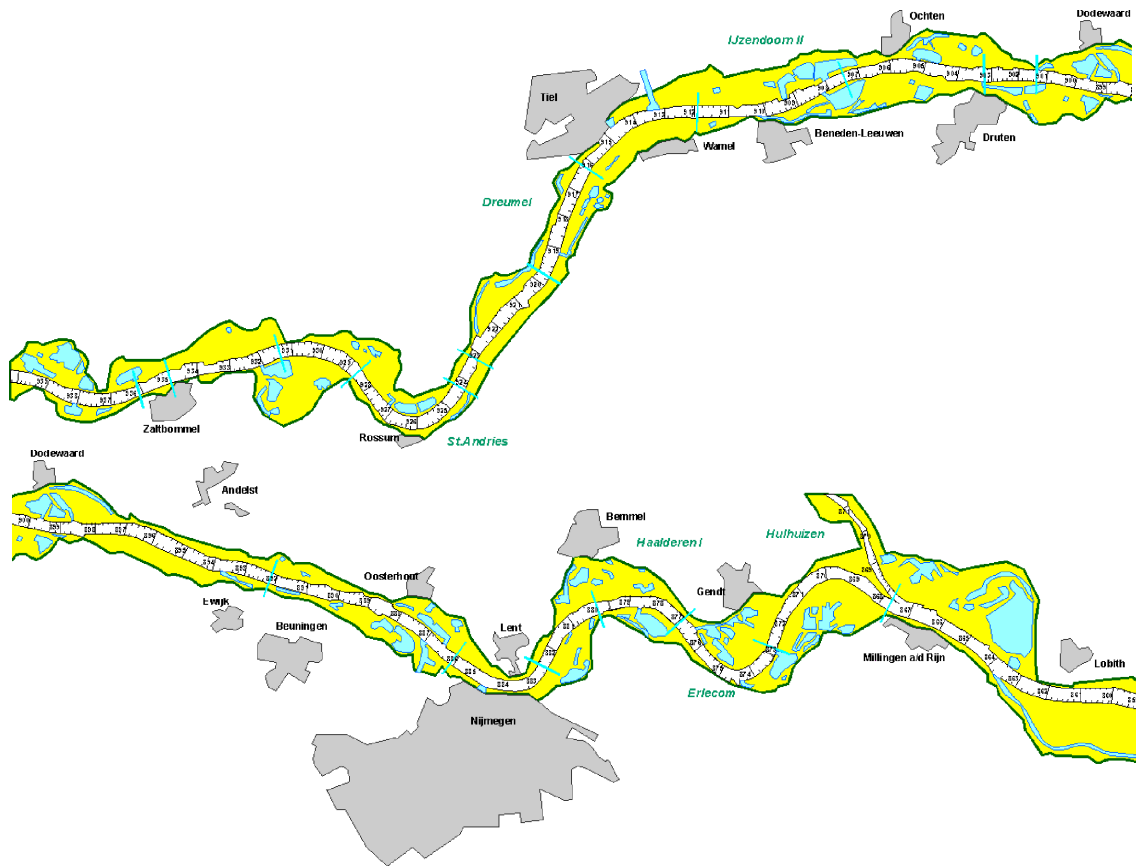
Figuur 1.2 Gemeten duinpatroon in vogelvluchtperspectief (multi-beam metingen).

Een samenvatting van hetgeen bekend is over beddingvormen op de Waal wordt gegeven in Bijlage B. Overigens ligt de nadruk bij het meeste van dit onderzoek naar beddingvormen op de situatie bij hoogwater, terwijl in het kader van deze Parallelstudie vooral het gedrag van beddingvormen na het hoogwater in perioden met een meer gemiddelde afvoer en tijdens laagwater perioden zonder en met baggeren van belang zijn.

Verder is er recent ook prototype-onderzoek uitgevoerd naar *de uitwisseling van sediment in de kribvakken*, zie ten Brinke et al (1999b). Een goed overzichtsartikel over *sedimenttransport* in de Rijntakken is ten Brinke (2000).

Proeven met baggeren en terugstorten in de Waal

De Waal tussen Pannerdense Kop en Sint Andries is het riviergedeelte tussen de Nederlandse grens en Rotterdam dat bij lage afvoeren de meeste problemen oplevert. Het bestaat uit een aantal scherpe bochten en de gestrekte Midden-Waal (zie Figuur 1.3).



Figuur 1.3 Waal tussen Pannerdse Kop en Herwijnen

Proeven met baggeren zijn in de 90-er jaren, in het kader van toegenomen interesse in baggeren als een middel om de vaargeul te verbeteren, gedaan in de bocht bij Hulhuizen in 1992 en 1993 en in de Midden-Waal vanaf 1998. Een evaluatie van de baggerproef bij Hulhuizen wordt gegeven in Taal (1994), waarin is opgenomen het WL-verslag Q1699 (Barneveld et al, 1994) met een aantal illustratieve SEDREDGE berekeningen, terwijl van de Proef Morfologie een verslag op CD-rom ter beschikking is (Taal, 1999).

1.4 Aanpak

Bij deze eerste fase van de Parallelstudie, waarvan dit verslag een neerslag is, is als volgt te werk gegaan:

- identificatie van te nemen beslissingen waarbij morfologische voorspellingen een rol moeten spelen, waarbij drie voorspellingshorizonten zijn onderscheiden (lang, middellang en kort);
- identificatie van verschijnselen die mogelijk in de natuurlijke situatie en na het baggeren een rol zouden kunnen spelen;
- bestudering van deze verschijnselen middels een nauwkeurige en gedetailleerde visuele inspectie van de door Taal (1999) verzamelde informatie;
- literatuurstudie ten aanzien van hetgeen bekend is over de verschillende 2-D morfologische verschijnselen en over beddingvormen, zowel ten aanzien van optreden

als van voortplanting en groei/demping; en op basis van deze inventarisatie vaststelling van welke verschijnselen te weinig bekend is om met enige stelligheid een voorspelling te doen over hun bijdrage aan de verandering van de 2-D beddingtopografie;

- toepassing van de in de literatuur gevonden relaties op de condities in de Waal ten einde het relatieve belang van de verschillende verschijnselen te bepalen en een keuze te maken welke verschijnselen voor verschillende voorspellingshorizonten (lang, middellang en korte termijn) meegenomen dienen te worden;
- opstellen van eenvoudige en voorlopige voorspellingsmethoden voor de drie voorspellingstermijnen;
- nagaan op welke wijze de voorgestelde voorspellingsmethoden getoetst kunnen worden, enerzijds via vergelijking met de prototype metingen gebruik makend van ArcView en anderzijds door toepassing van Delft2D-Rivieren;
- opstellen van conclusies en aanbevelingen voor nader onderzoek.

Binnen het BOS Baggeren is de Waal opgedeeld in zogenaamde ‘morfologische eenheden’, elk met een beperkte lengte. Er zijn drie typen opeenvolgende eenheden gedefinieerd: een linker bocht, een rechter bocht, en een overgang tussen bochten (crossing). Omdat deze eenheden worden gekenmerkt door specifieke morfologische processen (bijvoorbeeld, de ontwikkeling van een point bar in een binnenbocht), wordt de mogelijkheid geboden voorspellingen te maken op basis van karakteristieken van deze eenheden. In dit rapport wordt daarom regelmatig verwezen naar de morfologische eenheden.

2 Benodigde morfologische voorspellingen in kader van BOS Baggeren

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt besproken welke morfologische voorspellingen nodig zijn in het kader van het BOS Baggeren. Belangrijke aspecten, die uiteindelijk bepalen welk type voorspellingen gedaan zal moeten worden, zijn:

- waar in het algemeen gebaggerd moet worden;
- welk type informatie ter beschikking is en hoe "gedateerd" die informatie is;
- wat voor soort beslissingen genomen moet worden.

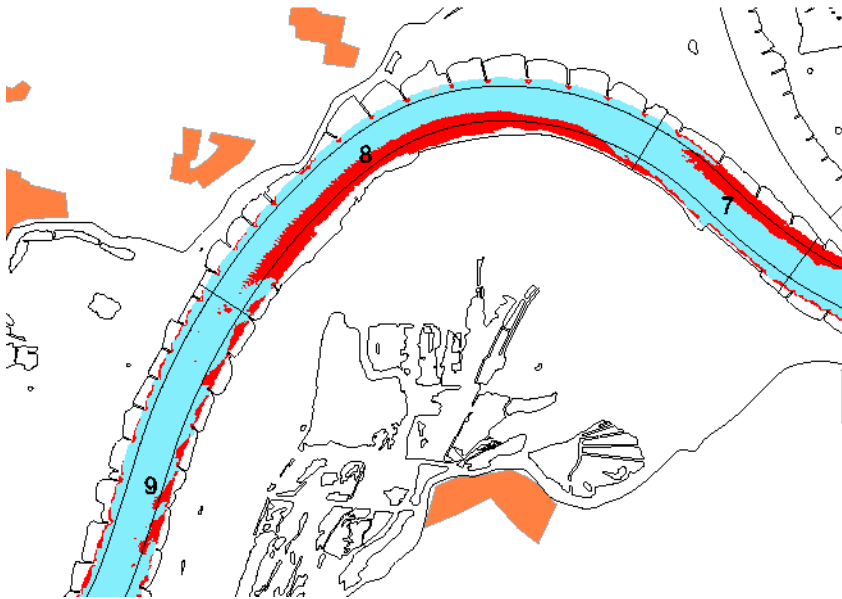
Deze drie aspecten bepalen in hoofdzaak welk type voorspellingen gedaan moet worden. Dit wordt kort nader uitgewerkt in dit hoofdstuk.

2.2 Ondieptes en baggeren op de Waal

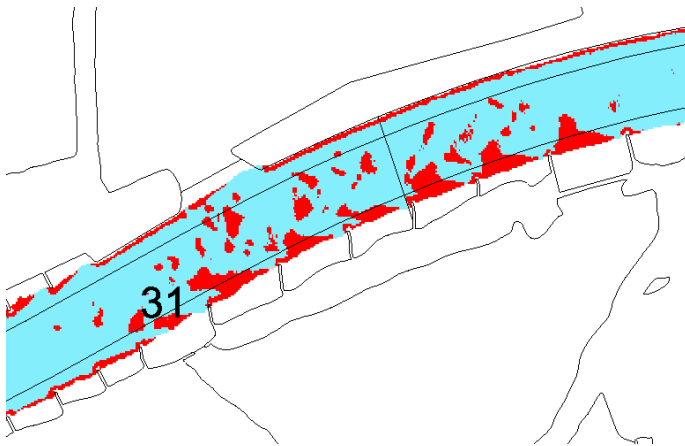
Bij de bespreking van het type ondieptes en het benodigd baggerwerk kan een onderscheid worden gemaakt tussen de scherpe rivierbochten bovenstrooms van Nijmegen en bij St. Andries en de meer gestrekte Midden-Waal. Bij de scherpe bochten kan weer een onderscheid gemaakt worden tussen natuurlijke bochten en de bochten waar inmiddels werken zijn uitgevoerd in de buitenbocht teneinde de vaargeul te verbreden. Dit leidt tot de volgende indeling voor riviertrajecten waar mogelijk gebaggerd moet worden:

- scherpe bochten in natuurlijke staat (Hulhuizen en Haalderen): baggeren zal vooral betreffen het aanbrengen van een geul in de binnenbocht (zie Figuur 2.1 en Figuur 2.3a);
- scherpe bochten met een verondiepte buitenbocht hetzij door een vaste laag (Nijmegen, St. Andries) hetzij door grondkribben (Erlecom): baggeren blijkt vooral nodig benedenstrooms van de vaste laag in de binnenbocht;
- relatief rechte Midden-Waal: baggeren betreft vooral (de beddingvormen in) de flauwe binnenbochten en de overgangen (zie Figuur 2.2 en Figuur 2.3b).

De bovengenoemde bochten en overgangen zijn als afzonderlijke 'morfologische eenheden' onderscheiden in het BOS Baggeren.

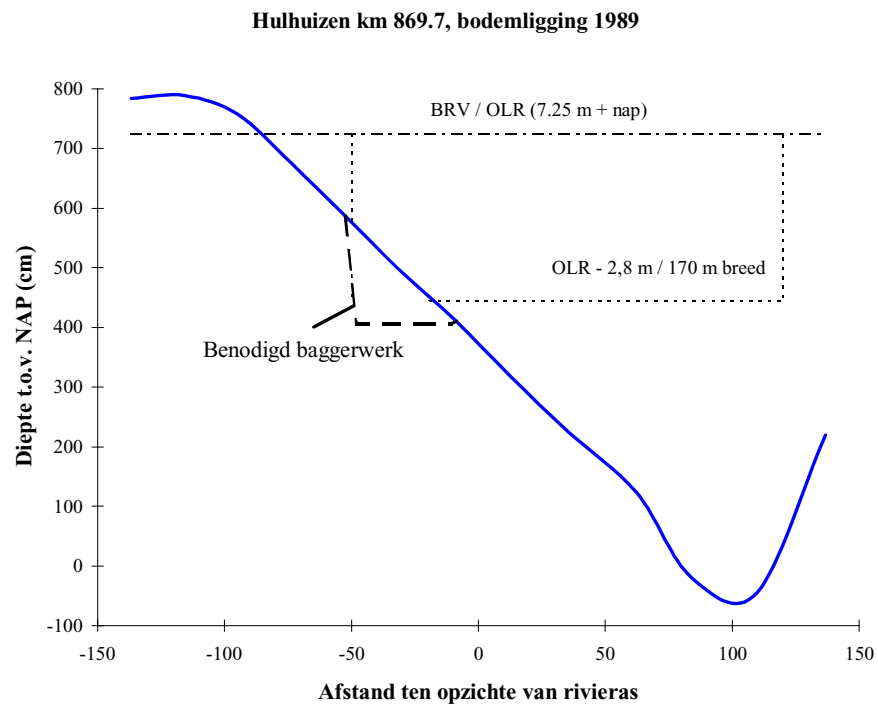


Figuur 2.1 Waalbochten: ondieptes (ondieper dan 2,80 m t.o.v. OLR is rood) in bocht Hulhuizen

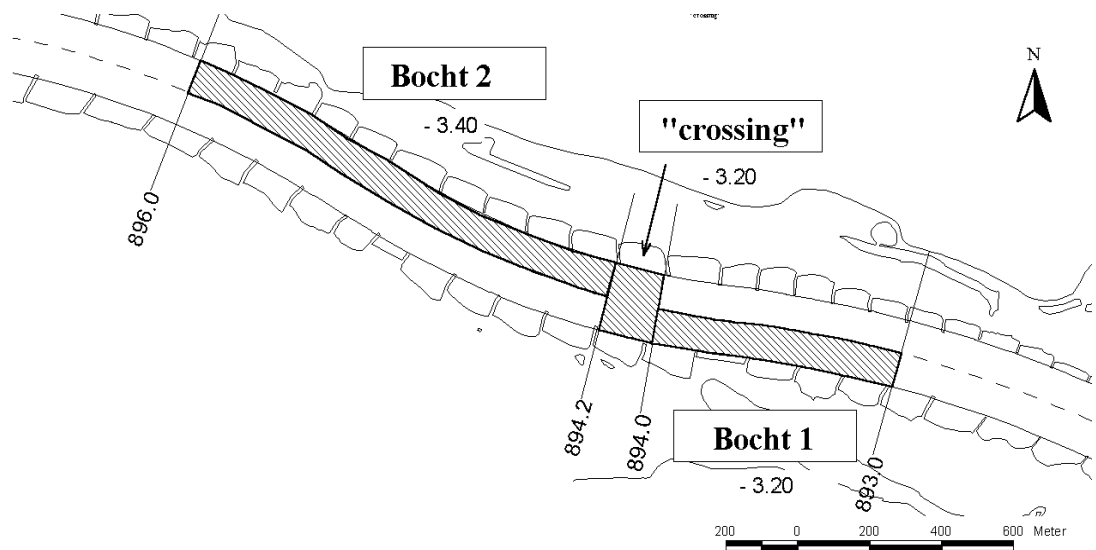


Figuur 2.2 Midden-Waal: ondieptes (ondieper dan 2,80 m t.o.v. OLR is rood) bij IJzendoorn

Een belangrijk aspect, waar later in dit rapport op teruggekomen zal worden, is het relatieve belang van de beddingvormen ten opzichte van de 2-D bodemtopografie. De orde van grootte van beddingvormen is circa 10 tot 15 % van de waterdiepte, hoewel de indruk bestaat dat deze kleiner zullen zijn op riviergedeelten waar regelmatig diepgeladen scheepvaart de bodem kan beïnvloeden. In de scherpe bochten zijn de beddingvormen van relatief ondergeschikt belang en zal de noodzaak tot baggeren vooral bepaald worden door de 2-D bodemtopografie. Op de Midden-Waal zijn de beddingvormen relatief van veel groter belang en zal het baggerwerk om te beginnen het verwijderen of afvlakken van de beddingvormen betreffen.



- (a) Verruiming binnenbocht in scherpe Waalbocht in natuurlijke staat (voorbeeld schets gebaseerd op de gemeten bodemligging, JDP, en de OLR in 1989)



- (b) Baggeren op de Midden-Waal: binnenbochten en overgangen ('crossings') (Siegfried, 2000b)

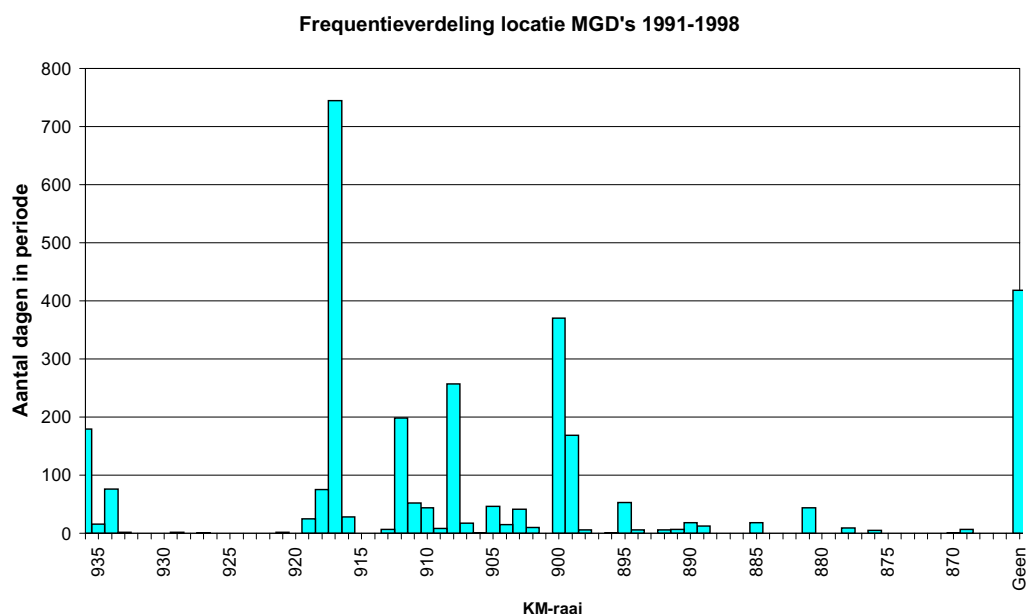
Figuur 2.3 Typische locaties van baggerwerk op de Waal

2.3 Ondersteunende metingen

Prototype metingen zijn onmisbaar omdat ze de situatie in de rivier op een bepaald moment weergeven en de basis vormen voor de voorspellingen. In het kader van baggeren op de Waal zijn in principe twee typen reguliere metingen voorzien, die in ieder geval in het BOS Baggeren gebruikt kunnen worden, namelijk:

- *oriëntatiepeilingen*: eenmalig in het voorjaar kort na het (laatste) hoogwater, welke over de gehele lengte van de Waal tussen Pannerdense Kop en Zaltbommel (of mogelijk zelfs verder benedenstrooms) en over de gehele breedte tussen de normaal lijnen wordt uitgevoerd;
- *beheerspeilingen* met een frequentie van circa twee weken, die wel over de gehele lengte van de rivier, maar slechts over een beperkte breedte worden uitgevoerd: deze breedte is circa 50 m en betreft in het algemeen het riviergedeelte waar hinderlijke ondieptes kunnen optreden.

Daarnaast worden bij waterstanden aan de peilschaal Nijmegen van 9 m + NAP (overeenkomend met een afvoer te Lobith van circa 3.200 m³/s) en lager dagelijks de zogenaamde MGD's (Minst Gepeilde Dieptes) bepaald op de verschillende riviertrajecten. Zie Figuur 2.4 voor een samenvattend overzicht van MGD's op de Midden-Waal in de periode 1991-1998. Tenslotte dienen bij dit overzicht nog de metingen genoemd te worden die in het kader van monitoringsprogramma's worden verzameld. De in dit kader meest belangrijke meetcampagne is de Proef Morfologie (Taal, 1999): zowel Siegfried (2000a en 2000b) als Schepman (2000a,b) maken van de resultaten ervan gebruik. Ook in de nabije toekomst zullen zulke monitoringsprogramma's worden uitgevoerd.



Figuur 2.4 Optreden van ondiepten op de Waal (Siegfried, 2000b, Taal, 1999)

De oriëntatie- en beheerspeilingen (en tot een bepaalde hoogte ook de peilingen in het kader van een monitoringsprogramma) verschaffen inzicht in de bodemligging op een bepaald tijdstip en kunnen gebruikt worden als uitgangspunt voor voorspellingen. Voor de beheerspeilingen geldt dat ze onder meer kunnen worden gebruikt om de momentane breedte van de vaargeul vast te stellen.

Dit is mogelijk van belang, omdat Siegfried (2000a & 2000b) een analyse van de verandering van vaargeulbreedte met de afvoer heeft uitgevoerd, en hiermede mogelijk een eerste schatting van de verandering van de geulbreedte afhankelijk van het afvoerverloop kan worden gemaakt.

Het is essentieel dat de uitgevoerde metingen zo snel mogelijk ter beschikking komen. Des te recenter de informatie over de bodemligging is, des te nauwkeuriger zal in het algemeen de voorspelling kunnen zijn.

Een ander belangrijk punt betreft het afvoerverloop. De morfologische veranderingen worden gestuurd door de waterbeweging en de waterbeweging wordt weer bepaald door de afvoer. Voor het doen van morfologische voorspellingen dient dus ook een afvoervoorspelling voorhanden te zijn. In dit rapport zal op deze afvoervoorspelling niet worden ingegaan (ook al niet omdat in het kader van het BOS Baggeren een andere parallelle studie wordt uitgevoerd die specifiek betrekking heeft op het voorspellen van de afvoer in een periode met lagere afvoeren), maar benadrukt wordt dat de nauwkeurigheid van de voorspelling van de bodemligging mede afhangt van de nauwkeurigheid van de afvoervoorspelling.

2.4 Type beslissingen

Het type beslissingen, dat in de toekomst ten aanzien van het baggeren op de Waal dient te worden genomen, wordt bepaald door twee factoren, namelijk:

- het benodigde budget;
- het verloop van de Rijnafoeren in het jaar en de daardoor veroorzaakte veranderingen in de bodemligging in de Waal.

Ter toelichting het volgende. Aan het begin van het jaar dient te worden afgewogen of in het specifieke jaar relatief veel geld moet worden uitgegeven om grootschalig (profiel) baggeren uit te voeren (omdat er een lange periode met hoge afvoeren heeft plaatsgevonden) of dat volstaan kan worden met kleinschalig (knelpunt) baggeren.

Hoge afvoeren zullen meestal optreden gedurende de winterperiode. De oriëntatiepeiling gebeurt in het algemeen pas als de afvoer minder wordt dan $3000 \text{ m}^3/\text{s}$, hetgeen pas kan gebeuren in april of zelfs later. Na de oriëntatiepeiling kan besloten worden of grootschalig (profiel)baggeren nodig is. Daarvoor is in het algemeen een waarschuwingsperiode van circa 6 weken (de tijd die het theoretisch ongeveer duurt om van $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ naar OLR te "zakken") ter beschikking.

Aanvullend op het profielbaggeren zal het ook voorafgaand en tijdens het laagwater mogelijk nodig zijn om te baggeren. In dat geval betreft het het zogenaamde knelpuntbaggeren, waarvoor een kortere reactietijd variërend van 1 dag tot circa 2 weken ter beschikking staat.

Het bovenstaande leidt dus tot drie typen beslissingen:

- vroeg in het voorjaar: anticiperen op grootschalig baggeren op de Waal;
- als de afvoer beneden 3000 m³/s zakt en een oriëntatiepeiling is uitgevoerd: waar, wanneer (afhankelijk van het voorspelde afvoerloop) en hoeveel grootschalig (profiel)baggerwerk nodig is;
- bij het naderen, bereiken en onderschrijden van OLR: waar en wanneer kleinschalig (knelpunt)baggeren nodig is.

2.5 Benodigde voorspellingen

Het voorgaande leidt tot een drietal typen voorspellingen, die in de hierna volgende hoofdstukken zullen worden aangeduid als:

- lange-termijn voorspelling (= anticiperen op profielbaggeren): termijn van 4 - 6 maanden;
- middellange-termijn voorspelling (= beslissen en voorbereiden op profielbaggeren): termijn van 1 - 2 maanden;
- korte-termijn voorspelling (= beslissen en voorbereiden van knelpuntbaggeren): termijn van enkele dagen - 2 weken.

Deze verschillende voorspellingen zullen hierna nader worden verduidelijkt.

Lange-termijn voorspelling

De lange-termijn voorspelling betreft een voorspelling om na te gaan of grootschalig profielbaggeren nodig zal zijn. Deze voorspelling gebruikt als uitgangspunt prototype metingen (beheerspeilingen- en oriëntatie-peilingen) in het voorgaande laagwaterseizoen en houdt rekening met het afvoerloop tijdens de winterperiode. Deze voorspelling dient te worden gedaan maanden nadat de laatste informatie over de bodemligging ter beschikking is gekomen. Wel kan het afgelopen afvoerloop worden gebruikt plus misschien op termijn een schatting van het afvoerloop in de volgende maanden. Op basis van een te ontwikkelen voorspellingsmethode dient te worden vastgesteld of grootschalig baggerwerk waarschijnlijk nodig zal zijn, voordat een betere schatting is verkregen met behulp van een oriëntatiepeiling.

Middellange-termijn voorspelling

De middellange-termijn voorspelling is bedoeld ter ondersteuning van de beslissing voor en de omvang van het grootschalig (profiel)baggeren. De basis voor deze voorspelling is de oriëntatiepeiling die na het (laatste) hoogwater in het voorjaar wordt uitgevoerd bij een afvoer van circa 3000 m³/s. Op basis daarvan dient, in principe per 'morfologische eenheid', een voorspelling te worden gemaakt voor de omvang van het baggerwerk, dus waar, wanneer en hoeveel dient te worden gebaggerd. De termijn waarop deze voorspelling dient te worden uitgevoerd is bedraagt 1 tot 2 maanden (een indicatie van de periode die

nodig is om van een afvoer van circa 3000 m³/s OLR te bereiken). In het algemeen zal echter met een langere voorspellingstijd rekening dienen te worden gehouden. Op middellange termijn moet ook voorspeld worden hoe de rivier zich zal herstellen van het baggerwerk en, omdat het gebaggerde materiaal in de rivier wordt teruggestort, wat er zal gebeuren met het teruggestorte materiaal.

Korte-termijn voorspelling

De korte-termijn voorspelling is bedoeld ter ondersteuning van het knelpuntbaggeren. De basis voor deze voorspelling wordt gevormd door de beheerspeilingen, eventueel in combinatie met de eerder uitgevoerde oriëntatiepeiling en de regelmatig uitgevoerde MGD peilingen. De voorspelling dient te worden uitgevoerd voor een periode variërend van enkele dagen tot twee weken. Er bestaat dan een goed inzicht in het verloop van de afvoeren in de voorspellingsperiode. Eventueel kunnen enkele varianten voor het afvoerloop worden verondersteld, maar waarschijnlijk zal dit een geringe invloed op het korte-termijn gedrag van de rivier hebben.

Op dit moment is de ervaringskennis bij de riviermeesters en bij de dienstkring, opgebouwd op basis van de vroegere situatie, maar beperkt bruikbaar. Er wordt inmiddels grootschalig gebaggerd en er wordt teruggestort, waardoor de rivier zich anders gedraagt dan in het verleden. Naarmate de termijn waarover voorspeld moet worden echter korter wordt, zal de ervaring uit het verleden bruikbaar blijken. Met name voor de zeer korte-termijn voorspelling voor riviergedeelten die al dan niet gebaggerd zijn, zal het mogelijk zijn om ook nu al de ervaringskennis van de riviermeesters in te zetten. Met het grootschalig teruggestorten van gebaggerd materiaal moet echter opnieuw ervaring worden opgebouwd. Verwacht wordt echter dat op termijn de nieuw opgedane ervaringskennis van de riviermeesters aanvullend op of misschien zelfs als alternatief voor sommige van de nog te ontwikkelen voorspellingsmethoden kan dienen.

3 Verandering natuurlijke bodemligging Waal tijdens val

3.1 Inleiding

De bodem van een rivier als de Waal bestaat uit loskorrelig materiaal, dat makkelijk wordt getransporteerd onder de invloed van het erover stromende water. De stroming in een rivier is voortdurend aan verandering onderhevig, met name door de variatie van de afvoer, maar ook door veranderingen in de bodem zelf. Er bestaat dus een gecompliceerde interactie tussen de bodem en het er overheen stromende water. De bodemtopografie van een rivier verandert dan ook voortdurend. Men spreekt van een dynamisch evenwicht wanneer de bodemligging ondanks allerlei fluctuaties gemiddeld genomen constant blijft. Op een schaal van enkele jaren kan men stellen dat de bodem van de Waal in dynamisch evenwicht is. Een goed inzicht in de verschijnselen die de fluctuaties veroorzaken is een voorwaarde voor het voorspellen van bodemveranderingen in de tijd.

In dit hoofdstuk wordt een samenvatting gegeven van hetgeen bekend is over morfologische verschijnselen in rivieren als de Waal als aanloop naar een voorspellingsmethode (zoals die in Hoofdstuk 5 zal worden besproken). De nadruk ligt op de voortplanting van de morfologische verschijnselen door de rivier en de aanpassing van de hoogte ervan in de tijd, beiden als functie van de afvoercharacteristieken. Er zijn verschillende morfologische verschijnselen te onderscheiden, die allemaal een eigen gedrag vertonen. De weg die in dit rapport gevolgd wordt, is dat deze verschijnselen elk apart worden besproken. Ook bij de ontwikkeling van voorspellingsmethoden in Hoofdstuk 5, zullen deze verschijnselen apart worden beschouwd. De uiteindelijke morfologie is uiteraard de som van al deze verschillende verschijnselen.

De Waal is een rivier met een zomerbed en met uiterwaarden die vanaf een afvoer van circa $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ een bijdrage gaan leveren aan de totale afvoer. Tussen Nijmegen en St. Andries is de rivier vrijwel recht, hoewel de Midden-Waal bij nadere beschouwing een aaneensluiting van riviergedeelten met afwisselende maar geringe kromming blijkt. Bij Nijmegen en bovenstrooms ervan en bij St. Andries bevinden zich een aantal scherpe bochten. Daarnaast is er veel scheepvaart op de rivier die ook invloed heeft op de bodemligging. Dit karakter bepaalt de van belang zijnde morfologische karakteristieken.

De indeling van dit hoofdstuk is de volgende. In Paragraaf 3.2 worden de verschillende verschijnselen kort besproken. Daarbij wordt een onderscheid gemaakt tussen verschijnselen die zijn veroorzaakt door de geometrie van de rivier (hierna te noemen de "opgedrongen" verschijnselen) en morfologische verschijnselen die zich min of meer vrij door de rivier kunnen bewegen (hierna te noemen de "vrije" verschijnselen). In de paragrafen 3.3 en 3.4 worden deze verschijnselen in meer detail behandeld. De invloed van de scheepvaart op de morfologische verschijnselen wordt apart besproken in Paragraaf 3.5.

De afsluitende paragraaf bespreekt het belang van de verschillende verschijnselen in de verschillende riviergedeelten die in Paragraaf 2.2 zijn onderscheiden.

Opgemerkt wordt dat in de Bijlagen A en B een summier overzicht is gegeven van bestaande kennis op het gebied van respectievelijk 2-D morfologische verschijnselen en beddingvormen. In dit hoofdstuk zal regelmatig verwezen worden naar deze bijlagen.

3.2 Optredende verschijnselen

Globaal kunnen morfologische verschijnselen worden verdeeld in (1) verschijnselen die opgedrongen zijn door de geometrie en die zich dus ook niet door de rivier voortplanten, en (2) verschijnselen die niet gebonden zijn aan de geometrie en daardoor in principe vrij door de rivier kunnen bewegen. Voortplanten door de rivier gebeurt in het algemeen in benedenstroomse richting. In het volgende worden de verschillende verschijnselen kort besproken, vooruitlopend op een meer kwantitatieve bespreking van de verschillende verschijnselen in de volgende paragrafen. Een overzicht van de verschillende morfologische verschijnselen en hoe ze zullen veranderen bij vallende afvoer is gegeven in Tabel 3.1.

Opgedrukt of vrij	Morfologisch verschijnsel	Verandering bij vallende afvoer
Opgedrukt (door geometrie of anderszins)	natuurlijke bochten	Kantelen axiaal-symmetrisch dwarsprofiel bochten en afmetingen van point bar
	bochten met vaste laag of grondkribben	Aanzanding benedenstrooms van binnenbocht neemt waarschijnlijk af in hoogte
	overgangen	Veranderingen van de bodemligging van de vaargeul op overgangen
	erosiekuilen bij kribben	Aanzandingen in ontgroningen bij kribkoppen
	“kribvlammen” = depositie achter (benedenstrooms) erosiekuilen bij kribvakken	Erosie van de kribvlammen, en erosie van afzettingen gevormd tijdens hoogwater vanuit kribvakken. Met als gevolg mogelijk afzettingen in het zomerbed (Vormen mogelijk een combinatie met beddingvormen, dus loslaten en voortplanting)
	hoogwaterafzettingen tijdens hoogwater (aanzandingen in zomerbed in perioden dat hoogwaterbed meestroomt)	Erosie van de aanzanding (leidt tot translatie en afvlakking van de aanzandingen)
Vrij	alternerende banken	Translatie en groei/demping van alternerende banken
	beddingvormen	Translatie en verandering afmetingen duinen (duinhoogtes en -lengtes)
	hoogwaterafzettingen tijdens laagwater	Invloed scheepvaart op bodem leidt onder meer tot afvlakken beddingvormen (opgedrukt via de vaarbaan, die een functie is van de riviergeometrie)

Tabel 3.1 Natuurlijke morfologische verschijnselen en veranderingen bij vallende afvoer

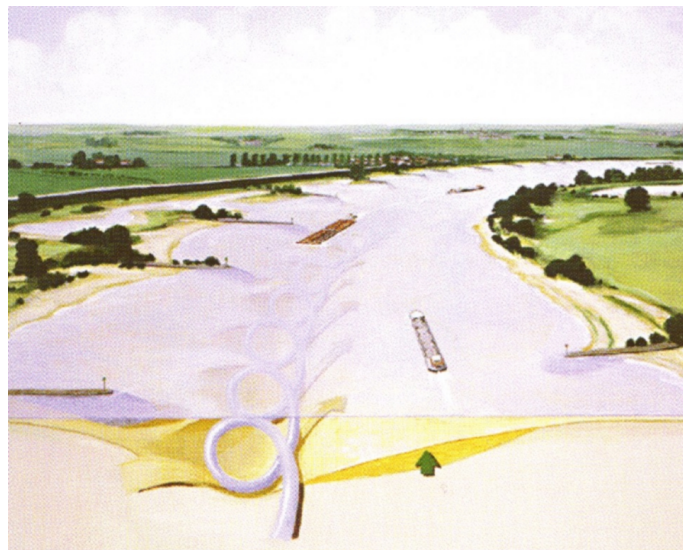
Geometrie-gebonden verschijnselen

Geometrie-gebonden verschijnselen kunnen door drie soorten invloeden opgedrongen zijn, namelijk door:

- (1) de geometrie van het zomerbed;
- (2) de geometrie van het winterbed;
- (3) de locatie van kunstwerken.

De volgende geometrie-gebonden verschijnselen kunnen worden onderscheiden:

- **Natuurlijke bochten:** In bochten, die zijn opgedrongen door de specifieke geometrie van het zomerbed, stelt zich een dwarsverhang in als gevolg van de invloed van de spiraalstroom (zie figuur 3.1). In het begin van een bocht treedt een herverdeling van de water- en sedimentverdeling over de breedte op, met als gevolg daarvan de vorming van de zogenaamde "point bar" in de binnenbocht (zie Struiksma et al, 1985). Als de bocht erg lang is of als het systeem sterk gedempt is, dan kan een axiaal-symmetrische situatie worden bereikt waarbij (bij gelijkblijvende kromming) de helling van de bocht niet meer verandert in langsrichting. De axiaal-symmetrische situatie is als het ware een theoretisch bochtprofiel dat zich instelt in een oneindig lange bocht. Hoe de dwarshelling van de bocht zich instelt is onder meer afhankelijk van de waterdiepte: als de waterdiepte afneemt, zal de dwarshelling kleiner worden. Ook de afmetingen van de point bar zullen veranderen. Dit noemt men wel eens het ademen van de bocht.



Figuur 3.1 Schets van de ontwikkeling van een bochtprofiel onder invloed van de spiraalstroming (illustratie K. Nuyten)

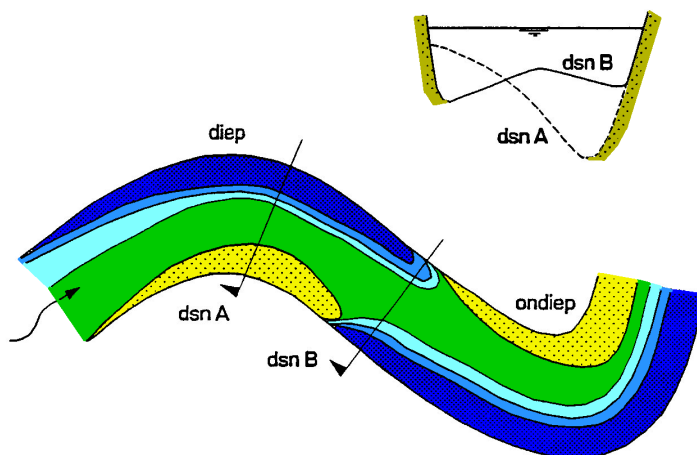
- **Bochten met vaste laag of grondkribben:** In bochten met een vaste laag of met grondkribben is de verdeling van de water- en sedimentbeweging anders dan bij natuurlijke bochten. Het bochtprofiel wordt minder steil (lagere point bar in binnenbocht), waardoor de bevaarbare breedte groter zal zijn. Het merendeel van het sediment zal door de binnenbocht worden getransporteerd (zie figuur 3.2). Als benedenstrooms van de bocht de riviergeometrie verandert in een rechtstand, dan zal aan het einde van de binnenbocht te veel sedimenttransport aanwezig zijn. Dit leidt tot een ondiepte (evenals dat in de buitenbocht, juist benedenstrooms van de vaste laag, een erosiekuil optreedt).

- Bij lager wordende afvoer zal de hoogte van deze aanzanding waarschijnlijk enigszins geringer worden, maar naar dit verschijnsel is nog niet voldoende onderzoek gedaan. Ook dit verschijnsel is geometrie-gebonden omdat het optreedt onmiddellijk benedenstrooms van een vaste laag in een bocht. Het is dus een combinatie van opgedrongen door de geometrie van het zomerbed (bocht) en van de locatie van een kunstwerk (in dit geval de vaste laag of de grondkribben).



Figuur 3.2 Schets van de maatregelen “vaste laag” (links) en “bodembribben” (rechts) (illustratie K. Nuyten)

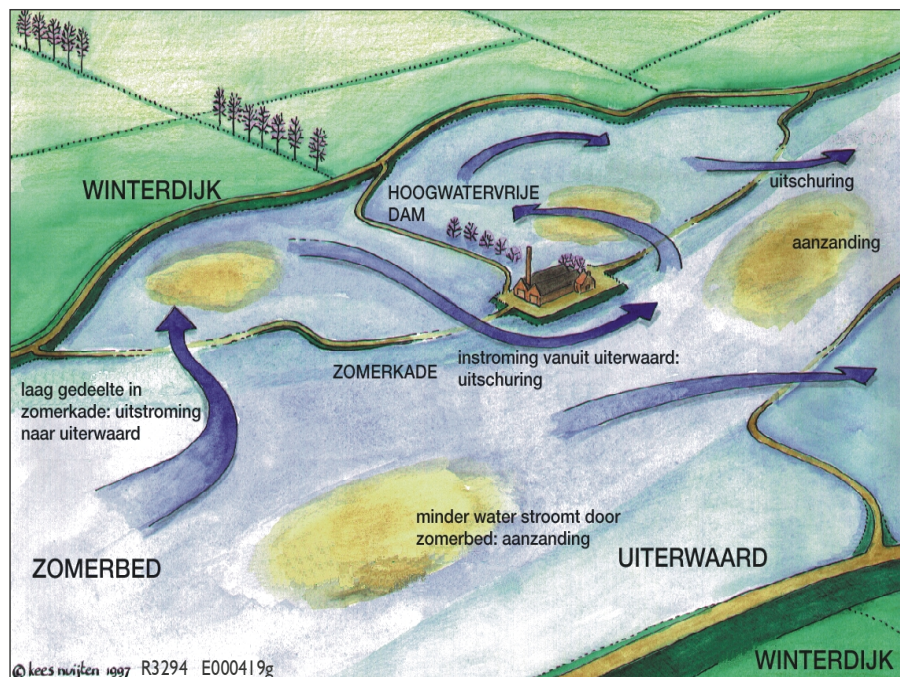
- Overgangen: Overgangen treden op wanneer de kromming van de rivier overgaat in een tegengestelde kromming (zie figuur 3.3). Overgangen zijn in lengterichting van de rivier gezien vaak de locaties met de geringste diepte. Tijdens hoogwater zanden overgangen aan, terwijl ze tijdens (de aanloop naar) laagwater weer uitschuren. De locatie van overgangen is gebonden aan de geometrie van het zomerbed en wordt enigszins beïnvloed door de variatie van de afvoer.



Figuur 3.3 Schematische weergave van bodemligging in een bocht en de overgang tussen twee bochten

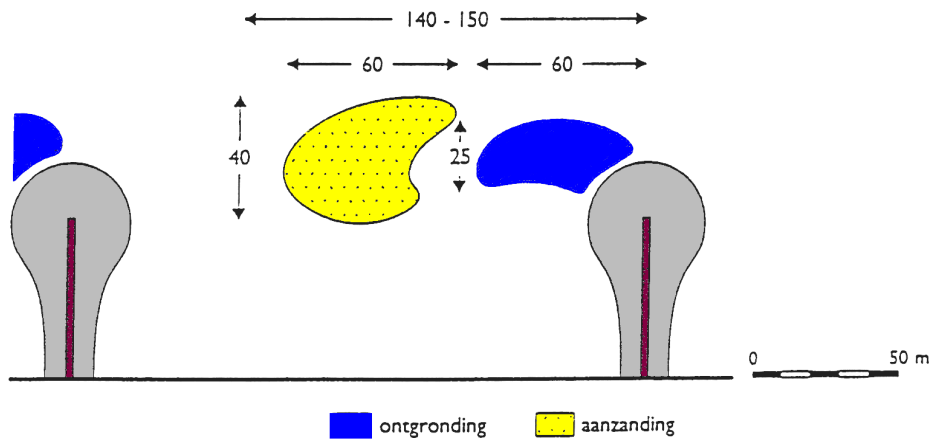
- Hoogwaterafzettingen: Tijdens hoogwater stroomt een deel van de afvoer door het winterbed. De bijdrage van het winterbed is niet uniform in langsrichting maar op sommige riviergedeelten stroomt er meer door dan op andere. Dit veroorzaakt

snelheidsvariaties in het zomerbed, met als gevolg afzettingen op de ene plek en uitschuringen op een andere plek (zie figuur 3.4). In principe zijn deze afzettingen bepaald door de geometrie van het winterbed. Daarbij is de ruwheid van het winterbed (en dus de begroeiing) een belangrijke bepalende factor. Als de uiterwaarden niet meer deelnemen aan de afvoer valt deze locatiegebondenheid weg en veranderen deze hoogwaterafzettingen in vrije morfologische verschijnselen. Zie verderop.



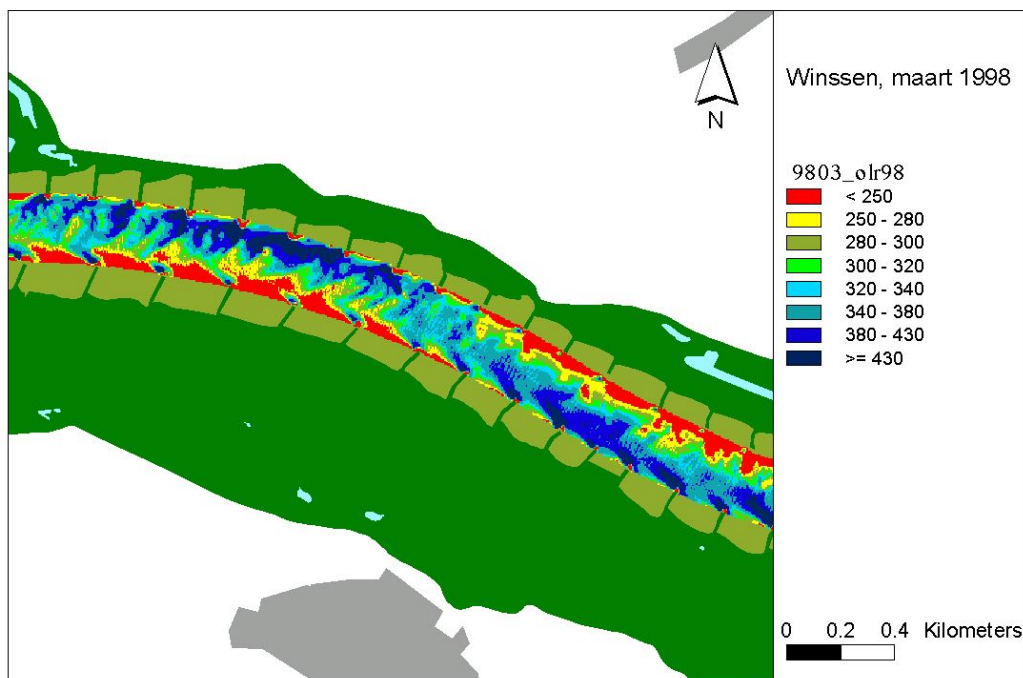
Figuur 3.4 Stromingsbeeld in de rivierbedding: drijvende kracht voor plaatselijke uitschuring en aanzanding in het zomerbed (illustratie K. Nuyten)

- Kribgaten: Als gevolg van de 3D stroming rond de kribkoppen en de door de krib gegenereerde extra turbulentie treden nabij kribben grote erosiekuilen op (zie figuur 3.5). De diepte van deze kribgaten is een functie van de geometrie van de krib en (lineair) van de lokale waterdiepte. Dit houdt in dat de diepte van de gaten tijdens de aanloop naar laagwater afneemt, omdat door de val van het water ook de lokale waterdiepte afneemt. De locatie van de kribgaten is vooral afhankelijk van de locatie van de kribben, maar varieert enigszins met de afvoer.



Figuur 3.5 Schematische weergave van ontgraving en aanzanding bij kribkoppen. Tevens zijn enkele kenmerkende dimensies (in meters) aangegeven.

- Depositie benedenstrooms van kribgaten (kribvlammen): Het uit de kribgaten en kribvakken geërodeerde sediment komt deels net benedenstrooms van deze gaten weer tot afzetting waar de langs de kribben geconcentreerde stroomlijnen weer uitbuigen. Het vormt daar typische aanzandingspatronen die ook wel worden aangeduid met de term "kribvlammen" omdat deze in de bewerkte oriëntatie- en beheerspeilingen (waarin dieptes kleiner dan 2,80 m t.o.v. OLR zijn aangegeven) het beeld van vlammen oproept. Een voorbeeld hiervan is gegeven in figuur 3.6. Tijdens de val zullen deze afzettingen in hoogte afnemen. De locatie van deze afzettingen wordt bepaald door de locatie van de kribben.



Figuur 3.6 "Kribvlammen" (ondieptes gerelateerd aan kribvakken) zichtbaar in bewerkte oriëntatiepeiling.

- Erosie van kribvakken: Tijdens hoogwater vindt aanzanding plaats binnen de kribvakken. Wanneer de afvoer weer daalt tot beneden het niveau waarbij de kribben worden overstroomd wordt er netto sediment vanuit de kribvakken naar de hoofdgeul afgevoerd. Dit verschijnsel wordt nog eens versterkt door de scheepvaart (zie Paragraaf 3.5). De erosie vanuit de kribvakken leidt tot extra sediment dat naar het zomerbed wordt afgevoerd en daar tot afzettingen aanleiding kan geven. Deze afzettingen zijn moeilijk te onderscheiden van de aanzandingen benedenstrooms van de kribgaten. Deze verschijnselen zijn sterk aan de locatie van de kribvakken gebonden.

Vrij-bewegende morfologische verschijnselen

De volgende vrij-bewegende morfologische verschijnselen kunnen worden onderscheiden in een rivier:

- Hoogwaterafzettingen: Wanneer de afvoer weer beneden het afvoerniveau komt waarbij de uiterwaarden zijn overstroomd, zal de geometrie-gebondenheid van de hoogwaterafzettingen wegvallen. Ze gaan zich dan gedragen als vrije verschijnselen. In de volgende laagwaterperiode zullen ze zich gaan voortplanten (met een voortplantingssnelheid, die afhankelijk is van hun vorm, zie hierna) en tijdens deze translatie zullen ze in hoogte afnemen;
- Alternierende banken: In relatief rechte riviergedeelten met voldoende grote breedte-diepte-verhouding kunnen alternierende banken optreden. In de Midden-Waal zijn deze nog nooit waargenomen, maar de lineaire stabiliteitsanalyses door Struiksma et al (1994) en Lambeek en Mosselman (1998; zie ook Schoor en Sorber, 1998, en Schoor et al, 1999) suggereren dat ze in rechte trajecten eventueel toch voor kunnen komen. In bochtige trajecten wordt de vorming van alternierende banken onderdrukt;
- Beddingvormen: Beddingvormen in de Waal bestaan uit grote duinen waarop kleinere duinen gesuperponeerd zijn. Duinen zijn positief gecorreleerd met de waterdiepte. Bij afnemende waterdiepte zal ook de duinhoogte afnemen.

Scheepvaart

De scheepvaart heeft waarschijnlijk een niet te verwaarlozen invloed op de morfologie van de Waal. Tenminste de volgende verschijnselen zijn waarschijnlijk van belang:

- retourstroom onder het schip, die een afvlakkende werking op beddingvormen zal hebben;
- schroefstraal, die een soortgelijke invloed zal hebben, en tevens voor diffusie in dwarsrichting en dus vermindering van de bodemliggingsverschillen in dwarsrichting zal zorgen;
- geïnduceerde waterbeweging in het kribvak, die tot erosie van afzettingen in het kribvak leidt.

Naar verwachting zal de invloed van de scheepvaart op de bodem toenemen naarmate de afvoer lager is. Niet zeker is of dit ook het geval is voor de erosie van de kribvakken. De invloed van de scheepvaart wordt bepaald door de vaarbaan, die op zichzelf weer een functie is van de geometrie van het zomerbed. De invloed van de scheepvaart is dus via een omweg een door de geometrie bepaald en dus opgedrongen verschijnsel.



Figuur 3.7 Scheepvaart op de Waal

3.3 Opgedrongen verschijnselen

3.3.1 Inleiding

In de voorgaande paragraaf is in kwalitatieve zin aangegeven welke morfologische verschijnselen van belang zijn in de Waal. Voor een aantal van de genoemde verschijnselen is ook meer kwantitatieve informatie beschikbaar, die het mogelijk maakt zowel voortplanting van de verschijnselen als de tijdschaal van groei dan wel demping af te schatten. Met nadruk wordt hier de term "afschatten" gebruikt, omdat de te gebruiken formules veelal gebaseerd zijn op vereenvoudigingen en meestal niet uitgebreid zijn getoetst. Toch kan hetgeen bekend is een eerste indruk geven en bijvoorbeeld gebruikt worden om na te gaan of een bepaald verschijnsel van belang is, dan wel verwaarloosd kan worden in vergelijking met andere verschijnselen. Waar geen kwantitatieve informatie voorhanden is, wordt aangegeven hoe eventueel tot een meer kwantitatieve voorspeller gekomen zou kunnen worden. Daarvoor is in het algemeen veel onderzoek nodig.

De informatie wordt hier behandeld per soort verschijnsel. Bijlage A geeft meer informatie over herkomst van de hier te gebruiken methoden voor 2-D morfologische verschijnselen, terwijl Bijlage B meer details geeft over hetgeen bekend is over beddingvormen. Voor meer details wordt verwezen naar de relevante literatuur (zie ook literatuurlijst in dit rapport).

3.3.2 Bodemligging opgedrongen door geometrie zomerbed

Morfologische verschijnselen die zijn opgedrongen door de geometrie van het zomerbed zijn:

- bochten
- overgangen

Bochten

In bochten zal een aanpassing (in de ruimte) van water- en sedimentverdeling plaatsvinden, die bij zeer lange bochten en/of sterke demping (en gelijkblijvende bochtstraal) tot een axiaal-symmetrische situatie zal leiden. De dwarshelling voor een axiaal-symmetrische situatie wordt gegeven door (zie Bijlage A):

$$\tan \beta = A f(\theta_0) \frac{h_0}{R} \quad (3.1)$$

waarin:

- β = helling in dwarsrichting (-)
- A = spiraalstromingscoëfficiënt (-); afhankelijk van de hydraulische ruwheid geldt voor de Waal $A \approx 10$
- h_0 = waterdiepte op de rivieras (m)
- R = kromtestraal (m)
- $f(\theta_0)$ = dwarshellingseffect, gedefinieerd via:

$$f(\theta_0) = 9 \left(\frac{D}{h_0} \right)^{0.3} \sqrt{\theta_0} \quad (3.2)$$

met:

- D = korreldiameter (voor de Midden-Waal $D \approx 1$ mm)
- θ_0 = Shieldsparameter op de rivieras, gedefinieerd via:

$$\theta_0 = \frac{h_0 i}{\Delta D} \quad (3.3)$$

waarin:

- Δ = relatieve dichtheid (-), gedefinieerd via $\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$
- ρ_s = soortelijke dichtheid sediment (kg/m^3)
- ρ = soortelijke dichtheid water (kg/m^3)

Voor Δ wordt veelal een waarde van 1,65 aangehouden.

Bij aanname van een cosinus-vorm van het dwarsprofiel in dwarsrichting en met gebruik van de kromming in plaats van de kromtestraal kan vergelijking (3.1) ook geschreven worden als:

$$\frac{H_0}{B} = \frac{A}{\pi} f(\theta_0) h_0 \hat{\Gamma} \quad (3.4)$$

waarin:

- H_0 = amplitude axiaal-symmetrisch dwarsprofiel (m)
- B = normaalbreedte, breedte van het zomerbed (m)
- $\hat{\Gamma}$ = krommingsamplitude van de rivier (apex) (m^{-1})

Dit is de vorm die in Bijlage A wordt gegeven.

Zoals uit vergelijking (3.1) in combinatie met vergelijking (3.2) blijkt, is voor gegeven geometrie, bodemmateriaal en bodemruwheid (R , D en C bekend) de axiaal-symmetrische oplossing alleen nog een functie van $h_0^{1,2}$. Dit betekent dat de dwarsprofielen flauwer zouden moeten worden bij lagere afvoer.

In de Waal is niet alleen de axiaal-symmetrische dwarshelling van belang maar moet ook het niet-uniforme verloop van de kromming in de beschouwingen worden betrokken. Deze variaties leiden tot een bankenpatroon dat gesuperponeerd gedacht kan worden op de bodemtopografie die volgt uit axiaal-symmetrische dwarshellingen. In de context van dit rapport worden deze extra banken “point bars” genoemd, hoewel deze term in de geomorfologische traditie ook van toepassing is op het ondiepe deel van het axiaal-symmetrische dwarsprofiel.

De vorm van de point bar wordt bepaald door de interactie tussen de dempingslengte van het water en van het sediment. Twee parameters bepalen de vorm van de point bar, namelijk L_p en L_D , respectievelijk de golflengte en de dempingslengte van de point bar. De grootte van de beide karakteristieke lengten kan worden afgeleid uit de volgende twee vergelijkingen (zie Bijlage A):

$$2\pi \frac{\lambda_w}{L_p} = \frac{1}{2} \sqrt{(n+1)IP^{-1} - IP^{-2} - \left(\frac{n-3}{2}\right)^2} \quad (3.5)$$

$$\frac{\lambda_w}{L_D} = \frac{1}{2} \left(IP^{-1} - \frac{n-3}{2} \right) \quad (3.6)$$

waarin:

L_p = golflengte van de point bar (m)

L_D = dempingslengte van de point bar (m) (damping voor positieve waarden)

n = graad van niet-lineariteit van het transport met de watersnelheid

λ_w = aanpassingslengte waterbeweging (m), gedefinieerd via

$$\lambda_w = \frac{C^2 h_0}{2g} \quad (3.7)$$

C = Chézy coëfficiënt voor hydraulische ruwheid ($m^{1/2}/s$)

g = versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)

λ_s = aanpassingslengte bodemverstoring (m), gedefinieerd via

$$\lambda_s = \frac{1}{\pi^2} \left(\frac{B}{h_0} \right)^2 f(\theta_0) h_0 \approx \left(\frac{B}{h_0} \right)^2 \left(\frac{D}{h_0} \right)^{0.3} f(\theta_0) h_0 \quad (3.8)$$

IP = interactieparameter (-), gedefinieerd via:

$$IP = \frac{\lambda_s}{\lambda_w} \approx 2 \frac{g}{C^2} \left(\frac{B}{h_o} \right)^2 \left(\frac{D}{h_o} \right)^{0.3} \sqrt{\theta_o} \quad (3.9)$$

De vorming van de point bar wordt, zoals ook uit bovenstaande definitie blijkt, sterk beïnvloed door de breedte-diepte verhouding van de rivier, die bij afnemende afvoer zal toenemen. Het is dus mogelijk dat de afname van het (axiaal-symmetrische) dwarsverhang gedeeltelijk wordt gecompenseerd door de toename van de hoogte van de point bar.

De topografie in bochten is bepaald door de geometrie van het zomerbed en zal dus niet voortplanten. Wel is er een typische tijdsschaal voor de aanpassing van de bodemtopografie in bochten, die gegeven is via (zie Bijlage A):

$$T = -T_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{(n-1)k'^2}{1+k'^2} IP \right)^{-1} \quad (3.10)$$

waarin:

T = tijdschaal voor damping van 2-D processen (s) (negatief vanwege damping)

T_0 = tijdschaal 1-D processen bij lengte λ_s (s), gedefinieerd via $T_0 = \lambda_s h_o / s_o$

k' = $2\pi\lambda_w/L_p$

L_p = golflengte van de bochten (voor de Midden-Waal $L_p > 5000$ m)

Overgangen

Op de overgangen tussen twee bochten zal tijdens laagwater enige uitschuring kunnen optreden ten opzichte van de gemiddelde bodemligging. Bij hoogwater is dit andersom. Dit wordt veroorzaakt doordat de over de breedte van een rivier gemiddelde bodemschuifspanning op een overgang iets groter is dan in een bocht bij laagwater (bij hoogwater is dit andersom). Hierdoor ontstaan er gradiënten in het sedimenttransport. Voor laagwater is dit verschijnsel te vergelijken met een geringe versmalling op de overgangen. Dit geval is behandeld door Klaassen en Struiksmā (1988). De tijdschaal, die hiervoor geldt:

$$T_{ov} = \frac{L_{ov}}{c} \quad (3.11)$$

waarin:

T_{ov} = tijdschaal (s)

L_{ov} = lengte overgang voor Midden-Waal (m)

c = voortplantingssnelheid 1-D bodemverstoring (m/s), gedefinieerd via:

$$c = \frac{ns_o}{h_o(1 - Fr_o)} \quad (3.12)$$

met:

Fr_o = Froude-getal (-), gedefinieerd via:

$$Fr_0 = \frac{u_0}{\sqrt{gh_0}} \quad (3.13)$$

s_0 = sedimenttransport per eenheid van breedte (m^2/s)

u_0 = 'gemiddelde' stroomsnelheid (m/s)

Om deze tijdschaal af te schatten, dient een typische lengte voor de overgangen op de Waal te worden gekozen. Voorshands lijkt een lengte van 500 m redelijk.

3.3.3 Bodemligging opgedrongen door geometrie hoogwaterbed

De hoogte van afzettingen in het zomerbed als gevolg van de variatie in bijdrage van het winterbed bij hoogwaters is sterk afhankelijk van de lokale omstandigheden. Het gaat hier om sterk twee- en driedimensionale verschijnselen. Door Sieben (1999) is een methode opgesteld om deze afzettingen af te schatten.

Deze methode kan waarschijnlijk gebruikt worden om tijdens een hoogwater of kort erna een eerste schatting te maken van de mate waarin hoogwaterafzettingen zullen zijn opgetreden.

Als de rivier zich weer terugtrekt in het zomerbed zullen de hoogwaterafzettingen zich gaan gedragen als vrije verschijnselen. Voor meer informatie zie Paragraaf 3.4.

3.3.4 Bodemligging opgedrongen door kribben en kribvakken

De morfologie nabij kribben wordt beïnvloed door een drietal verschijnselen, namelijk:

- erosie bij kribkoppen;
- aanzandingen benedenstrooms van de erosiegaten;
- nalevering vanuit kribvakken.

Erosie bij kribkoppen

De diepte van erosiekuilen bij gegeven kribgeometrie wordt in zeer sterk geschematiseerde vorm gerelateerd aan de lokale waterdiepte. In formule vorm:

$$h_s = K h \quad (3.14)$$

waarin:

h_s = uitschuringsdiepte onder oorspronkelijke bodemligging (m)

K = coëfficiënt (-), waarmee de invloed van de geometrie van de krib wordt verrekend

h = lokale, oorspronkelijke waterdiepte (m).

Informatie over de waarde van K is te vinden in de literatuur. Zie bijvoorbeeld Joglekar (1971) of Hoffmans en Verhey (1998). De waarde van K kan uit metingen worden afgeleid.

De inhoud van het ontgrondingsgat, aannemende dat de hellingen van de ontgrondingskuil geen functie zijn van de afvoer, wordt geschaald met h_s^3 .

Aanzandingen benedenstrooms van de erosiegaten

De aanzandingen benedenstrooms van de kribgaten zijn voor de scheepvaart belangrijker dan de erosiekuilen. Omdat deze afzettingen mogelijk sterk zijn gerelateerd aan erosie van de kribgaten tijdens hoogwater wordt als ruwe schatting gesteld dat de omvang van de afzetting een functie is van de inhoud van de erosiekuil tijdens hoogwater minus de resterende inhoud van de erosiekuil tijdens de laagwaterperiode. Er voorlopig van uitgaande dat ook de vorm van de afzetting geometrisch schaalt en dat de afvlakking geen rol speelt, leidt dit tot de volgende uitdrukking voor de hoogte van de aanzandingen benedenstrooms van de kribgaten:

$$\Delta h_{ak}(t) :: (h_{sm}^3 - h_s(t)^3)^{1/3} \quad (3.15)$$

waarin:

- $\Delta h_{ak}(t)$ = hoogte aanzanding benedenstrooms van kribgaten op tijdstip t (m)
- h_{sm} = maximale lokale uitschuringsdiepte tijdens voorgaande hoogwater (m)
- $h_s(t)$ = uitschuringsdiepte op tijdstip t (m)

In deze vergelijking is aangenomen dat er geen na-ijleffecten optreden in de relatie tussen de uitschuring en in de kuil en de aanzanding benedenstrooms.

Door combinatie met vergelijking (3.14), kan dit ook worden geschreven als:

$$\Delta h_{ak}(t) = K_{ak} (h_m^3 - h(t)^3)^{1/3} \quad (3.16)$$

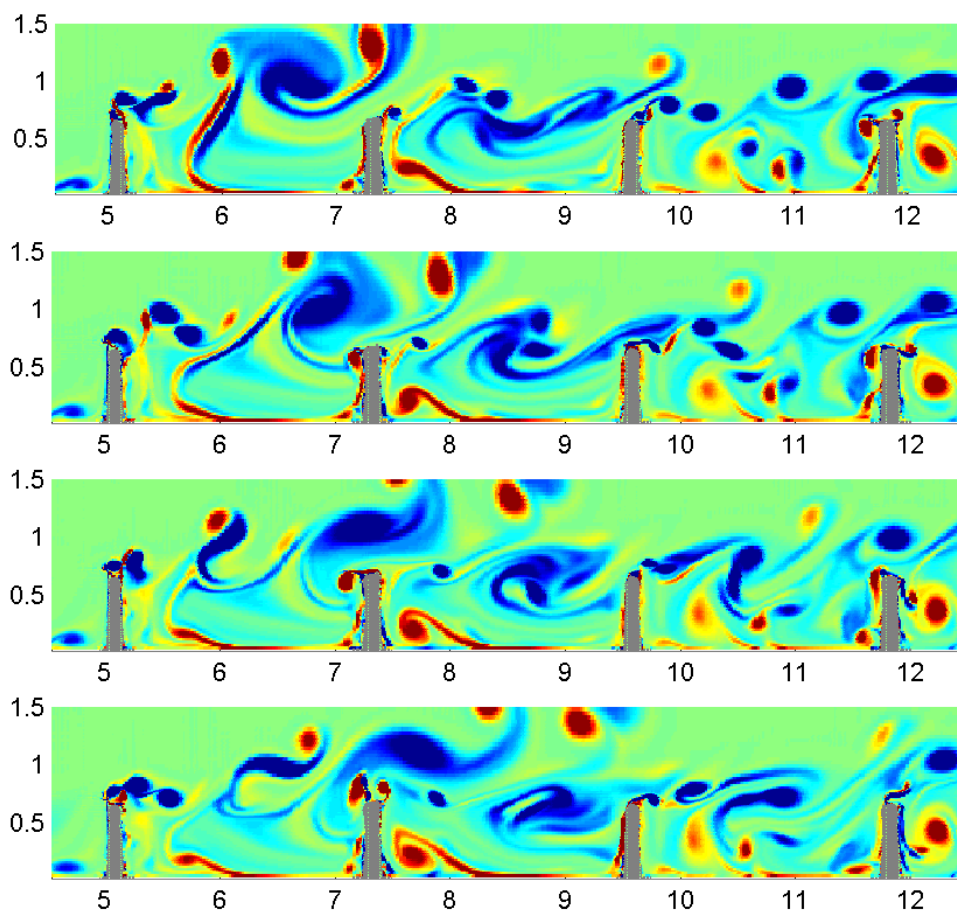
waarin:

- h_m = maximale lokale waterdiepte zonder uitschuring tijdens voorgaand hoogwater (m)
- $h(t)$ = lokale waterdiepte zonder uitschuring op tijdstip t (m)
- K_{ak} = vormfactor (-), waarvan de waarde empirisch vastgesteld dient te worden.

Het is interessant om op te merken dat volgens deze vergelijking de hinder door deze "kribvlammen" groter is, naarmate de afvoer in de hoogwaterperiode groter is geweest. Bij meerdere toppen wordt het morfologisch verschijnsel ingewikkelder, omdat dan de erosiegaten meerdere keren zijn "geleegd en gevuld". Tevens wordt opgemerkt dat de factor K_{ak} waarschijnlijk kleiner wordt bij hogere topafvoeren in verband met niet-lineaire verschijnselen.

Daarnaast is in deze aanpak niet direct rekening gehouden met de effecten van het ontbreken van de oeverlijnen ter plaatse van de kribvakken (bijvoorbeeld uit te drukken als een functie van de afstand tussen de kribben), hoewel deze effecten indirect de waarde van K zullen beïnvloeden. Door de kribben worden lokaal de stroomlijnen samengedrukt, en ontstaan horizontale turbulentiestructuren die achter de kribben verder tot ontwikkeling komen en uitwaaiëren door het ontbreken van een oeverbegrenzing (er ontstaat een soort wervelstraat). Met deze wervels wordt het geërodeerde materiaal uit de erosiekuilen getransporteerd (deze hebben namelijk een hogere transportcapaciteit), en wordt het afgezet waar de wervels uitwaaiëren en hun capaciteit verliezen. In figuur 3.8 is met behulp van de vorticeit (een

maat voor de sterkte van de rotatie van een stromingsdeeltje) aangegeven hoe in een simulatie deze wervelstructuren tot ontwikkeling komen.



Figuur 3.8 Bovenaanzicht van de vorticeit in vier achtereenvolgende momenten van gesimuleerde horizontale wervelstructuren bij kribben in een schaalmodel. De wervels zijn berekend met behulp van LES (large eddy simulation) in Delft3D. Horizontale en verticale assen geven relatieve afstanden in meters (in het schaalmodel) aan.

De invloed van deze wervels op de kribvlammen zal samen hangen met de effectiviteit van de kribben (zijn ze bijvoorbeeld niet achterloops), de grootte van de wervels die ze genereren, en de lengte van het kribvak waarbinnen ze uit kunnen waaiëren. De invloed van het ontbreken of aanwezig zijn van de oeverbelijning is duidelijk zichtbaar op locaties waar de kribsecties overgaan in een gestrekte oever. Een voorbeeld hiervan, met de bijbehorende bodemligging, is gepresenteerd in figuur 3.9. Het sterk “gevlamde” karakter nabij de kribsecties verandert in een rustiger bodemverloop. Ondieptes zichtbaar langs de gestrekte oever aan de linkeroever (bijvoorbeeld km 913.8 in figuur 3.9) zijn hoogst waarschijnlijk afkomstig van de bovenstrooms gelegen kribvlammen. De aanzanding benedenstrooms van de kribben zal zich namelijk tijdens de val van het hoogwater en in de daarop volgende periode met lagere afvoeren door het riviersysteem gaan voortplanten en tegelijkertijd afvlakken, min of meer analoog aan hoogwaterafzettingen. Zie verder paragraaf 3.4.2.



Figuur 3.9 Overgangen tussen kribvakken en gestrekte oevers bij Tiel (Schepman, 2000b).

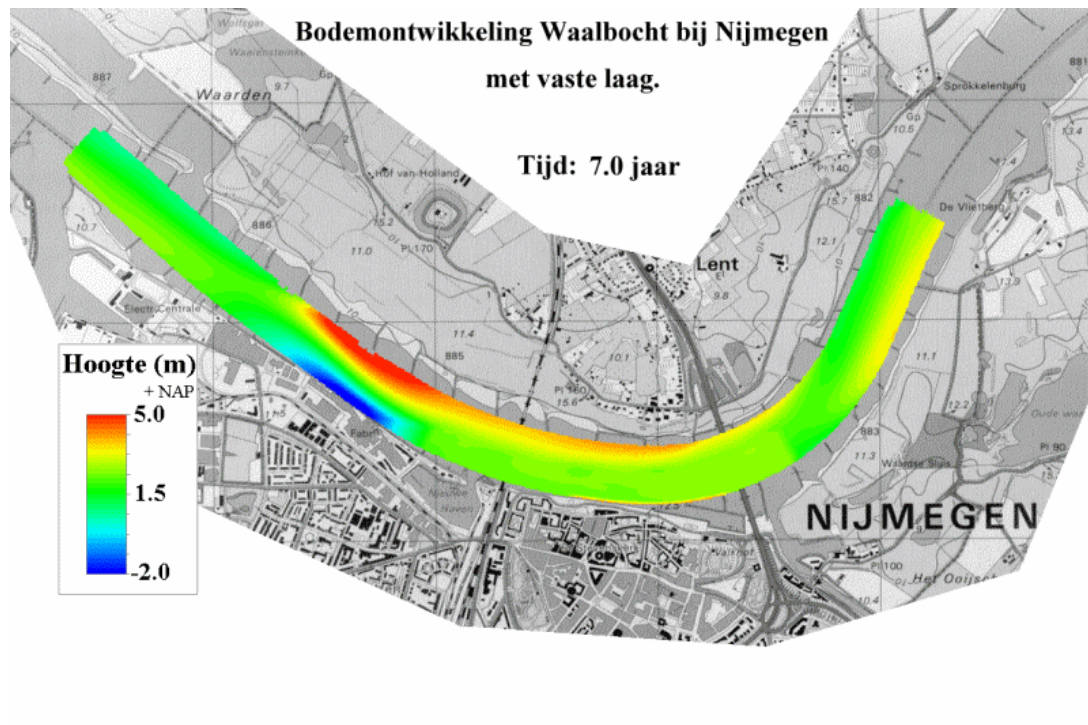
Nader onderzoek is noodzakelijk om meer inzicht te krijgen in de processen die de grootte en diepte van kribvlammen bepalen, en parameters die nodig zijn om deze fenomenen nauwkeuriger te kunnen voorspellen.

Erosie van afzettingen in kribvakken

Het sediment dat bij hoogwater afgezet is in de kribvakken, zal bij lagere afvoeren weer langzaam naar het zomerbed worden afgevoerd. Over dit proces onder natuurlijke omstandigheden is weinig bekend, en zal samenhangen met de circulatie en de wervelstructuur die ontstaat in het kribvak (zoals geïllustreerd in figuur 3.3). Tegenwoordig zal het erosieproces worden versneld door de invloed van langsvarende scheepvaart. Zie verder paragraaf 3.5.

3.3.5 Vaste lagen in de Waal

Doordat de vaste laag de waterbeweging en de sedimentbeweging in dwarsrichting op zodanige wijze verstoort dat direct benedenstrooms langs de oever waar de vaste laag is aangelegd een verdieping ontstaat met langs de andere oever een bank (zie figuur 3.10), zal in benedenstroomse richting een gedempt 2-D golvend patroon in de bodem kunnen worden waargenomen. Dit patroon is gesuperponeerd op de oorspronkelijke bodemligging. Deze bodemvervorming is plaatsgebonden en de golf- en dempingslengten kunnen worden gevonden uit vergelijkingen (3.5) en (3.6). Een nadere analyse van het gedrag van deze verstoring is nog niet uitgevoerd, maar lijkt gewenst (zie Paragraaf 6.4).



Figuur 3.10 Berekende ontwikkeling vaste laag bij Nijmegen met verondieping en verdieping benedenstrooms van de laag (Wolters, 1998)

3.4 Vrije verschijnselen

3.4.1 Inleiding

Analoog aan wat in de voorgaande paragraaf is opgenomen over opgedrongen morfologische verschijnselen, wordt in deze paragraaf een overzicht gegeven van hetgeen bekend is over morfologische verschijnselen die zich vrij kunnen bewegen door het riviersysteem. Het betreft:

- hoogwaterafzettingen (tijdens de er op volgende val naar de laagwaterperiode);
- alternerende banken;
- beddingvormen.

De behandeling in deze paragraaf zal zich toespitsen op methoden om zowel de voortplanting van de verschijnselen als de tijdschaal van groei dan wel demping af te schatten.

Met name de in de hoofdstuk opgenomen informatie over beddingvormen is summier, maar voor meer informatie wordt verwezen naar Bijlage B.

3.4.2 Hoogwaterafzettingen

Als de afvoer weer zodanig lager is geworden dat er geen stroming meer over de uiterwaarden is, zullen de hoogwaterafzettingen zich gaan gedragen als vrijbewegende morfologische verschijnselen. In Bijlage A wordt aannemelijk gemaakt dat afhankelijk van de 2-D vorm van de afzettingen en van de opeenvolging in langsrichting van afzettingen en eraan gerelateerde uitschuringen, de voortplantingssnelheid van de afzettingen bepaald wordt door hetzij de 2-D voortplantingssnelheid, hetzij de 1-D voortplantingssnelheid van morfologische verschijnselen. Alleen als een puur 1-D schematisatie van toepassing is kan de voortplanting worden bepaald met vergelijking (3.12) tenzij het volume groot is. Is de afzetting duidelijk 2-D, hetgeen waarschijnlijk het geval is bij hoogwaterafzettingen, dan wordt de voortplantingssnelheid (zie Bijlage A):

$$c_r = \left(\frac{s_0}{h_0} \right) \frac{k'^2 - \left(\frac{n-3}{2} \right)}{k'^2 + 1} \quad (3.17)$$

waarin:

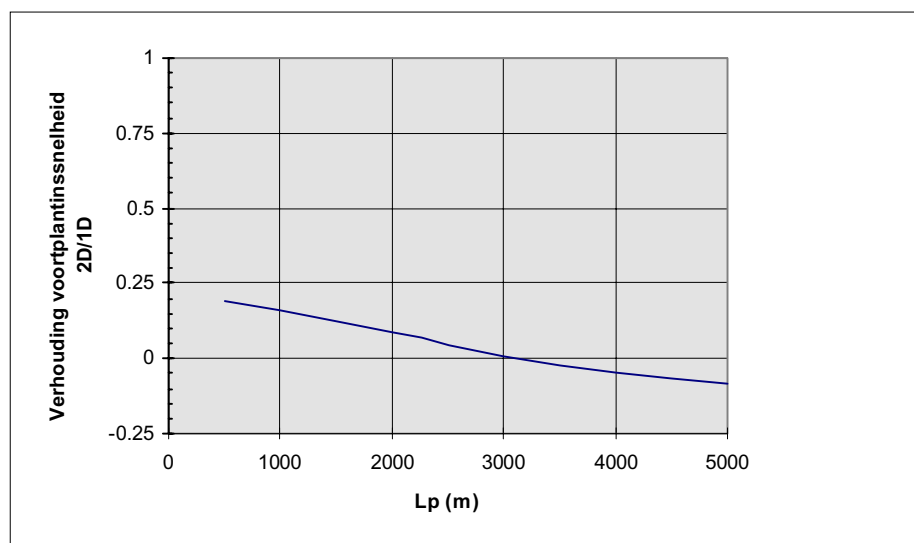
c_r = 2-D voortplantingssnelheid

k' = $2\pi\lambda_w/L_p$

n = graad van niet-lineariteit van het transport met de watersnelheid

L_p = karakteristieke golflengte van de afzetting

Voor kleine waarden van L_p levert dit een relatief grote voortplantingssnelheid op. Naarmate de afzetting langer wordt neemt de voortplantingssnelheid nog meer af. De hier berekende 2-D voortplantingssnelheid is veel kleiner dan de 1-D voortplantingssnelheid die berekend kan worden met vergelijking (3.12). Figuur 3.11 geeft de verhouding van de 1-D en 2-D voortplantingssnelheden voor een geval met $\lambda_w = 500$ m en $n = 5$. Bij grotere waarden voor L_p wordt de 2-D voortplanting steeds kleiner en kan, althans volgens deze benadering, zelfs negatief worden.

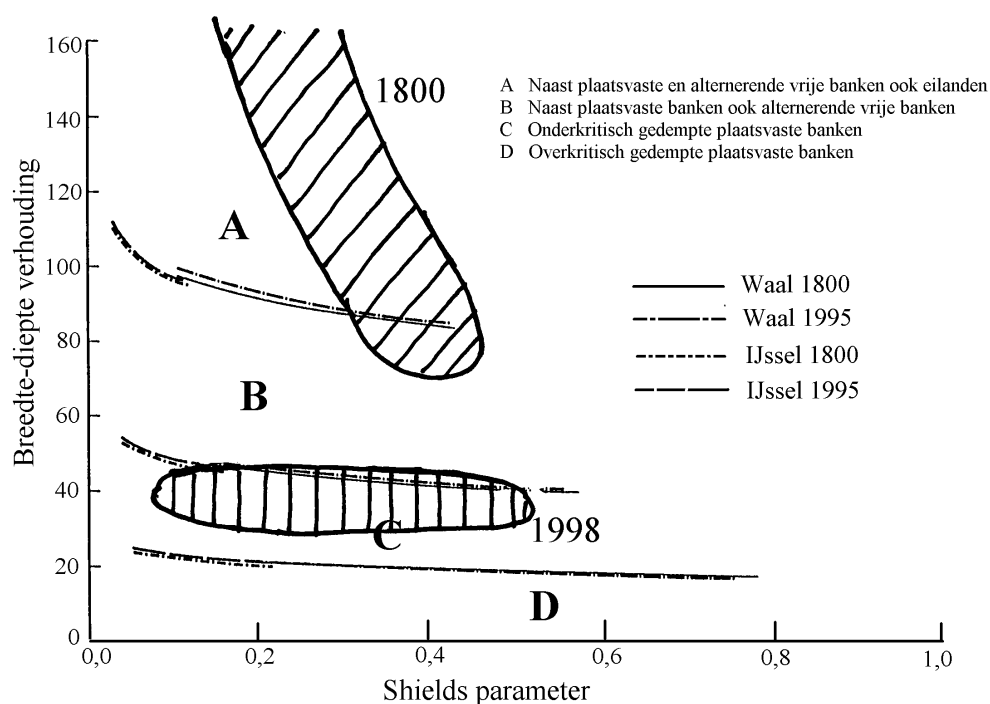


Figuur 3.11 Verhouding tussen 2-D en 1-D voortplantingssnelheid (met $\lambda_w = 500$ m en $n = 5$)

3.4.3 Alternierende banken

In relatief rechte riviergedeelten met voldoende grote breedte-diepteverhouding kunnen alternierende banken optreden. In de Midden-Waal zijn deze nog nooit waargenomen, maar de lineaire stabiliteitsanalyses door Struiksma et al (1994) en Lambeek en Mosselman (1998; zie ook Schoor en Sorber, 1998, en Schoor et al, 1999) suggereren dat ze in rechte trajecten eventueel toch voor kunnen komen. In bochtige trajecten wordt de vorming van alternierende banken onderdrukt.

Struiksma et al (1994) nemen in hun analyse een rechthoekig dwarsprofiel aan en vinden zo voor alternierende banken geschikte omstandigheden bij zeer lage afvoeren. De groeisnelheid is dan echter gering, zodat de banken nauwelijks de tijd krijgen om goed en wel tot ontwikkeling te komen voordat ze bij hogere afvoeren weer worden uitgevlakt. Lambeek en Mosselman (1998) gebruiken in hun analyse de in het eendimensionale Rijntakkenmodel (SOBEK) gehanteerde dwarsprofielen en vinden zo juist bij hogere afvoeren plaatselijk geschikte omstandigheden, omdat deze dwarsprofielen bij lage afvoeren een geringere breedte-diepteverhouding hebben dan rechthoekige dwarsprofielen. Dit is te zien in Figuur 3.12, waar in de Waal voorkomende combinaties van Shieldsparameter en breedte-diepteverhouding zijn uitgezet in zones van verschillend morfologisch gedrag. Daaruit blijkt dat de parametercombinaties voor sommige locaties bij hogere afvoeren vallen in zone B, waar alternierende vrije banken kunnen voorkomen.



Figuur 3.12 Optreden van alternierende banken in de Waal (Lambeek en Mosselman, 1998)

De groei/demping van alternierende banken kan worden afgeschat met de resultaten van een lineaire analyse (zie Bijlage A), die ook voor de alternierende banken weer de volgende tijdschaal oplevert:

$$T = -T_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{(n-1)k'^2}{1+k'^2} IP \right)^{-1} \quad (\text{id. 3.10})$$

Deze tijdsschaal is afhankelijk van de aangenomen waarde voor L_p . Het is ook mogelijk om voor alternerende banken die waarde van L_p te vinden die het meest snel groeit. Voor hogere afvoeren (kleinere IP waarden) zal een demping worden gevonden, terwijl voor lagere afvoeren (grotere IP waarden) groei kan optreden. De voortplanting van de eventuele alternerende banken wordt bepaald door de 2-D uitdrukking (vergelijking (3.17)).

3.4.4 Beddingvormen

Uitgebreid onderzoek naar beddingvormen in de Waal is beschikbaar. Bijlage B geeft een samenvatting van hetgeen bekend is. Er is een redelijk verband tussen afvoer en beddingvormkarakteristieken (hoogte, lengte en voortplantingssnelheid) bekend. Ook is er enig onderzoek naar de aanpassing in de tijd van beddingvormen gedaan. In Bijlage B wordt voorgesteld om een uitdrukking van Allen (1976a, 1976b, 1976c, 1978) te gebruiken die luidt:

$$\frac{\partial H(t)}{\partial t} = \frac{A c_b}{H(t)} (H_e - H(t)) \quad (3.18)$$

waarin

$H(t)$	=	actuele duinhoogte (m)
t	=	tijd (s)
H_e	=	evenwichtsduinhoogte behorend bij de actuele afvoer (m)
A	=	aanpassingscoëfficiënt (-)
c_b	=	voortplantingssnelheid van de beddingvormen (m/s)

Ter bepaling van A kunnen prototype gegevens over de aanpassing van beddingvormen worden gebruikt die onder meer beschikbaar zijn voor de Waal bij een afvoer van circa 2500 m³/s. Deze zijn geanalyseerd door Wijbenga (1991) met als conclusie dat de aanpassingstijd van de duinen circa 6 dagen is voor de Waal bij die afvoer. Dit kan vertaald worden naar andere afvoeren door de waarde van A af te leiden uit deze gegevens.

3.5 Invloed scheepvaart

Hoewel formeel geen "natuurlijke" factor, wordt de invloed van de scheepvaart hier in dit hoofdstuk besproken, omdat ook de scheepvaart invloed heeft op de morfologie. Zoals al besproken in paragraaf 3.2 zijn waarschijnlijk de volgende verschijnselen van belang:

- retourstroom onder het schip, die een afvlakkende werking op beddingvormen zal hebben;
- schroefstraal, die een soortgelijke invloed zal hebben, en die tevens voor diffusie in dwarsrichting en dus vermindering van de bodemliggingsverschillen in dwarsrichting zal zorgen;

- geïnduceerde waterbeweging in het kribvak, die tot erosie van afzettingen in het kribvak leidt.

Helaas zijn voor geen van deze verschijnselen kwantitatieve methoden bekend om hun effect op de morfologie van de rivier af te schatten. Daarom moet in deze paragraaf volstaan worden met enkele opmerkingen over de huidige stand van zaken qua kennis en enkele suggesties voor het ontwikkelen van voorspellingsmethoden.

Effect retourstroom

Door de retourstroming onder het schip zullen extra schuifspanningen op met name de hoogst gelegen delen van de bodem worden uitgeoefend. Dit zal leiden tot afvlakking van de bodem. Methoden zijn beschikbaar om de grootte van de retourstroom afhankelijk van diepgang, vaarsnelheid en speling onder het schip te bepalen. Geen methode is voorhanden om de vervorming van de beddingvormen uit te rekenen. Na de passage van een schip zullen de beddingvormen zich weer gaan opbouwen, maar de tijd tot de passage van het volgende schip is te kort om tot een aanzienlijke hoogte te groeien. Naarmate de afvoer lager is zal dit verschijnsel ernstiger zijn om een tweetal redenen:

- de groei van de duinen is langzamer (kleiner sedimenttransport);
- de invloed van de scheepvaart is groter door geringere vaardiepte.

Invloed schroefstraal

De schroefstraal wervelt het sediment op en werkt daardoor als een soort extra diffusie. Het gevolg van deze extra diffusie is dat gradiënten in de bodem zowel in langsrichting (beddingvormen) als in dwarsrichting (dwarshelling in bochten) kleiner zullen worden. Geen methoden zijn voorhanden om een voorspelling te maken voor de invloed op de bodem. Over de werking van een schroefstraal op de bodem is wel het een en ander bekend. Mogelijk is dit uit te bouwen tot een methodiek om de invloed van de schroefstraal, eventueel in combinatie met het effect van de retourstroom, enigszins kwantitatief te beschrijven.

Geïnduceerde waterbeweging in het kribvak

Naast de in de jaren tachtig uitgevoerde studies, is de afgelopen jaren enig onderzoek naar de water- en sediment beweging in kribvakken langs de Waal gedaan, met name gericht op de invloed van scheepvaart. Een samenvatting van die onderzoeken wordt gegeven in ten Brinke et al (1999). De eerste resultaten van dit nieuwe onderzoek zijn zeer interessant, maar helaas blijkt het nog niet mogelijk om te komen tot een goede kwantitatieve afschatting van de grootte van de erosie. Toch lijkt het mogelijk om voortbouwend op de tot nu toe verkregen resultaten een methodiek te ontwikkelen. Die zal rekening moeten houden met onder meer de frequentie van scheepspassages, de waterverplaatsing van de schepen, de afstand van de schepen tot het kribvak, en het verschil in bodemligging tussen het kribvak en het zomerbed ter plaatse van het kribvak.

Samenvattend kan gesteld worden dat er nog te weinig bekend is over de invloed van de scheepvaart op de morfologie om dit in te bouwen in voorspellingsmethoden voor de bodemligging.

3.6 Belang van verschillende verschijnselen in de Waal

In de voorgaande paragrafen zijn van belang zijnde morfologische verschijnselen geïdentificeerd en de mogelijkheid om ze te voorspellen is besproken. Welke van deze verschijnselen werkelijk van belang zijn hangt af van de karakteristieken van de verschillende riviergedeelten. In Paragraaf 2.2 zijn een drietal trajecten met verschillende karakteristieken onderscheiden binnen de Waal tussen Pannerdense Kop en St. Andries, namelijk:

- scherpe bochten in natuurlijke staat (Hulhuizen en Haalderen);
- scherpe bochten met een verondiepte buitenbocht hetzij door een vaste laag (Nijmegen, St. Andries) hetzij door grondkribben (Erlecom);
- relatief rechte Midden-Waal tussen Nijmegen en St. Andries.

In deze paragraaf zal het relatieve belang van de verschillende morfologische verschijnselen worden onderzocht. Als een verschijnsel in een bepaald riviertraject van ondergeschikt belang is, dan hoeft dit ook niet in een te ontwikkelen voorspellingsmethode te worden meegenomen.

In de huidige analyse zijn met name onderzocht en met elkaar vergeleken de scherpe bochten bovenstrooms van Nijmegen en bij St. Andries en de Midden-Waal. Scherpe bochten met verondieping in de buitenbocht zijn een verbijzondering van de natuurlijke scherpe bochten en zijn voorshands niet apart beschouwd.

Voor de onderstaande analyse is van de volgende geschematiseerde gegevens voor de Waal uitgegaan:

- breedte is 260 m;
- verhang circa 0,00011 (11 cm/km);
- D_{50} circa 0,001 m = 1 mm;
- Chézy-coëfficiënt circa $50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$;
- graad van niet-lineariteit n van transport met stroomsnelheid 5;
- bochtstraal op Midden-Waal 5.000 m;
- bochtstraal in scherpe bochten 1.000 m;
- lengte overgang 500 m;
- karakteristieke lengte van vrije verschijnselen 1.000 m.

Vervolgens zijn voor 6 afvoerniveau's (500, 1.000, ..., 3.000 m^3/s) de volgende analyses uitgevoerd:

(1) Algemene analyses:

- berekening evenwichtsdiepte h_e via:

$$h_e = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 C^2 i}} \quad (3.19)$$

waarin Q = afvoer (m^3/s)

- berekening Shieldsparameter met vergelijking (3.3)
- berekening $f(\theta)$ via vergelijking (3.2)
- berekening $\tan \beta$ via vergelijking (3.1)
- verschil tussen linker en rechter oever hoogte via een benadering voor vergelijking (3.4), waarbij in plaats van een cosinus-vorm van een driehoekig dwarsprofiel wordt uitgegaan, namelijk:

$$\Delta z_b = \frac{2}{\pi} B \tan(\beta) \approx B \tan(\beta) \quad (3.20)$$

- λ_w via vergelijking (3.7)
- λ_s via vergelijking (3.8)
- IP via vergelijking (3.9)

(2) Analyses van de duinhoogten:

- de duinhoogte (H) via Wilbers & ten Brinke (1999), zie ook Bijlage B
- H/h_e
- $H - h_e$
- sedimenttransport per eenheid van breedte (s) uit ten Brinke (2000)

(3) Analyse voortplantingssnelheden:

- 1-D voortplantingssnelheid uit vergelijking (3.12)
- voortplantingssnelheid duinen (c_b) uit Wilbers & ten Brinke (1999)
- s uit duinvoortplantingsmethode via:

$$s = 0.6 H c_b \quad (3.21)$$

- tijdsschaal grote duinen via de methode van Allen (1976a,b,c) met

$$T_{\text{duinen}} = \frac{A c_b}{H} \quad (3.22)$$

- 1-D tijdschaal via:

$$T_0 = \frac{\lambda_s h_0}{s_0} \quad (3.23)$$

(4) Analyses bochten:

- bij gegeven L_p (bocht lengte) berekening van k' via:

$$k' = \frac{2\pi\lambda_w}{L_p} \quad (3.24)$$

- 2-D voortplantingssnelheid voor bochten via vergelijking (3.17)
- 2-D tijdschaal voor bochten via vergelijking (3.10)
- groei dan wel demping, afhankelijk van teken van 2-D tijdschaal: positief is groei, negatief is demping.

(5) Analyses vrije verschijnselen:

- k' voor vrije verschijnselen met vergelijking (3.24)
- 2-D voortplantingssnelheid voor vrije verschijnselen via vergelijking (3.17)
- 2-D tijdschaal voor vrije verschijnselen
- groei dan wel demping, afhankelijk van teken van 2-D tijdschaal

(6) Analyses overgangen:

- tijdschaal overgangen via vergelijking (3.11)

(7) Analyses snelheid van aanpassing:

- berekening aanpassingssnelheid van duinen voor een plotselinge val van het hoogwater van $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ via de vergelijking (3.18)
- berekening aanpassingssnelheid 2-D bodemtopografie onder dezelfde omstandigheden.

De resultaten van deze analyses zijn beschikbaar als Excel bestanden. In de Tabellen 3.1 en 3.2 zijn kopieën van deze bestanden opgenomen. Het verschil tussen de twee tabellen is de aanname voor de bochtstraal (zie hierboven). Tabel 3.1 heeft betrekking op de scherpe bochten in de Waal en Tabel 3.2 heeft betrekking op de Midden-Waal met zeer flauwe bochten.

De analyses zijn veelal ruwe benaderingen van de werkelijkheid. Desondanks geven ze in veel gevallen een nuttige indicatie van de orde van grootte van de processen. Inspectie en onderlinge vergelijking van de twee tabellen leidt tot de volgende constatering:

- Het verschil in bodemligging tussen de linker- en de rechteroever varieert voor de Midden-Waal tussen de 0,4 en 1,8 m en voor de scherpe bochten tussen de 2,2 en 9 m;
- De duinhoogten op de Waal variëren tussen de 0,4 en 1 m;
- Hieruit volgt dat het relatieve belang van duinen veel groter is op de Midden-Waal dan in de scherpe bochten;
- De relatieve duinhoogte neemt bij afnemende afvoeren toe van circa 13% tot 17%;
- De interactie parameter IP neemt snel af met toenemende afvoer;
- De voortplantingssnelheid van de duinen is bij lagere afvoeren redelijk in overeenstemming met de berekende 1-D voortplantingssnelheid van oneindig kleine verstoringen, maar bij hogere afvoeren treden aanzienlijke afwijkingen op;
- De waarde van het sedimenttransport bepaald uit de duinverplaatsingsmethode komt redelijk overeen met de gegevens over het sedimenttransport uit ten Brinke (2000);
- De tijdschaal van de bochten is zodanig groot (orde van jaren bij lage afvoeren), dat verwacht mag worden dat de bodemligging zich zal instellen op een soort gemiddelde afvoer;

- Bij de flauwe bochten in de Midden-Waal worden voor de opgedrongen 2-D bodemtopografie negatieve voortplantingssnelheden gevonden, hetgeen duidt op een relatief grote breedte-diepteverhouding (grote IP);
- Bij afnemende afvoeren neemt de axiaalsymmetrische helling (enigszins) af, maar dit wordt in de scherpe bochten gecompenseerd door de groei van de point bar;
- Er is een groot verschil tussen de hier gepresenteerde 1-D voortplantingssnelheid en 2-D voortplantingssnelheid;
- De voortplantingssnelheid van de vrije verschijnselen varieert tussen 0,15 en 0,5 m/dag en is een orde kleiner dan de voortplantingssnelheid van de duinen.

Afvoer zomerbed (m ³ /s)	500	1000	1500	2000	2500	3000
C	50	50	50	50	50	50
h	2.38	3.77	4.95	5.99	6.95	7.85
Afgeleide parameters						
Shields parameter (-)	0.16	0.25	0.33	0.40	0.46	0.52
f(theta)	0.35	0.38	0.40	0.42	0.43	0.44
tan beta (m)	0.008	0.014	0.020	0.025	0.030	0.035
Verskil links-rechts (m)	2.151	3.745	5.180	6.521	7.795	9.019
Lambda w (m)	297	472	618	749	869	982
Lambda s (m)	1099	759	612	525	466	423
IP (-)	3.70	1.61	0.99	0.70	0.54	0.43
LP (m)	5034	3872	3862	4001	4213	4489
LD (m)	-815	-2493	112429	3502	2007	1484
Sediment transport etc						
Duinhoogte H (m) AW+WtB (1999)	0.40	0.60	0.78	0.86	0.92	1.00
H/h (-)	0.17	0.16	0.16	0.14	0.13	0.13
h-H (m)	1.98	3.17	4.17	5.13	6.03	6.85
s (m ² /dag) via WtB (2000)	0.8	1.6	2.4	3.2	4.0	4.8
1D voortplantingssnelheden						
1D voortplantingssnelheid (m/dag)	1.7	2.1	2.4	2.7	2.9	3.1
1D voortplantingssnelheid duinen (m/dag) AW+WtB	1.7	4	5.5	6.8	7	8.2
s uit duinvoortplanting (m ² /s) (alpha = 0.6)	0.4	1.4	2.6	3.5	3.9	4.9
Tijdsschaal aanpassing grote duinen Allen (dagen)	10.7	6.8	6.5	5.8	6.0	5.6
T0 = lambda s*/h/s0 (dagen)	3266	1791	1261	982	810	691
Bochten						
L (m)	1000	1000	1000	1000	1000	1000
k' = 2pi lambda w/L	1.87	2.96	3.88	4.70	5.46	6.16
2D voortplantingssnelheid (m/dag)	0.15	0.32	0.41	0.48	0.53	0.57
Tijdsschaal groei/demping (dagen)	688	948	1474	2888	21960	-4294
Groei/demping	groei	groei	groei	groei	groei	demping
Vrije verschijnselen						
L (m)	1000	1000	1000	1000	1000	1000
k' = 2pi lambda w/L	1.87	2.96	3.88	4.70	5.46	6.16
2D voortplantingssnelheid (m/dag)	0.15	0.32	0.41	0.48	0.53	0.57
Tijdsschaal groei (dagen)	688	948	1474	2888	21960	-4294
Groei/demping	groei	groei	groei	groei	groei	demping
Overgang						
Lo	500	500	500	500	500	500
Tijdsschaal uitschuring overgangen (dagen)	297	236	206	187	174	164
Aanpassing						
Aanpassingssnelheid duinen (m/dag)		0.055	0.040	0.024	0.023	0.032
Aanpassingssnelheid bochten (m/dag)		-0.003	-0.002	-0.001	0.000	0.001

Tabel 3.1 Enkele karakteristieke parameters voor de scherpe bochten in de Waal

Afvoer zomerbed (m ³ /s)	500	1000	1500	2000	2500	3000
C	50	50	50	50	50	50
h	2.38	3.77	4.95	5.99	6.95	7.85
Afgeleide parameters						
Shields parameter (-)	0.16	0.25	0.33	0.40	0.46	0.52
f(theta)	0.35	0.38	0.40	0.42	0.43	0.44
tan beta (m)	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007
Vershil links-rechts (m)	0.430	0.749	1.036	1.304	1.559	1.804
Lambda w (m)	297	472	618	749	869	982
Lambda s (m)	1099	759	612	525	466	423
IP (-)	3.70	1.61	0.99	0.70	0.54	0.43
LP (m)	5034	3872	3862	4001	4213	4489
LD (m)	-815	-2493	112429	3502	2007	1484
Sediment transport etc						
Duinhoogte H (m) AW+WtB (1999)	0.40	0.60	0.76	0.85	0.93	1.02
H/h (-)	0.17	0.16	0.15	0.14	0.13	0.13
h-H (m)	1.98	3.17	4.19	5.14	6.02	6.83
s (m ² /dag) via WtB (2000)	0.8	1.6	2.4	3.2	4.0	4.8
1D voortplantingssnelheden						
1D voortplantingssnelheid (m/dag)	1.7	2.1	2.4	2.7	2.9	3.1
1D voortplantingssnelheid duinen (m/dag) AW+WtB	1.7	4	5.5	6.8	7	8.2
s uit duinvoortplanting (m ² /s) (alpha = 0.6)	0.4	1.4	2.5	3.5	3.9	5.0
Tijdsschaal aanpassing grote duinen Allen (dagen)	10.6	6.8	6.2	5.6	6.0	5.6
T0 = lambda s*h/s0 (dagen)	3266	1791	1261	982	810	691
Bochten						
L (m)	5000	5000	5000	5000	5000	5000
k' = 2pi lambda w/L	0.37	0.59	0.78	0.94	1.09	1.23
2D voortplantingssnelheid (m/dag)	-0.40	-0.36	-0.27	-0.17	-0.08	0.00
Tijdsschaal groei/demping (dagen)	-34189	-10956	-4929	-2870	-1940	-1438
Groei/demping	demping	demping	demping	demping	demping	demping
Vrije verschijnselen						
L (m)	1000	1000	1000	1000	1000	1000
k' = 2pi lambda w/L	1.87	2.96	3.88	4.70	5.46	6.16
2D voortplantingssnelheid (m/dag)	0.15	0.32	0.41	0.48	0.53	0.57
Tijdsschaal groei (dagen)	688	948	1474	2888	21960	-4294
Groei/demping	groei	groei	groei	groei	groei	demping
Overgang						
Lo	500	500	500	500	500	500
Tijdsschaal uitschuring overgangen (dagen)	297	236	206	187	174	164
Aanpassing						
Aanpassingssnelheid duinen (m/dag)		0.0531	0.0401	0.0301	0.0283	0.0303
Aanpassingssnelheid bochten (m/dag)		0.0001	0.0001	0.0002	0.0003	0.0005

Tabel 3.2 Enkele karakteristieke parameters voor de Midden-Waal

- Vrije verschijnselen als alternerende banken kunnen volgens de analyses bij lage afvoeren groeien, maar bij hogere afvoeren wijzigt dit gedrag in demping;
- De tijdsschaal van de overgangen is in de orde van een half jaar, en dus niet geheel verwaarloosbaar;
- De aanpassing van de duinhoogte is enkele orden sneller dan de aanpassing van de 2-D morfologie.

De voorgaande analyse heeft betrekking op duinen en de 2-D morfologie (zowel opgedrongen als vrij), en kon worden uitgevoerd omdat er enig inzicht in het morfologisch gedrag bestaat. Voor een aantal andere verschijnselen is dit niet het geval. Daarom wordt ter aanvulling van bovenstaande tabellen ook een scorekaart toegevoegd, waar het relatieve belang van alle verschijnselen is weergegeven, op basis van de enigszins subjectieve beoordeling. In de scorekaart is, in analogie met het voorstaande, een onderscheid gemaakt tussen de scherpe bochten en de Midden-Waal.

De verklaring van de gebruikte score is:

- +++ = zeer belangrijk
- ++ = belangrijk
- + = niet zo belangrijk
- = nauwelijks van invloed
- = geen invloed

<i>Natuurlijke veranderingen</i>	<i>Mogelijke (relatieve) importantie</i>	
	Waalbochten	Midden-Waal
<i>Natuurlijke veranderingen</i>		
• kantelen dwarsprofiel bochten en veranderen van L_p en L_d in de tijd	+?	-
• groei en translatie (verschuiving) en afvlakking van alternerende banken bij lage afvoer	--	+
• translatie en afvlakking van aanzandingen a.g.v. sedimentatie tijdens perioden dat het hw-bed ook meestroomt	++	++
• veranderingen van de bodemligging van de vaargeul op overgangen (tussen twee bochten)	++	+
• aanzandingen benedenstrooms van vaste laag	++	nvt
• translatie en afname afmetingen duinen (duinhogtes en -lengtes)	+	+++
• aanzandingen in ontgroningen bij kribkoppen; erosie van sedimentatie benedenstrooms van deze ontgroningen	+	+++
• nalevering vanuit kribvakken	+	++
• invloed scheepvaart op bodem (inclusief duinen)	++	++

Tabel 3.3 Scorekaart voor relatieve belang van de verschillende verschijnselen die invloed hebben op de Waalbodem

3.7 Discussie

De volgende punten worden nog opgemerkt:

- In het algemeen geldt dat bovenstaande analyses gebaseerd zijn op benaderende methodes. Op sommige van de conclusies kan ongetwijfeld afgedongen worden;
- Toch geeft de gepresenteerde analyse een redelijke eerste indruk van welke "natuurlijke" verschijnselen van belang zijn voor respectievelijk de scherpe bochten en de Midden-Waal;
- Uit het voorstaande kan worden afgeleid dat de veranderingen van de 2-D morfologie, met name de bochten, tijdens het laagwater verwaarloosbaar zijn. Dit lijkt in strijd met waarnemingen dat de scherpe bochten in de Waal in sommige jaren aanzienlijk dieper zijn. Zie bijvoorbeeld Sloff en Mosselman (1998). Deze diepere bochten zijn mogelijk het gevolg van de perioden met hoogwater, waarna ze niet meer veranderen tijdens de laagwater periode.

4 Herstel van Waal na baggeren en storten

4.1 Inleiding

In het voorgaande hoofdstuk is een onderzoek gedaan naar natuurlijke veranderingen op de Waal tussen Pannerdense Kop en St. Andries. Dit hoofdstuk heeft betrekking op het herstel van de rivier na baggeren. Omdat ter voorkoming van verdergaande degradatie van de rivier is besloten om het sediment niet aan de rivier te onttrekken, moeten ook voorspellingsmethodieken worden ontwikkeld om na te gaan wat het effect is van storten van gebaggerd sediment op verschillende plekken.

De opzet van dit hoofdstuk is als volgt. In paragraaf 4.2 wordt kort aangegeven welke morfologische verschijnselen moeten worden weggebaggerd en waar eventueel teruggestort kan worden. In Paragraaf 4.3 worden in kwalitatieve zin herstelprocessen besproken. De paragrafen 4.4. en 4.5 geven een overzicht van bestaande kennis op het gebied van herstelrelaties. Paragraaf 4.6 bespreekt de invloed van de scheepvaart op een rivier waarin gebaggerd en teruggestort is. In paragraaf 4.7 wordt het relatieve belang van de verschillende herstelprocessen besproken, als aanzet tot het komen tot voorspellingsmethodieken.

4.2 Baggeren en terugstorten op de Waal

In hoofdstuk 2 is al in het kort besproken waar gebaggerd dient te worden op het desbetreffende gedeelte van de Waal, en het volgende overzicht is gegeven (zie bijvoorbeeld figuur 4.1):

- scherpe bochten in natuurlijke staat (Hulhuizen en Haalderen): baggeren zal vooral betreffen het aanbrengen van een geul in de binnenbocht;
- scherpe bochten met een verondiepte buitenbocht hetzij door een vaste laag (Nijmegen, St. Andries) hetzij door grondkribben (Erlecom): baggeren blijkt vooral nodig benedenstrooms van de vaste laag;
- relatief rechte Midden-Waal: baggeren betreft vooral (de beddingvormen in) de flauwe binnenbochten en de overgangen.

Daarnaast zal het soms nodig zijn om hoogwaterafzettingen te verwijderen. Ook afzettingen benedenstrooms van kribgaten kunnen soms hinderlijk zijn.



Figuur 4.1 Schematische weergave van baggerwerkzaamheden in een binnenbocht

Terugstorten kan en gebeurt op verschillende plaatsen:

- in de buitenbocht;
- in kribgaten (in de buitenbocht);
- in de binnenbocht (hetgeen tijdens baggerseizoen 2000 reeds in praktijk is gebracht);
- in de kribvakken.

4.3 "Soorten" herstel

Het soort herstel hangt af van waar gebaggerd en waar gestort is. Bij een bespreking ervan wordt weer onderscheid gemaakt tussen het baggeren van opgedrongen verschijnselen en het baggeren van vrij bewegende verschijnselen. Ook bij de bespreking van het effect van terugstorten zal voor zover mogelijk dit onderscheid worden gehanteerd.

Herstel van opgedrongen verschijnselen

- Gebaggerde geulen in binnenbochten hebben de neiging weer aan te zanden. Volgens waarnemingen in een schaalmodel en in het prototype (Taal, 1994) en via simulaties met numerieke modellen blijkt dat het herstel aanvankelijk vooral betreft het van bovenstrooms opvullen van de gebaggerde geul. Er vormt zich dan een soort zandgolf die aanvankelijk vrij snel de geul "inwandelt". Naarmate de golf langer wordt, vertraagt deze en kan de golf zelfs op een gegeven moment vrijwel tot stilstand komen. Vanaf dat moment wordt het terugkantelen van de dwarshelling maatgevend (onder invloed van spiraalstroming en bovenstroomse 2-D-effecten). De snelheid van dit kantelen hangt sterk af van de afvoer. Bij lagere afvoeren zal het proces langzaam gaan, maar bij hogere afvoeren versnelt het sterk (ervaringen van de bochten bij Hulhuizen, zie Taal, 1994);
- Overgangen hebben de neiging tot uitschuring tijdens laagwater. Indien overgangen worden gebaggerd, zal bij laagwater weinig verandering in de gemiddelde bodemligging meer optreden. Pas bij een volgend hoogwater zullen er weer afzettingen optreden. Afzettingen benedenstrooms van binnenbochten in bochten met een verondiepte buitenbocht (door schermen of door bestortingen) zullen zelfs in de laagwaterperiode

waarschijnlijk gedeeltelijk terugkomen. Tijdens een volgend hoogwater wordt dit proces versneld;

- Afzettingen benedenstrooms van kribgaten zullen zich in een laagwaterperiode na baggeren niet meer vormen. Pas bij een volgend hoogwater zullen dergelijke "vlammen" weer terugkomen;
- Gebaggerd materiaal aan het begin van de laagwaterperiode teruggestort in de buitenbocht zal waarschijnlijk daar blijven liggen, mits het niet hoger wordt aangebracht dan natuurlijk tijdens laagwater. In de volgende hoogwaterperiode(n) zal dit materiaal weer gemobiliseerd worden;
- Gebaggerd materiaal teruggestort in kribgaten zal vrij snel weer gemobiliseerd worden, omdat de tijdsschaal van de erosie van kribgaten klein is (in de orde van dagen);
- Gebaggerd materiaal dat in binnenbochten wordt teruggestort kan afhankelijk van de locatie van de stort al dan niet snel weer gemobiliseerd worden.

Vrij bewegende verschijnselen

- Hoogwaterafzettingen zullen na wegbaggeren niet meer terugkeren. Pas bij een volgend hoogwater kunnen ze weer ontstaan;
- Alternierende banken kunnen ontstaan nadat de rivier min of meer is "gladgestreken". De alternierende banken zullen slechts langzaam groeien en bij hogere afvoeren weer verdwijnen, omdat onder die omstandigheden de groei omslaat in demping (zie paragraaf 3.6).

Beddingvormen zullen na wegbaggeren weer gaan ontstaan. Bij lagere afvoeren zal het lang duren, maar bij hogere afvoeren herstelt het duinenpatroon zich binnen enkele weken. Beddingvormen komen voor als verschijnselen die zijn gesuperponeerd op andere, doch 2-D morfologische verschijnselen.

4.4 Herstel van opgedrukte bodemligging

4.4.1 Inleiding

Wanneer er in een gedeelte van de rivier is gebaggerd, zal op termijn het effect van het baggeren steeds meer afnemen. Globaal kunnen twee reacties onderscheiden worden:

- aanpassing van de 2-D bodemtopografie;
- weer gaan groeien van beddingvormen.

De aanpassing van de 2-D bodemtopografie kan worden gekenmerkt als relaxatiegedrag (weer terugkeren naar de oude situatie) en translatie. Dit is bijvoorbeeld geïllustreerd met twee voorbeelden in bijlage A (A.1). In deze paragraaf zal met name deze aanpassing worden beschreven.

Een belangrijk aspect daarbij is of de verstoring als gevolg van baggeren zich als een 1-D (voortplantende golf) of als een 2-D verschijnsel (kanteling dwarsprofiel) zal gaan gedragen.

4.4.2 Gebaggerde geulen in binnenbochten

In de voorgaande paragraaf is al aangegeven dat bij gebaggerde geulen in binnenbochten er twee verschijnselen zijn te onderscheiden, namelijk opvulling van bovenaf en terugkantelen naar de "oude" opgedrongen bodemtopografie. De opvulling overheerst waarschijnlijk alleen aanvankelijk; in een latere fase gaat het terugkantelen overheersen. Bij de door Siegfried (2000a en 2000b), is het aanvankelijke opvullen met enige moeite te onderkennen, maar het is weinig geprononceerd. Zoals uit de analyse van de vrije verschijnselen in paragraaf 3.6 is gebleken is de voortplantingssnelheid van zulke verschijnselen ook gering.

Het 2-D herstelgedrag van gebaggerde geulen in binnenbochten wordt daarom benaderend worden beschreven met de volgende simpele vergelijking:

$$\frac{\partial z_b(t)}{\partial t} = \frac{1}{T}(z_{bo} - z_b(t)) \quad (4.1)$$

waarin:

- $z_b(t)$ = bodemhoogte (m) na baggeren op tijdstip t
- z_{bo} = opgedrukte bodemligging (m)
- T = relaxatietijd (s)
- t = tijd (s)

waarbij zowel $z_b(t)$ als z_{bo} functies zijn van x en y , en voor T de 2-D aanpassingstijd kan worden aangehouden uit vergelijking (3.10):

$$T = -T_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{(n-1)k'^2}{1+k'^2} IP \right)^{-1}$$

waarin (zie ook paragraaf 3.3.2):

- T = aanpassingstijdschaal 2-D processen (s)
- T_0 = tijdschaal 1-D processen (s), gedefinieerd via $T_0 = \lambda_{s0} h_0 / s_0$
- k' = $2\pi\lambda_w/L_p$ (-)
- L_p = karakteristieke golflengte van de geul (m)

Opgemerkt wordt dat T via T_0 een functie van de afvoer is (zie bijvoorbeeld Tabel 3.1). Afhankelijk van de grootte van de afvoer kan het herstel dus langzaam (lage afvoer) of snel (hoge afvoer) gaan.

Indien toch ook de voortplanting van de gebaggerde geul in de beschouwing betrokken moet worden dan kan uitdrukking (3.17) worden gebruikt om deze voortplanting af te schatten:

$$c_r = \left(\frac{s_0}{h_0} \right)^{k'^2 - \left(\frac{n-3}{2} \right)} \frac{1}{k'^2 + 1} \quad (3.17)$$

waarin:

c_r = 2-D voortplantingssnelheid (m/s)

k' = $2\pi\lambda_w/L_p$ (-)

n = graad van niet-lineariteit van het sedimenttransport met de watersnelheid (-)

L_p = karakteristieke golflengte van de gebaggerde geul (m)

h_0 = waterdiepte in rivieras (m)

s_0 = sedimenttransport per eenheid van breedte in rivieras (m^2/s)

Tenslotte wordt opgemerkt dat mogelijk rekening moet worden gehouden met het feit dat de geul niet overeenkomt met de halve breedte van de rivier, maar waarschijnlijk smaller is. Dit kan tot snellere aanpassing leiden.

4.4.3 Overgangen

Indien in een overgang is gebaggerd, zal naar verwachting in de laagwaterperiode daar geen aanzanding meer optreden. In de volgende hoogwaterperiode zal dit echter wel gebeuren. Waarschijnlijk is ook voor dit verschijnsel de relaxatievergelijking (4.1) van toepassing.

4.4.4 Aanzanding benedenstrooms van binnenbocht bij verondiepte buitenbocht

Zoals aangegeven in paragraaf 3.3.5, zal in benedenstroomse richting een gedempt 2-D golvende patroon ontstaan dat is gesuperponeerd op de oorspronkelijke bodemligging. Voor deze stationaire bodemvervorming kunnen de golf- en dempingslengte worden gevonden uit vergelijkingen (3.5) en (3.6):

$$2\pi \frac{\lambda_w}{L_p} = \frac{1}{2} \sqrt{(n+1)IP^{-1} - IP^{-2} - \left(\frac{n-3}{2}\right)^2}$$

$$\frac{\lambda_w}{L_D} = \frac{1}{2} \left(IP^{-1} - \frac{n-3}{2} \right)$$

waarin (zie ook paragraaf 3.3.2):

L_p = golflengte van de point bar (m)

L_D = dempingslengte van de point bar (m) (damping voor positieve waarden)

n = graad van niet-lineariteit van het transport met de watersnelheid

λ_w = aanpassingslengte waterbeweging (m)

Aangenomen kan worden dat de processen zeer langzaam verlopen, zodat het resultaat zal worden bepaald door de gemiddelde condities in de rivier. Dit betekent dat $L_p > 3400$ m en $L_D > 3300$ m (bij $Q_w = 1600 \text{ m}^3/s$). Indien de zandbank wordt weggebaggerd, dan zal het herstel van deze bank relatief langzaam verlopen (want wederom is de 2-D relaxatietijd van toepassing).

4.4.5 Erosie van in ontgrondingskuilen gestort materiaal

Gebaggerd materiaal dat wordt gestort in erosiegaten benedenstrooms van kribben zal weer snel geërodeerd worden. Een tijdsschaal voor dit proces is:

$$T_e = \frac{I}{B_k s} \quad (4.2)$$

waarin:

T_e = tijdsschaal voor de erosie van de kribgaten (s)

I = inhoud van het kribgat (m^3)

B_k = representatieve breedte (m)

s = gemiddeld sedimenttransport per eenheid van breedte over de breedte B_k (m^2/s)

In eerste benadering kan voor s ook het gemiddeld transport worden genomen. Zie bijvoorbeeld Tabel 3.1.

4.5 Herstel vrije verschijnselen

4.5.1 Inleiding

Het herstel van de gebaggerde riviergedeelten zal behalve de aanpassing van de opgedrongen 2-D bodemtopografie ook de terugkeer van vrij bewegende verschijnselen met zich mee brengen. Het betreft hier vooral beddingvormen, die op de Midden-Waal een belangrijke rol spelen. Inzicht in de terugkeer van de vrije verschijnselen is dan ook van aanzienlijk belang. Behalve beddingvormen is het in theorie ook denkbaar dat tijdens de laagwaterperiode alternerende banken worden gevormd die later tijdens hogere afvoeren weer zullen verdwijnen.

4.5.2 Hoogwaterafzettingen

Indien hoogwaterafzettingen worden weggebaggerd zullen ze niet terugkeren tijdens de aansluitende laagwaterperiode. Bij het volgende hoogwater waarbij de uiterwaarden een substantiële bijdrage aan de hoogwaterafvoer leveren zullen de hoogwaterafzettingen weer terugkeren.

4.5.3 Alternerende banken

Indien na baggeren de rivier vrij vlak wordt opgeleverd dan kunnen er alternerende banken ontstaan. De golflengte van deze alternerende banken is af te leiden uit de onderstaande uitdrukking voor IP.

$$IP = \left[\frac{1}{2} \frac{(n-1)k'^2}{1+k'^2} - \frac{2g}{C^2} \frac{k'^2}{f(\theta)} \right]^{-1} \quad (4.3)$$

Bij gegeven waarden voor n , C en $f(\theta)$ komt de waarde van k' waarbij IP minimaal wordt, bij benadering overeen met de golflengte met maximale groei. Voor die golflengte is het ook mogelijk om de groeisnelheid uit te rekenen uit de 2-D vergelijking voor de aanpassingstijd volgens vergelijking (3.10):

$$T = -T_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{(n-1)k'^2}{1+k'^2} IP \right)^{-1} \quad (3.10)$$

Hiermee kan de bijdrage van de alternerende banken afgeschat worden. Verwacht wordt overigens dat die gering zal zijn (door de grote tijdsschaal van 2-D processen).

4.5.4 Beddingvormen

Na baggeren is de bodem relatief vlak. In de loop van de tijd zullen er weer beddingvormen gaan optreden. Zoals eerder aangegeven zal het hier waarschijnlijk kleinere duinen gesuperponeerd op grotere duinen betreffen. De groei (en demping) van duinen is onder andere bestudeerd door Wijbenga en Klaassen (1981) op basis van metingen in de Zandgoot en door Wijbenga (1991), Julien en Klaassen (1995) en door Wilbers (1997) op basis van prototypemetingen in de Rijntakken. Daarnaast geeft Wijbenga (1990) een goed overzicht van hetgeen bekend is op het gebied van groei en demping van beddingvormen.

Er zijn verschillende methoden om de groei van beddingvormen te voorspellen. Ze zijn veelal gebaseerd op een beperkt aantal experimenten dat uit de literatuur bekend is voor wat betreft het ontstaan en de groei van beddingvormen. Wijbenga (1990) noemt onder meer laboratorium proeven van Sutherland & Hwang (1965), Jain & Kennedy (1971), Gee (1973), en Bishop (1977). Door Allen (1976a, 1976b, 1976c, 1978) is een methode voorgesteld om de groei en demping van duinen te modelleren (zie paragraaf 3.4), die beschreven wordt door vergelijking (3.18):

$$\frac{\partial H(t)}{\partial t} = \frac{A c_b}{H(t)} (H_e - H(t))$$

Toepassing van deze formule op de situatie van groei van vlak bed naar duinen kan niet zonder meer omdat aanvankelijk $H(t)$ nul is en dus de linker term oneindig wordt. Door gebruik van vergelijking (3.21), die luidt:

$$s = 0.6 H c_b$$

kan vergelijking (3.18) worden herschreven tot:

$$\frac{\partial H(t)}{\partial t} = \frac{0.6 A c_b^2}{s} (H_e - H(t)) \quad (4.4)$$

Deze vergelijking geeft een eerste indruk van de groei van duinen vanuit een vlak bed situatie, en kan gebruikt worden na ijking van de coëfficiënt A .

Zij kan bijvoorbeeld worden afgeleid uit Tabel 3.1, hoewel een nader onderzoek naar het verband tussen duinhoogte en lokale waterdiepte gewenst is.

Bij de bepaling van de grootte van s dient rekening te worden gehouden met het feit dat door de aanvankelijk geringe bijdrage van de beddingvormen de effectieve schuifspanning groter is (geen bijdrage van vormruwheid), waardoor een groter transport zou kunnen optreden dan uit voorspellers blijkt.

4.6 Invloed scheepvaart en nalevering vanuit kribvakken

De invloed van scheepvaart op de bodemligging is reeds besproken in Paragraaf 3.5. Daarbij is gebleken dat nog geen methoden voorhanden zijn om de invloed van de scheepvaart op de bodemligging te bepalen. Hetzelfde kan gesteld worden ten aanzien van de invloed van de scheepvaart op het herstel van de bodemligging na baggeren. Met name de nalevering lijkt belangrijk. In het verlengde van het in paragraaf 3.5 gedane voorstel om een methodiek te ontwikkelen voor de afschatting van de erosie door de scheepvaart van sediment uit de kribvakken, kan gepoogd worden deze methode uit te breiden om hiermee ook van de nalevering een afschatting te maken.

4.7 Relatieve belang van verschillende typen herstel

In verband met een eventuele uitbreiding van het BOS Baggeren met herstelrelaties is het belangrijk om te bepalen welke verschijnselen hiervoor het meest belangrijk zijn. Analoog aan Tabel 3.3 is in Tabel 4.1 een scorekaart voor herstelprocessen gemaakt, waarbij weer een onderscheid is gemaakt tussen de scherpe bochten en de gestrekte Midden-Waal. Opgemerkt wordt dat in de tabel ook een aantal processen is opgenomen dat bij relatief smalle geulen in bredere rivieren wel belangrijk is, maar dat in de Waal waarschijnlijk geen rol van betekenis speelt. Dit komt omdat het baggerwerk in de Waal de breedte van de geul zal brengen op 170 m, hetgeen in de praktijk betekent dat de gebaggerde geul maar enkele tientallen meters van de kribkoppen verwijderd zal zijn. Dit is relatief weinig in vergelijking met rivieren met een verhouding van rivierbreedte tot gebaggerde geul van bijvoorbeeld 3 tot 6.

Veranderingen a.g.v. baggeren en terugstorten	Mogelijke (relatieve) importantie?	
	Waalbochten	Midden-Waal
• sedimentatie van gebaggerde geul als gevolg van convectie door zijdelingse toestroming van debiet	--	--
• idem als gevolg van laterale diffusie	--	--
• sedimentatie in geul als gevolg van "schuine" aanstroming	--	--
• invullen van gebaggerde geul in binnenbocht	+++	+
• groei van beddingvormen vanaf vlakke bodem situatie	+	+++
• erosie van in buitenbocht teruggestort sediment	?	++
• erosie van in ontgrondingskuil van kribkoppen teruggestort sediment	?	++
• (extra) nalevering vanuit kribvakken	?	+++
• erosie van in kribvakken teruggestort sediment	?	++

Tabel 4.1 Relatieve belang van verschillende herstelprocessen.

5 Mogelijke methoden voor bodemvoorspelling en herstelrelaties

5.1 Inleiding

Na een beschouwing over de beschikbaarheid van voorspellingsmethoden voor de natuurlijke bodemligging in de rivier (Hoofdstuk 3) en voor herstelgedrag van de rivier na baggeren en terugstorten (Hoofdstuk 4), kan nu teruggekeken worden op voorspellingsmethoden. In Hoofdstuk 2 was al geconcludeerd dat een drietal typen voorspellingen, nodig zullen zijn, namelijk:

- lange-termijn voorspelling (4 - 6 maanden);
- middellange-termijn voorspelling (1 - 2 maanden);
- korte-termijn voorspelling (1 - 2 weken).

Lange-termijn voorspelling betreft een voorspelling voor het anticiperen op eventueel grootschalig baggeren. De middellange-termijn voorspelling is bedoeld ter ondersteuning van de beslissing voor en de omvang van het grootschalig (profiel)baggeren. De korte-termijn voorspelling is bedoeld ter ondersteuning van het knelpuntbaggeren.

In de volgende paragrafen wordt meer in detail op deze verschillende voorspellingen ingegaan. Belangrijk is vooral welke verschijnselen bij de voorspelling meegenomen moeten en kunnen worden. "Moeten" omdat ze van overwegend belang zijn en "kunnen" omdat voorspellingsmethoden voorhanden zijn. Voor elk van de mogelijke voorspellingsmethoden is nog een zeker onderzoeks- en ontwikkelingstraject nodig, en afhankelijk van de uitkomsten daarvan kan beslist worden of het werkelijk verantwoord is om de voorspellingsmethode in de mei 2001-versie op te nemen. Hierna is voor elk van de voorspellingsmethoden aangegeven wat nog moet gebeuren.

Tevens is onderscheid gemaakt tussen voorspelling van de 2-D morfologie, de vrije verschijnselen en de kribvlammen als apart verschijnsel. T.a.v. de 2-D morfologie is de situatie vrij duidelijk: een deterministische voorspelling lijkt binnen handbereik, zowel voor de Midden-Waal (te verwaarlozen veranderingen door het jaar heen) als voor de scherpe bochten (invloed van voorgaand hoogwater, maar geen significante veranderingen tijdens het laagwaterseizoen). De vrije verschijnselen (vooral de beddingvormen) worden benaderd als een stochastisch verschijnsel, dat gesuperponeerd is op de 2-D morfologie. Geen voorspellingsmethode is voorhanden voor de kribvlammen. Deze kribvlammen en overigens ook de invloed van de scheepvaart behoeven veel meer onderzoek.

Tabel 5.1 geeft een systematisch overzicht van de verschillende verschijnselen in de Waal en beschikbare methoden ter voorspelling van de bodemliggingsverandering tijdens de aanloop naar een laagwater.

Voorgesteld wordt om voorlopig alleen voor de flauwgekromde Midden-Waal voorspellingen op te nemen, omdat die redelijk binnen handbereik zijn. Dit is in Tabel 5.1 dik omrand. Voor de scherpe bochten zonder vaste lagen of grondkribben, kan mogelijk meer worden gezegd na toepassing van Delft3D (Delft2D-Rivieren). Waarschijnlijk moet op een of andere wijze de invloed van het voorgaande hoogwater worden meegenomen. Naar de invloed van vaste lagen en grondkribben zou eerst nader onderzoek moeten worden verricht. Onder meer een vergelijking van eerdere SEDREDGE berekeningen kan hierbij worden overwogen.

		Zonder baggeren		Met baggeren (en storten) (en vlak opleveren)	
		2-D	Beddingvormen	2-D	Beddingvormen
Midden-Waal	Binnenbocht	Gemiddelde JDP's	$H=f(Q)$	Aanpassing verwaarloosbaar	$H=f(Q,t) = \text{groeï beddingvormen}$
	Overgang	Gemiddelde JDP's of effect voorgaande hw's	$H=f(Q)$ plus scheepvaart	Aanpassing verwaarloosbaar	Groeï beddingvormen
Scherpe bocht	Binnenbocht	Restant voorgaande hw's	$H=f(Q)$	Aanpassing als e-macht	Groeï beddingvormen
	Overgang	Restant voorgaande hw's	$H=f(Q)$ plus scheepvaart	Aanpassing als e-macht	Groeï beddingvormen
Scherpe bocht met grondkrib/vaste laag	Benedenstrooms	?	?	?	?
	Overgang?	?	?	?	?

Tabel 5.1 Verschijnselen van belang voor eerste aanzet middellange termijn voorspelling (? = nog niet voldoende over nagedacht). In de tabel: hw = hoogwater, H=duinhoogte, Q=afvoer, t=tijd, JDP=jaarlijkse dwarspeiling.

5.2 Lange termijnvoorspelling ten behoeve van anticiperen op profiel-baggeren

Lange-termijn voorspelling betreft een voorspelling ten behoeve van het anticiperen op profielbaggeren. Deze voorspelling gebruikt als uitgangspunt prototype metingen (mogelijk de beheerspeilingen) in het voorgaande laagwaterseizoen en houdt rekening met het afvoerverloop tijdens de winterperiode. Deze voorspelling dient te worden gedaan maanden nadat de laatste informatie over de bodemligging ter beschikking is gekomen. Wel kan het afgelopen afvoerverloop worden gebruikt plus misschien op termijn een schatting van het afvoerverloop in de volgende maanden. Op basis van een te ontwikkelen voorspellingsmethode dient te worden vastgesteld of grootschalig baggerwerk waarschijnlijk nodig zal zijn, voordat een betere schatting is verkregen met behulp van een oriëntatiepeiling.

De schatting van het lange-termijn baggerwerk bevat twee onderdelen:

- schatting van vermindering van de verruiming van het zomerbed na baggeren door herstelprocessen;
- hoogwaterafzettingen.

Voor de schatting van het verloren gaan van de effecten van baggerwerk van het vorig jaar kan gebruik worden gemaakt van het relaxatiekarakter van de herstelprocessen. Analoog aan vergelijking (4.4) kan een vergelijking worden opgesteld voor het totale gebaggerde hoeveelheid sediment (per baggerwerk, of per morfologische eenheid):

$$\frac{\partial V(t)}{\partial t} = \frac{1}{T} V(t) \quad (5.1)$$

waarin:

$V(t)$ = op tijdstip t nog resterend deel van het totale gebaggerde volume

T = aanpassingstijd (s).

De aanpassingstijd is weer een functie van de afvoer. Dat betekent dat ook geschreven kan worden:

$$\frac{\partial V(t)}{\partial t} = f(V(t), Q) \quad (5.2)$$

Waarschijnlijk geldt een dergelijk verband alleen per morfologische eenheid. Siegfried (2000b) heeft een aanzet gegeven voor het afleiden van zulke verbanden door het verband tussen dB_{vaar}/dt en Q te onderzoeken (met B_{vaar} = beschikbare vaarbaanbreedte bij een diepte van 2,80 m ten opzichte van OLR), maar voorgesteld wordt om na te gaan of dergelijke verbanden ook voor V op basis van $V(t)$ en Q (als vergelijking(5.2)) kunnen worden afgeleid. Misschien is het niet nodig om dit per morfologische eenheid te doen, maar kunnen morfologische eenheden gegroepeerd worden, zoals ook Siegfried (2000a) dat heeft gedaan: de bochten naar klassen van gekromdheid en misschien de overgangen apart.

Daarnaast dient ook een methode te worden ontwikkeld om de omvang van hoogwaterafzettingen af te schatten als functie van het afvoeroverloop. Mogelijk kan dit met behulp van een numeriek model (zie Hoofdstuk 6), hetzij voor de ontwikkeling van een methode, hetzij min of meer "real-time".

5.3 Middellange termijn voorspelling ten behoeve van profielbaggeren

De middellange-termijn voorspelling is bedoeld ter ondersteuning van de beslissing voor en de omvang van het grootschalig (profiel)baggeren. De basis voor deze voorspelling is de oriëntatiepeiling die na het (laatste) hoogwater in het voorjaar wordt uitgevoerd bij een afvoer van circa 3000 m³/s. Op basis daarvan dient, in principe per morfologische eenheid, een voorspelling te worden gemaakt voor de omvang van het baggerwerk, dus waar, wanneer en hoeveel dient te worden gebaggerd. De termijn waarop deze voorspelling dient te worden uitgevoerd is orde 1 à 2 maanden (de periode die nodig is om van een afvoer van circa 3000 m³/s OLR te bereiken). In het algemeen zal echter met een langere voorspellingstijd rekening dienen te worden gehouden. Op middellange termijn moet ook voorspeld worden hoe de rivier zich zal herstellen van het baggerwerk en, omdat het gebaggerde materiaal in de rivier wordt teruggestort, wat er zal gebeuren met het teruggestorte materiaal.

Bij het doen van voorstellen voor een middellange voorspellingsmethode wordt een onderscheid gemaakt tussen de scherpe Waalbochten en de gestrekte Midden-Waal. De van belang zijnde verschijnselen zijn vermeld in de Tabellen 3.3 en 4.1.

Scherpe rivierbochten

Voor scherpe rivierbochten dienen in principe de volgende morfologische verschijnselen te worden meegenomen (+++ of ++ in de twee tabellen):

- translatie en afvlakking van aanzandingen als gevolg van sedimentatie tijdens perioden dat het hoogwaterbed ook meestroomt (++);
- veranderingen van de bodemligging van de vaargeul op overgangen (tussen twee bochten) (++);
- aanzandingen benedenstrooms van vaste laag (++);
- invloed scheepvaart op bodem (inclusief duinen) (++);
- invullen van gebaggerde geul in binnenbocht (+++).

Van een aantal verschijnselen is blijkens het overzicht in de Hoofdstukken 3 en 4 nog te weinig bekend om ze in een voorspeller in te bouwen. Voor de scherpe rivierbochten wordt daarom voorgesteld om voorshands alleen voorspellers te ontwikkelen voor (1) de aanzandingen benedenstrooms van een vaste laag en (2) het invullen van een gebaggerde geul in de binnenbocht als relaxatieverschijnsel. Benadrukt wordt dat dezerzijds niet wordt voorgesteld om het natuurlijke kantelen van het dwarsprofiel mee te nemen, omdat dat verschijnsel tijdens een laagwaterperiode te verwaarlozen is.

Qua prioriteitstelling wordt voor de scherpe bochten in de Waal voorlopig aangehouden:

- 1) invullen gebaggerde geul;
- 2) veranderingen op overgangen;
- 3) groei beddingvormen vanaf vlakke bodem;
- 4) translatie en afvlakkingen HW-aanzandingen;
- 5) aanzandingen benedenstrooms vaste laag;
- 6) invloed scheepvaart.

Midden-Waal

Voor de Midden-Waal dienen in principe de volgende morfologische verschijnselen te worden meegenomen (+++ of ++ in de Tabellen 3.3 en 4.1):

- translatie en afvlakking van aanzandingen als gevolg van sedimentatie tijdens perioden dat het hoogwaterbed ook meestroomt (++);
- translatie en afname afmetingen duinen (duinhoogtes en -lengtes) (+++);
- aanzandingen in ontgrondingen bij kribkoppen; erosie van sedimentatie benedenstrooms van deze ontgrondingen (++);
- nalevering vanuit kribvakken (++);
- invloed scheepvaart op bodem (inclusief duinen) (++);
- groei van beddingvormen vanaf vlakke bodem situatie (+++);
- erosie van in buitenbocht teruggestort sediment (++);
- erosie van in ontgrondingskuil van kribkoppen teruggestort sediment (++);

- (extra) nalevering vanuit kribvakken;
- erosie van in kribvakken teruggestort sediment.

De Midden-Waal is bijzonder in verband met de belangrijke rol die beddingvormen spelen. De middellange-termijnvoorspelling van de morfologie van de Midden-Waal is dan ook voornamelijk een schatting van de voortplanting en vervorming van de beddingvormen, gesuperponeerd op de opgedrongen maar natuurlijke "gemiddelde" 2-D bodemtopografie (hierna te noemen de 2-D evenwichts-bodemtopografie). Dit wordt gedaan per morfologische eenheid. De vervorming van de beddingvormen wordt, naast het effect van een stochastische component, veroorzaakt door veranderingen in de afvoer en door het zich voortplanten naar gebieden met een andere waterdiepte. De voorspelling van de aanpassing van de beddingvormen zal niet voor elke individuele beddingvorm kunnen gebeuren, maar de beddingvormen worden gesuperponeerd op de 2-D bodemligging als een kansverdeling. Middellange-termijn voorspellingen zullen per morfologische eenheid worden gedaan.

Van een aantal andere verschijnselen is blijkens het overzicht in de Hoofdstukken 3 en 4 nog te weinig bekend om ze in een voorspeller in te bouwen. Voor de Midden-Waal wordt daarom voorgesteld om voorshands alleen voorspellers te ontwikkelen voor (1) afname van de afmetingen van duinen tijdens de laagwaterperiode, (2) groei van beddingvormen vanaf vlakke bodem situatie, en misschien (3) sedimentatie benedenstrooms van deze ontgroningen.

Qua prioriteit geldt voor de Midden-Waal:

- 1) groei beddingvormen vanaf vlakke bodem;
- 2) translatie en afname duinen;
- 3) invullen gebaggerde geul;
- 4) veranderingen op overgangen;
- 5) erosie van sedimentatie benedenstrooms ontgroningen;
- 6) translatie en afvlakkingen HW-aanzandingen;
- 7) erosie buitenbocht;
- 8) erosie ontgrondingskuil;
- 9) nalevering vanuit kribvakken;
- 10) erosie kribvakken
- 11) invloed scheepvaart.

Rekening houdend met de hiervoor aangegeven prioriteit wordt voorgesteld om een middellange termijn voorspelling te ontwikkelen voor de situatie in een binnenbocht in de Midden-Waal na het baggeren. Dus de verandering van een gebaggerde geul in een binnenbocht. Dit betreft het omrande gedeelte in Tabel 5.1. De aanpassing van deze geul na baggeren betreft (afgezien van de kribvlammen inclusief eventuele nalevering vanuit de kribvakken) voornamelijk de groei van beddingvormen vanuit een vlak-bed situatie. Daartoe dient een voorspeller voor de groei beddingvorm te worden afgeleid. Ook dit is al hiervoor besproken, namelijk in Paragraaf 4.5. Daar wordt de volgende vergelijking voorgesteld:

$$\frac{\partial H(t)}{\partial t} = \frac{0.6Ac_b^2}{s} (H_e - H(t)) \quad (4.4)$$

waarbij verder geldt dat:

$$H_e = f(h, Q, D, \text{meer?}) \quad (5.1)$$

De waarde van s (die ook een functie van Q en dus van het veronderstelde afvoerverloop zal zijn) kan benaderend berekend worden, overigens rekening houdend met de geringere duinhoogte dan in evenwichtssituaties en dus een grotere effectieve schuifspanning. Vergelijking (4.4) kan dus vervolgens toegepast worden op een eveneens voorspeld afvoerverloop.

In het kader van het gebruik van ArcView kan worden gepoogd om voor de "vrije" morfologische verschijnselen (i.c. de beddingvormen) een waarschijnlijkheidsverdeling te bepalen in plaats van een bepaalde specifieke duinhoogte. Dit zal het mogelijk maken om beter de kans dat er ondieptes ontstaan na een zekere tijd te bepalen.

Een punt van belang is daarbij dat de nieuwe vergelijking voor H_e in principe nog ontwikkeld dient te worden, hoewel er eerste aanzetten beschikbaar zijn (zie Bijlage B).

Het is aan te raden berekeningen met Delft3D (Delft2D-Rivieren) uit te voeren om de aanname te toetsen dat inderdaad de aanpassing van de 2-D morfologie, en dus ook de daarmee samenhangende aanpassing van de gebaggerde geul tijdens de laagwaterperiode, verwaarloosbaar is.

5.4 Korte-termijn voorspelling ten behoeve van knelpuntbaggeren

De korte-termijn voorspelling is bedoeld ter ondersteuning van het knelpuntbaggeren. De basis voor deze voorspelling bestaat uit de beheerspeilingen, eventueel in combinatie met de eerder uitgevoerde oriëntatiepeiling en de regelmatig uitgevoerde MGD peilingen. De voorspelling dient te worden uitgevoerd voor een periode variërend van enkele dagen tot twee weken. Er bestaat dan een goed inzicht in het verloop van de afvoeren in de voorspellingsperiode. Eventueel kunnen enkele varianten voor het afvoerverloop worden verondersteld, maar waarschijnlijk zal dit een geringe invloed op het korte-termijn gedrag van de rivier hebben.

Voorgesteld wordt voor korte-termijn voorspellingen (enkele weken) zowel voor als na baggeren er van uit te gaan dat de 2-D bodemtopografie niet substantieel zal veranderen. Dit betekent dat de morfologische veranderingen vooral voortplanting en vervorming van beddingvormen zullen zijn. Voor de korte termijn voorspelling is het mogelijk om individuele duinen te volgen en voorspellingen over hun voortplanting en vervorming te doen. In principe wordt het hiermee mogelijk om per locatie (en per morfologische eenheid) aan te geven waar hoeveel dient te worden gebaggerd.

6 Benodigd onderzoek

6.1 Inleiding

In hoofdstuk 5 zijn voorstellen gedaan voor eenvoudige voorspellers voor:

- de natuurlijke ontwikkeling van de bodem in de Midden-Waal en in de Waalbochten bij laagwater, en
 - het herstel van de bodemligging in de Midden-Waal en in de Waalbochten na baggeren.
- Er zijn verschillende mogelijkheden om deze eenvoudige voorspellers te toetsen. Overigens kan ook gepoogd worden om de hierna te beschrijven toetsingsmiddelen in te zetten om voorspellingsmethoden af te leiden.

De volgende mogelijkheden voor toetsing worden voorzien:

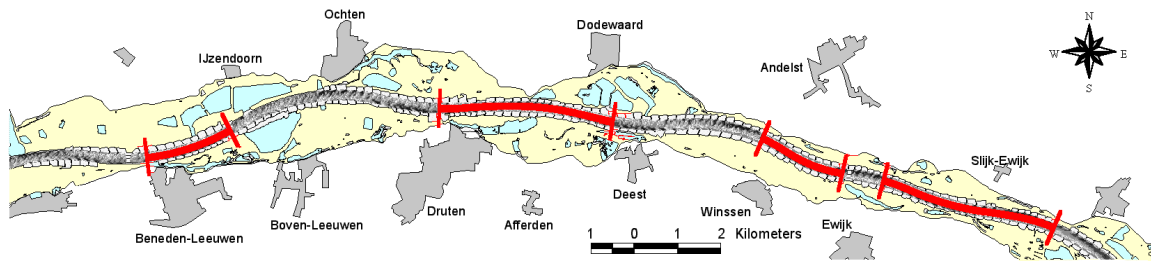
- analyse van de door DON verzamelde prototype gegevens in het kader van de Proef Morfologie (zie Taal, 1999) en latere vervolgmetingen met behulp van een GIS pakket (met name ArcView);
- het uitvoeren van een aantal simulaties met een 2-D morfologisch (numeriek) model (met name Delft2D-Rivieren).

Deze twee mogelijkheden worden in dit hoofdstuk besproken, namelijk in Paragraaf 6.2 de analyses met behulp van ArcView en in Paragraaf 6.3 de mogelijke numerieke simulaties met Delft2D-Rivieren. Meer details worden gegeven in de Bijlagen C en D, respectievelijk.

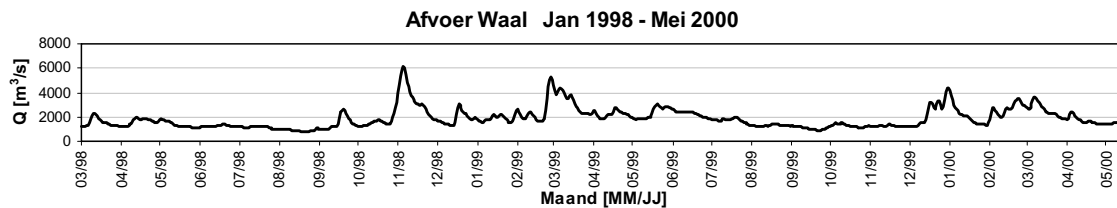
Daarnaast kan speciaal onderzoek geëntameerd worden of worden voortgezet, dat kan helpen om op termijn de voorspellingsmethoden binnen BOS Baggeren uit te breiden. In Paragraaf 6.4 wordt hiertoe een aantal voorstellen gedaan.

6.2 Onderzoek op basis van Proef Morfologie en vervolgmetingen in prototype

Sinds 1998 zijn in het kader van de Proef Morfologie en het vervolg erop maandelijks metingen uitgevoerd in een viertal meettrajecten op de Midden-Waal. De locatie van de metingen is aangegeven in Figuur 6.1. Het betreft trajecten met zowel flauwe bochten als overgangen. Het afvoerverloop sinds begin 1998 is weergegeven in Figuur 6.2. In de Waal is in twee perioden gebaggerd, namelijk in augustus-september 1998 en in de zomer van 1999. De metingen betreffen zowel de periode voor het baggeren als de periode erna.



Figuur 6.1 Vier meetlocaties langs de Waal (Taal, 1999, Siegfried, 2000b)



Figuur 6.2 Afvoer verloop van de Waal in de periode januari 1998 - mei 2000 (Siegfried, 2000b)

De prototype metingen zijn beschikbaar als ArcView bestanden en het ligt dus voor de hand om ook ArcView als instrument te gebruiken voor de analyse. Daarnaast zijn ook de resultaten van de jaarlijkse dwarspeilingen sinds 1988 beschikbaar als ArcView bestanden. De mogelijkheden van analyse met ArcView zijn echter beperkt.

De volgende onderzoeken worden voorgesteld voor het onderzoek van voorspellingsmethoden voor de natuurlijke situatie:

- identificatie van de gemiddelde natuurlijke en opgedrongen 2-D op verschillende manieren (zie Bijlage A);
- bepaling van de vrije verstoringen (die een mix zijn van beddingvormen, overgangen, hoogwaterafzettingen en "vlammen");
- beddingvormhoogtes in verschillende riviergedeelten;
- identificatie van en onderzoek naar verschijnselen zoals hoogwaterafzettingen en overgangen.

Voor het toetsen van de voorgestelde herstelrelaties worden de volgende onderzoeken voorgesteld:

- toetsing van de lange-termijn voorspelling via analyse van de snelheid van herstel van de bodemligging na baggeren en terugstorten;
- analyse van de groeisnelheid van beddingvormen;
- toetsing van de middellange-termijn voorspelling voor de situatie na baggeren en terugstorten;
- toetsing van de korte-termijn voorspelling, waarbij met name de groei en voortplanting van de beddingvormen wordt onderzocht.

Met name de metingen van 1999 zijn in principe goed geschikt omdat daarbij de hoeveelheid gebaggerd en teruggestort materiaal goed bekend is. Gebruik zal dienen te worden gemaakt van de gemiddelde natuurlijke 2-D bodemligging als referentie, omdat die bepalend is voor de aanpassing van de bodemtopografie. Afwijkingen van deze bodemligging zullen teniet worden gedaan als een eerste-orde systeem middels een e-macht met een tijdsschaal die hiervoor is besproken.

6.3 Onderzoek met 2-D morfologische (numerieke) modellen

Ter aanvulling op de analyses met prototype metingen, zoals voorgesteld in de vorige paragraaf, kan verder overwogen worden om een aantal simulaties uit te voeren met een 2-D morfologisch (numeriek) model. Met name wordt daarbij gedacht aan het model Delft2D-Rivieren (Delft3D). De voordelen van het gebruik van een dergelijk model en de eisen waaraan dat model en de schematisatie zouden moeten voldoen zijn vermeld in Bijlage D. In dezelfde bijlage worden ook de voorstellen voor onderzoek met een dergelijk model, die hierna kort worden aangeduid, wat uitgebreider besproken.

De volgende simulaties worden voorgesteld voor het onderzoek van voorspellingsmethoden voor de natuurlijke situatie na ijking van het model, waarbij met name de parameters die de axiaalsymmetrische dwarshelling en de point-bar vorming worden gevarieerd en ingesteld (in volgorde van prioriteit):

- onderzoek naar de aanpassingstijd van de opgedrongen 2-D bodemtopografie;
- simulatie ter bepaling van de (i) gemiddelde evenwichtsbodemligging en (ii) de variatie van de bodemligging rond het gemiddelde;
- onderzoek naar morfologische veranderingen op overgangen;
- onderzoek naar de optelbaarheid van de verschillende morfologische verschijnselen;
- onderzoek naar het gedrag van hoogwaterafzettingen.

De volgende simulaties worden voorgesteld voor het onderzoek ter toetsing van herstelrelaties en voor het in tweede termijn ook verder ontwikkelen van zulke relaties (in volgorde van prioriteit):

- principe onderzoek naar de aanpassing van een gebaggerde "sleuf" in een scherpe en in een flauwe bocht;
- toetsing van de middellange-termijn voorspelling;
- onderzoek naar de middellange-termijn invloed van storten van sediment, en de interactie met de omringende bodemtopografie;
- mate waarin bochtprofielen ademen in een jaarlijkse afvoercyclus;
- interactie tussen nabijgelegen baggerlocaties (in welke mate beïnvloedt het baggerwerk de benedenstroomse trajecten);
- onderzoek voor een aantal geselecteerde morfologische eenheden naar de lange-termijn verandering van de gebaggerde geul.

6.4 Overig onderzoek

Over een aantal morfologische verschijnselen is nog te weinig bekend om ze in een voorspeller te vangen. Daarom wordt een aantal aanvullende onderzoeken voorgesteld, die te zijner tijd kunnen leiden tot uitbreiding van de voorspellingsmethoden die in het BOS Baggeren zijn ingebouwd. Het type onderzoek dat kan worden overwogen is theoretisch onderzoek, gecombineerd met onderzoek in laboratorium-opstellingen, onderzoek in wiskundige modellen en prototype onderzoek. Voor elk onderdeel moet een geëigende (mix) van onderzoek(en) worden vastgesteld.

Aanvullend op hetgeen al in de paragrafen 6.2 en 6.3 is voorgesteld, worden onderzoeken voorgesteld naar de volgende verschijnselen:

- aanzandingen op overgangen en erosie ervan tijdens perioden van laagwater;
- hoogwaterafzettingen en hun vervorming en eventuele translatie tijdens laagwaterperioden;
- aanzandingen benedenstrooms van erosiegaten bij kribben en hun gedrag;
- translatie en vervorming van beddingvormen bij lage afvoeren;
- invloed van scheepvaart op beddingvormen en op bodemligging;
- erosie van kribvakken door scheepvaart.

7 Conclusies en aanbevelingen

In deze notitie is verslag gedaan van de in het kader van de ontwikkeling van het BOS Baggeren uitgevoerde Parallelstudie Bodemligging en Herstelrelaties, bedoeld om aanbevelingen te doen hoe morfologische processen en hun effect eventueel ingebracht kunnen worden in het BOS Baggeren.

Op basis van het hier beschreven onderzoek kunnen de volgende conclusies worden geformuleerd:

Kenmerken van de Waal en de voor baggerwerk relevante processen:

- Het onderzoek heeft zich beperkt tot de Waal benedenstrooms van het splitsingspunt Pannerdense Kop. Het betreft hier een riviergedeelte met twee verschillende "gezichten", (i) een aantal sterke bochten (Hulhuizen, Erlecom, Haalderen, Nijmegen en St. Andries) en (ii) de Midden-Waal met een vrijwel recht zomerbed. Verder is in drie van de scherpe bochten (Nijmegen en St. Andries, en Erlecom) de buitenbocht opgevuld met respectievelijk een vaste laag en grondkribben, hetgeen tot andere morfologische problemen leidt;
- In de scherpe bochten zijn 2-D bochtprocessen dominant en spelen beddingvormen een meer ondergeschikte rol. In de Midden-Waal zijn de beddingvormen, de "kribvlammen" (aanzanding vanuit kribvakken) en de 2-D morfologische verschijnselen (zoals buitenbochten, point bars, overgangen en hoogwaterafzettingen) van dezelfde orde van grootte, hetgeen de analyse van morfologische verschijnselen een stuk moeilijker maakt;
- In deze studie kon gebruik worden gemaakt van de resultaten van veel onderzoek dat in de laatste decennia is gebeurd op het gebied van 2-D morfologische verschijnselen (in Nederland onder andere in het kader van het TOW Rivieren, tijdens verschillende promotieonderzoeken en het project kennisontwikkeling 2-D morfologie) en van beddingvormen (in het kader van het TOW Rivieren en meer recent via uitgebreid prototype onderzoek);
- De natuurlijke bodemligging wordt gekarakteriseerd door een combinatie van (i) een (stationaire) opgedrongen 2-D bodemligging, die bepaald wordt door met name de geometrie van het zomerbed, en (ii) (niet stationaire) verschijnselen, die vrij door de rivier kunnen bewegen (met name beddingvormen). De aanpassingstijd van de opgedrongen 2-D bodemligging is groot, waardoor de natuurlijke aanpassing van de opgedrongen geometrie tijdens een laagwaterperiode gering zal zijn. Dit geldt waarschijnlijk ook voor de "kribvlammen", de afzettingen benedenstrooms van de erosiekuilen als gevolg van de kribben en kribvakken. De hoogte van de beddingvormen neemt af bij vallende afvoer, terwijl ook de voortplantingssnelheid van de beddingvormen positief gecorreleerd is met de afvoer;
- Baggeren houdt veelal in een combinatie van (i) een wijziging van de opgedrongen geometrie en (ii) een afvlakking van beddingvormen. Herstel houdt dan in het terug"kantelen" en opvullen naar de oorspronkelijke opgedrongen geometrie, en het weer gaan groeien van de beddingvormen. Voor beide verschijnselen zijn typische tijdsschalen geïdentificeerd die het mogelijk maken om voorspellingen te doen, maar

voor beddingvormen is geen onderzoek beschikbaar naar deze tijdsschalen tijdens perioden met laagwater. Verder is er enig begrip van typische voortplantingssnelheden, welke eveneens in voorspellingsmethoden gebruikt kunnen worden;

- Tot nu toe is geen specifiek onderzoek gedaan naar de "kribvlammen" (sedimentatie patronen vanuit de kribvakken), en de kennis over het gedrag van deze verschijnselen is dan ook gering;
- Eveneens is er nauwelijks kennis beschikbaar over de invloed van de scheepvaart op de bodem en dus ook niet over de invloed van scheepvaart op het herstel. Ook over de nalevering van sediment vanuit de kribvakken, hetgeen de herstelprocessen kan versnellen, is te weinig kennis beschikbaar om voor dit proces tot een voorspellingsmethode te ontwikkelen. Ook bij dit laatste proces speelt overigens de scheepvaart een belangrijke rol door de in de kribvakken opgewekte waterbeweging.

Onderscheid en kenmerken van verschillende typen morfologische voorspellingen:

- Bij het doen van voorspellingen kan een onderscheid worden gemaakt naar de termijn waarover de voorspelling dient plaats te vinden;
- Lange-termijn voorspellingen (maanden vooruit) zijn bedoeld om tijdens een hoogwater nog voordat een oriëntatiepeiling van de bodem is gedaan reeds een idee te krijgen of en zo ja, in globale zin hoeveel grootschalig (profiel) baggerwerk nodig zal zijn na een hoogwater om de vaargeul weer op diepte te brengen;
- Middellange-termijn voorspellingen (op termijn van 1 à 2 maanden) zijn bedoeld om per morfologische eenheid een betere voorspelling te kunnen maken waar, wanneer en hoeveel gebaggerd dient te worden om bij OLR aan de gestelde eisen te kunnen voldoen;
- Korte-termijn voorspellingen (op termijn van enkele weken) zijn bedoeld ter ondersteuning van knelpuntbaggeren;
- Lange-termijn voorspellingen zijn mogelijk voor de natuurlijke, ongestoorde omstandigheden en hebben dan betrekking op het ontstaan van ondiepten tijdens hoogwater. Belangrijker is echter het lange-termijn herstel van een gebaggerde geul. Gezien de resultaten van Siegfried (2000a en 2000b) voor vaargeulbreedten is het waarschijnlijk mogelijk om een relatie af te leiden tussen het afvoerverloop (met een zekere weging om de grote invloed van de hoge afvoeren mee te nemen) en het afnemen van het effect van voorafgaand baggeren (en dus het bij benadering in het volgend seizoen te baggeren volume in het kader van onderhoud middels profielbaggeren). De lange termijn voorspellingen zullen in het algemeen gemaakt worden voor het gehele riviertraject, maar zijn mogelijk opgebouwd uit een somming van de verschijnselen voor gelijksoortige morfologische eenheden (flauwe bochten, scherpere bochten, overgangen). Daarnaast dient een methode te worden ontwikkeld om de omvang van hoogwaterafzettingen af te schatten afhankelijk van het afvoerverloop tijdens hoogwater;
- Bij middellange-termijn voorspellingen kan een onderscheid worden gemaakt tussen de natuurlijke situatie en de aanpassing na baggeren en tussen de situatie in de Midden-Waal en de situatie in de scherpe bochten. Ten aanzien van de natuurlijke situatie in de Midden-Waal geldt dat de aanpassing van de 2-D morfologie zeer langzaam verloopt (er is een zeer grote naijling in de orde van jaren). Dat betekent dat er waarschijnlijk een gemiddelde "opgedrongen" 2-D bodemtopografie is, die een soort basis vormt voor de morfologie in de Waal. Daarover heen bewegen een aantal "vrije" verschijnselen, waarvan de beddingvormen verreweg het meest belangrijk zijn;

- De middellange-termijn voorspelling van de morfologie van de Midden-Waal is dan ook voornamelijk een schatting van de voortplanting en vervorming van de beddingvormen, gesuperponeerd op deze opgedrongen maar natuurlijke "gemiddelde" 2-D bodemtopografie (hierna te noemen de 2-D evenwichts-bodemtopografie). Dit wordt gedaan per morfologische eenheid. De vervorming van de beddingvormen wordt, naast het effect van een stochastische component, veroorzaakt door veranderingen in de afvoer en door het zich voortplanten naar gebieden met een andere waterdiepte. De voorspelling van de aanpassing van de beddingvormen zal niet voor elke individuele beddingvorm kunnen gebeuren, maar de beddingvormen worden gesuperponeerd op de 2-D bodemligging als een kansverdeling. Middellange-termijn voorspellingen zullen per morfologische eenheid worden gedaan;
- Complicerende factoren zijn de hoogwaterafzettingen, de invloed van scheepvaart en nalevering vanuit de kribvakken en de "kribvlammen" benedenstrooms van de erosiekuilen van de kribben, waaraan nog apart aandacht gegeven zal moeten worden en die mogelijk op termijn in de voorspellingsmethode dienen te worden ingebracht;
- Voor de scherpe Waalbochten in de natuurlijke situatie is de aanpassing van het dwarsprofiel belangrijker en overwogen kan worden dit verschijnsel bij de voorspelling van de 2-D bodemligging mee te nemen. Voor de scherpe bochten geldt overigens dat drie ervan in de buitenbochten zijn voorzien van een vaste laag of grondkribben. De verschijnselen in de binnenbochten en benedenstrooms van deze verbeterde gedeelten dienen nader bestudeerd te worden voordat ze in een voorspellingsmethode kunnen worden ingebouwd;
- Voor middellange-termijn voorspellingen van de aanpassing van de rivier na baggeren wordt in principe gebruik gemaakt van dezelfde aanpak. Als de bodemtopografie na baggeren sterk afwijkt van de 2-D evenwichts-bodemtopografie, dan zal de 2-D bodemtopografie zich aanpassen. Bij voldoende groot verschil tussen de actuele 2-D bodemtopografie en de 2-D evenwichts-bodemtopografie, zal de aanpassing van de 2-D bodemtopografie waarschijnlijk niet meer verwaarloosbaar zijn. Dit geldt met name in de scherpe Waalbochten. De aanpassing is een combinatie van een soort aanzandingsgolf die de gebaggerde geul inloopt en kanteling waarbij waarschijnlijk in het begin het golfkarakter overheerst en later de kanteling dominant wordt. De middellange-termijn aanpassing na baggeren is dus de combinatie van de aanpassing van de 2-D bodemtopografie en de voortplanting en vervorming van de beddingvormen. Ook deze voorspellingen worden per morfologische eenheid gedaan;
- Voor korte-termijn voorspellingen (enkele weken) zowel voor als na baggeren kan er van worden uitgegaan dat de 2-D bodemtopografie niet substantieel zal veranderen. Dit betekent dat de morfologische veranderingen vooral voortplanting en vervorming van beddingvormen zullen zijn. Voor de korte-termijn voorspelling is het mogelijk om individuele duinen te volgen en voorspellingen over hun voortplanting en vervorming te doen. In principe wordt het hiermee mogelijk om per locatie (en per morfologische eenheid) aan te geven waar hoeveel dient te worden gebaggerd;
- Een probleem bij de middellange en korte-termijn voorspellingen zal met name zijn het onderscheid maken tussen de 2-D bodemtopografie en de beddingvormen. Niet zozeer voor de natuurlijke situatie (want die kan waarschijnlijk wel uit een middeling van de JDP's worden verkregen), maar vooral voor de situatie na baggeren. Met name als de beddingvormen niet geheel zijn weggebaggerd;

- Sinds 1998 is door RWS-DON een zeer grote hoeveelheid multi-beam metingen uitgevoerd, die gebruikt kunnen worden om nader onderzoek te doen naar de hierboven voorgestelde voorspellingsmethoden. In aanvulling op het onderzoek van Taal (1999), is daarmee al een begin gemaakt door Siegfried (2000a,b). Vervolgonderzoek dient zich aanvankelijk te richten op de natuurlijke omstandigheden op de Midden-Waal, en vervolgens dient het effect van baggeren en terugstorten onderzocht te worden;
- Bij de toetsing aan de hand van de multi-beam metingen, die bij DON zijn opgeslagen als ArcView bestanden, zal bij de Midden-Waal een probleem kunnen worden dat de beddingvormen van dezelfde orde zijn als de 2-D bodemtopografie. Dit speelt minder voor de Waalbochten.

Op basis van de bovenstaande conclusies wordt een aantal aanbevelingen gedaan, onderverdeeld naar verschillende invalshoeken:

Analyse met ArcView van multi-beam peilingen gedaan sinds 1998

- Het onderzoek van Siegfried (2000a,b) dient te worden vervolgd met een analyse van de veranderingen in vaargeulbreedte als functie van het afvoerverloop en andere relevante parameters. Als aanvulling moet een soortgelijke analyse worden uitgevoerd voor het volume sediment in bepaalde riviergedeelten na baggeren en hoe dat verandert onder invloed van onder andere de afvoer;
- Vervolgens moet ten aanzien van de voorspellingsmethoden in eerste instantie onderzoek gedaan worden naar de opgedrongen maar natuurlijke 2-D bodemtopografie als basis voor de voorspellingen;
- Vervolgens zal specifiek onderzoek naar het optreden, de afmetingen en de voortplanting van beddingvormen en aanpassingstijden bij lage afvoeren gedaan moeten worden (eventueel door of in samenwerking met de Universiteit Utrecht). Ook dient de kortetermijn voorspelling getoetst te worden, eventueel met additionele informatie, als de frequentie van de multi-beam peilingen niet voldoende is;
- Tenslotte dient aandacht te worden gegeven aan een aantal complicerende omstandigheden: overgangen en uitschuring ervan tijdens laagwater, hoogwaterafzettingen en hun voortplanting, de invloed van scheepvaart en nalevering vanuit kribvakken, voor zover mogelijk met de beschikbare multi-beam/ArcView bestanden;
- In tweede instantie dient de aanpassing na baggeren te worden onderzocht. De hiervoor voorgestelde voorspellingsmethode (combinatie van verandering van de 2-D bodemtopografie en veranderingen van beddingvorm als stochastisch verschijnsel) dient daarbij getoetst te worden aan de multi-beam peilingen gedaan na het baggeren.

Analyse met 2-D rekenmodellen

- Een groot probleem bij de analyse van de prototype metingen op de Midden-Waal is dat de relatieve grootte van de beddingvormen het moeilijk maakt om de aanpassing van de 2-D bodemtopografie goed te bestuderen. Het gebruik van een 2-D morfologisch model als Delft2D-Rivieren is daardoor aantrekkelijk omdat de beddingvormen daarin alleen als ruwheid zijn vertegenwoordigd.

Aanvullend prototype onderzoek

- Onderzoek naar beddingvormen tijdens laagwater perioden: afmetingen als functie van de afvoer/waterdiepte, naijling, voortplanting en vervorming;
- Specifiek onderzoek naar de voortplanting en vervorming van hoogwaterafzettingen;
- Specifiek onderzoek naar de "vlammen", grootte (correlatie met diepte ontgroning bij kribkoppen), voortplanting en demping.

Aanvullend theoretisch onderzoek

- Onderbouwing met theoretisch onderzoek van de aanpassing van beddingvormen in de tijd en met verandering van waterdiepte;
- Ontwikkeling van een (in eerste instantie simpel) model voor de nalevering van sediment vanuit de kribvakken op basis van frequentie van scheepspassages, afstand van de passage en scheepstonnage;
- Ontwikkeling van een methode om de invloed van scheepvaart op de bodem in rekening te brengen, zowel voor wat betreft de beddingvormen als ook de 2-D bodemtopografie.

Literatuur

- Allen, J.R.L. (1976a), Computational models for dune-timelag: general ideas, difficulties and early results, *Sedimentary Geology*, Vol. 15, pp. 1-53.
- Allen, J.R.L. (1976b), Computational models for dune-timelag: oppulation structures and the effect of discharge pattern and coefficient of change, *Sedimentary Geology*, Vol. 16, pp. 99-130.
- Allen, J.R.L. (1976c), Computational models for dune-timelag: an alternative boundarey condition, *Sedimentary Geology*, Vol. 16, pp. 255-279.
- Allen, J.R.L. (1978), Computational models for dune-timelag: calculations using Stein's rule for dune height, *Sedimentary Geology*, Vol. 20, pp. 165-216.
- Barneveld, H.J., Flokstra, C. en Struiksmā, N. (1994), Evaluatie Baggerproef Hulhuisen, WL | Delft Hydraulics, Rapport Q1699.
- Bishop, C.T. (1977), On the time growth of dunes, Kingston, Queen's University, M.Sc. thesis.
- Brinke, W.B.M. ten, Kruij, N.M., Kroon, A. en Berg, J.H. van den (1999a), Erosion of sediments between groynes in the Waal River as a result of navigation traffic, *Spec. Publ. Intern. Ass. Sedimentology*, Vol. 28, pp. 147-160.
- Brinke, W.B.M., Wilbers, A.W.E. and Wesseling, C. (1999b), Dune growth, decay and migration rates during a large-magnitude flood at a sand and mixed sand-gravel bed in the Dutch Rhine system, *Spec. Publ. Intern. Ass. Sedimentology*, Vol. 28, pp. 15-32.
- Brinke, W. B.M. ten (2000), *Sedimenthuishouding Rijntakken*, TU Delft, PAO Cursus Moderne Rivierkunde, 18 pp, MR4.
- Douben, N. (1995), Knelpunten analyse Waal. Analyse van scheepvaartknelpunten op de Boven-Rijn en Waal; oplossingsrichtingen, RWS, RIZA, Nota 95.005.
- Douben, N. (1997), Projectvoorstel "Beslissing Ondersteunend Systeem Baggeren" (Bagger-BOS), RWS, RIZA, RIZA-memo RYN*97-45(I).
- Douben, N. (1999), Projectprogramma Beslissing Ondersteunend Systeem Baggeren: Ontwikkeling van instrumentarium voor vaarwegbeheer in het kader van het Waalprogramma, RWS, RIZA, Afdeling Rivieren, Werkdocument 99.036X.
- Douben, N. (1999), Handvaten voor beddingvormen op de Waal, RWS, RIZA, Memo RYN*99-18(I), 7 pp.
- Douben, N. (2000), Temporele variatie in bodemligging per morfologische eenheid, RWS, RIZA, Memo RYN*2000-11(I), 18 pp.
- Duits, M.T. (1997), Baggeroptimalisatie in rivierbochten, TU Delft/ HKV Lijn in water, Report PRO68.
- Fredsoe, J. (1979), Unsteady flow in straight alluvial streams: modification of individual dunes, *J. Fluid Mech.*, Vol. 91, pp. 497-512.
- Gee, D.M. (1973), *Sediment transport in non-steady flow*, Berkeley, University of California, Report 4EC22-3.
- Havinga, H. en A. van Urk (1980), Solving river problems in The Netherlands, *Proc. IAHR Symp. on River Engng. and its Interaction with Hydr. and Hydr. research*, Belgrado.
- Hoffmans, G. en H. Verhey, H.J. (1998), *Scour manual*, Balkema.
- Ikeda, S. and Parker, G. (Ed.) (1989), *River meandering*, AGU, Water Resources Monograph 12, Washington, D.C.

- Jain, S.C. and J.F. Kennedy (1971), The growth of sand waves, Proc. Intern. Conf. on Stochastic Hydraulics, Pittsburg, USA.
- Jansen, P.Ph. (Ed.) (1979), Principles of River Engineering, The non-tidal alluvial river, London, etc., Pitman Publ. Cy. (fascimile reprint 1994 by Delft Uitgevers Maatschappij).
- Joglekar, D.V. (Ed.) (1971), Manual on river behaviour, control and training, Central Board of Irrigation and Power, Publ. No.60 (revised), New Delhi.
- Julien, P.Y. & Klaassen, G.J. (1995), Sand-dune geometry of large rivers during floods, Journ. of Hydr. Engng., Vol. 121, No. 9, pp. 657-663.
- Klaassen, G.J. en N. Struiksmā (1988), On constriction scour in braided rivers. Intern. Conf. on Fluvial Hydraulics, Budapest.
- Kleinmans, M.G. (1999), Sediment transport in de Waal: hoogwater november 1998, Netherlands Centre for Geo-ecological Research, Rapport ICG 99/6.
- Kruitwagen, P. & Graaf, D van de (1996), Projectnota Waal. Verdieping en verbreding van de vaarweg tussen Pannerdenschē Kop en Zaltbommel, RWS-DON, Nota W-KS-96070, versie 2.0.
- Kruitwagen, P. en Havinga, H. (1996), Ontwerpnota (hydraulisch/morfologische effectbepaling Waalproject), RWS-DON, Nota B-KS-96017, versie 2.1.
- Kruitwagen, P. (1997), Projectplan Baggeren, RWS-DON, Rapportnummer W-BG-97026 (versie 1.0).
- Lai, N.T. (1998), Characterisation of bedforms in the Waal River, IHE Delft, M.Sc. thesis.
- Lambeek, J.J.P. en E. Mosselman (1998) Huidige en historische rivierkundige parameters van de Nederlandse Rijntakken, WL | Delft Hydraulics, Rapport Q2382.
- Lenders, R., Maren, B. van en Mol, J.-W. (1998), Wind-, golf- en stromingsgeïnduceerd sedimenttransport in kribvakken langs de Waal. Kribvakmetingen Druten/Ochten juli 1996 tot april 1997, Netherlands Centre for Geo-ecological Research, Rapport ICG 98.10.
- Miwa, H. and Nagayoshi, T. (1999), Suppression limit of alternate bar migration through sine-generated meander channels, Journ. of Natural Disaster Science, Vol. 21, No. 1, pp. 1-10.
- Mosselman, E. en C.J. Sloff (1998) Probleemanalyse ijking Delft3D voor Pannerdenschē Kop, WL | Delft Hydraulics, Rapport Q2494.
- Mosselman, E., A. Sieben, C.J. Sloff en A. Wolters (1999) Effect of spatial grain size variations on two-dimensional river bed morphology. Proc. IAHR symposium River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Genova, 6-10 sept. 1999, Vol. I, p.499-507.
- Ogink, H. (1984), Hydraulische ruwheid van de Bovenrijn en Waal, WL | Delft Hydraulics, Rapport R2017.
- Ogink, H. (1989), Hydraulic roughness of single and compound bedforms, WL | Delft Hydraulics, Rapport M1314 - XI/Q786.
- RA & WL (1998), Definitiefase BOS Baggeren; Resultaten specialistische verkenningen en beoordeling alternatieven, Rapport RA/98-315 (Resource Analysis, Delft).
- Rijn, L.C. van (1993), Principles of sediment transport in rivers, estuaries and seas, Aquarius.
- Schans, H. (1998), Bed level development in Bovenrijn, Pannerdenschē Kanaal and the upstream part of the Waal, Netherlands Centre for Geo-ecological Research, Report ICG 98/16.
- Schepman, F. (2000a), Morfologische ontwikkeling van de Waalbodem. Een studie naar eenvoudige relaties die de bodemligging beschrijven, voor en na baggerwerk, NCR, WL | Delft Hydraulics & TU Delft, Inceptie rapport afstudeerwerk.
- Schepman, F. (2000b), Morfologische ontwikkeling van de Waalbodem, WL | Delft Hydraulics & TU Delft, NCR, Interim rapport afstudeerwerk.

- Schoor, M.M. & A.M. Sorber (1998), Morfologie natuurlijk. Brochure, RWS, RIZA, ISBN 903695231X.
- Schoor, M.M., H.P. Wolfert, G.J. Maas, H. Middelkoop & J.J.P. Lambeek (1999), Potential for floodplain rehabilitation based on historical maps and present-day processes along the River Rhine, The Netherlands. In: Floodplains: Interdisciplinary approaches. Eds. S.B. Marriott & J. Alexander, Geological Society, London, Spec. Publ., 163, pp.123-137.
- Sieben, J. (1999), Lokale morfologische effecten door verlaging van zomerkaden, RWS, RIZA, Werkdocument 99.152 X, 51 pp.
- Sieben, J. (2000), Morfodynamisch gedrag van bodemverstoringen; verkenning met lineaire oplossing, RWS, RIZA, WSR-Memo 2000/022, 3 pp.
- Sieben, N. en Douben, N. (2000), Globale inschatting van morfologische effecten in het zomerbed door herinrichting van uiterwaarden, RWS, RIZA, Werkdocument 2000.027 X, 65 pp.
- Siegfried, A. (2000a), Morphological response of the Waal to dredging activities, NCR, University of Karlsruhe, Power Point presentation prepared for RWS-DON, 195 sheets.
- Siegfried, A. (2000b), Morphologische Reaktion der Waal auf Baggermassnahmen, Universitaet Karlsruhe (TH), Institut fuer Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik, Diplomarbeit.
- Sloff, C.J., en E. Mosselman (1998), Voorbereiding ijking Rijntakkenmodel, WL | Delft Hydraulics, Rapport Q2460 met kaartbijlage.
- Smedes, R. (1999), Notitie Draaiboek Baggeren, RWS-DON, januari 1999.
- Struiksmā, N. and J.J. van der Zwaard (1981), Influence of the regime on the bed topography in a river, Proc. XIX IAHR-Congress, New Delhi, India (ook WL publicatie no. 243), 9 pp.
- Struiksmā, N., K.W. Olesen, C. Flokstra, H.J. de Vriend (1985) Bed deformation in curved alluvial channels, J. Hydr. Res., Vol. 23, No.1, p.57.
- Struiksmā, N. en Crosato, A. (1989), Analysis of a 2DH bed topography model for rivers, In: Ikeda, S. and Parker, G. (Ed.) (1989), River meandering, AGU, Water Resources Monograph 12, Washington, D.C.
- Struiksmā, N., M. Laguzzi en J. Bremer (1994), Improvement fairway Middenwaal, Sensitivity analysis related to the occurrence of free bars in the constricted Middenwaal River, WL | Delft Hydraulics, Report Q1813.
- Struiksmā, N. (1997), Cursus 2-D riviermorfologie, WL | Delft Hydraulics en TU Delft, 2 delen (overheadsheets en literatuur).
- Sutherland, A.J. and L.S. Hwang (1965), A study of the dune geometry and dune growth on a sand bed, Cal. Inst. Technology, W.M. Keck Laboratory, Pasadena, USA, Techn. Memorandum no. 65-5.
- Taal, M. (1994), Evaluatie baggerproef Hulhuizen, RWS, RIZA, Nota nr. 94.059, met 5 bijlagen (o.a. Bijlage E, Evaluatie baggerproef Hulhuizen = Rapport Q1699 van WL | Delft Hydraulics).
- Taal, M. (1999), Waalproject - Proef Morfologie, RWS-DON Afdeling Rivierkunde, CD-Versie 2.0, okt. 99.
- Talmon, A.M., N. Struiksmā & M.C.L.M. van Mierlo (1995), Laboratory measurements of the direction of sediment transport on transverse alluvial-bed slopes, J. Hydr. Res., IAHR, Vol.33, No.4, pp.495-517.
- Wijbenga, J.H.A. and G.J. Klaassen (1981), Changes in bedform dimensions under unsteady flow conditions in a straight flume, Proc. 2nd Intern. Conf. on Fluvial Sediments, Keele (UK).
- Wijbenga, J.H.A. (1990), Flow resistance and bedform dimensions for varying flow - literature review, WL | Delft Hydraulics, Report Q 785, TOW Rivers A58.
- Wijbenga, J.H.A. (1991), Analyse prototype-metingen (niet-)permanente ruwheid, WL | Delft Hydraulics, Report Q 1302, 38 pp. + 15 fig. + 7 bijlagen.

- Wilbers, A.W.E. (1997), Duinkarakteristieken en dune tracking tijdens een hoogwater in de Rijntakken. Verwerking van gegevens bij Druten en de Pannerdensche Kop met DT2D, Netherlands Centre for Geo-ecological Research, Report ICG 98/12.
- Wilbers, A.W.E. (1998a), Bodemtransport en duinontwikkeling tijdens afvoergolven in de bovenrijn en Waal, Netherlands Centre for Geo-ecological Research, Report ICG 98/12.
- Wilbers, A.W.E. (1998b), Ruimtelijke variabiliteit van duinkarakteristieken in de Waal tijdens een hoogwatergolf in 1997, Netherlands Centre for Geo-ecological Research, Report ICG 98/19.
- Wilbers, A.W.E. & W.B.M ten Brinke (1999), Development of subaqueous dunes in the Rhine and Waal, The Netherlands. A preliminary note, pp. 303-312.
- Wolters, A.F. (1998), Vaste laag bij Nijmegen, Casestudy in het kader van 'Kennisonwikkeling 2D-morfologie', RWS, RIZA Rapport 98058, oktober 1998.

A Voortplanting, groei en demping van 2-D morfologische verschijnselen

A.1 Inleiding

Bij de baggerprojecten op de Midden-Waal, maar ook bij dergelijke werken op de bochtige trajecten bovenstrooms van Nijmegen en bij St. Andries, bestaat de behoefte om met enige eenvoudige schattingsmethoden greep te krijgen op de morfologische responsie van de rivier in termen van de 2-D tijdschalen en voortplantingssnelheden in aanvulling op 1-D verschijnselen. Sinds het eind van de 70-er jaren zijn er op het gebied van de 2-D morfologie interessante studies uitgevoerd met behulp van lineaire en verstoringsanalyse van de 2-D vergelijkingen. De resultaten, hoewel gebrekkig door veel vereenvoudigingen, hebben het begrip van de 2-D morfologie aanzienlijk vooruit geholpen. Deze resultaten worden uitvoerig besproken in enkele artikelen die zijn verschenen in Ikeda en Parker (1989). In dezelfde periode zijn er ook computerprogramma's ontwikkeld op basis van het complete stelsel 2-D verschijnselen, waarmee numerieke modellen kunnen worden ontworpen. Het gebruik van dit soort programma's voor voorspellingen voor baggeren heeft de voorkeur, omdat de complexiteit van het baggerwerk en de morfologische gevolgen ervan zich niet erg goed verdragen met eenvoudige schattingsmethoden. Desalniettemin wordt hier een poging ondernomen om tot enig inzicht te komen op basis van eenvoudige benaderingen.

Voor de in de 2-D gebruikte uitgangsvergelijkingen en de gepleegde analyse met al zijn vereenvoudigingen wordt verwezen naar Struiksmā en Crosato (1989). In dit artikel wordt het eerste orde resultaat van de analyse gegeven in Vergelijking (37) van het desbetreffende artikel (zie ook paragraaf A.2). Omdat deze vergelijking nogal ingewikkeld is, zijn er daarna twee wegen bewandeld, namelijk:

- niet stationaire oplossing;
- stationaire oplossing.

Ad 1 Niet-stationaire oplossing

Deze weg is bewandeld onder de aanname dat de maximale amplitude van de verstoring van het dwarsprofiel in langsrichting uniform is, hetgeen overeenkomt met de aanname dat de amplitude van de verstoring van het langsprofiel langs een oever uniform is. Deze aanpak leidt tot de beschrijving van vrije banken (initiële groei of demping en voortplanting). Fysisch gezien is het verschijnsel verwant aan het hierna te behandelen fenomeen van de "overshoot" (doorschot). De golflengte van de vrije banken kan worden gevonden uit het golfgetal met de maximale initiële groei.

Ad 2 Stationaire oplossing

Deze oplossing is plaatsgebonden. De maximale amplitude van de verstoring kan dempen of groeien in de langsrichting. Met de uitkomst van de analyse kan een golflengte en een dempingslengte worden bepaald.

De golflengte is een factor 2 à 4 groter dan de golflengte van de vrije banken. Fysisch gezien is het verschijnsel het resultaat van de herverdeling van het water- en sedimenttransport in langs- en dwarsrichting. Een relevant voorbeeld van het effect van de stationaire oplossing is de bodemligging in bochten. In deze gevallen is de verstoring de spiraalstroom, die ervoor zorgt dat er in de binnenbocht een bank ontstaat met in de buitenbocht een uitschuring. In het axisymmetrische geval (een oneindig lange cirkelvormige bocht) is er op basis hiervan een simpele benadering van het dwarsprofiel mogelijk. Echter het fysische verschijnsel van re-distributie resulteert in de Waal in een 'overshoot', die wordt opgewekt door de bovenstroomse bochten of rechtstanden. Met andere woorden de bodemligging in bochten kan niet worden voorspeld met alleen de simpele axi-symmetrische oplossing. het dwarsprofiel zal altijd steiler zijn.

Ter illustratie van het voorgaande kunnen de volgende twee voorbeelden dienen:

In de 80-er jaren is een zeer interessant numeriek experiment uitgevoerd door Struiksmā, hetgeen geschikt is om een goed begrip van het gedrag van 2-D verstoringen te verkrijgen. Het betrof hier een rechte goot van grote lengte met hydraulische en morfologische karakteristieken van de Boven-Rijn. De bovenstroomse rand werd stationair vervormd en er werd gerekend totdat er een evenwichtsbodemligging was verkregen. In feite is dus het rekenresultaat een combinatie van stationaire en niet-stationaire verschijnselen. In het begin (zowel in tijd als in ruimte) ontstonden er banken met relatief korte golflengten, die bij vrije banken behoren en die een positieve voortplanting en groei hadden. Na verloop van de tijd werd de gehele goot gevuld met banken, groeide de golflengte en nam de voortplantingssnelheid af, hetgeen te verwachten was gezien de resultaten van de lineaire analyse. Uiteindelijk kwam het numerieke resultaat tot stilstand (dus was er evenwicht bereikt) met golf- en dempingslengten, die redelijk met de resultaten van de lineaire analyse waren te voorspellen voor het stationaire geval.

Een ander zeer illustratief experiment is gedaan voor de toetsing van de quasi-2D SEDREDGE optie (2 parallelle geulen) in het 1-D SOBEK model. Daarbij zijn drie numerieke experimenten uitgevoerd. Bij het eerste experiment is over de gehele breedte van de rivier (dus in beide geulen) een gelijke hoeveelheid sediment weggenomen. Tijdens de daarop volgende berekening plantte de verdieping zich voort met een snelheid die overeen kwam met de 1-D voortplantingssnelheid, die gegeven wordt door:

$$c_b = \frac{n s_0}{h_0 (1 - Fr_0^2)} \quad (A.1)$$

waarin:

- c_b = 1-D voortplantingssnelheid (m/s)
- h_0 = ongestoorde waterdiepte (m)
- s_0 = ongestoorde sedimenttransport (m^2/s)
- n = macht van de eenvoudige sedimenttransportformule $s = m u^n$
- Fr_0 = (ongestoord) Froude getal (-), gedefinieerd als $Fr_0 = u/(gh_0)^{1/2}$
- g = versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)

In een volgend numeriek experiment werd de ene zijde van de rivier over een bepaalde afstand verdiept en de andere zijde opgehoogd zodanig dat netto geen sediment uit de rivier werd verwijderd. Ook dit verschijnsel plantte zich voort, maar met een veel kleinere voortplantingssnelheid. Dit wordt veroorzaakt doordat het water als het ware kan uitwijken via het verdiepte gedeelte. De voortplantingssnelheid kwam overeen met de 2-D voortplantingssnelheid zoals die hierna besproken zal worden (zie vergelijking (A.8)). Bij het laatste numerieke experiment werd alleen aan een zijde van de rivier een hoeveelheid sediment verwijderd. Tijdens de daarop volgende simulatie bleek de verstoring zich te splitsen in twee gedeelten, elk met een eigen voortplantingssnelheid en amplitude. De eerste verstoring kwam overeen met een 1-D verstoring met een amplitude van de halve verdieping en een voortplantingssnelheid volgens vergelijking (A.1) (de onttrekking van zand had zich na enige afstand over de gehele breedte herverdeeld). De tweede verstoring had eveneens als amplitude de halve verdieping en die plantte zich voort met de bij 2-D verstoringen behorende vergelijking (A.8), die (afhankelijk van de lengte van de verstoring, die terugkomt in de factor k') beduidend langzamer is dan de 1-D verstoring. Dit voorbeeld toont aan dat de voortplanting van een verstoring sterk afhankelijk is van of wel of niet sediment is onttrokken, maar ook van de 2-D vorm en afmeting van de verstoring.

Deze voorbeelden zijn bedoeld om te illustreren dat de lineaire analyse veel kennis over 2-D morfologische processen heeft opgeleverd, maar tegelijkertijd tonen ze aan dat 2-D morfologie en het gedrag van verstoringen een ingewikkelde materie is, die moeilijk in simpele relaties te vangen is.

Voortbouwend op het bovenstaande, worden in deze bijlage enkele relevante resultaten gegeven van de lineaire analyse van de 2-D bodemligging van de Waal. Dit is gebeurd voor de hierboven onderscheiden (stationair en niet-stationaire) verschijnselen. Verder is een eerste afschatting gemaakt van de grootte van onder meer de voortplantingssnelheden en van karakteristieke aanpassings/groeitijden.

A.2 Niet-stationaire oplossing van de 2-D-beddingvervorming

Uitgegaan wordt van het homogene gedeelte van vergelijking (2.49) van Crosato (1990):

$$\lambda_s \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \left(1 - \frac{n-3}{2}\right) \frac{\partial H}{\partial x} + \left(\frac{1}{\lambda_w}\right) H + \left(\frac{h_0 \lambda_s}{s_0}\right) \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial t} + \left(\frac{h_0 \lambda_s}{s_0 \lambda_w}\right) \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (\text{A.2})$$

waarin:

H = amplitude dwarsprofiel

λ_w = aanpassingslengte waterbeweging (m) (voor definitie zie onder vergelijking (A.8))

λ_s = aanpassingslengte sedimentbeweging (m) (voor definitie zie onder vergelijking (A.8))

x = langskoördinaat

t = tijd

Voor de niet-stationaire oplossing van de 2-D-beddingvervorming wordt in de lineaire analyse de volgende vergelijking gevonden:

$$H(x, t) = \hat{H}(t) e^{+\frac{t}{T}} \sin k(x - c_r t) \quad (\text{A.3})$$

waarin:

- \hat{H} = uniforme maximale amplitude
- T = tijdschaal (positief voor groei, negatief voor demping)
- k = $2\pi/L_p$ = golfgetal bodemverstoring (L_p is golflengte)
- c_r = voortplantingssnelheid 2-D bodemverstoring

De vergelijking beschrijft het gedrag van vrije banken en de “overshoot”, die moet worden opgeteld bij de verstoring van de bodem veroorzaakt door de aanwezigheid van bochten. In de vergelijking kan het golfgetal k worden gekozen. Dit kan bijvoorbeeld het golfgetal zijn voor de aanwezige bochten, of vrije banken, of stationaire banken. Omdat het een resultaat is van een lineaire analyse is het niet goed mogelijk om de amplitude \hat{H} te schatten. Dit geldt met name voor de vrije banken (groei).

A.3 Kanteling dwarsprofiel als gevolg van variatie afvoer

Hoewel op de Midden-Waal de bochten zwak zijn gekromd is er toch een duidelijk geforceerde beddingtopografie aanwezig. Daarom is de amplitude van het dwarsprofiel samengesteld uit de som van de axiaalsymmetrische oplossing en een “overshoot”.

Uit de lineaire analyse volgt voor de amplitude $H_0(x, t)$:

$$\frac{H_0}{B} = \frac{A}{\pi} f(\theta_0) h_0 \hat{\Gamma} \quad (\text{A.4})$$

waarin:

- H_0 = amplitude axi-symmetrisch dwarsprofiel
- B = breedte van de rivier
- A = spiraalstromingscoëfficiënt (voor de Waal $A \approx 10$)
- $f(\theta_0)$ = dwarshellingseffect, gedefinieerd via:

$$f(\theta_0) = 9 \left(\frac{D}{h_0} \right)^{0.3} \sqrt{\theta_0} \quad (\text{A.5})$$

- h_0 = gemiddelde waterdiepte
- $\hat{\Gamma}$ = krommingsamplitude van de rivier (apex)
- D = korreldiameter (voor de Midden-Waal $D \approx 1$ mm)
- θ_0 = gemiddelde Shieldsparameter

Ervan uitgaande dat het langsverhang van de Midden-Waal constant is, is dus de axi-symmetrische oplossing alleen nog een functie van $h_0^{1.2}$. Dit betekent dat de dwarsprofielen flauwer zouden moeten worden bij lagere afvoer (h_0 klein). Dit is echter hoogst waarschijnlijk niet het geval, daar de “overshoot” bij lagere afvoeren toeneemt, omdat deze gestuurd wordt door de interactieparameter IP:

$$IP \approx 2 \frac{g}{C^2} \left(\frac{B}{h_o} \right)^2 \left(\frac{D}{h_o} \right)^{0.3} \sqrt{\theta_o} \quad (A1.6)$$

waarin: C = Chézy-coëfficiënt

Gezien de grote invloed van de breedte-diepte verhouding zal de interactieparameter bij lagere afvoer groeien en daardoor de “overshoot”. Dit zal de verflauwing van de axiaal-symmetrische oplossing kunnen neutraliseren.

Bij deze processen horen een 2-D tijdschaal en een 2-D voortplantingssnelheid. De lineaire analyse van vrije banken geeft hiervoor (zie vergelijking (A.3)):

$$T = -T_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{(n-1)k'^2}{1+k'^2} IP \right)^{-1} \quad (A.7)$$

en

$$c_r = \frac{s_0}{h_o} \frac{k'^2 - \left(\frac{n-3}{2} \right)}{k'^2 + 1} \quad (A.8)$$

waarin:

T = tijdschaal 2-D processen

T_0 = $\lambda_s h_o / s_o$

k' = $2\pi\lambda_w/L_p$

n = graad van niet-lineariteit van het transport met de watersnelheid

c_r = 2-D voortplantingssnelheid

λ_s = aanpassingslengte bodemverstoring (= $IP \lambda_w$)

λ_w = aanpassingslengte waterbeweging (= $C^2 h_o / 2g$)

g = versnelling van de zwaartekracht

L_p = golflengte van de bochten (voor de Midden-Waal $L_p \approx 5000$ m) of van de verstoring.

In tabel A.1 wordt de tijdschaal en de voortplantingssnelheid met de index b gegeven voor twee Waalafvoeren. Het is een gedempt systeem met een relatief zeer grote tijdschaal en zeer kleine negatieve voortplantingssnelheid. Dit betekent dat beddingtopografie gestuurd door de bochten wordt bepaald door de gemiddelde rivierafvoeren. Variaties in de dwarsprofielen worden vooral bepaald door de aanwezige duinen. Tevens zal de niet-uniforme afstroming bij hoge afvoeren van de uiterwaarden een rol spelen alsmede dieptevariaties van de ontgrondingskuilen bij kribkoppen.

A.4 Vrije banken

Dit verschijnsel is op de Midden-Waal nog nooit gemeten. Toch volgt uit de lineaire analyse, dat het verschijnsel op de Midden-Waal aanwezig is. Immers in Tabel A.1 wordt voor vrije banken een positieve tijdschaal T (index f) gegeven, zodat van initiële groei sprake is. Mogelijk worden de vrije banken niet waargenomen door de interactie met de aanwezige duinen en bochten in combinatie met een zeer geringe groeisnelheid (grote tijdschaal) en voorplantingssnelheid c_r (index f). Bovendien is het waarschijnlijk dat tijdens hoogwater het verschijnsel wordt onderdrukt (IP is dan klein).

A.5 Verstoring door baggeren

Indien de baggerstrategie het afvlakken van de bochten betreft (baggeren binnenbocht en storten buitenbocht), dan is het probleem vergelijkbaar met het eerdere behandelde bochtprobleem. De in Tabel A.1 gegeven tijdschalen en voorplantingssnelheid (index b) zijn dan geldig. De dwarsprofielen tenderen terug naar de oorspronkelijke toestand en dat duurt zeer lang. De baggerstrategie zal ook de duinen en de verstoringen ten gevolge van de kribben afvlakken. Deze verschijnselen zullen ook terugkomen, maar veel sneller. Indien alleen wordt gebaggerd in de binnenbocht of alleen wordt gestort in de buitenbocht, dan geldt voor het 2-D verschijnsel hetzelfde als bij het afvlakken. Echter, conform hetgeen in de inleiding is verteld over het derde numerieke experiment, verschijnt er ook een 1-D verstoring, die zich in benedenstroomse richting zal voortplanten met een veel grotere snelheid dan de 2-D verstoring, die zich in bovenstroomse richting voortplant. Uit Tabel A.1 blijkt dat de snelheid c van de 1-D verstoring ongeveer een factor 10 groter is dan voor de 2-D verstoringen.

A.6 Verschijnselen op de overgangen

Op de overgangen tussen twee bochten zal tijdens laagwater enige uitschuring kunnen optreden ten opzichte van de gemiddelde bodemligging. Bij laagwater is dit andersom. Dit wordt veroorzaakt doordat de over de breedte van een rivier gemiddelde bodemschuifspanning op een overgang iets groter is dan in een bocht bij laagwater (bij hoogwater is dit andersom). Hierdoor ontstaan er gradiënten in het sedimenttransport. Voor laagwater is dit verschijnsel te vergelijken met een geringe versmalling op de overgangen. De tijdschaal, die hiervoor geldt:

$$T_{ov} = \frac{L_{ov}}{c} \quad (A.9)$$

waarin:

T_{ov} = tijdschaal

L_{ov} = lengte overgang (1000 m) voor Midden-Waal

c = voortplantingssnelheid 1-D bodemverstoring

Voor laagwater ($Q_w = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$) met $L_{ov} = 1000 \text{ m}$ wordt de tijdschaal $T_{ov} \approx 1000/2.3 \approx 430$ dagen. Het proces gaat dus dermate langzaam dat het waarschijnlijk nauwelijks meetbaar is.

A.7 Gedrag van bodem benedenstrooms van vaste lagen in een buitenbocht

Doordat de vaste laag de waterbeweging en de sedimentbeweging in dwarsrichting op zodanige wijze verstoort dat direct benedenstrooms langs de oever waar de vaste laag is aangelegd een verdieping ontstaat met langs de andere oever een bank, zal in benedenstroomse richting een gedempt 2-D golvend patroon in de bodem kunnen worden waargenomen. Dit patroon is gesuperponeerd op de oorspronkelijke bodemligging. Deze bodemvervorming is stationair en de golf- en dempingslengte kunnen worden gevonden uit de resultaten van de stationaire lineaire analyses, volgens:

$$2\pi \frac{\lambda_w}{L_p} = \frac{1}{2} \sqrt{(n+1)IP^{-1} - IP^{-2} - \left(\frac{n-3}{2}\right)^2} \quad (\text{A.10})$$

$$\frac{\lambda_w}{L_D} = \frac{1}{2} \left(IP^{-1} - \frac{n-3}{2} \right) \quad (\text{A.11})$$

waarin:

L_D = de dempingslengte (damping voor positieve waarden)

Aangenomen kan worden dat de processen zeer langzaam verlopen, zodat het resultaat zal worden bepaald door de gemiddelde condities in de rivier. Dit betekent dat $L_p \approx 3400$ m en $L_D \approx 3300$ m ($Q_w = 1600$ m³/s). Indien de zandbank moet worden weggebaggerd, zal het herstel van deze bank relatief langzaam verlopen. Een indicatie voor de bijbehorende tijdschaal zou kunnen worden gevonden uit de ervaringen die zijn opgedaan met de vaste laag bij St. Andries.

A.8 Aanbeveling

Het voorgaande is gebaseerd op lineaire analyse, waardoor de nauwkeurigheid niet groot zal zijn. Daarom is het sterk aan te bevelen om een 2-D morfologisch model van de Midden-Waal te maken voor alleen het laagwaterbed (dus voor afvoeren < 2000 m³/s). Met een plaatsstap van 100 m in langsrichting en 50 m in dwarsrichting zullen voor een traject van bijvoorbeeld 20 km de rekentijden meevallen. In een dergelijk model kunnen allerlei verstoringen onderzocht worden. Het model zal niet het gedrag van duinen voorspellen, zodat rond de uitkomsten een onzekerheidsband moet worden aangenomen.

Literatuur

- Crosato, A. (1990), Simulation of meandering river processes, Comm. on Hydr. and Geotechn. Engng., Delft University, Report no. 90-3
- Ikeda, S. and Parker, G. (Ed.) (1989), River meandering, AGU, Water Resources Monograph 12, Washington, D.C.
- Struiksmā, N. en Crosato, A. (1989), Analysis of a 2DH bed topography model for rivers, In: Ikeda, S. and Parker, G. (Ed.) (1989), River meandering, AGU, Water Resources Monograph 12, Washington, D.C.

	Parameter	Q ₁	Q ₂	Unit	
	Q _w	1000	1600	m ³ /s	
	λ _w	396	547	m	
	λ _s	540	417	m	
	IP	1.36	0.75	-	
bochten	k' _b	0.50	0.69	-	L _p ≈5000m
vrije banken	k' _f	2	3	-	L _p ≈1000m
	s _o	1.9	3.5	m ² /dag	2-D
bochten	c _{rb}	-0.27	-0.21	m/dag	2-D
bochten	T _b	-2600	-1300	dagen	2-D
		demping	demping		
vrije banken	c _{rf}	+0.27	+0.48	m/dag	2-D
vrije banken	T _f	+1000 groei	+2000 groei	dagen	2-D
	θ	0.286	0.395	-	
	c	2.3	3.0	m/dag	1-D
	h	4.2	5.8	m	
	C	43	43	m ^{1/2} /s	
	T _o	1200	690	dagen	

Tabel A1.1 Karakteristieken Midden-Waal voor twee afvoeren

B Sedimenttransport en beddingvormen in de Waal

B.1 Inleiding

Bij de baggerprojecten op de Midden-Waal, maar ook bij dergelijke werken op de bochtige trajecten bovenstrooms van Nijmegen en bij St. Andries, bestaat de behoefte om met enige eenvoudige schattingsmethoden greep te krijgen op de morfologische responsie van de rivier. Op een rivier zijn behalve 2-D morfologische verschijnselen ook beddingvormen van belang. Dat geldt met name op de relatief rechte Midden-Waal, omdat daar de grootte van de beddingvormen in dezelfde orde ligt als de grootte van de 2-D morfologische verschijnselen. Dat betekent dat scheepvaartbeperkingen zich in eerste instantie zullen vertonen als beddingvormen gesuperponeerd op 2-D verschijnselen. Een goede kennis van het optreden van beddingvormen, hun afmetingen, voortplantingssnelheden en de aanpassing van de afmetingen van de beddingvormen aan variërende afvoeromstandigheden is dan ook noodzakelijk in het kader van voorspellingen van toekomstige ondiepten. Een bijkomend aspect is dat baggeren op de Midden-Waal vaak het verwijderen van beddingvormen zal zijn, waarbij een min of meer vlakke bodem wordt opgeleverd. In de daarna volgende periode zullen wederom beddingvormen gaan optreden die zullen gaan groeien. Inzicht in de groei van deze beddingvormen is belangrijk, omdat op termijn deze beddingvormen de beschikbare vaardiepte zullen gaan beïnvloeden.

Beddingvormen en sedimenttransport zijn nauw met elkaar verbonden. In rivieren als de Waal, waar bodemtransport sterk overheerst en bepalend is voor de morfologische veranderingen, vindt het sedimenttransport vooral plaats via het transport van beddingvormen. De voortplantingssnelheid van beddingvormen wordt bepaald door de grootte van het bodemtransport. Daarom is gekozen om in deze bijlage ook het een en ander op te nemen over sedimenttransport op de Waal.

Uitgebreid onderzoek naar beddingvormen is uitgevoerd in het kader van het TOW Rivieren, waarbij de aandacht vooral gericht is geweest op aanpassing van beddingvormen aan zich wijzigende afvoeromstandigheden (Wijbenga en Klaassen, 1983; Wijbenga, 1990 en 1991). Meer recent is veel onderzoek verricht naar sedimenttransport en beddingvormen in het prototype, met name op de Boven-Rijn en de Waal. Voor een overzicht zie onder meer Wilbers en ten Brinke (1999), Kleinhans (1999), en ten Brinke (2000). Gebruik makend van deze onderzoeken, wordt in deze bijlage een summier overzicht gegeven van hetgeen bekend is op het gebied van sedimenttransport en beddingvormen, waarbij de nadruk ligt op beschikbare gegevens van de Waal.

B.2 Sedimenttransport op de Waal

Recente gegevens over het sedimenttransport in de Waal worden gegeven door ten Brinke (2000). Metingen van het bodemtransport in de Rijntakken is en wordt gedaan met twee verschillende methoden, namelijk:

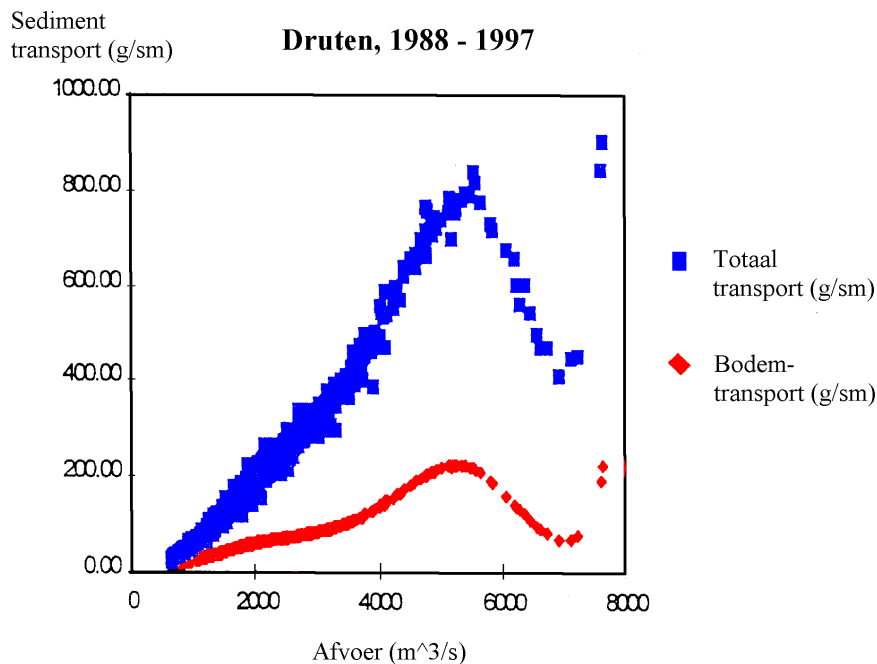
- bodemtransportmeters als de BTMA en de Helley Smith;
- dune-tracking.

Dune tracking gebeurt door de beweging van beddingvormen via achtereenvolgende peilingen te volgen. Zowel de hoogte van de beddingvormen H als de voortplantingssnelheid c_b kan dan worden bepaald, mits het interval tussen de verschillende peilingen niet te groot is. Het bodemtransport kan worden bepaald uit de volgende formule:

$$s = \alpha H c_b \quad (\text{B.1})$$

waarin s = bodemtransport per eenheid van breedte (m^2/s)
 α = bodemtransportcoëfficiënt (-)
 H = hoogte beddingvormen (m)
 c_b = voortplantingssnelheid van de beddingvormen (m/s)

De metingen kunnen worden gebruikt om te bepalen welke sedimenttransportformule het best passend is voor de Rijn. Uit het onderzoek van ten Brinke (2000) blijkt dat voor de meer zanderige riviergedeelten de sedimenttransportformule van Engelund-Hansen het best voldoet. Als een sedimenttransportformule is gekozen, kan op basis van de dagelijkse afvoeren het dagelijkse sedimenttransport worden berekend. Het resultaat voor de Waal bij Druten is weergegeven in Figuur B.1.

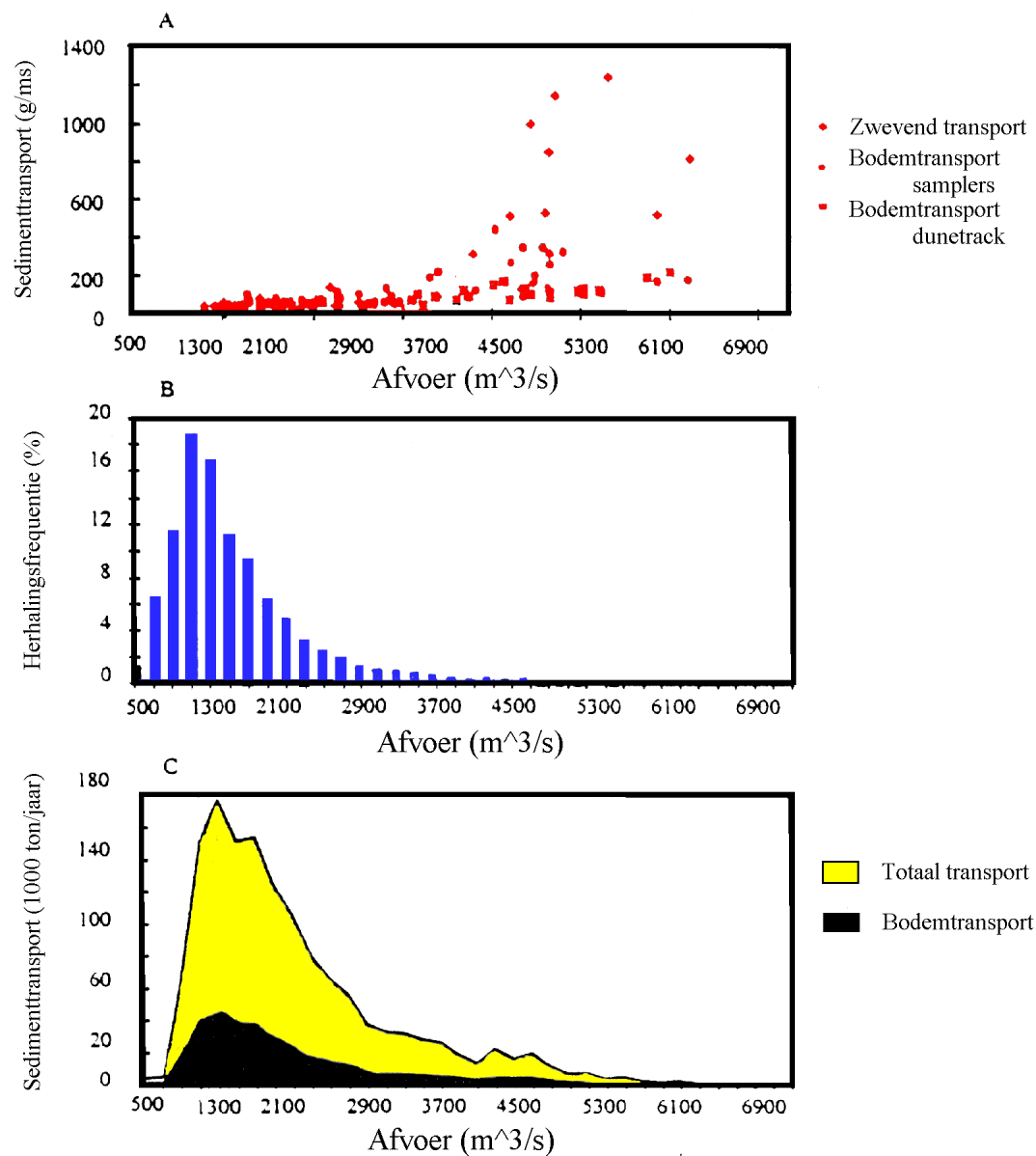


Figuur B.1 Sedimenttransport in de Waal berekend voor alle dagen in de periode 1988-1997 als functie van de afvoer in de Waal (ten Brinke, 2000)

De volgende opmerkingen worden gemaakt naar aanleiding van Figuur B.1:

- Op de verticale as is het sedimenttransport gegeven in de eenheid gram per seconde per eenheid van breedte. Dit kan herleid worden tot het volumetrische sedimenttransport s (m^3/s) door te delen door zowel het soortelijk gewicht van het sediment ($\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$) als het aandeel van de korrels in het volume ($1 - \text{poriengetal} = 0,6$);
- Boven $5500 \text{ m}^3/\text{s}$ blijkt het sedimenttransport scherp af te nemen. Volgens ten Brinke komt dat omdat de snelheid in het zomerbed afneemt als de uiterwaarden gaan meestromen.

Figuur B.2 is gebaseerd op dezelfde informatie. De bijdrage van elke afvoerklasse aan het totale sedimenttransport is uitgerekend. Het blijkt dat hoewel de grootste transporten optreden als het zomerbed vrijwel geheel is gevuld ("bankfull conditions"), de grootste bijdrage aan het sedimenttransport wordt geleverd door afvoeren (op de Waal) in de orde van $1500 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figuur B.2 Verdeling van bijdrage aan sedimenttransport in de Waal voor een aantal afvoerclassen (ten Brinke, 2000)

Voor meer informatie over sedimenttransport op de Waal wordt verwezen naar diverse rapporten en artikelen van Wilbers, Kleinhans (1999) en ten Brinke (2000).

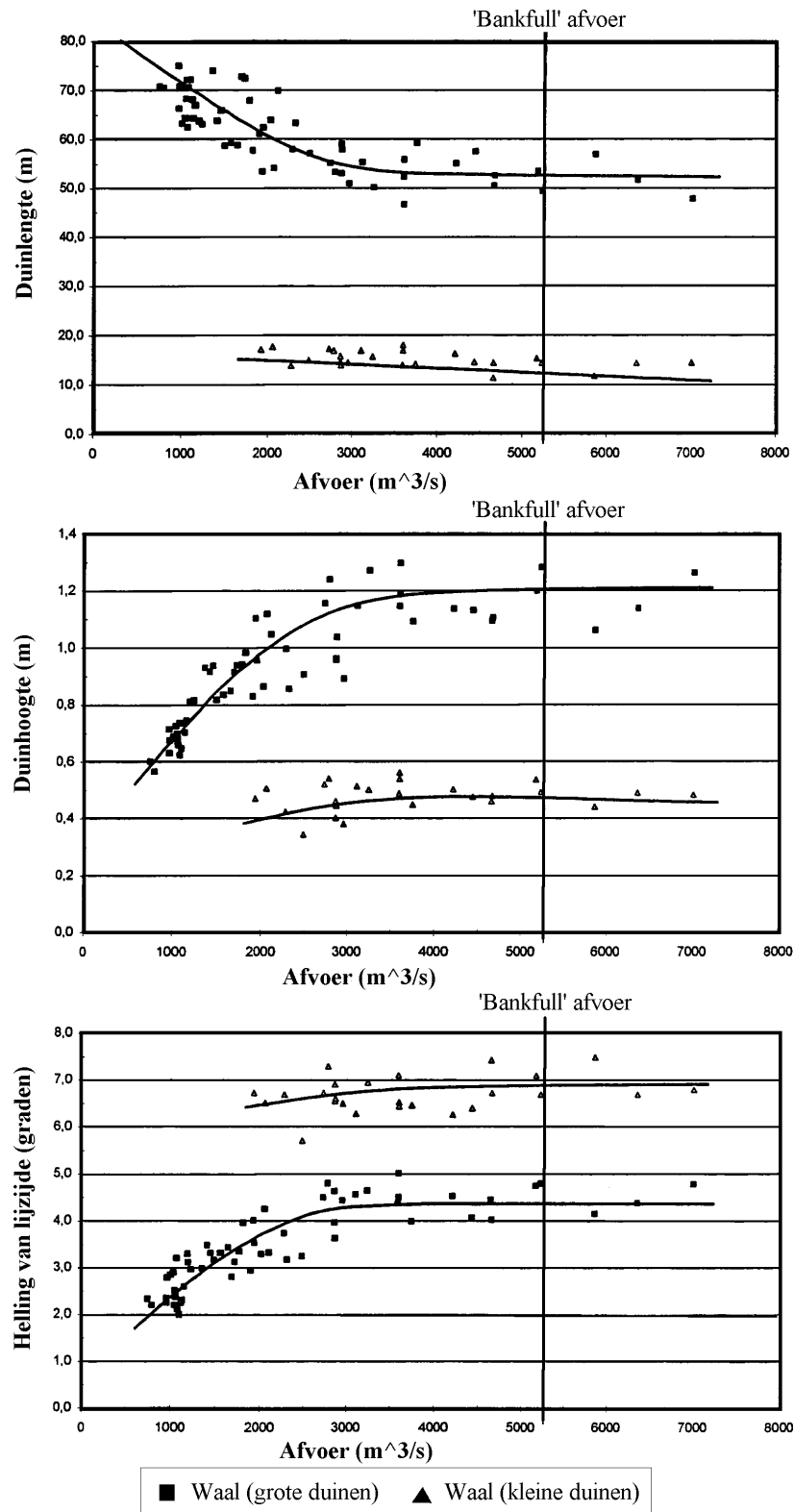
B.3 Optreden, afmetingen en voortplantingssnelheden van beddingvormen op de Waal

In de Waal komen vooral duinen voor als dominante beddingvormen. Volgens Wilbers en ten Brinke (1999) verschilt het type beddingvorm echter afhankelijk van of het linker of het rechter gedeelte van het zomerbed wordt beschouwd. Enkele gegevens over de optredende beddingvormen:

linker riviergedeelte: grote symmetrische beddingvormen die volgens Wilbers en ten Brinke (1999) geen duinen zijn met een lengte van 150-160 m en een hoogte 1,5 m met erop gesuperponeerd relatief kleine duinen met een lengte van 15-20 m en een hoogte van 0,4 m;

rechter riviergedeelte: alleen relatief grote duinen met een lengte van 60-70 m en een hoogte van 0,6-1,2 m.

Algemeen wordt aangenomen dat de verschillen tussen rechts en links verklaard worden door het verschil in invloed van de scheepvaart. Links wordt gebruikt door de geladen opvaart, terwijl de ongeladen afvaart, die een kleinere invloed op de bodem heeft, vooral ter rechterzijde vaart.

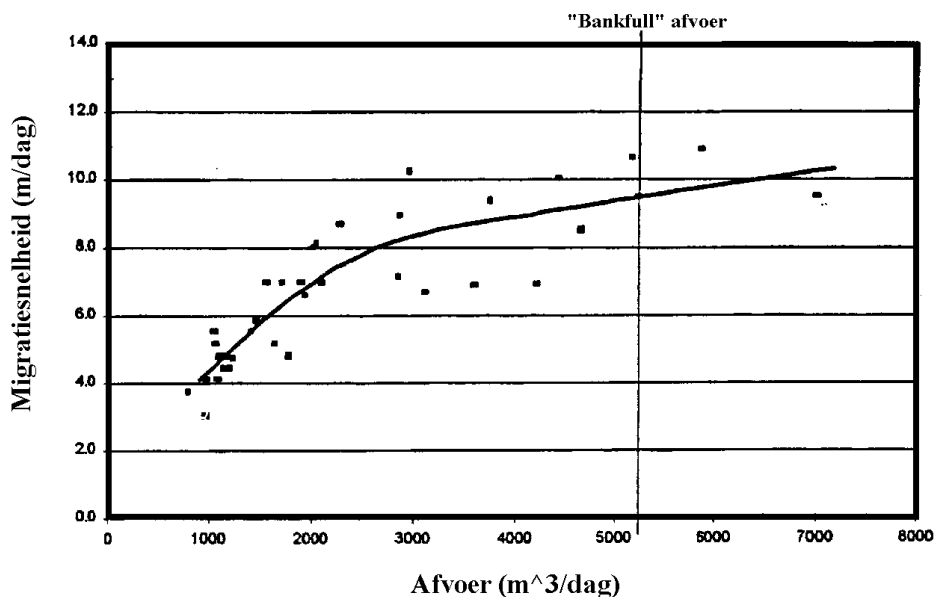


Figuur B.3 Duinlengte, duinhoogte en helling van lijzijde van grote duinen (rechter-/Noordzijde van de Waal) en kleine duinen (linker-/Zuidzijde van de Waal), volgens Wilbers en ten Brinke (1999)

Figuur B.3 geeft informatie over de in de Waal optredende duinen als functie van de afvoer. Opvallend is dat vanaf 5.000 m³/s ("bankfull discharge") de afmetingen van de duinen niet

meer veranderen. De duinhoogte in het rechter deel van de rivier neemt sterk af met de afvoer, maar de duinen in het linkergedeelte blijven vrijwel constant in hoogte.

In Figuur B.4 is de voortplantingssnelheid van de grote duinen in het rechter riviergedeelte weergegeven als functie van de afvoer. Ook hier kan geconstateerd worden dat de voortplantingssnelheid sterk afhangt van de afvoer in de rivier. Bij afvoeren van circa 1.000 m³/s is de voortplantingssnelheid circa 4 m/dag, en die neemt toe bij toenemende afvoer tot circa 10 m/dag.



Figuur B.4 Voortplantingssnelheid van grote duinen op de Waal (Wilbers en ten Brinke, 1999)

B.4 Aanpassing van beddingvormen

De afmetingen van beddingvormen zijn een functie van de afvoer, maar beddingvormen passen zich vertraagd aan. In het kader van het TOW Rivieren is hier onderzoek naar gedaan. Na een uitgebreid literatuurstudie, stelt Wijbenga (1990) voor om voorshands de volgende simpele uitdrukking (eerste orde systeem) voor de aanpassing van de duinhoogte aan te houden:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{T_d} (H_e - H) \quad (\text{B.2})$$

waarin H = actuele duinhoogte (m)
 t = tijd (s)
 H_e = evenwichtsduinhoogte behorend bij de actuele afvoer (m)
 T_d = tijdschaal voor de aanpassing van de duinhoogte (s)

Prototype gegevens over de aanpassing van beddingvormen zijn onder meer beschikbaar voor de Waal bij een afvoer van circa 2500 m³/s. Deze zijn geanalyseerd door Wijbenga (1991) met als conclusie dat T_d circa 6 dagen is voor de Waal.

Mogelijk is de aanpassingstijd groter voor kleinere afvoeren. Een alternatieve formule voor de aanpassing van duinen is gegeven door Allen (1976a en volgende publicaties). De door Allen voorgestelde formule is:

$$\frac{\partial H(t)}{\partial t} = \frac{A c_b}{H(t)} (H_e - H(t)) \quad (B.3)$$

waarin A = aanpassingscoëfficiënt (-)

c_b = voortplantingssnelheid van de beddingvormen (m/s)

Voor de Waal leidt deze formule tot grotere aanpassingstijden bij lagere afvoeren, maar de formule heeft als nadeel dat ze geen duingroei uitgaande van een vlak bed kan voorspellen.

Groei van beddingvormen vanuit vlakbedsituaties

Groei van beddingvormen vanuit de vlakbed situatie is onder andere onderzocht door Gee (1973).

B.5 Literatuur

- Allen, J.R.L. (1976a), Computational models for dune-timelag: general ideas, difficulties and early results, *Sedimentary Geology*, Vol. 15, pp. 1-53
- Allen, J.R.L. (1976b), Computational models for dune-timelag: oppulation structures and the effect of discharge pattern and coefficient of change, *Sedimentary Geology*, Vol. 16, pp. 99-130
- Allen, J.R.L. (1976c), Computational models for dune-timelag: an alternative boundarey condition, *Sedimentary Geology*, Vol. 16, pp. 255-279
- Allen, J.R.L. (1978), Computational models for dune-timelag: calculations using Stein's rule for dune height, *Sedimentary Geology*, Vol. 20, pp. 165-216
- Brinke, W. B.M. ten (2000), *Sedimenthuishouding Rijntakken*, TU Delft, PAO Cursus Moderne Rivierkunde, 18 pp, MR4.
- Brinke, W.B.M., Wilbers, A.W.E. and Wesseling, C. (1999), Dune growth, decay and migration rates during a large-magnitude flood at a sand and mixed sand-gravel bed in the Dutch Rhine system, *Spec. Publ. Intern. Ass. Sedimentology*, Vol. 28, pp. 15-32.
- Gee, D.M. (1973), *Sediment transport in non-steady flow*, Berkeley, University of California, RRreport 4EC 22-3.
- Julien, P.Y. & Klaassen, G.J. (1995), Sand-dune geometry of large rivers during floods, *J. of Hydr. Engng.*, Vol. 121, No. 9, pp. 657-663
- Kleinhans, M.G. (1999), *Sediment transport in de Waal: hoogwater november 1998*, Netherlands Centre for Geo-ecological Research, Report ICG 99/6
- Lai, N.T. (1998), *Characterisation of bedforms in the Waal River*, IHE Delft, M.Sc. thesis
- Wilbers, A.W.E. (1997), *Duinkarakteristieken en dune tracking tijdens een hoogwater in de Rijntakken. Verwerking van gegevens bij Druten en de Pannerdensche Kop met DT2D*, Netherlands Centre for Geo-ecological Research, Report ICG 98/12

- Wilbers, A.W.E. (1998a), Bodemtransport en duinontwikkeling tijdens afvoergolven in de bovenrijn en Waal, Netherlands Centre for Geo-ecological Research, Report ICG 98/12
- Wilbers, A.W.E. (1998b), Ruimtelijke variabiliteit van duinkarakteristieken in de Waal tijdens een hoogwatergolf in 1997, Netherlands Centre for Geo-ecological Research, Report ICG 98/19
- Wilbers, A.W.E. & W.B.M ten Brinke (1999), Development of subaqueous dunes in the Rhine and Waal, The Netherlands. A preliminary note, pp. 303-312
- Wijbenga, J.H.A. (1990), Flow resistance and bedform dimensions for varying flow - literature review, WL | Delft Hydraulics, Report Q 785, TOW Rivers A58
- Wijbenga, J.H.A. (1991), Analyse prototype-metingen (niet-)permanente ruwheid, WL | Delft Hydraulics, Report Q 1302, 38 pp. + 15 fig. + 7 bijlagen
- Wijbenga, J.H.A. and G.J. Klaassen (1981), Changes in bedform dimensions under unsteady flow conditions in a straight flume, Proc. 2nd Intern. Conf. on Fluvial Sediments, Keele (UK)

C Onderzoek op basis van prototype verschijnselen met behulp van ArcView

C.1 Inleiding

In de hoofdtekst van dit rapport worden voorstellen gedaan voor eenvoudige voorspellers voor de natuurlijke ontwikkeling van de bodem in de Midden-Waal en in de Waalbochten bij laagwater, en het herstel van de bodemligging in de Midden-Waal en in de Waalbochten na baggeren.

Er zijn verschillende mogelijkheden om deze eenvoudige voorspellers te toetsen. Een van die mogelijkheden is gebruik maken van de door DON verzamelde prototype gegevens in het kader van de Proef Morfologie (zie Taal, 1999) en latere vervolgmetingen.

De prototype metingen zijn beschikbaar als ArcView bestanden en het ligt dus voor de hand om ook ArcView als instrument te gebruiken voor de analyse. Daarnaast zijn ook de resultaten van de jaarlijkse dwarspeilingen sinds 1988 beschikbaar als ArcView bestanden. De mogelijkheden van analyse met ArcView zijn echter beperkt.

C.2 Voorgestelde analyses voor onderzoek natuurlijke situatie

De volgende onderzoeken worden voorgesteld voor het onderzoek van voorspellingsmethoden voor de natuurlijke situatie:
identificatie van de gemiddelde natuurlijke en opgedrongen 2-D bodemligging hetgeen kan gebeuren op verschillende manieren, namelijk:

- middeling van de JDP's sinds 1988;
- middeling van de 4 multi-beam peilingen uit 1998 uitgevoerd voor het baggeren;
- middeling van de multi-beam peilingen na het hoogwater van 1999 en voor het baggeren van 1999;
- aftrekken van de gemiddelde bodemligging van de situatie voor het baggeren ter bepaling van de vrije verstoringen (die een mix zijn van beddingvormen, overgangen, hoogwaterafzettingen en "vlammen");
- analyse van de variatie in de "restant" bodemligging in verschillende riviergedeelten om inzicht te krijgen in de variatie van de beddingvormhoogtes in verschillende riviergedeelten;
- identificatie van en onderzoek naar het morfologisch gedrag (voortplanting en demping) van "complicerende" verschijnselen zoals hoogwaterafzettingen en overgangen.

C.3 Voorgestelde analyses voor toetsen herstelrelaties

Voor het toetsen van de voorgestelde herstelrelaties worden de volgende onderzoeken voorgesteld:

- ter toetsing van de lange-termijn voorspelling, analyse van de snelheid van herstel van de bodemligging na baggeren en terugstorten, waarbij expliciet rekening wordt gehouden met de afvoervariaties (des te hoger de afvoer, des te sneller zal het herstel gaan); zowel ten aanzien van $\partial V/\partial t$ als functie van de afvoer (in het verlengde van de analyses van Siegfried (2000) voor $\partial B/\partial t$) als voor $\partial z_b/\partial t$;
- analyse van de groeisnelheid van beddingvormen, eveneens als functie van de afvoer Q ;
- ter toetsing van de middellange termijn voorspelling voor de situatie na baggeren en terugstorten, vergelijking van de waarschijnlijkheidsverdeling van gemeten bodemligging met de voorspelling op basis van de combinatie van de aanpassing van de 2-D bodemtopografie met de groei van de beddingvormen (als stochastische parameter); hierbij wordt met name aandacht gegeven aan het eventueel optreden van 1-D verschijnselen, die zich met een 1-D voorplantingssnelheid naar beneden voortplanten;
- toetsing van de korte-termijn voorspelling, waarbij met name de groei en voortplanting van de beddingvormen wordt onderzocht.

Met name de metingen van 1999 zijn in principe goed geschikt omdat daarbij de hoeveelheid gebaggerd en teruggestort materiaal goed bekend is. Gebruik zal dienen te worden gemaakt van de gemiddelde natuurlijke 2-D bodemligging als referentie, omdat die bepalend is voor de aanpassing van de bodemtopografie. Afwijkingen van deze bodemligging zullen teniet worden gedaan als een eerste-orde systeem middels een e-macht met een tijdsschaal die in de hoofdtypekst wordt besproken.

D Mogelijk onderzoek met 2-D morfologische (numerieke) modellen

D.1 Inleiding

Om de in dit rapport voor de Waal voorgestelde eenvoudige voorspeller (voor natuurlijke bodemontwikkeling en herstel van bodemligging na baggeren) te toetsen zijn verschillende mogelijkheden. Een van die mogelijkheden is het uitvoeren van een aantal simulaties met een 2-D morfologisch (numeriek) model. Met name wordt daarbij gedacht aan het model Delft2D-Rivieren.

Het gebruik van zo'n model heeft een aantal voordelen in vergelijking met prototype onderzoek zoals besproken in Bijlage C, namelijk:

- de randvoorwaarden (met name de afvoer) kunnen duidelijk en eenduidig opgelegd worden en kunnen ook bij verschillende simulaties gevarieerd worden;
- de begincondities kunnen eveneens goed worden gespecificeerd, waardoor het - in combinatie met het eerste voordeel - mogelijk is om vergelijkend onderzoek te doen;
- de invloed van een aantal storende effecten (beddingvormen, kribben, nalevering vanuit kribben, erosiekuilen en “vlammen” en scheepvaart) is niet aanwezig omdat deze gesimuleerd worden;
- simulaties kunnen ook uitgevoerd worden of specifiek gericht worden op situaties die tot nu toe niet specifiek bij het prototype onderzoek aan de orde zijn geweest of onderkend konden worden (bijvoorbeeld het gedrag van hoogwaterafzettingen);
- zowel baggerlocaties als stortlocaties zijn goed bekend, want ze worden gespecificeerd via de begincondities of als randvoorwaarden voor de berekening;
- het numerieke model kan behalve voor het toetsen van voorspellingsmethoden ook gebruikt worden om deze relaties af te leiden door verschijnselen waarover nu nog te weinig bekend is te simuleren; hierbij wordt met name gedacht aan morfologische verschijnselen op overgangen en het morfologisch gedrag van hoogwaterafzettingen.

D.2 Eisen te stellen aan te gebruiken model

Voor het onderzoek naar voorspellingstechnieken dient een aantal eisen aan het te gebruiken model gesteld te worden, namelijk:

- “normaal” 2-D (*quasi-3D*) model, met 2-D waterbeweging met daaraan toegevoegd een geparametriseerde aanpak om de spiraalstroming te bepalen;
- curvi-lineair (kromlijnig) coördinatenstelsel;
- minstens 10 gridcellen in dwarsrichting in het zomerbed (waardoor de gebaggerde geul en de terugstort locaties met circa 25 m nauwkeurig kunnen worden gespecificeerd);

- alleen *bodemtransport* of *totaal transport*. Dat wil zeggen het sediment transport is direct gerelateerd aan de lokale stromingsomstandigheden en bodemmateriaaleigenschappen. Het sedimenttransport kan worden beschreven met een sedimenttransportformule;
- *door de gebruiker op te geven sedimenttransportformule* met minstens keuze uit Engelund-Hansen, Meyer-Peter & Müller en een nader te specificeren verband tussen het sedimenttransport s en snelheid u ;
- *variërende afvoer en variërende benedenstroomse waterstand*;
- voorshands *constante korreldiameter*, althans geen verticale of horizontale uitzeving;
- voorshands *constante C-waarde* en alleen mogelijk in een later stadium ruimtelijk en temporele variabiliteit;
- bij voorkeur een model met *zowel zomerbed als winterbed* (het laatste maakt het mogelijk om ook de lange-termijn voorspelling te toetsen).

Onder andere het bij RWS ter beschikking zijnde Delft2D-Rivieren model, waarin een deel van de Midden-Waal inclusief de uiterwaarden is geschematiseerd, lijkt geschikt voor dit onderzoek.

D.3 Voorgestelde simulaties voor onderzoek natuurlijke situatie

De simulaties voor onderzoek naar de ongestoorde, natuurlijke situatie kunnen voor een Waalmodel worden uitgevoerd met beperkte lengte. Het is dus niet nodig om het gehele model van de Waal hiervoor te gebruiken.

De volgende simulaties worden voorgesteld voor het onderzoek van voorspellingsmethoden voor de natuurlijke situatie:

- globale ijking van het model, waarbij met name de parameters die de axiaalsymmetrische dwarshellling en de point-bar vorming bepalen worden gevarieerd en ingesteld;
- simulatie met een langjarig afvoerloop met tijdens elke laagwaterperiode een uitvoer van de bodemligging, ter bepaling van de (i) gemiddelde evenwichtsbodemligging en (ii) de variatie van de bodemligging rond het gemiddelde;
- onderzoek naar de aanpassingstijd van de opgedrongen 2-D bodemtopografie, ter toetsing van de in Hoofdstuk 3 gedane veronderstellingen ten aanzien van de snelheid van aanpassing;
- nader te specificeren onderzoek naar de optelbaarheid van de verschillende morfologische verschijnselen;
- nader te specificeren onderzoek naar morfologische veranderingen op overgangen tijdens de aanloop naar een laagwaterperiode;
- nader te specificeren onderzoek naar het gedrag van hoogwaterafzettingen tijdens de aanloop naar een laagwaterperiode, met name ter bepaling van de voortplanting en vervorming van de afzettingen.

D.4 Voorgestelde simulaties voor toetsen van herstelrelaties

De simulaties ter toetsing van de herstelrelaties kunnen voor een Waalmodel worden uitgevoerd met beperkte lengte. Het is dus niet nodig om het gehele model van de Waal hiervoor te gebruiken.

De volgende simulaties worden voorgesteld voor het onderzoek ter toetsing van herstelrelaties en voor het in tweede termijn ook verder ontwikkelen van zulke relaties:

- principe onderzoek naar de aanpassing van een gebaggerde “sleuf” in een scherpe en in een flauwe bocht (ter beantwoording van vragen als: waar treedt aanzanding op, hoe snel vindt deze aanzanding plaats, en hoe is dit gerelateerd aan de “rest”-geul en de afvoer);
- toetsing van de middellange-termijn voorspelling, met speciale aandacht of het inderdaad niet nodig is om de aanpassing van de 2-D morfologie mee te nemen tijdens een laagwaterperiode en of er in deze een verschil is tussen een scherpe en een flauwe bocht;
- onderzoek voor een aantal geselecteerde morfologische eenheden naar de lange-termijn verandering van de gebaggerde geul (bedoeld om per type morfologische eenheid en per grootte van de gebaggerde geul een lange termijn herstelrelatie af te leiden);
- nader te specificeren onderzoek naar de middellange termijn invloed van waar en hoeveel sediment wordt gestort en wat daarvan de invloed is op de morfologie van de rivier, met het doel ook hiervoor te zijner tijd “herstel”relaties af te leiden.



WL | Delft Hydraulics

Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon 015 285 85 85
telefax 015 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 285 85 85
telefax +31 15 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

