

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

## Morfologische studie BOS Baggeren met Delft2D-Rivieren

Verslag parallelstudie

Verslag

oktober 2001

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

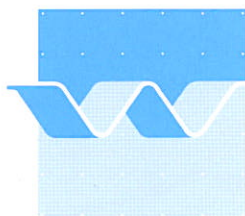
## Morfologische studie BOS Baggeren met Delft2D-Rivieren

Verslag parallelstudie

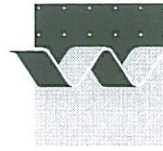
C.J. Sloff

Verslag

oktober 2001



**WL | delft hydraulics**



WL | delft hydraulics

OPDRACHTGEVER: Rijkswaterstaat RIZA

TITEL: Morfologische studie BOS Baggeren

**SAMENVATTING:**

Voor de ontwikkeling van een morfologische voorspellingsmodule in het BOS Baggeren is een studie uitgevoerd naar de "opgedrongen" tweedimensionale morfologie. Deze opgedrongen morfologie wordt met name bepaald door de geometrie van het zomerbed van de Waal (bochtstralen, breedtevariaties), en kan worden gesimuleerd met een tweedimensionaal (2D) morfologisch model. Hiervoor is een 2D model ontwikkeld in het Delft3D modelsysteem en zijn diverse berekeningen gemaakt en geanalyseerd. Enerzijds is aandacht besteed aan het natuurlijke dynamische gedrag van de opgedrongen bodemligging, anderzijds is onderzoek verricht naar herstel van bagger en stortwerkzaamheden. Daarnaast zijn uit de modelresultaten ook sedimenttransporten afgeleid per morfologische eenheid, en is op basis van metingen onderzoek gedaan naar de variaties in bodemligging die zijn opgetreden in de periode 1988-1999.

REFERENTIES: Ontwerp BOS-Baggeren 1.0, RIZA overeenkomst RI-323 I  
Resource analysis en WL | Delft Hydraulics

VER.	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
0.2	C.J. Sloff	nov. 2001		G.J. Klaassen	

PROJECTNUMMER: Q2844

TREFWOORDEN: Morfologie, Tweedimensionaal morfologisch model, baggeren

INHOUD:	TEKST	50 p	TABELLEN	7	FIGUREN	54	APPENDICES	3
---------	-------	------	----------	---	---------	----	------------	---

STATUS:  VOORLOPIG  CONCEPT  DEFINITIEF

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>1-1</b>
<b>2</b>	<b>Opzet van een tweedimensionaal model .....</b>	<b>2-1</b>
2.1	Inleiding .....	2-1
2.2	Kromlijng rekenrooster .....	2-1
2.3	Karakteristieken van het model .....	2-3
2.4	Globale ijking .....	2-4
<b>3</b>	<b>2D morfologische berekeningen Delft2D-Rivieren .....</b>	<b>3-1</b>
3.1	Herstel van baggerwerk .....	3-1
3.2	Dynamiek van de bodemligging .....	3-4
<b>4</b>	<b>Baggerwerk Hulhuizen .....</b>	<b>4-1</b>
4.1	Inleiding .....	4-1
4.2	Principe berekeningen .....	4-1
4.3	Simulatie herstel baggerbestek ON-1023 .....	4-4
<b>5</b>	<b>Berekende sedimenttransporten .....</b>	<b>5-1</b>
<b>6</b>	<b>Morfologische dynamiek .....</b>	<b>6-1</b>
<b>7</b>	<b>Conclusies .....</b>	<b>7-1</b>
	Literatuur .....	Lit.-1

## Bijlagen

<b>A</b>	<b>Parameters .....</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>Dwarsprofielen Hulhuizen .....</b>	<b>B-1</b>

**C Beschrijving aanpak voor figuren voor morfologische dynamiek..... C-1**

# I Inleiding

In het kader van een parallel-studie ten behoeve van morfologische voorspellingen in BOS Baggeren zijn morfologische berekeningen uitgevoerd met een 2D morfologisch model van de Waal. Doel van deze berekeningen was het verkrijgen van inzicht in de tweedimensionale opgedrongen morfologie die met name wordt bepaald door de geometrie van de Waal. Deze studie vormt onderdeel van een aantal onderzoeksactiviteiten die parallel worden uitgevoerd aan de ontwikkeling van het systeem “BOS Baggeren”, en moeten leiden tot een voorspellingsmodule voor de morfologie van de Waal binnen dit systeem. Zowel de simulaties zelf als de nabewerking van de resultaten ervan worden besproken in deze rapportage.

Het BOS-Baggeren wordt ontwikkeld in het kader van het project Baggeren, en dient ter ondersteuning van baggerbeslissingen die moeten worden genomen in de Waal. Deze baggerbeslissingen zijn noodzakelijk voor het handhaven van de vereiste vaargeul met dimensies 2,80 diepte ten opzichte van BRV (Bagger-referentievlak) en breedte 170 m. De doelstelling van het project Baggeren is de ontwikkeling van een baggerstrategie en de realisatie van een ‘Draaiboek baggeren’. Het Draaiboek baggeren dient handvatten aan te reiken voor de uitvoering en optimalisatie van jaarlijks terugkerende baggerwerkzaamheden op de Waal.

Het BOS baggeren wordt beschouwd als een ‘expertsysteem’ (bestaande empirische kennis gecombineerd met data en modellen) en dient bij de invoering van het baggerprogramma binnen korte termijn operationeel te zijn. Het BOS Baggeren zal in ieder geval ondersteuning moeten bieden bij de volgende beslissingen:

- |   |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"><li>1. waar moet worden gebaggerd ?</li><li>2. waar moet het materiaal worden teruggestort ?</li><li>3. hoeveel (volume en diepte) moet worden gebaggerd ?</li><li>4. op welk moment moet worden gebaggerd, en wanneer moet worden teruggekomen ?</li></ol> |
|---|

Bovengenoemde vragen vereisen niet alleen inzicht in de waargenomen situatie die volgt uit een gemeten bodemligging, maar ook in de wijze waarop de bodemligging zich in de tijd zal ontwikkelen. Bijvoorbeeld, om antwoord te geven op de vraag ‘wanneer moet worden teruggekomen’, of om het materiaal terug te storten op een locatie waar het niet snel erodeert en zelfs zou kunnen bijdragen aan versnelde ontwikkeling van nieuwe ondieptes. Daarom is als onderdeel van het BOS baggeren een module gewenst ten behoeve van de voorspelling van morfologische ontwikkelingen na een hoogwater, tijdens de laagwaterperiode en na de uitvoering van een baggerwerk (herstel van baggerwerk).

Op basis van de inventarisatie van mogelijke relaties voor het voorspellen van bodemveranderingen en herstel van baggerwerk (Klaassen en Sloff, 2000), en uit de studies van afgestudeerden Schepman (Schepman, 2001) en Siegfried (Siegfried, 2000) is vastgesteld dat in principe onderscheid is te maken tussen grootschalige opgedrongen 2D morfologie

(met name de bochtprofielen) en vrije verschijnselen (zich voortplantende storingen zoals de hoogwatersedimentatie, zandgolven die ontstaan vanuit kribvlammen, de duinen). Veelal zijn deze verschijnselen van een zelfde orde van grootte (m.b.t. de amplitude van deze verschijnselen). Omdat de grootschalige verschijnselen een andere tijdschaal kennen dan de kleinschalige verschijnselen (duinen) zijn ontkoppelingen mogelijk. Voor het vervolgonderzoek is daarom besloten afzonderlijke parallel-studies uit te voeren naar de genoemde verschijnselen.

Voor het onderzoek naar de opgedrongen 2D morfologie is gekozen voor de tweedimensionale modelleringsstudie met het Delft3D modelsysteem gepresenteerd in dit rapport. Voor het onderzoek naar vrije verschijnselen, toegespitst op beddingvormen, is een andere studie uitgevoerd door de Universiteit Utrecht (door A. Wilbers) waarbij met dune-track methode (DT2D methode) waargenomen beddingvormen in multibeam metingen zijn geanalyseerd.

In dit rapport wordt in hoofdstuk 2 de opzet, karakteristieken en ijking van het 2D model besproken. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 een aantal berekeningsresultaten gepresenteerd voor respectievelijk herstel van baggerwerk en stort in de Midden-Waal, en voor het dynamische gedrag van de bodemligging onder invloed van afvoervariaties. In hoofdstuk 4 zijn aansluitend de resultaten gepresenteerd voor simulaties van baggerwerk in de bocht bij Hulhuizen. Deze resultaten zijn vergeleken met de ter plaatse uitgevoerde metingen na oplevering van het baggerbestek ON-1023.

De berekende sedimenttransporten in het model zijn nader geanalyseerd en verwerkt voor het BOS Baggeren in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 is vervolgens beschreven op welke wijze de mate van morfologische dynamiek en de ruimtelijke verdeling kan worden gepresenteerd, zoals afgeleid uit een reeks van jaarlijkse dwarspeilingen. In deze statistiek wordt de opgedrongen morfologie en beddingvormen gecombineerd. Tenslotte zijn in hoofdstuk 7 conclusies en aanbevelingen van deze studie gepresenteerd.

## 2 Opzet van een tweedimensionaal model

### 2.1 Inleiding

Tweedimensionale morfologische berekeningen zijn uitgevoerd voor een kromlijinig model voor de Waal. Enerzijds wordt hiermee de gemiddelde opgedrongen 2D-bodemligging gesimuleerd, anderzijds kan hiermee simulatie van het herstel van baggerwerk worden gesimuleerd (met uitzondering van het effect van beddingvormen die daarbij optreden). Volgens Klaassen en Sloff (2000) is voor de opgedrongen bodemligging vooral de geometrie van het zomerbed maatgevend, en speelt het hoogwaterbed een secundaire rol. Hoogwatereffecten (bijvoorbeeld veroorzaakt door in- en uitstroming naar winterbed) worden beschouwd als vrije verschijnselen die zich voortbewegen over een als het ware gemiddelde 'stabiele' bodemligging. Om die reden is het model voorshands beperkt tot het zomerbed gelegen tussen de kribkoppen.

Kribben en kribvakken (dat wil zeggen het genoemde morfologische gedrag ervan) worden niet met het model gesimuleerd. Specifieke beddingvormen veroorzaakt door kribben (ontgrondingskuilen en kribvlammen) zijn daarom met het instrumentarium niet te simuleren, en worden beschouwd als verschijnselen die zijn gesuperponeerd op, en in feite onderdeel zijn van de opdrongen morfologie.

De berekeningen hebben een verkennend karakter, en zijn vooral bedoeld om inzicht te krijgen in de morfologische processen en de bijbehorende tijdschalen. De berekeningen zijn gemaakt met het tweedimensionaal modelsysteem Delft2D-Rivieren (te beschouwen als een subsysteem van Delft3D).

### 2.2 Kromlijinig rekenrooster

Voor het rekenmodel is gebruik gemaakt van een kromlijinig rekenrooster. De randen van het rekenrooster volgen de normaallijnen, waarbij de normaallijnen zijn gedefinieerd als rechte lijnstukken die achtereenvolgende kribkoppen met elkaar verbinden. Doordat de kribben zijn verbonden door rechte lijnstukken is in de bochten sprake van kleine knikjes ter plaatse van de kribkoppen. Deze geven in de simulaties aanleiding tot zeer kleine (stabiele) storingen in de berekende bodemligging, maar onvoldoende ernstig om eerst tot een glad gemaakte normaallijn over te gaan.

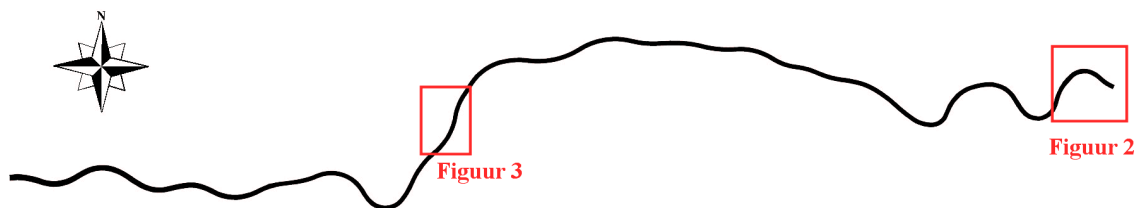
Het rekenrooster is gegenereerd voor het Waal-traject tussen km 867,2 (Pannerdense Kop) en km 953 (Gorinchem), totale lengte circa 84 km. Er is voor gezorgd dat op de rivieras de celgrootte van het rooster exact 50 meter bedraagt. In dwarsrichting varieert de celgrootte tussen de 10 en de 30 m, met een overwegende/gemiddelde grootte van 18 m. Het totaal aantal roostercellen bedraagt daarmee  $1682 \times 14 = 23548$  cellen.

Voor het rekenmodel wordt vereist dat het rooster orthogonaal is, hetgeen kan worden beschouwd als een eis dat de kromlijnige roosterlijnen elkaar min of meer loodrecht snijden. Bij afname van de orthogonaliteit neemt de nauwkeurigheid van de



waterbewegingsberekeningen af. Na het opzetten van het rooster wordt een rooster over het algemeen georthogonaliseerd, hetgeen kan worden beschouwd als een rekenslag waarbij het rooster iets wordt herschikt voor een betere orthogonaliteit. De mate van orthogonaliteit van het rooster wordt uitgedrukt met behulp van een orthogonaliteitsparameter. Hoe lager deze parameter, hoe hoger de orthogonaliteit. Voor het uiteindelijke rooster voor de Waal bedraagt de orthogonaliteitsparameter over het gehele model gemiddeld 0,03. Dit is als zeer goed te beschouwen. Zeer lokaal in het benedenstroomse traject is sprake van een waarde van 0.06, wat nog steeds als zeer laag (en dus zeer orthogonaal) is te zien.

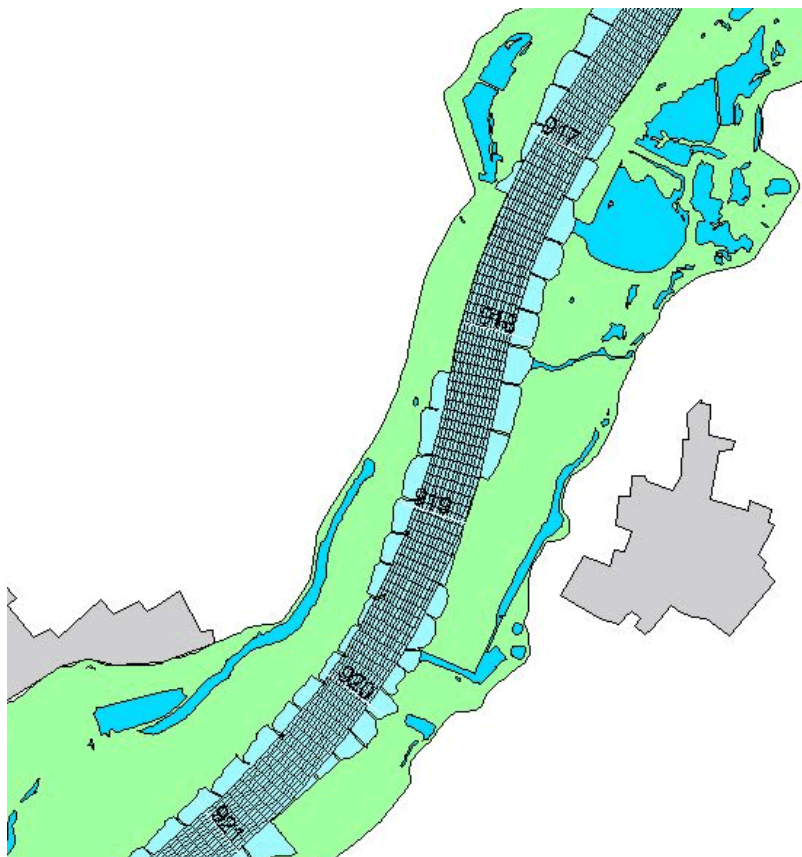
Een overzicht van het rekenrooster is weergegeven in figuur 1. In figuren 2 en 3 zijn vervolgens enkele details van het rooster weergegeven, geprojecteerd op de rivierenkaart. Deze figuren illustreren de ligging van het rooster in het zomerbed, en de vorm ervan.



Figuur 1 Overzicht van het Delft3D rekenrooster-traject voor de Waal (zomerbed)



Figuur 2 Detail van rekenrooster nabij Pannerdense Kop en bocht Hulhuizen



Figuur 3 Detail van rekenrooster Midden-Waal (omgeving Dreumel, km 918)

## 2.3 Karakteristieken van het model

Na vastlegging van het rekenrooster zijn vervolgens de belangrijkste karakteristieken van het model bepaald, en vastgelegd in de modelinvoer-bestanden. Daarbij is gebruik gemaakt van model instellingen die in het verleden succesvol zijn gebleken voor het simuleren van de bodemligging in de Waal (zie bijvoorbeeld Sloff en Struiksmā, 1997, Wolters, 1998). Een aantal belangrijke hydraulische en morfologische kenmerken, afgeleid uit geijkte 2D en 1D modellen voor de Waal, zijn gepresenteerd in Bijlage A. Hierbij is een onderscheid gemaakt naar een drietal trajecten (Bochtentraject Boven-Waal, zwak gekromde traject Midden-Waal en bocht bij St. Andries).

Enkele relevante kentallen voor het 2D model zijn globaal:

- roostergrootte  $\Delta x = 50$  m,  $\Delta y = 18$  m,
- korreldiameter  $D_{50} = 2$  mm;
- hydraulische ruwheid  $C = 45$  m<sup>1/2</sup>/s;
- breedte  $B \approx 260$  m;
- aanpassingslengte voor 2D stroming  $\lambda_w \approx 550$  m;
- aanpassingslengte voor 2D morfologie  $\lambda_s \approx 350$  m (dus roosterafstanden passen goed binnen deze aanpassingslengtes)

Hieronder worden puntsgewijs een aantal belangrijke uitgangspunten, en randvoorwaarden van het model genoemd.

- Er is gerekend met een uniforme verdeling van de diameter van het sediment (storende effecten die optreden met ruimtelijke variaties van de bodemsamenstelling worden daarmee voorkomen). Ook voor de ruwheid is van een uniforme Chézy-waarde uitgegaan om vergelijkbare redenen.
- Grootschalige morfologische veranderingen, met name de autonome bodemdaling, zijn buiten beschouwing gelaten.
- Een goede voorspelling van het sedimenttransport is noodzakelijk teneinde aanpassingstijden van de morfologie goed te kunnen voorspellen. In het verleden is vaak gebruik gemaakt van de Engelund en Hansen transport formule (vermenigvuldigd met een factor 0,5), waarbij met een in de tijd constante Waal-afvoer van 1600 m<sup>3</sup>/s een jaarlijks transport van 300.000 m<sup>3</sup>/jaar wordt bereikt. Het betreft de mate van “totaal transport”, het bodemmateriaal dat zowel middels bodemtransport als middels zwevend transport bijdraagt aan de morfologische veranderingen. Meninge over grootte van jaartransport en keuze van transportformule verschillen echter. In eerste instantie waren er gezien de goede ervaringen in het verleden geen argumenten om van deze instellingen af te wijken, maar inmiddels is na analyse van meetresultaten het beeld ontstaan dat de werkelijke waarden aanzienlijk hoger liggen (zie paragraaf 2.4). Overigens is voor de casestudie “vaste laag Nijmegen” gerekend met Meyer-Peter en Müller type transport formule, met vergelijkbaar resultaat als de Engelund en Hansen transport formule wat betreft de morfologische eindsituatie.
- Voorafgaande aan ieder berekening is een waterbewegingsberekening gemaakt om te kunnen starten met een stabiel stromingsbeeld. Daarmee worden inspeelverschijnselen voorkomen.
- Zoals in paragraaf 2.2 is aangegeven zijn de begrenzingen van het rooster gedefinieerd langs normaallijnen. Omdat deze normaallijnen zijn gevormd door rechte lijnstukjes van kribkop naar kribkop is ter plaatse van een kribkop sprake van een klein knikje in de normaallijn. Deze discontinuïteit leidt tot kleine storingen in de bodemligging (vergelijkbaar met de kribvlammen in sterk gereduceerde vorm). Omdat deze storingen kunnen leiden tot numerieke fouten (opslingering) en instabiliteitsproblemen is enige demping in het systeem gebracht. Hiervoor heeft de parameter ALFSTA een waarde 35 gekregen, hetgeen een waarde is die vaker in dit soort situaties wordt toegepast.

## 2.4 Globale ijking

In het volgende wordt puntsgewijs besproken welke typen ijkingsberekeningen zijn uitgevoerd, en welk resultaat zij hebben opgeleverd. Vervolgens worden enkele belangrijke resultaten getoond. Doel van de ijking is te komen tot een model dat in grote lijnen het gedrag beschrijft van de opgedrongen morfologie in de Waal. Omdat het model bedoeld is om inzichten te verschaffen in het morfologische gedrag van het sterk geschematiseerde zomerbed, en niet voor exacte voorspelling, is het model globaal (op grote schaal) geijkt.

- De morfologische ontwikkeling berekend met het model zijn getoetst aan de gemiddelde bodemligging bepaald uit de jaarlijkse dwarspeilingen periode 1988 - 1999 door Frieke Schepman (Schepman, 2001). Daarnaast vindt ook toetsing plaats van het berekende

jaartransport aan de recente gegevens met betrekking tot de sedimenthuishouding van de Rijntakken (ten Brinke, 2001).

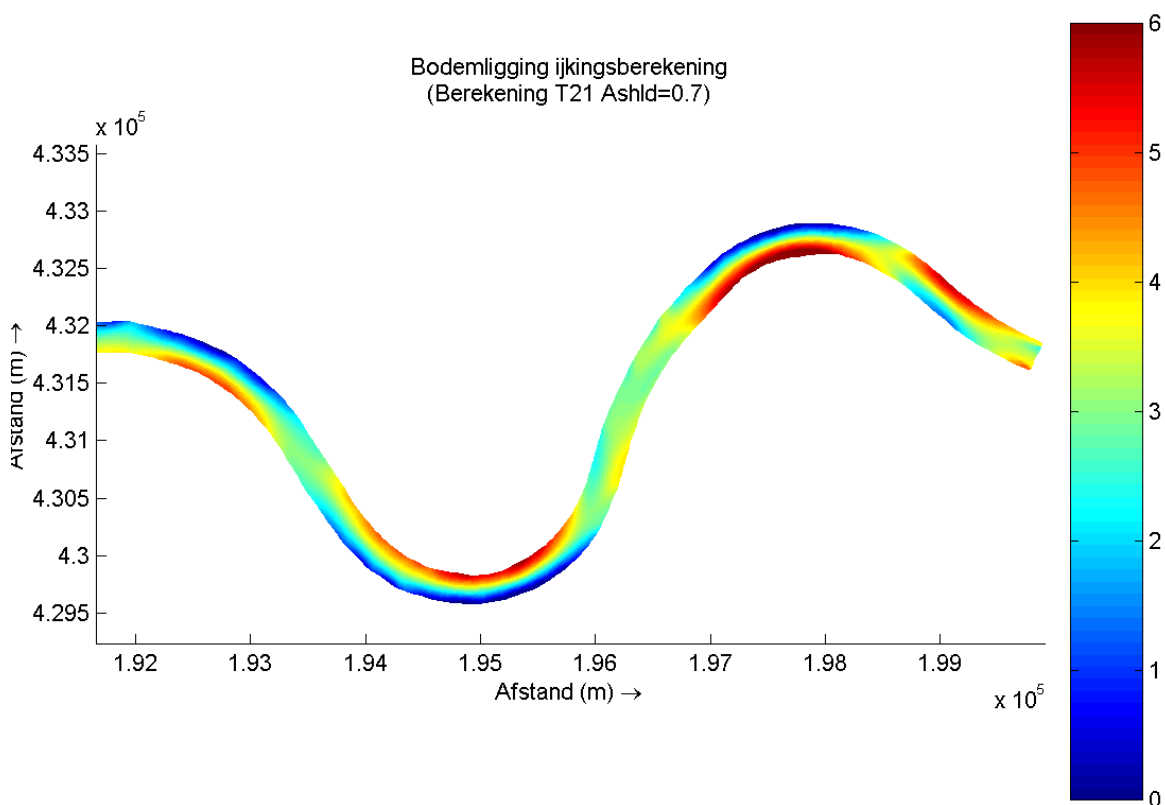
- Voor de eerste stap is een berekening gemaakt waarbij een bodem is opgelegd, startende met een in dwarsrichting horizontaal, en in langsrichting met een constante helling van  $1,01 \cdot 10^{-4}$  (van +3 m + NAP op bovenrand tot -5.5 m +NAP op benedenrand). Later is gestart met de gemiddelde prototype bodem van Schepman.
- Een eerste serie berekeningen is gemaakt waarin met constante afvoer van  $1600 \text{ m}^3/\text{s}$  (kenmerkende afvoer voor morfologische ontwikkelingen, zie bijvoorbeeld Sloff en Struiksma, 1997), en Engelund Hansen met een vermenigvuldigingsfactor van 0,5 is gerekend. Er is gerekend voor een simulatieperiode van circa 6 jaar (2001-2007). Na deze periode van 6 jaar bleek de bodemligging redelijk stabiel te zijn (oftewel, bleek een evenwichtstoestand vrijwel bereikt te zijn). Er is sprake van een bankenpatroon ("point bars" in binnenbochten) dat wordt opgedrongen door de bochten. De banken in de scherpe bochten zijn aanzienlijk hoger dan de banken in de Midden-Waal.
- De Engelund en Hansen transport formule geeft het "totaal transport" weer. Door de gemiddelde berekende sedimenttransporten door een dwarsraai te bepalen kan het jaartransport door de Waal worden berekend. De gekozen instelling voor het sedimenttransport (factor 0,5) levert uiteindelijk een jaartransport van circa  $300.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$  (zoals verwacht). Recente onderzoeken bij RIZA hebben echter uitgewezen dat jaartransporten in de orde van  $682.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$  optreden in de Waal (een verdubbeling van het eerder genoemde getal, zie ten Brinke 2001). Een hoger transport leidt over het algemeen tot een kleinere aanpassingstijd van morfologische processen, en daarmee een versnelling van de veranderingen, zonder een wezenlijke verandering van het bankenpatroon. Een verhoging van de vermenigvuldigingsfactor tot een factor 1 lijkt daarom noodzakelijk en gerechtvaardigd. Om die reden is de berekening herhaald met een transportfactor van 1.0. De berekening resulteert in een jaartransport tussen de  $600.000$  en  $700.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ .
- Vergelijking van de bovengenoemde berekeningen met de gemiddelde bodemligging van Schepman gaf aan dat vooral de hoogte van de banken in de binnenbochten (en de diepte van de buitenbochten) rond de vaargeulbegrenzings (ruwweg de 170 m breedte grenzen) werd overschat. Dat duidt op een te grote steilheid van de banken, hetgeen kan worden gecorrigeerd door een verlaging van de dempingslengte  $L_D$  middels een verlaging van de interactie parameter IP (de verhouding tussen aanpassingslengte voor stroming  $\lambda_w$  en voor sediment  $\lambda_s$ ,  $IP = \lambda_s/\lambda_w$ ). Deze verlaging wordt bereikt door de ijkingsfactor "Ashld" te verlagen van 1,0 naar 0,7 (hetgeen overeenstemt met eerder toegepaste waarden voor de casestudie "vaste laag bij Nijmegen", Wolters, 1998). De resultaten worden daarmee enigszins verbeterd.
- In eerste instantie is gerekend met een uniforme verdeling van de afvoer over de instroomrand (oftewel er stroomt door elke cel aan de rand evenveel water naar binnen). Dit heeft echter tot gevolg dat de aanzethellingen van de profielen in de eerste kilometer van het model niet overeenstemmen met de werkelijkheid (hetgeen mogelijk indirect van invloed is op de bodemligging in de bocht bij Hulhuizen). Een beter resultaat wordt verkregen door de afvoer beter in overeenstemming te brengen met de werkelijke situatie waarbij de aanstroming van bovenstrooms wordt beschouwd. Hiervoor is het noodzakelijk (in overeenstemming met eerdere ijkings, bijvoorbeeld Sloff en Struiksma, 1997) dat een scheve afvoerverdeling wordt toegepast waarbij de instrooming aan de rechteroever circa 25 % hoger is dan het gemiddelde, en de instrooming aan de linkeroever

circa 25 % lager (lineair verlopend). Daarnaast (met vastgehouden bodemligging) zorgt een circa 15 % hogere waterdiepte aan de rechteroever t.o.v. het gemiddelde (en circa 15 % lagere waterdiepte links) dat evenzo de snelheden aan rechter oever hoger zijn dan aan linker oever (circa 10 % t.o.v. het gemiddelde).

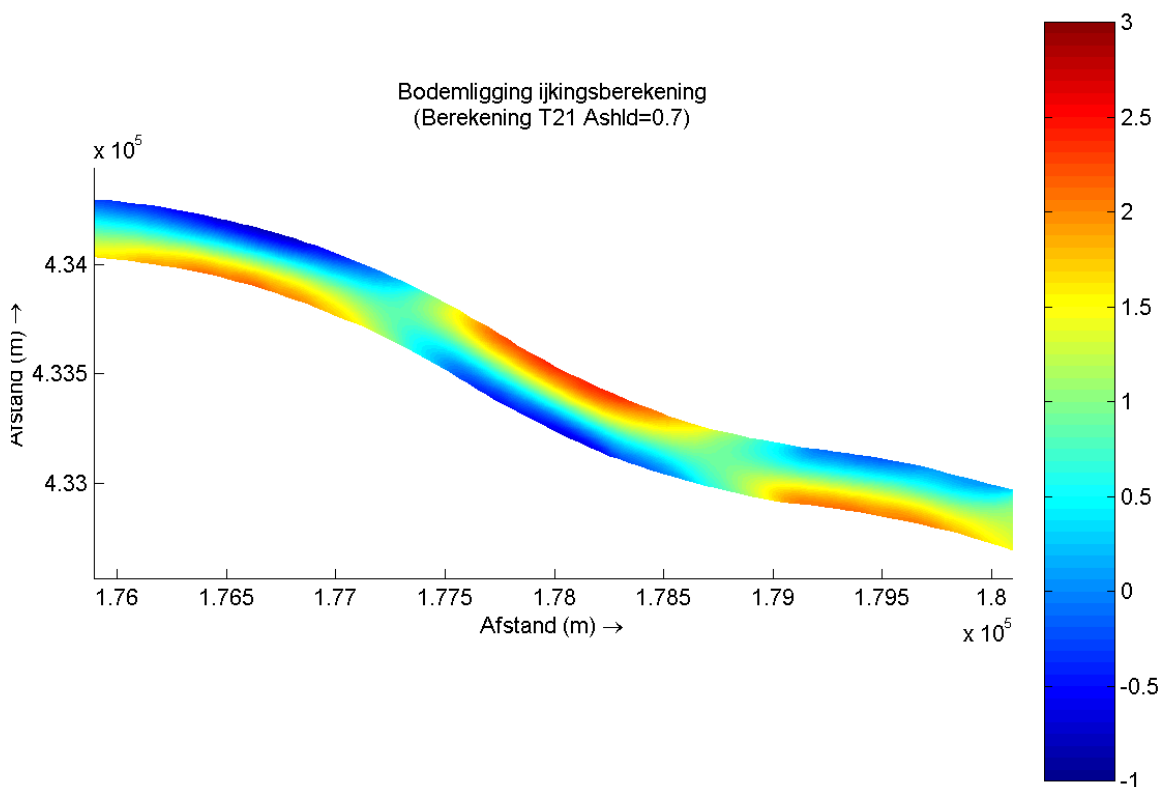
- De ijkingsberekeningen zijn grotendeels uitgevoerd met een vaste benedenstroomse waterstandsrandconditie van 0,5 m + NAP. Op basis van de Q/h-relatie bij Vuren kan worden gesteld dat deze waterstand bij  $Q=1600 \text{ m}^3/\text{s}$  eigenlijk iets hoger moet liggen: circa 0,9 m + NAP. In een latere berekening (T21) is deze benedenstroomse randvoorwaarde toegepast. De verschillen zijn gering.

In het volgende zijn de berekende bodemliggingsresultaten getoond middels contourenplots (bovenaanzicht), langsprofielen op een aantal langsradien, en een aantal willekeurige dwarsprofielen. De volgende opmerkingen zijn van belang:

- De ijkingsberekening is doorgezet totdat een stabiele evenwichtsbodem is bereikt (bij een constante afvoer van  $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ ). De resulterende ligging van de bodem is geïllustreerd voor de Waalbochten in figuur 4, en voor de Midden-Waal in figuur 5. Het figuur stemt ruimtelijk goed overeen met de metingen wat betreft de ligging van banken en bochtovergangen.

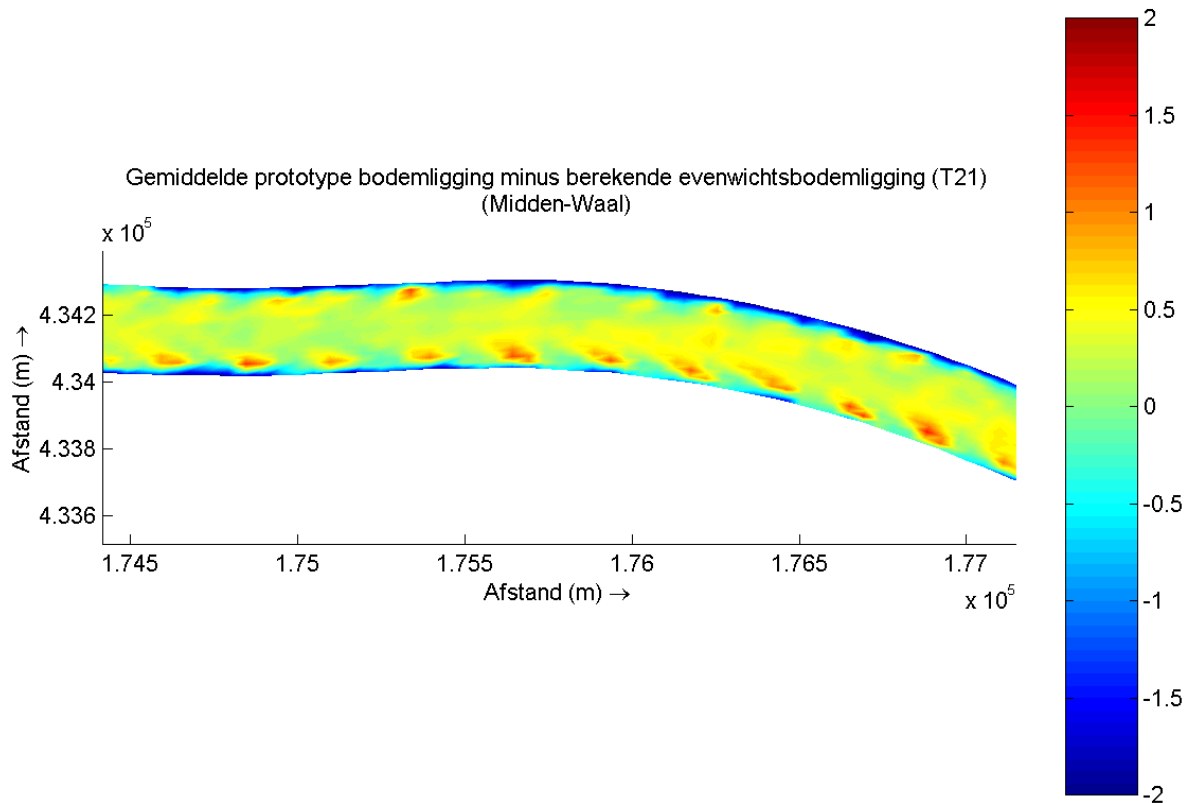


Figuur 4 Berekende bodemligging in de Waalbochten, traject km 868 - 878 (evenwichtsbodem)



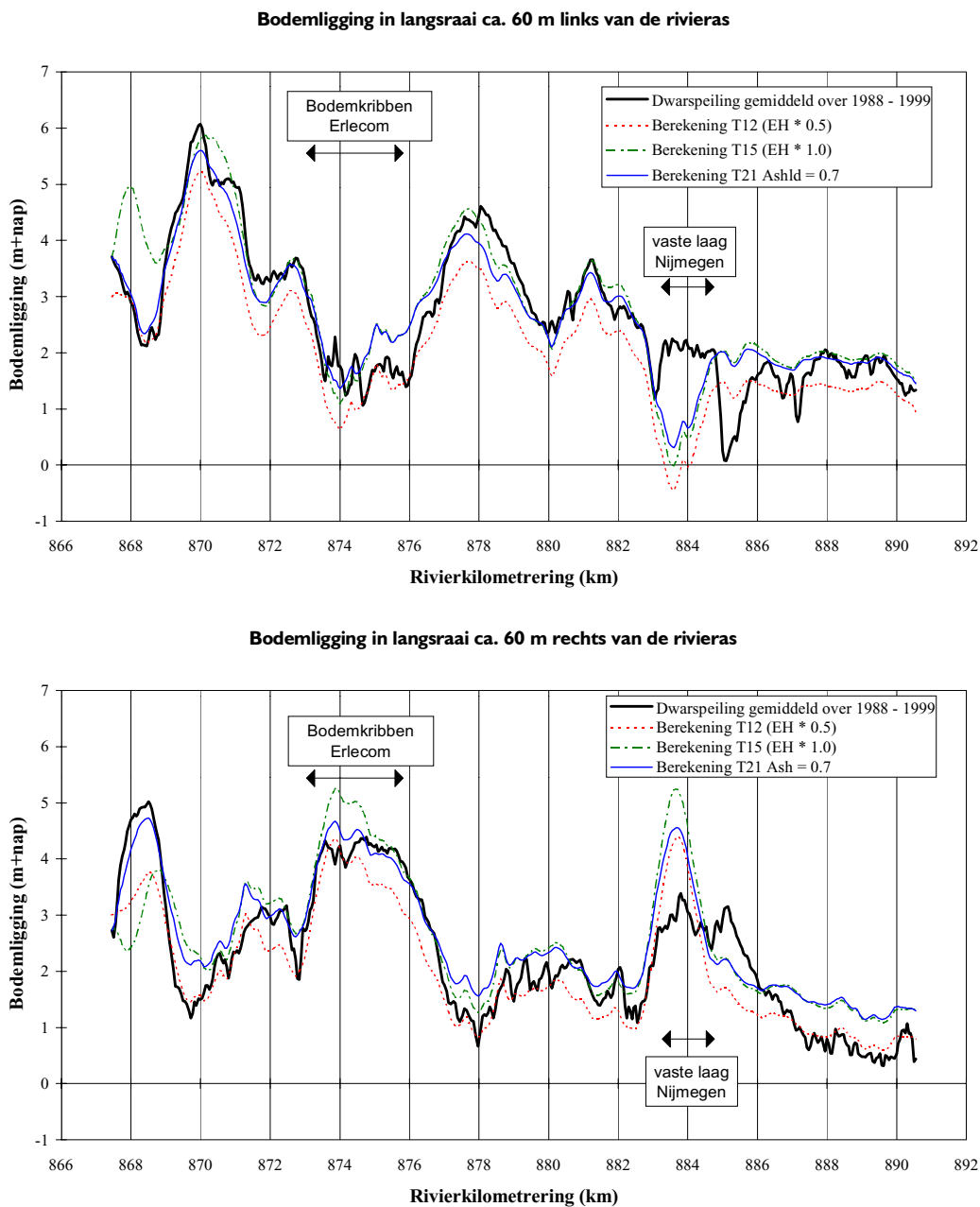
Figuur 5 Berekende bodemligging in de Midden-Waal, traject Ewijk - Dodewaard (evenwichtsbodem)

- Een ruimtelijke vergelijking tussen berekende en gemeten bodemligging (gemiddeld 1988 - 1999) toont dat verschillen vooral optreden nabij en onder invloed van kribben en de vaste lagen (met name bij Nijmegen). De grootste afwijkingen zijn te vinden nabij de normaallijnen (de begrenzing van het rooster): over het algemeen ligt de prototype bodem daar hoger dan de berekening (zie ook later in de weergegeven dwarsprofielen). Dit effect hangt samen met de invloed van de kribvakken die niet in de simulatie zijn opgenomen. Verder zijn kribvlammen, die wel zichtbaar zijn in prototype metingen en niet in de berekening, duidelijk als verschil waar te nemen. In figuur 6 zijn in een verschilfiguur deze verschijnselen zichtbaar gemaakt.



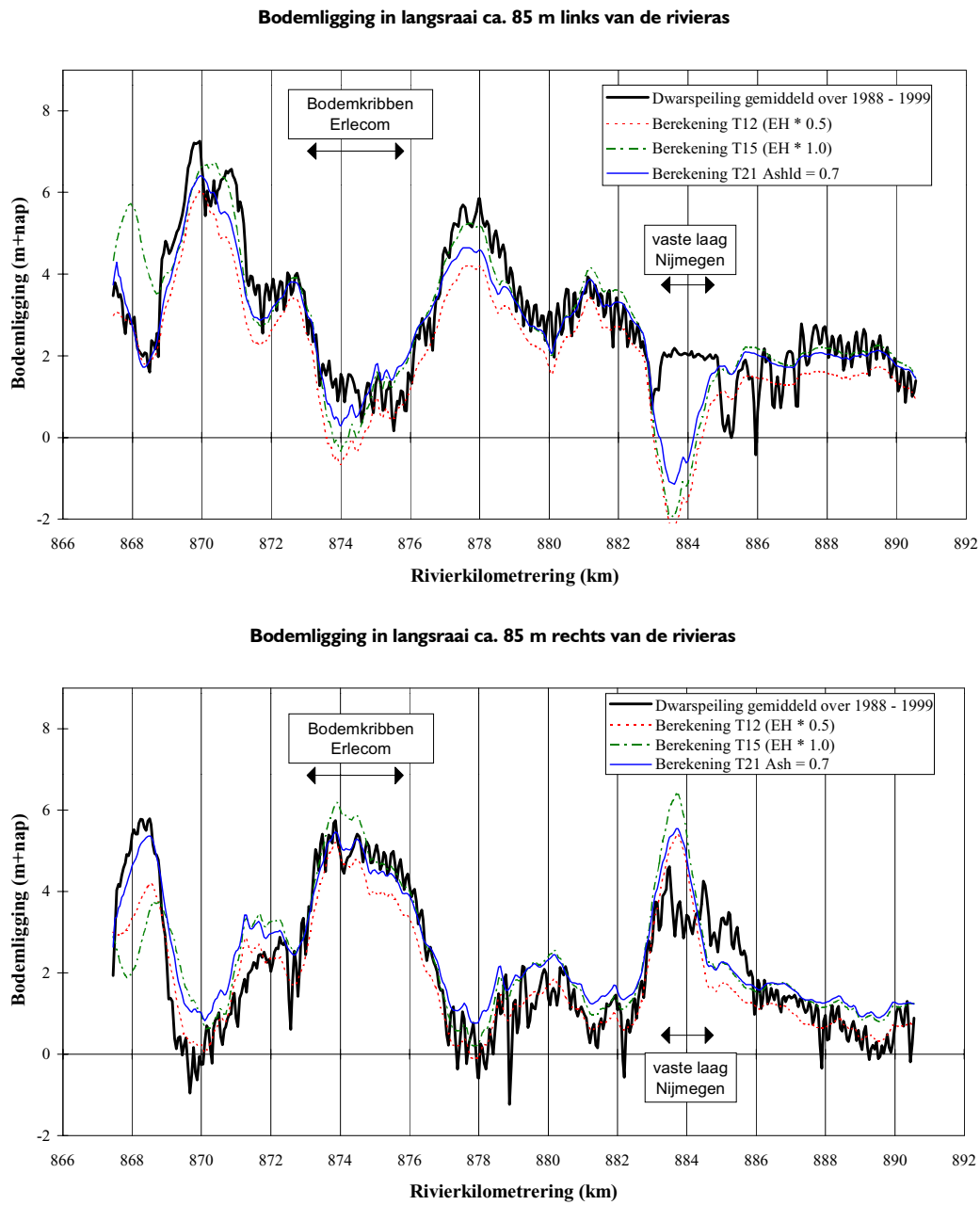
Figuur 6 Verschil tussen berekende bodem en gemiddelde bodemligging van prototype, met duidelijk zichtbare kribvlammen (willekeurig traject Midden-Waal)

- Langsprofielen langs de roosterlijnen nabij de ‘oevers’ (normaallijnen) geven een goede indicatie van de betrouwbaarheid van de resultaten. Vanwege de grote afwijkingen nabij de normaallijnen zelf (onder invloed van kribvakken) is het gebruikelijk deze vergelijking te maken voor een aantal roosterlijnen binnen de 170 m brede vaargeul, in plaats van roosterlijnen langs de normaallijnen (250 m brede zomerbed). In de onderstaande figuren zijn voor verschillende delen van de rivier de resultaten weergegeven. Er zijn resultaten gepresenteerd voor de langsraaien op respectievelijk 60 en 85 m uit de as (dus een geulbreedte van 120 en 170 m parallel aan de rivieras). Dichter bij de oever (dus bij langsraaien op 85 m uit de as) wordt het effect van de kribvlammen in het prototype duidelijk zichtbaar (als storingen op het langsprofiel). De berekeningen die zijn gepresenteerd hebben de volgende karakteristieken:
  - berekening T12: eerder genoemde ijkingsberekening met Engelund Hansen transport voorspeller vermenigvuldigd met 0,5, constante afvoer  $1600 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $D_{50} = 2 \text{ mm}$ ,  $C = 45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ );
  - berekening T15, idem met Engelund Hansen vermenigvuldigd met 1,0
  - berekening T21, als T15 maar nu met  $Ashld = 0,7$ , scheve instroming op bovenrand, en  $Q/h$ -relatie op benedenrand.

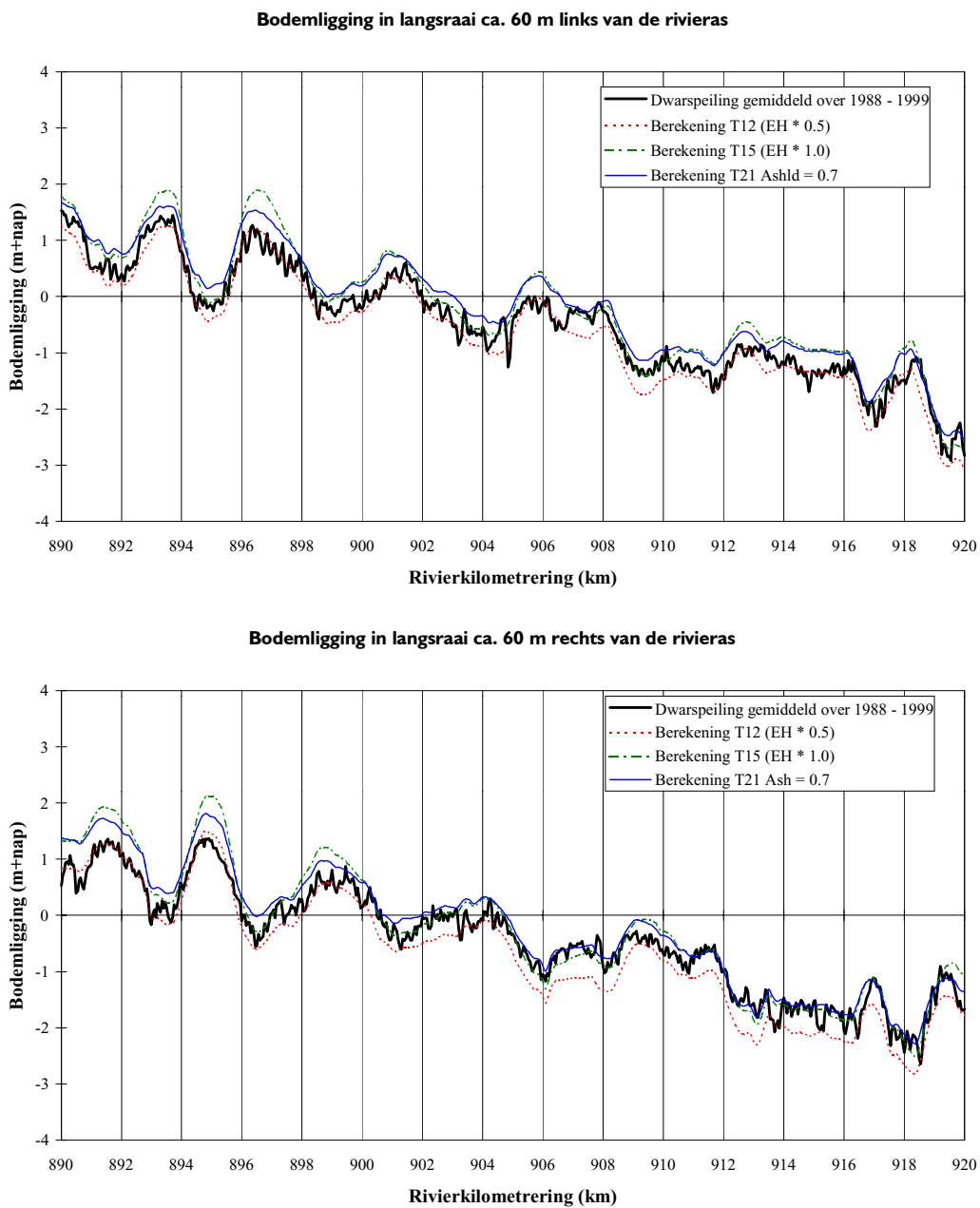


Figuur 7 Langsraai op circa 60 m LINKS en RECHTS van de rivieras, km 867 - 891: bodemligging als functie van de rivierkilometrer voor ijkingsberekeningen T12, T15 en T21 en prototype.

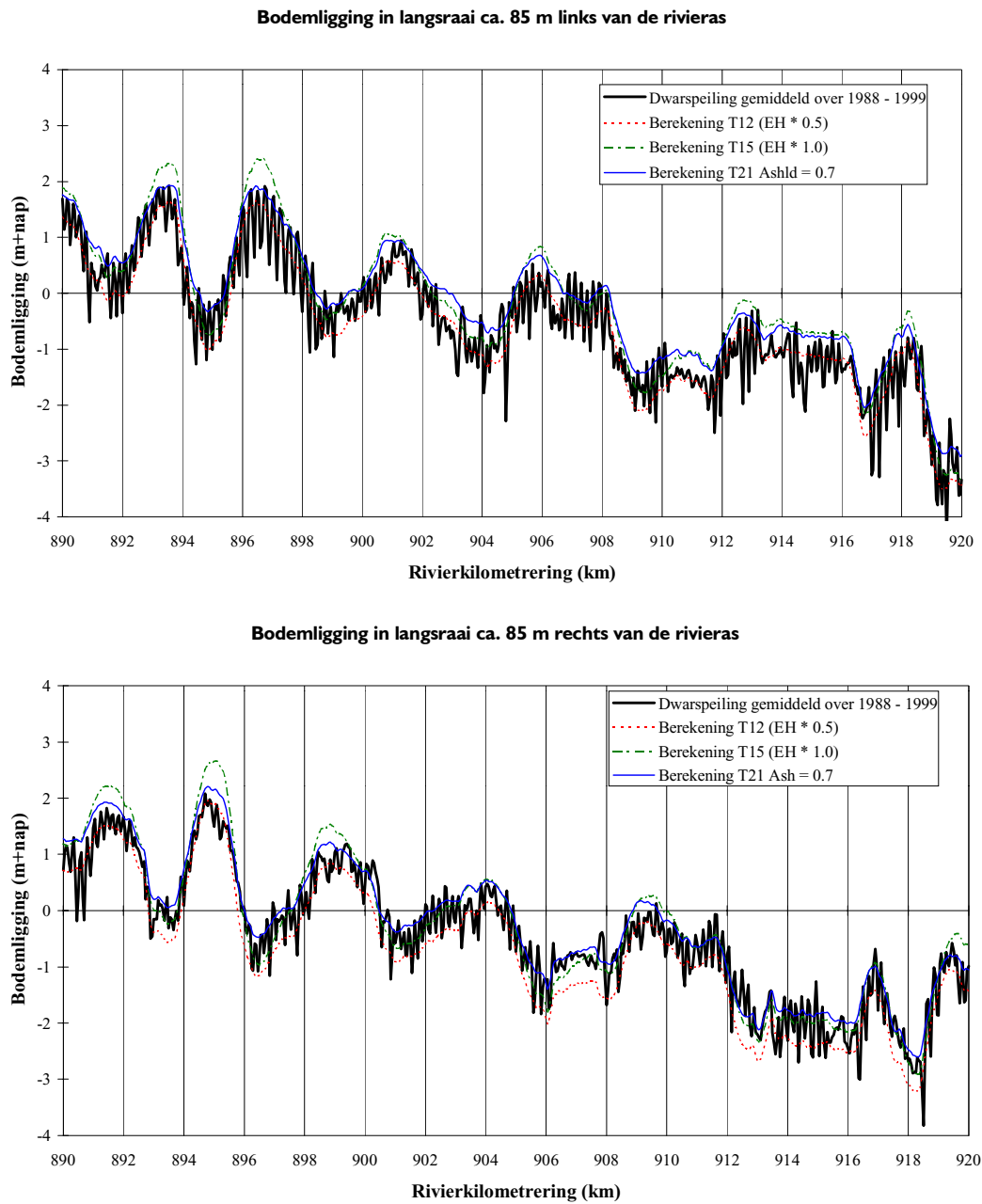




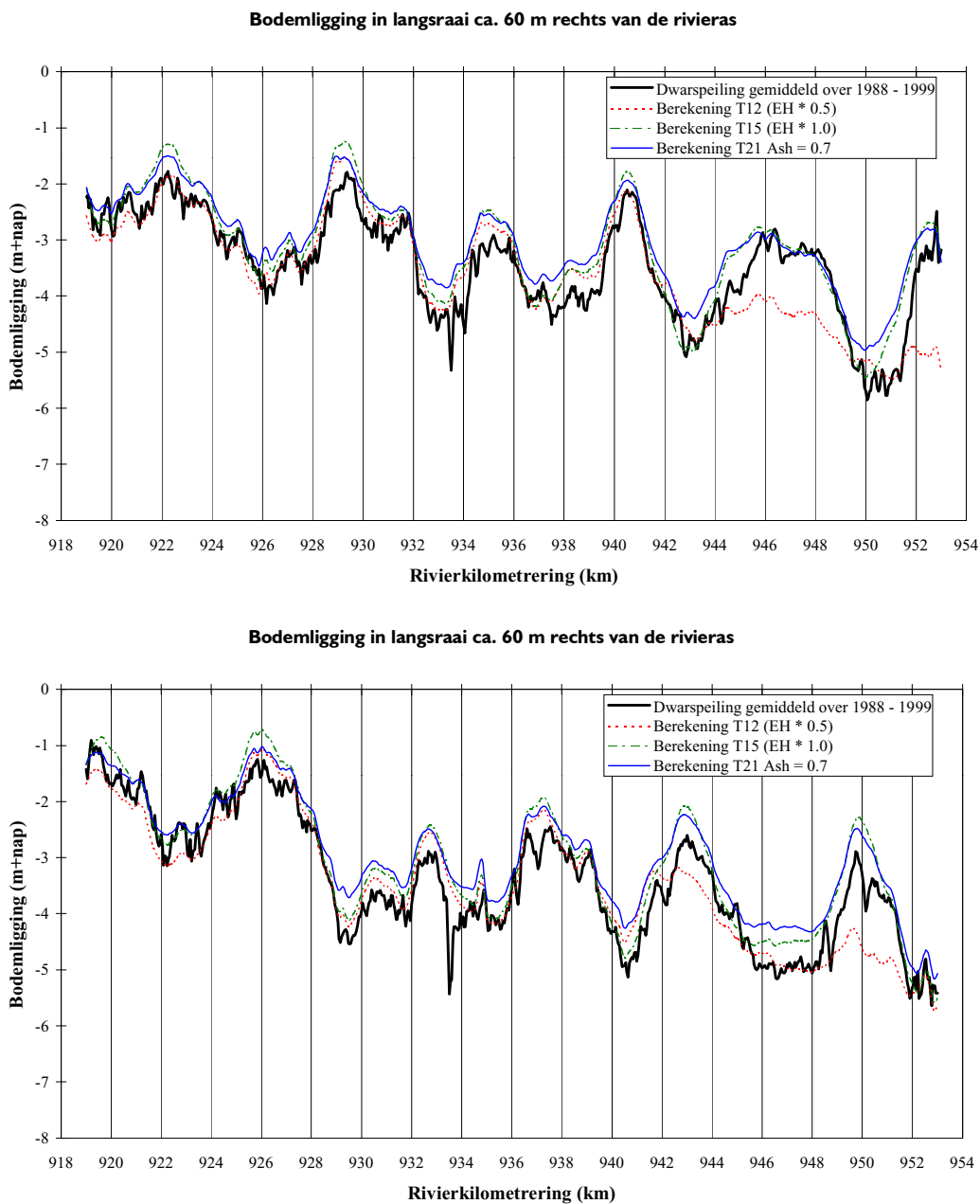
Figuur 8 Langdraai op circa 85 m LINKS en RECHTS van de rivieras, km 867 - 891: bodemligging als functie van de rivierkilometrering voor ijkingsberekeningen T12, T15 en T21 en prototype.



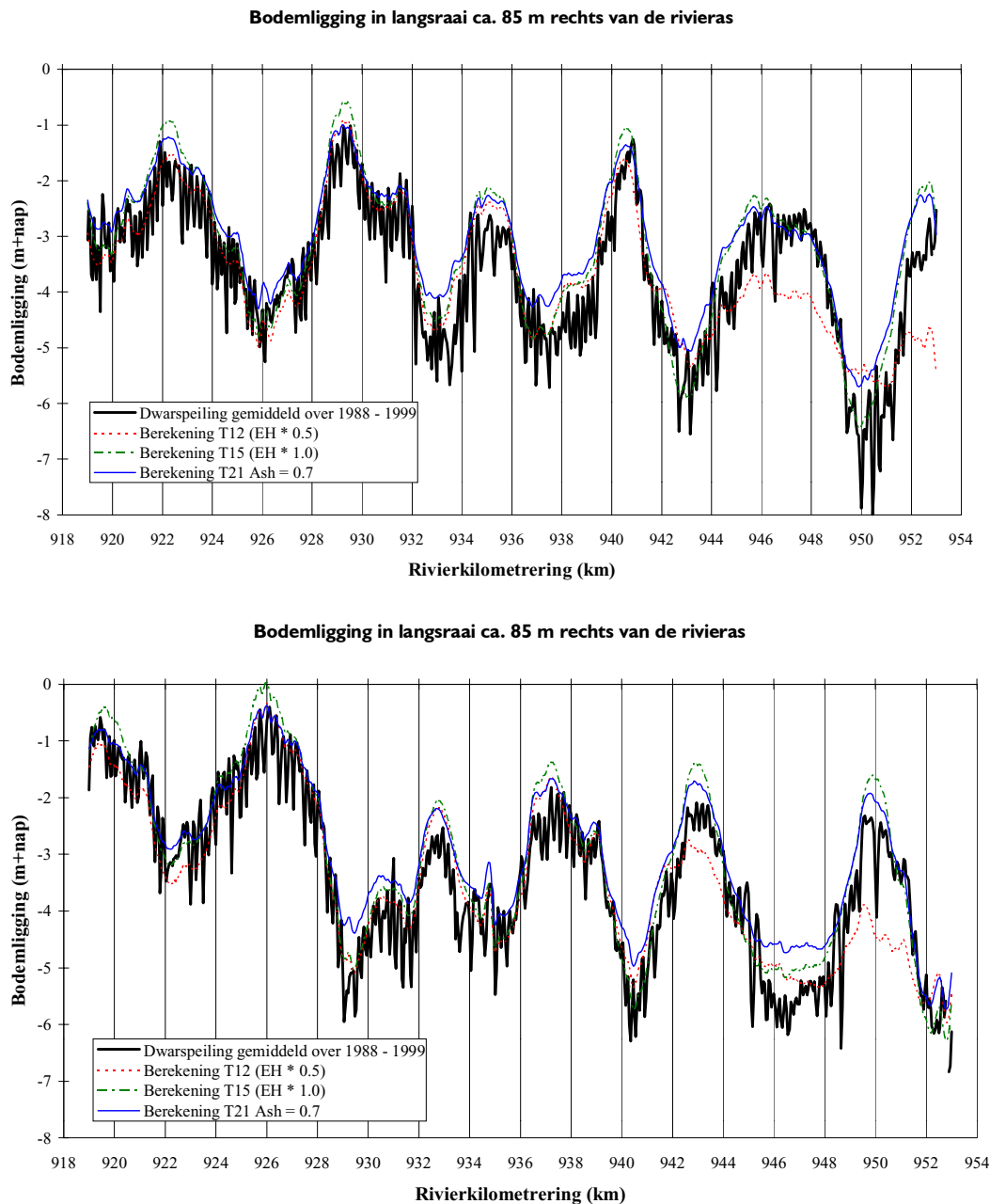
Figuur 9 Langsraai op circa 60 m LINKS en RECHTS van de rivieras, km 890 - 920: bodemligging als functie van de rivierkilometreering voor ijkingberekeningen T12, T15 en T21 en prototype.



Figuur 10 Langsgaai op circa 85 m LINKS en RECHTS van de rivieras, km 890 - 920: bodemligging als functie van de rivierkilometrerung voor ijkingsberekeningen T12, T15 en T21 en prototype.



Figuur 11 Langsvraai op circa 60 m LINKS en RECHTS van de rivieras, km 918 - 954: bodemligging als functie van de rivierkilometreering voor ijkingberekeningen T12, T15 en T21 en prototype.



Figuur 12 Langsraai op circa 85 m LINKS en RECHTS van de rivieras, km 918 - 954: bodemligging als functie van de rivierkilometrerung voor ijkingsberekeningen T12, T15 en T21 en prototype.

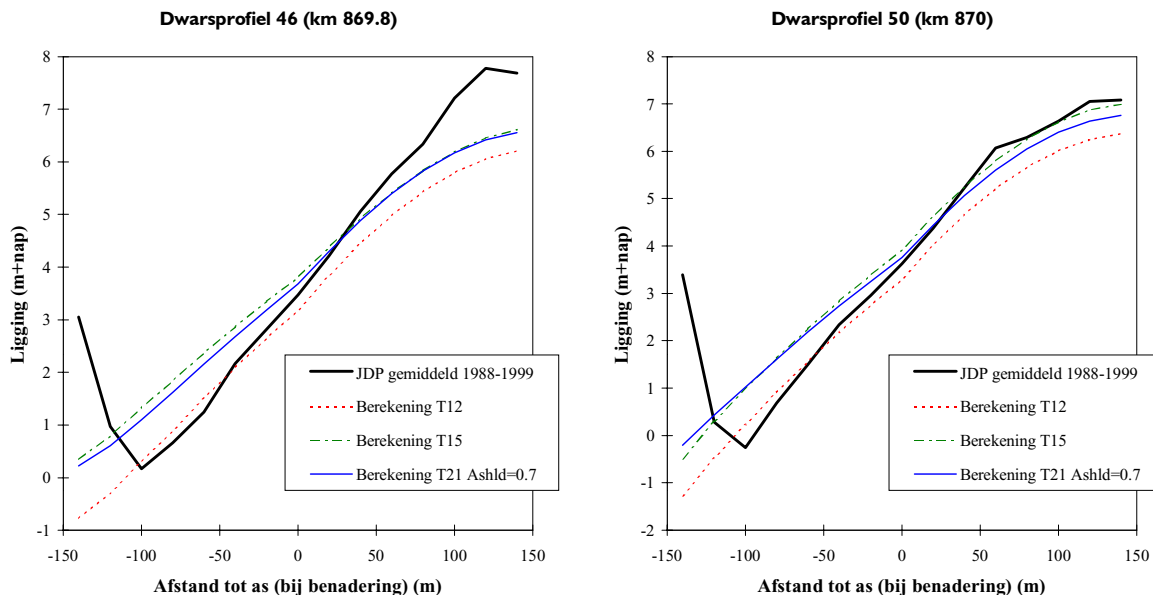
- Goed waarneembaar in de langsprofielen in de figuren 7 en 8 is het verschil in bodemligging bij Nijmegen (km 883 - 885), waarbij in de simulatie het effect van de vaste laag ontbreekt.
- De overeenstemming van de profielen bij de simulatie T21 met de profielen die zijn afgeleid uit een middeling van alle dwarspeilingen over de periode 1988-1999 is erg goed gebleken.

Dwarsprofielen:

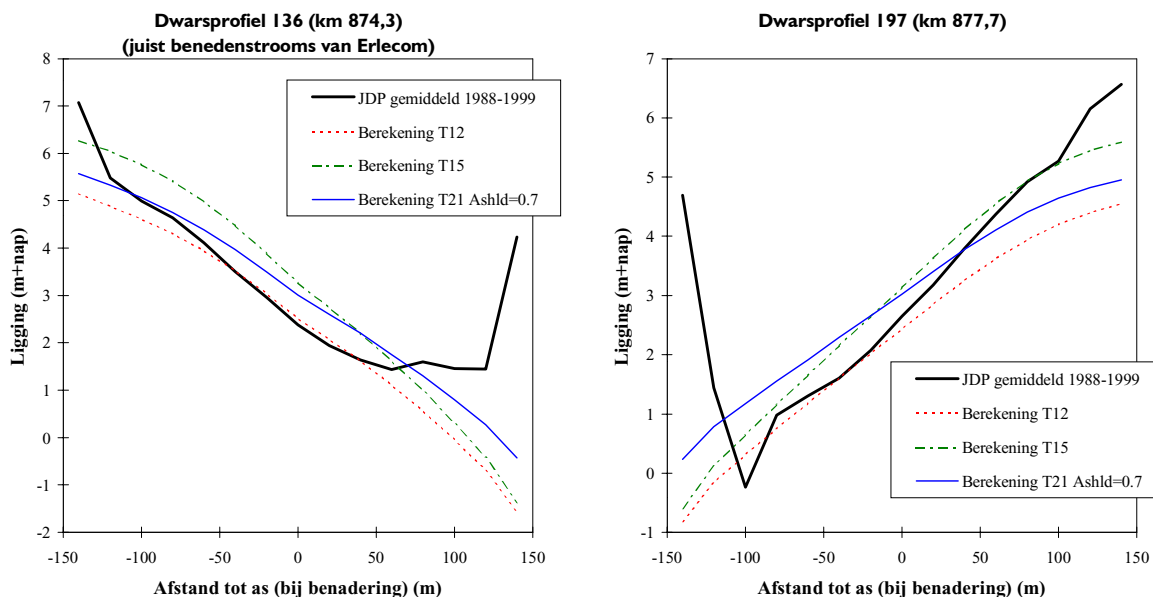
- In de figuren 13 t/m 16 zijn voor een aantal kenmerkende dwarsprofielen in bochten de berekende en gemeten waarden vergeleken. Een zorgvuldige vergelijking geeft aan dat

het beeld redelijk overeenstemt (hoogte van de banken e.d.). In de figuren zijn dezelfde berekeningen getoond als in de langspiegelen.

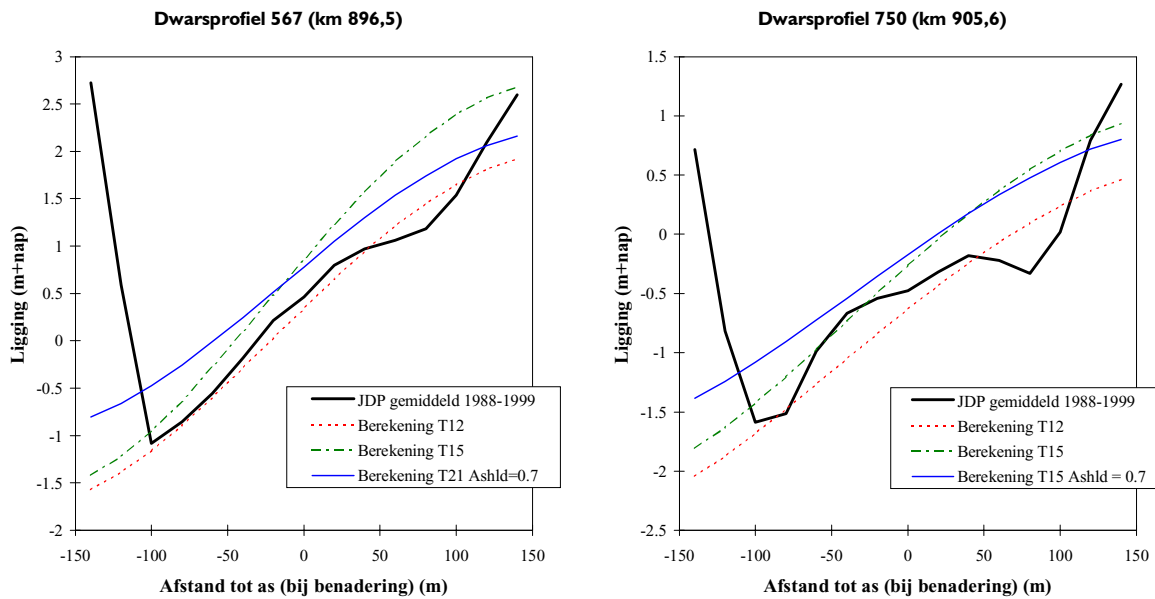
- Opgemerkt wordt dat in de zones dicht bij de oevers (kribben) forse afwijkingen optreden in berekende en gemeten bodemligging. Hier laat de invloed van de kribben en kribvakken zich gelden. Eventueel is (met name in de buitenbochten) een betere benadering mogelijk door gebruik te maken van vaste lagen. Hiermee wordt de zone langs de kribtenen gefixeerd in overeenstemming met de waargenomen bedding.



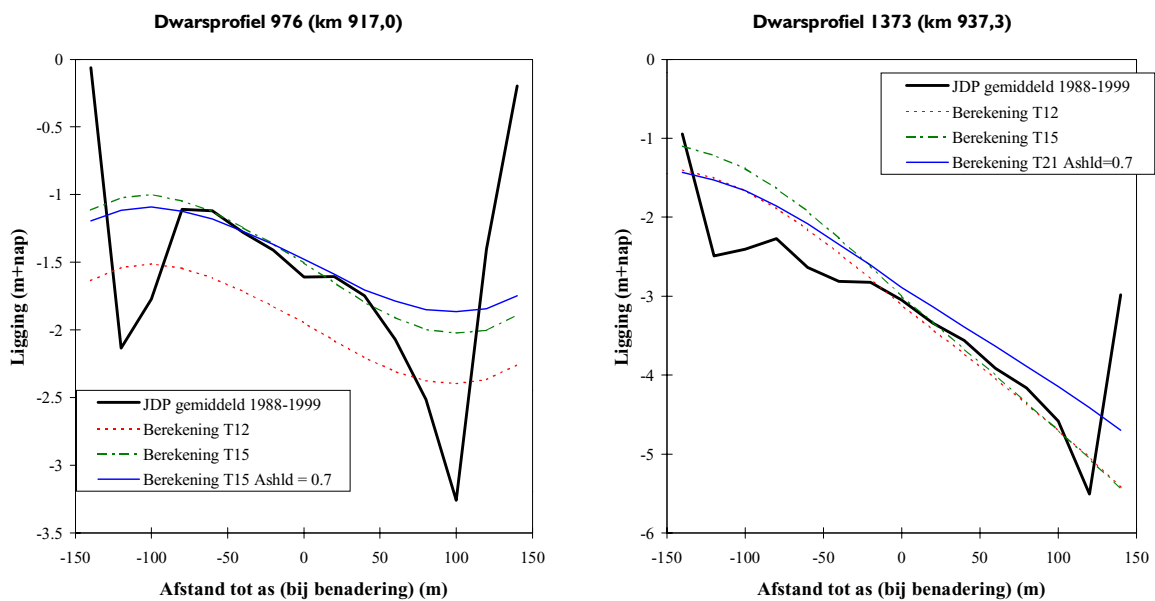
Figuur 13 Berekend dwarsprofiel (links) en prototype dwarsprofiel (middeling JDP's 1988-1999) voor roosterlijn 46: km 869,8 en voor roosterlijn 50: km 870 (bocht Hulhuizen)



Figuur 14 Berekend dwarsprofiel (links) en prototype dwarsprofiel (middeling JDP's 1988-1999) voor roosterlijn 136: km 874,3 (bocht Erlecom) en roosterlijn 197: km 877,7 (bocht Haalderen). In buitenbocht bij Erlecom treden verschillen op door ontbreken van de bodemkribben in de simulatie.

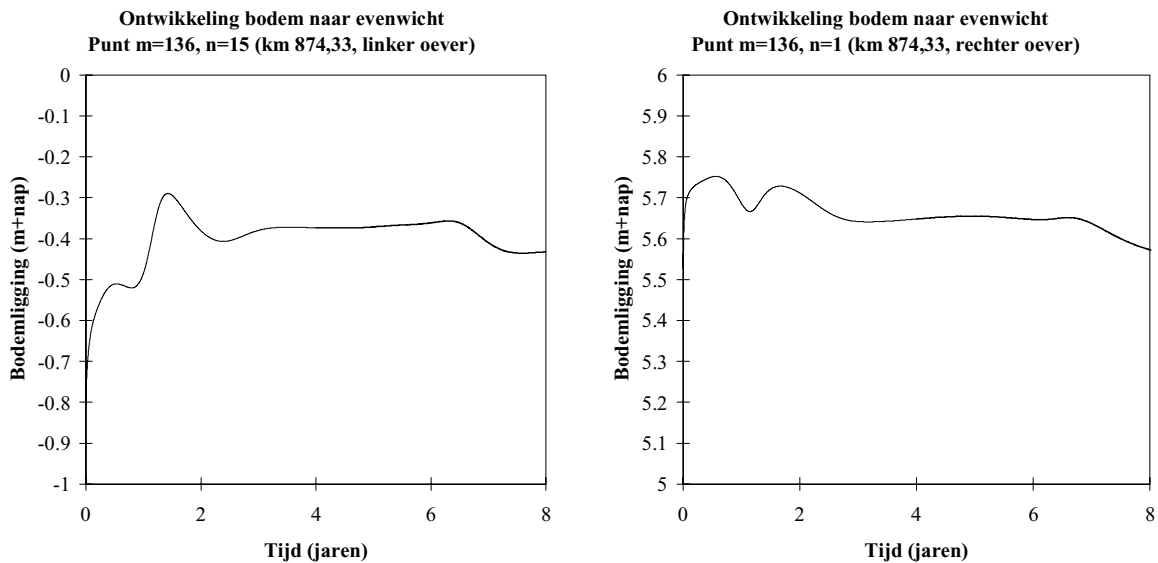


Figuur 15 Berekend dwarsprofiel (links) en prototype dwarsprofiel (middeling JDP's 1988-1999) voor roosterlijn 567: km 896,5 (Dodewaard) en voor roosterlijn 750: km 905,6 (IJzendoorn)

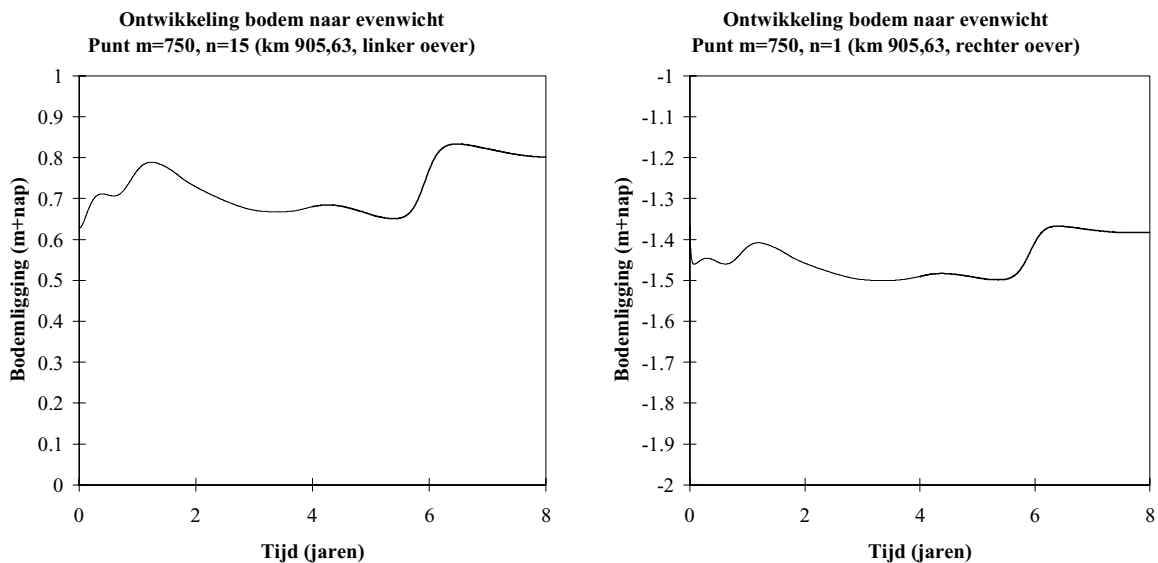


Figuur 16 Berekend dwarsprofiel (links) en prototype dwarsprofiel (middeling JDP's 1988-1999) voor roosterlijn 976: km 917 (Dreumel) en voor roosterlijn 1373: km 937,3 (Zaltbommel)

Tijdens de eerste berekeningen werd vanaf een vrijwel horizontale bodem geleidelijk naar een stabiele eindbodem toegerekend. Na een 8 jarige simulatieperiode bleek deze eindsituatie vrijwel te zijn bereikt, alhoewel op een aantal locaties punten nog variaties van de hoogte van de banken optreden in de eindfasen van de berekening. Dit is goed te zien wanneer de tijdsontwikkeling van de bodem op een aantal locaties wordt beschouwd in onderstaande figuren.



Figuur 17 Berekende bodemligging aan linkeroever (links) en rechteroever (rechts) voor roosterlijn 136: km 874,33 (bocht Erlecom)



Figuur 18 Berekende bodemligging aan linkeroever (links) en rechteroever (rechts) voor roosterlijn 750: km 905,6 (Ijzendoorn)

Geconcludeerd is dat de modelsimulaties een goede overeenstemming geven, en dat het model dus gebruikt mag worden voor verdere analyses.



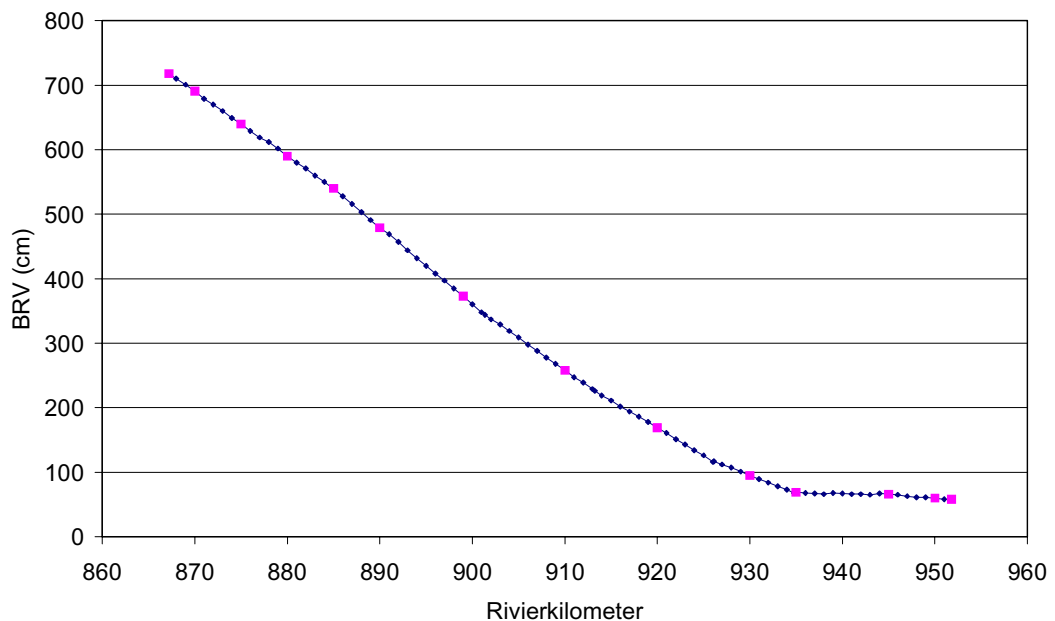


## 3 2D morfologische berekeningen Delft2D-Rivieren

### 3.1 Herstel van baggerwerk

Om inzicht te krijgen in het herstel van baggerwerk zijn met het geijkte model een aantal berekeningen gemaakt waarin de evenwichtsbodem is verlaagd in een aantal binnenbochten op de Midden-Waal op locaties waar deze de vaarwegnorm overschrijdt. In deze paragraaf wordt een aantal resultaten gepresenteerd van simulaties met constante afvoer.

Berekeningen zijn gemaakt voor baggerwerk in de Midden-Waal tussen km 886 en km 917. Het baggerwerk is ingevoerd door op het betreffende traject alles boven BRV-2,80 m te verwijderen uit de evenwichtsbodem. Evenzo is in de buitenbochten gestort op alle locaties onder BRV-4,0 m, door deze vol te storten tot dit niveau. Het BRV van 1999 is gebruikt (het BRV of baggerreferentievlak vervangt het OLR vlak, en wordt jaarlijks vastgesteld). In figuur 19 is weergegeven hoe dit vlak verloopt langs de rivier. Door middel van een aantal tussenpunten (met blokjes aangegeven in het figuur) is de lijn enigszins vereenvoudigd.

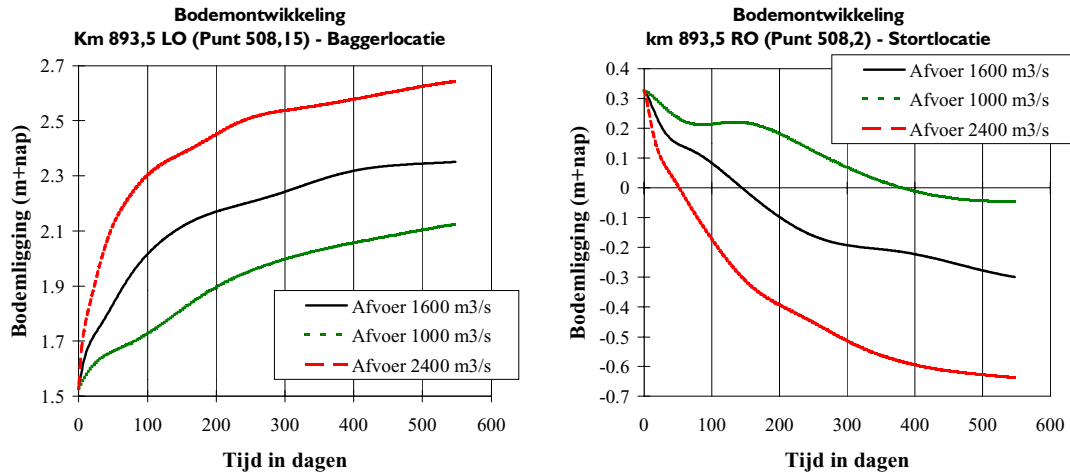


Figuur 19 BRV 1999, gebruikt voor implementatie van bagger en stort in beginbodem

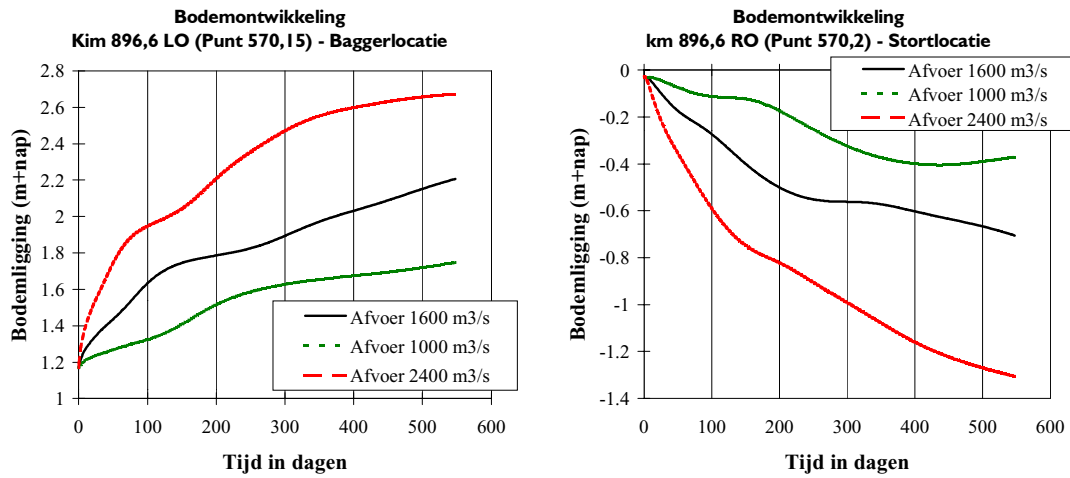
De volgende twee punten zijn karakteristiek voor de betreffende berekeningen:

- De maximale bagger- en stortdiepte is circa 1,5 m. Het gebaggerde volume voor het gehele traject bedraagt circa  $460 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ , terwijl het gestorte volume circa  $312 \cdot 10^3 \text{ m}^3$  bedraagt (en dus wat kleiner is omdat er niet voldoende stortruimte onder BRV-4,0 m beschikbaar is).

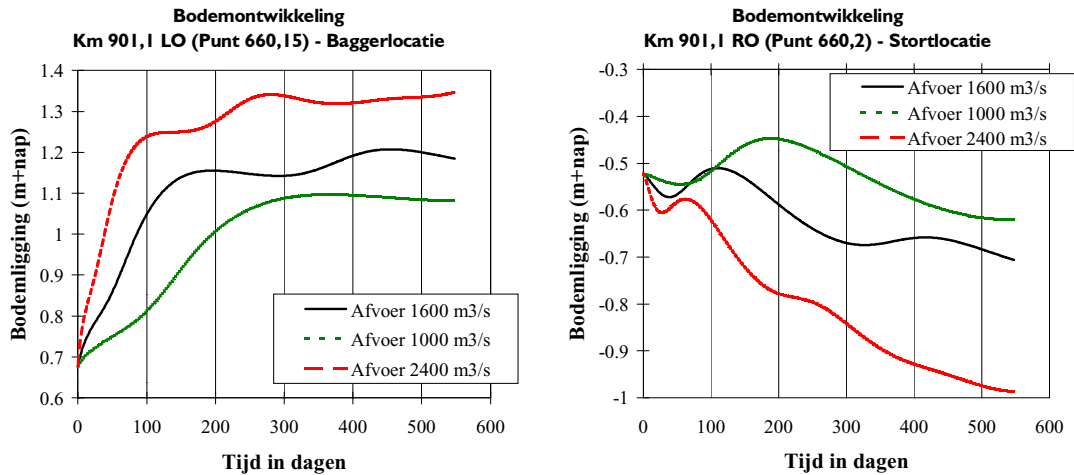
- Na uitvoering van het baggerwerk zijn simulaties gemaakt met een simulatieduur van circa 1,5 jaar, voor de drie eerder genoemde afvoeren van 1000 m<sup>3</sup>/s, 1600 m<sup>3</sup>/s en 2400 m<sup>3</sup>/s (telkens wordt een langjarige berekening gemaakt waarbij de afvoer constant wordt gehouden). De gebaggerde en gestorte secties herstellen zich met een snelheid die afhangt van het sedimenttransport en daarmee van de afvoer.



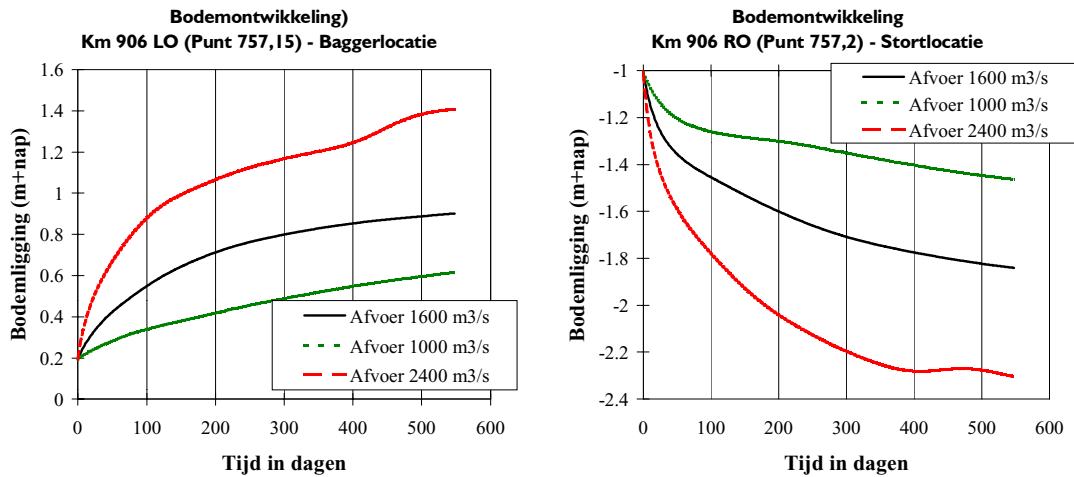
Figuur 20 Herstel van bagger en stortlocatie gesimuleerd op km 893,5



Figuur 21 Herstel van bagger en stortlocatie gesimuleerd op km 896,6



Figuur 22 Herstel van bagger en stortlocatie gesimuleerd op km 901,1



Figuur 23 Herstel van bagger en stortlocatie gesimuleerd op km 906

De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in de figuren 20 tot en met 23. Over het algemeen vertonen de lijnen een geleidelijk verloop. Echter, herkenbaar aan sprongen in de lijnen zijn eendimensionale voortplantingsverschijnselen, die in enkele gevallen zijn veroorzaakt door de onregelmatigheden in de oeverlijnen waarmee het rekenrooster is gegenereerd.

Een hele ruwe schatting van het herstel van baggerwerk kan worden afgeleid uit bovenstaande figuren:

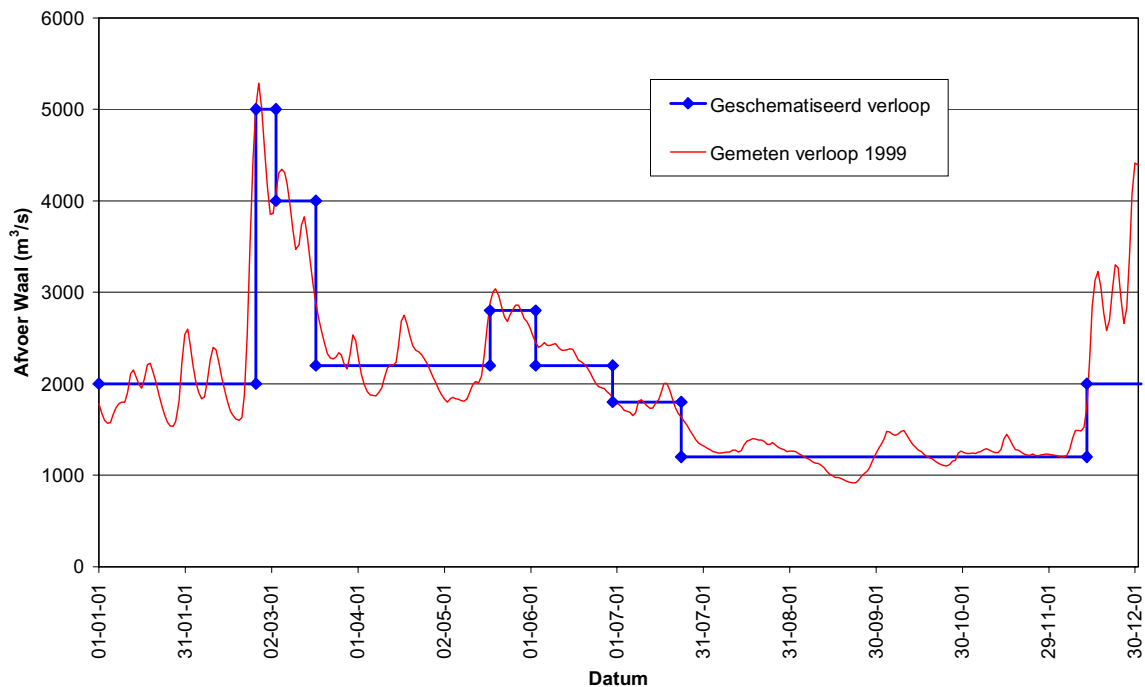
$$\Delta z \text{ (m/dag)} = 50 \cdot s \text{ (m}^2\text{/s)} \tag{3.1}$$

waarbij  $\Delta z$  is de bodemverandering (herstel) en  $s$  het berekende sedimenttransport per eenheid van breedte in de betreffende morfologische eenheid (zie hoofdstuk 4).

## 3.2 Dynamiek van de bodemligging

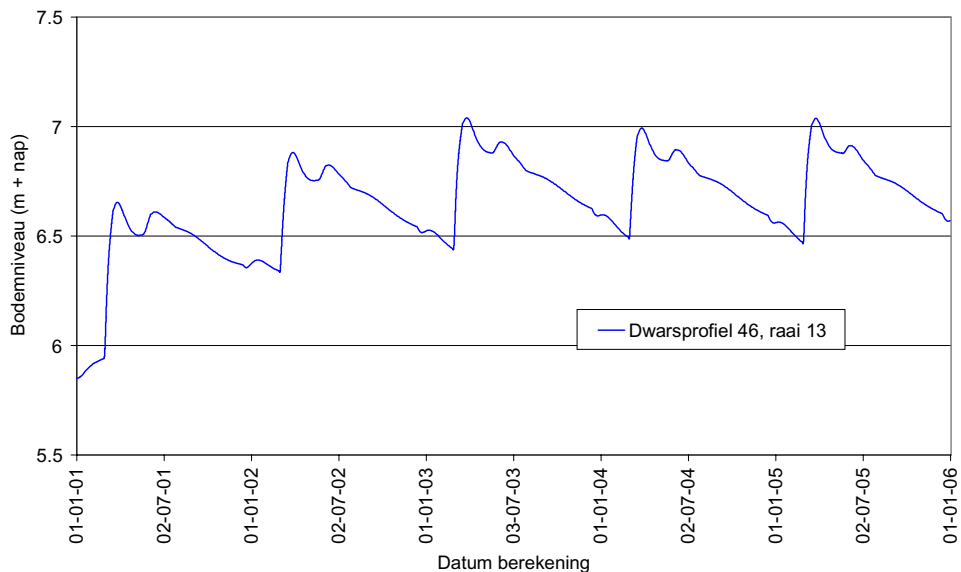
Om het effect van afvoervariaties en hoogwaters op de opgedrongen morfologie nader te beschouwen zijn berekeningen gemaakt met een geschematiseerd afvoerloop dat zich jaarlijks herhaalt. Hiervoor is het waargenomen afvoerloop van 1999 gebruikt.

In figuur 24 is aangegeven op welke wijze dit verloop is geschematiseerd. Er wordt gebruik gemaakt van een tragsgewijs (discreet) verloop omdat dit zeer sterk bijdraagt aan reductie van rekentijd en grotere stabiliteit van het model, terwijl deze vereenvoudiging voor de bodemligging een verwaarloosbaar verschil oplevert met een exacte en meer vloeiende implementatie van het afvoerloop. De afvoer varieert tussen de 1200 en 5000 m<sup>3</sup>/s. Hoewel bij de hogere afvoeren de uiterwaarden een deel van de afvoer voor hun rekening nemen, is dit effect in de simulaties niet beschouwd. De afvoeren zijn gereduceerd om ze zo te beperken tot de afvoer in de hoofdgeul. Afvoeren hoger dan circa 3000 m<sup>3</sup>/s in het zomerbed-model zijn daarom in de werkelijkheid veel groter voor de gehele Waal (inclusief het winterbed).

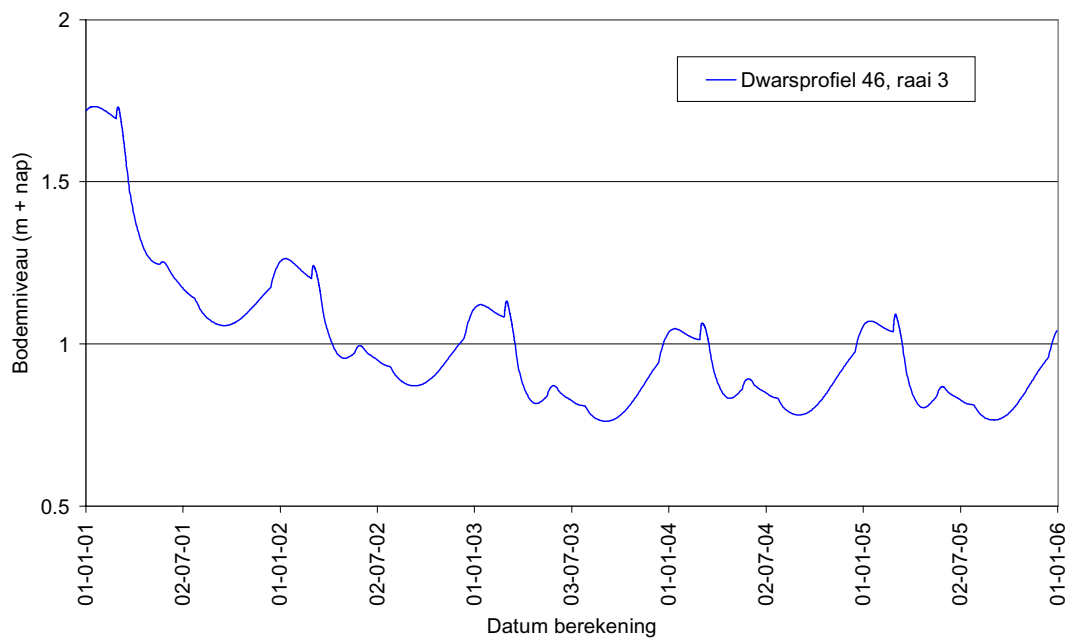


Figuur 24 Geschematiseerd jaarlijks afvoerloop van de dynamische berekeningen

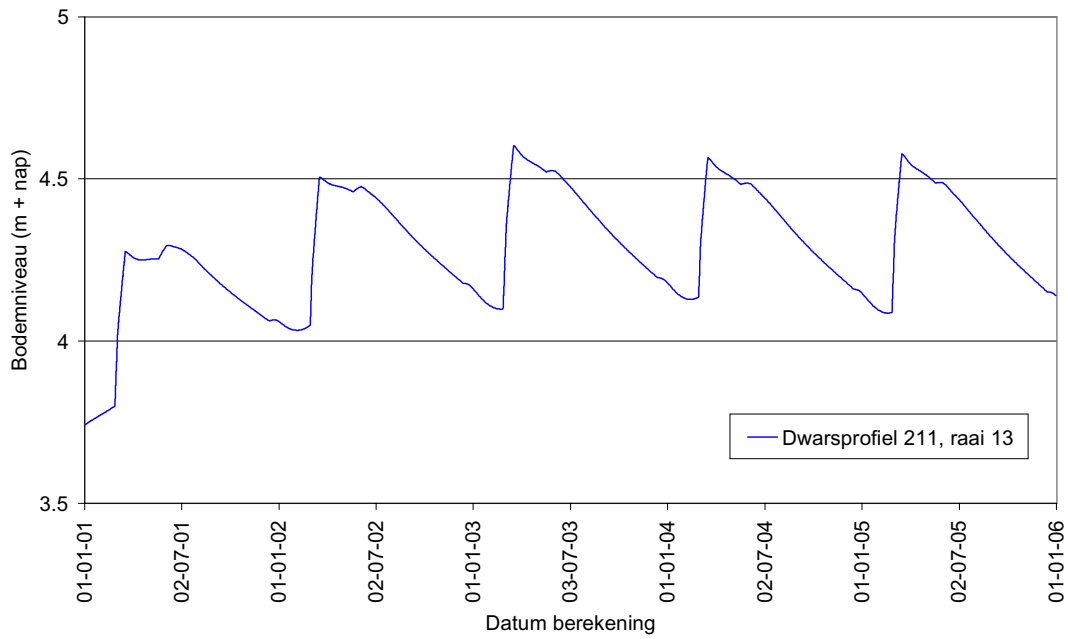
In de volgende figuren is voor een aantal locaties het verloop van de bodem in de tijd weergegeven. Het betreft locaties op circa 85 m vanaf de rivieras (nabij de begrenzingen van de vaargeul). Over het algemeen blijkt dat in de Waalbochten de periodieke variaties circa 0,5 m bedragen. Op de Midden-Waal is sprake van circa 0,1 m variatie in bodemligging.



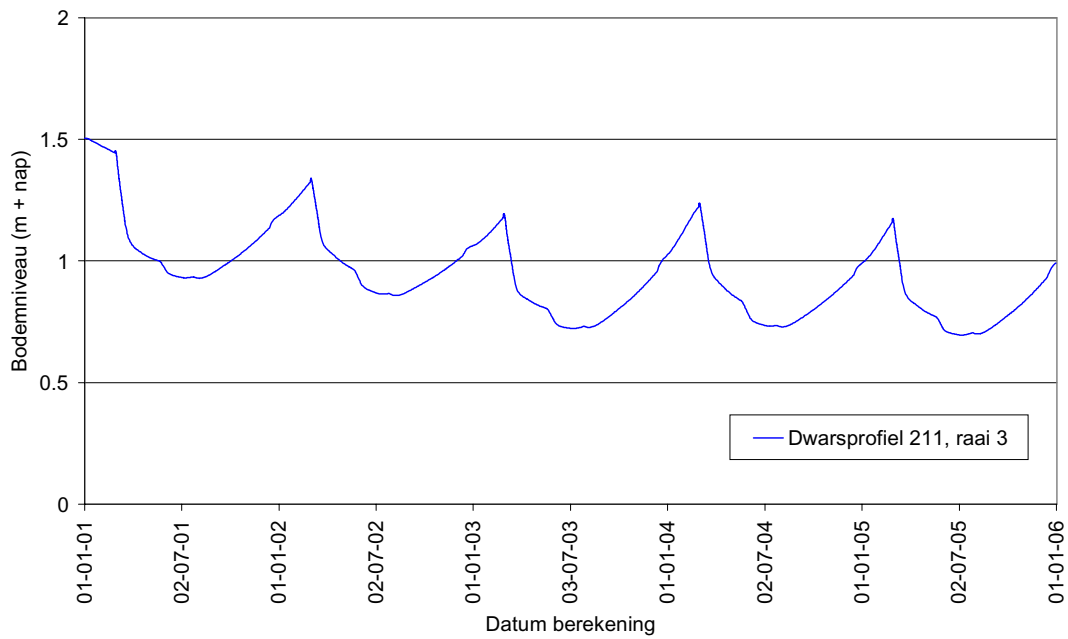
Figuur 25 Dynamisch verloop van de bodemligging km 869,8, circa 85 m links van de rivieras (binnenbocht Hulhuizen)



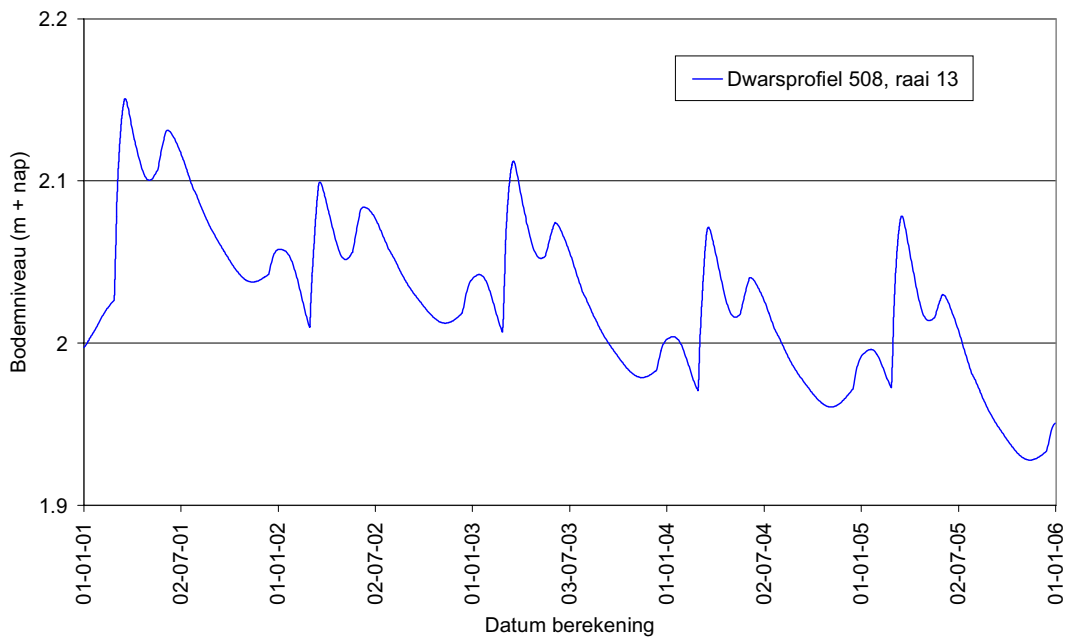
Figuur 26 Dynamisch verloop van de bodemligging km 869,8, circa 85 m rechts van de rivieras (buitenbocht Hulhuizen)



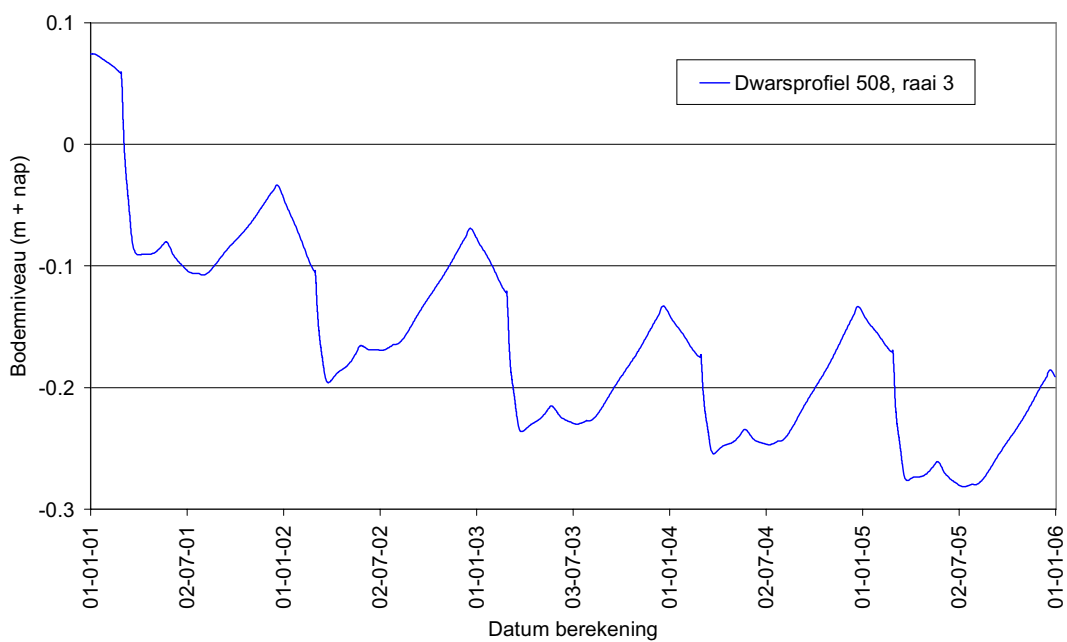
Figuur 27 Dynamisch verloop van de bodemligging km 878,4, circa 85 m links van de rivieras



Figuur 28 Dynamisch verloop van de bodemligging km 878,4, circa 85 m rechts van de rivieras

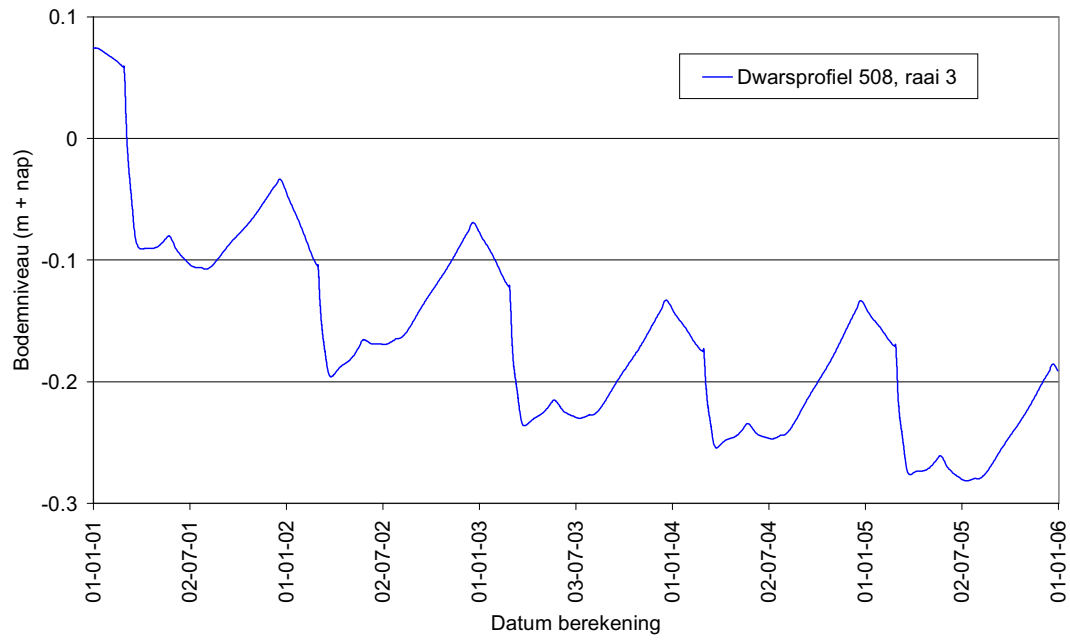


Figuur 29 Dynamisch verloop van de bodemligging km 893,5 circa 85 m links van de rivieras



Figuur 30 Dynamisch verloop van de bodemligging km 893,5 circa 85 m links van de rivieras





Figuur 31 Dynamisch verloop van de bodemligging km 893,5 circa 85 m rechts van de rivieras

## 4 Baggerwerk Hulhuizen

### 4.1 Inleiding

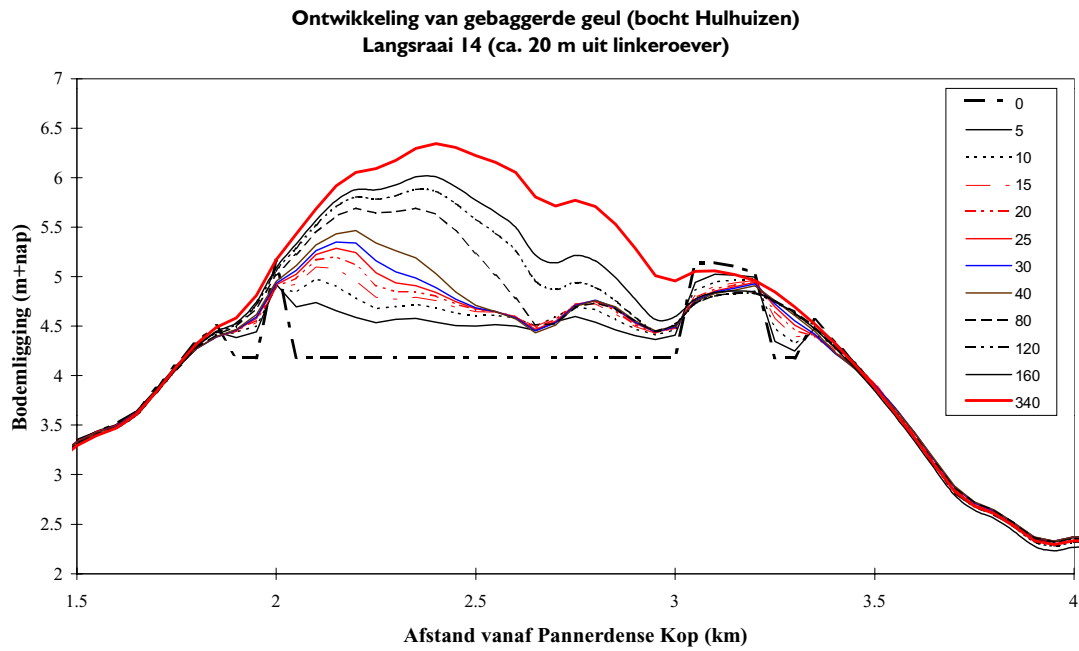
In september 2000 is in de bocht bij Hulhuizen profielbaggerwerk uitgevoerd in het kader van het baggerbestek ON-1023. Na uitvoering van het baggerwerk zijn diverse bodempeilingen (op verschillende momenten in de tijd) uitgevoerd, welke beschikbaar zijn in GIS formaat (deze peilingen zijn niet gebiedsdekkend). Met behulp van deze gegevens is het mogelijk het waargenomen herstel na te bootsen met het model, en de resultaten te toetsen.

Bij aanvang van deze fase van de studie zijn een aantal principe berekeningen gemaakt. Deze principe berekeningen zijn gemaakt om de mogelijkheden van het model te testen voordat de gegevens beschikbaar waren. De resultaten zijn gepresenteerd in paragraaf 4.2.

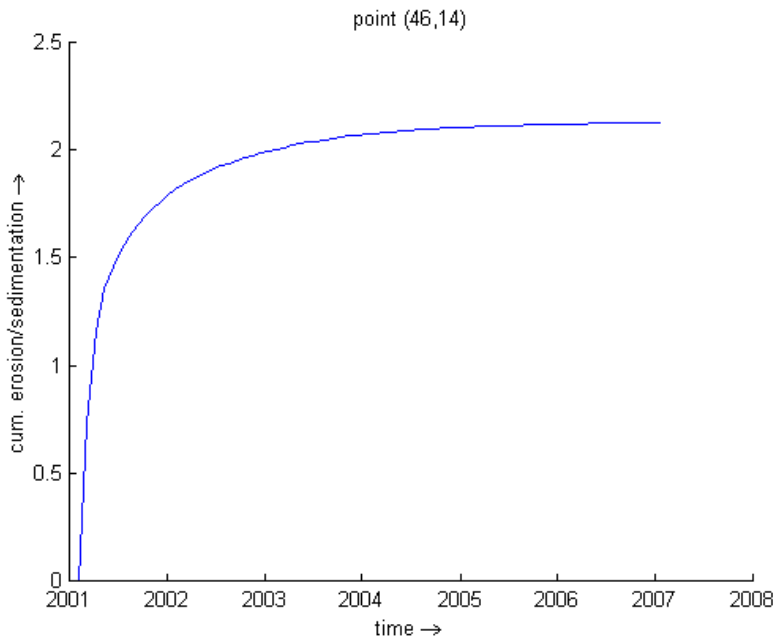
Vervolgens zijn in paragraaf 4.3 de resultaten gepresenteerd van de simulaties die zijn uitgevoerd voor het actuele baggerwerk in september 2000, en de bodemontwikkeling tot april/mei 2001.

### 4.2 Principe berekeningen

Tijdens de ijking is een eerste berekening uitgevoerd met baggerwerk in de Waalbocht bij Hulhuizen, waarbij de berekende bodem is verlaagd tot 2,80 m - OLR (hetgeen in dit geval overeenkomt met ontgraving tot een constant niveau van 4,18 m). Het materiaal is niet teruggestort in het model. Er is gerekend met een constante afvoer van 1600 m<sup>3</sup>/s. In figuur 32 is het herstel van het profiel geïllustreerd aan de hand van een langsraai. De point-bar wordt geleidelijk vanuit de bovenstroomse zijde opgebouwd. Het verloop van de bodemontwikkeling in de tijd is geïllustreerd in figuur 33.



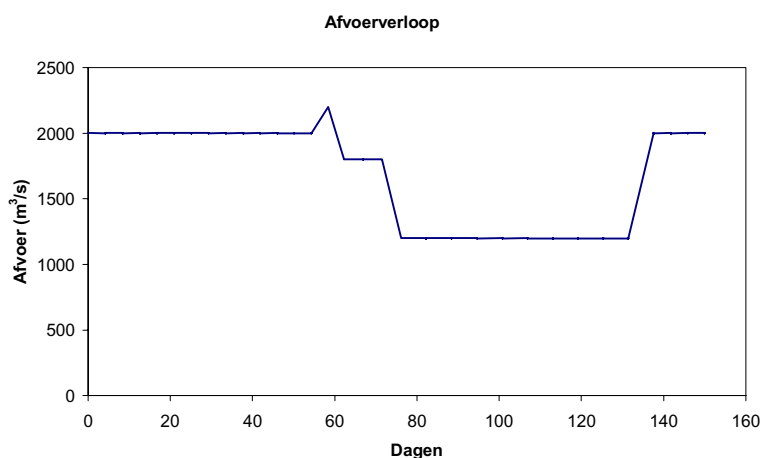
Figuur 32 Berekende bodemligging in langsraai langs linker oever: herstel van baggerwerk



Figuur 33 Berekende bodemligging bij linker oever als functie van de tijd: herstel van baggerwerk

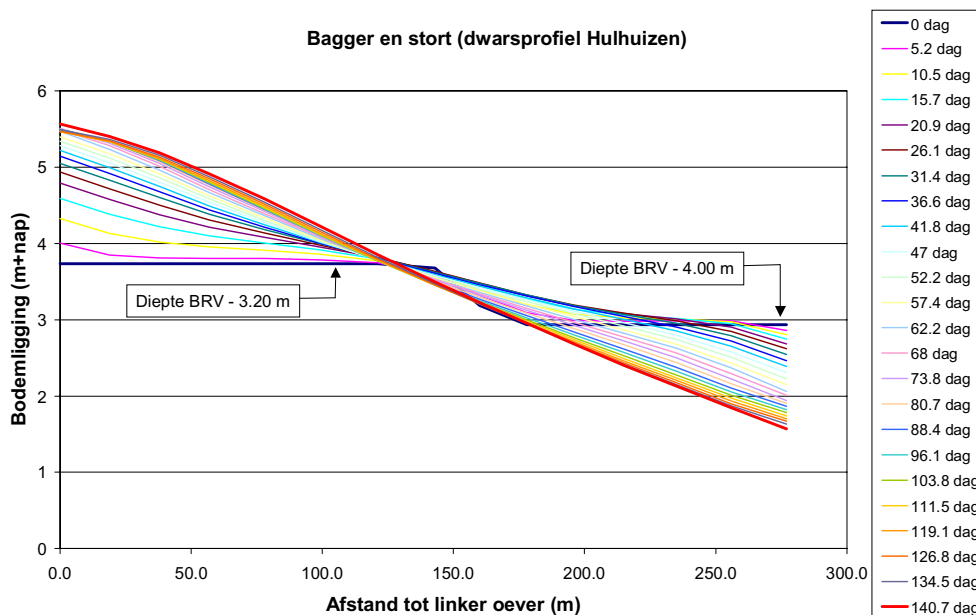
Voorafgaande aan het ontvangen van de noodzakelijke gegevens voor de toetsing van het model voor het herstel van baggerwerk bij Hulhuizen, is een testberekening gemaakt waarbij de binnenbocht bij Hulhuizen is gebaggerd tot een niveau van 3,2 m - BRV en de buitenbocht volgestort tot een niveau 4,0 m - BRV. Er is uitgegaan van een afvoerverloop afgeleid uit de 1999 afvoerreeks (zie figuur 24, periode april-december), de periode na het hoogwater startende met 2000 m<sup>3</sup>/s, een periode van 1200 m<sup>3</sup>/s, en aan het eind weer een

stijging: zie figuur 34. Hiermee wordt het gedrag van de bocht in de jaarlijks terugkerende laagwaterperiode tot aan het volgende hoogwater gesimuleerd.



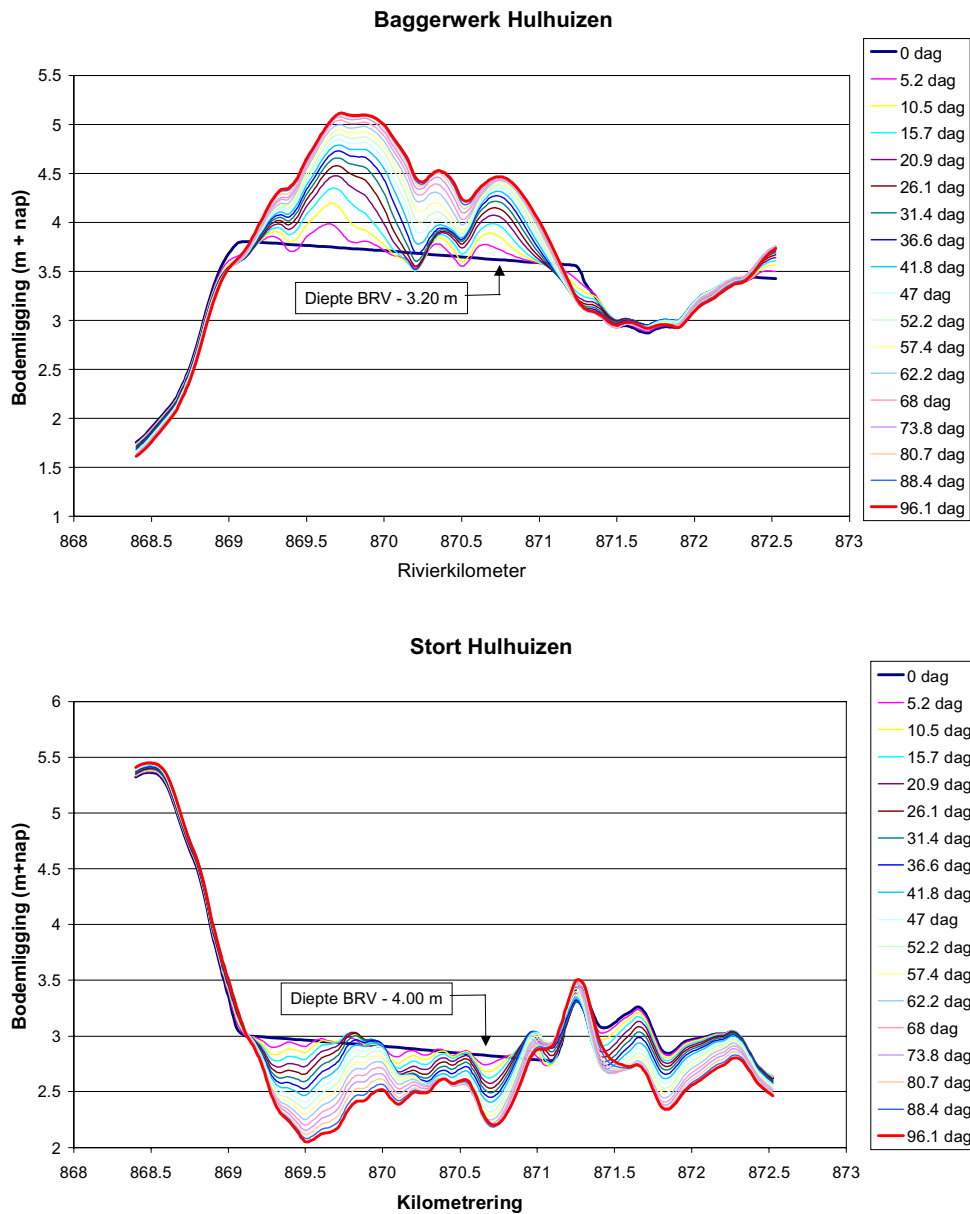
Figuur 34 Afvoerverloop Waal voor principe-berekening

In figuur 35 is het verloop van de bodemligging van een punt in de binnenbocht als functie van de tijd weergegeven. Het herstel van de bodemligging tijdens de periode van lage Waal-afvoeren (1200 m³/s) is zeer gering. Voor en na die periode (bij afvoeren van orde 2000 m³/s) is er wel een aanzienlijke aangroei van de bank waar te nemen.



Figuur 35 Berekend herstel van bagger en stort in dwarsprofiel op km 869,8 bij Hulhuizen (principeberekningen)

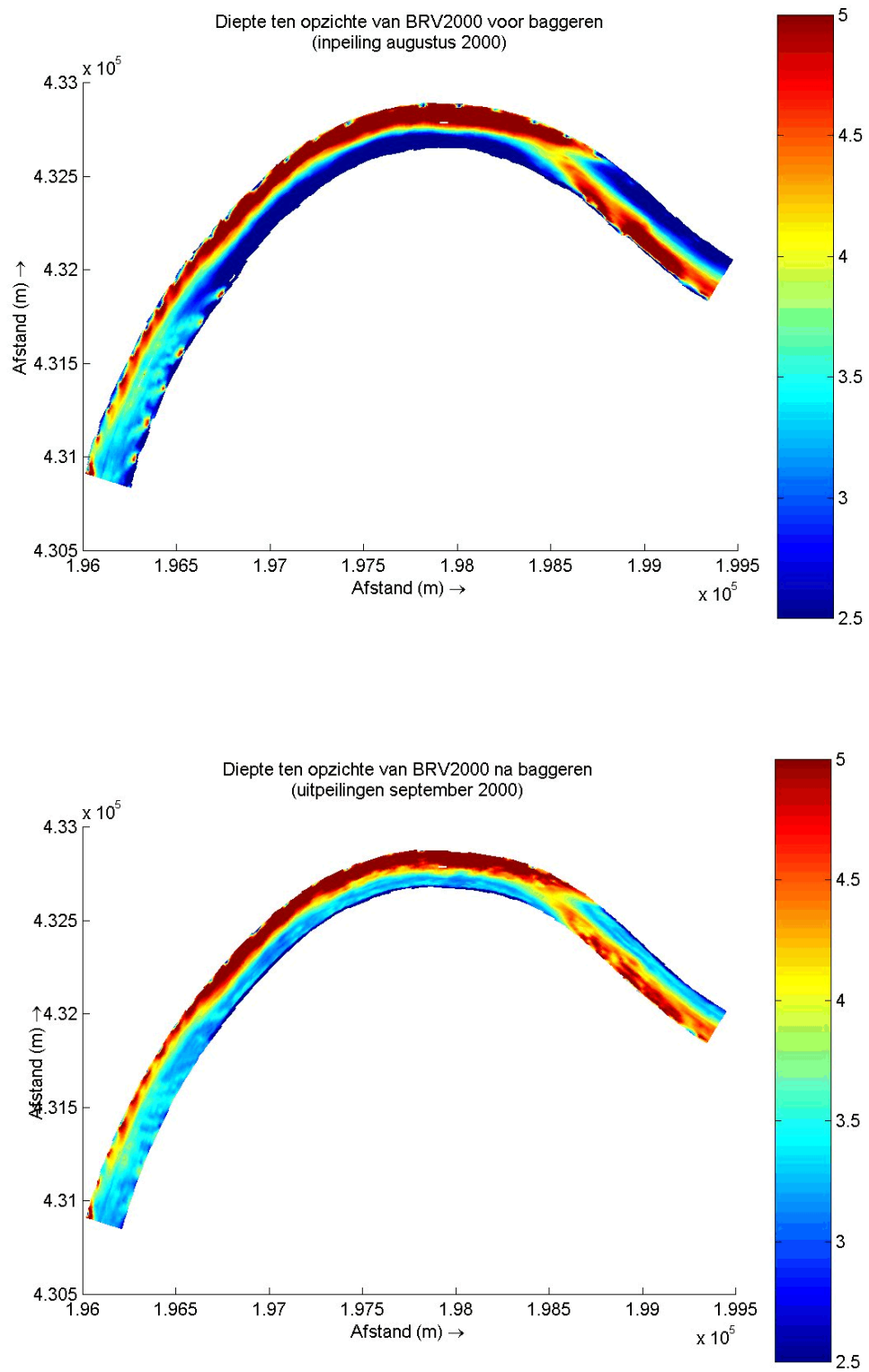
De opbouw van het profiel (terugkanteling) is gevisualiseerd in figuur 40 voor het dwarsprofiel op km 869,8. Daarnaast zijn in figuren 36 de langsprofielen op circa 85 m links en rechts van de as getoond, met daarin eveneens de ontwikkeling in de tijd.



Figuur 36 Verloop van langsprofielen bij bagger en stort locaties nabij Hulhuizen (principeberekening)

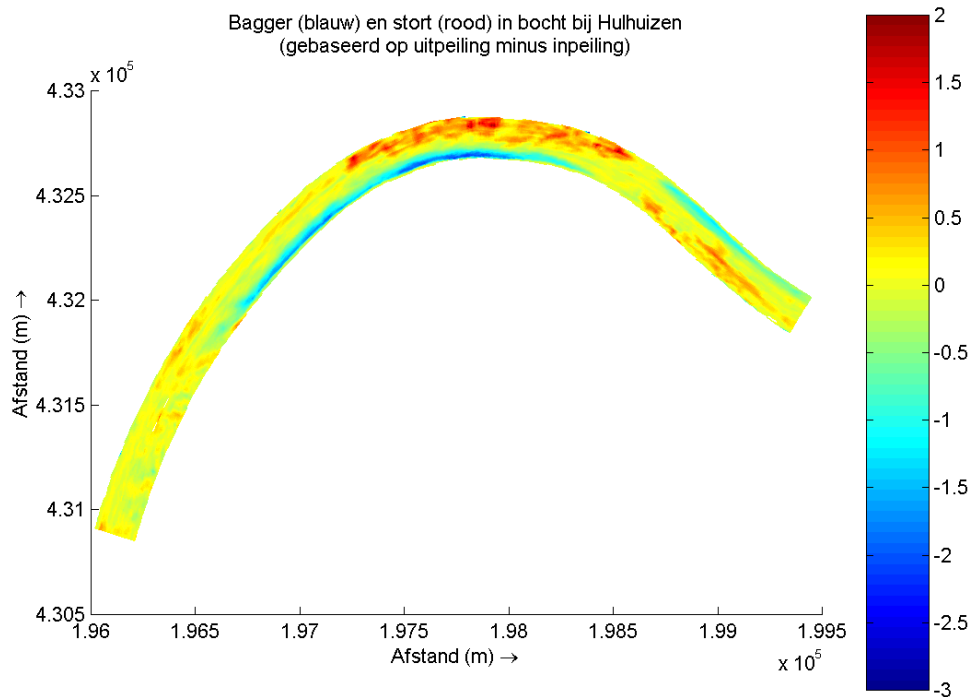
### 4.3 Simulatie herstel baggerbestek ON-1023

In periode augustus - september 2000 zijn in de Waalbochten bovenstreams van Nijmegen baggerwerkzaamheden uitgevoerd in het kader van baggerprogramma ON-1023. Het gaat hier om een significant baggervolume. De metingen van de bodemligging op het traject ter plaatse van de bocht bij Hulhuizen (km 869 - 872) kunnen worden gebruikt voor het toetsen van het model.



Figuur 37 Gemeten diepte ten opzichte van BRV2000 voor de situatie voor en na het baggeren respectievelijk (situaties augustus en september 2000)

Het baggerwerk ter plaatse van de bocht bij Hulhuizen is uitgevoerd in de vaargeul langs de binnenbocht. Daarbij is gebaggerd tot een diepte van 3,2 m ten opzichte van BRV2000. In figuur 37 is met behulp van dieptekaartjes aangegeven hoe de situatie is veranderd door het baggerwerk. In deze figuren is een legenda gehanteerd met een dieptebereik 2,5 tot 5 m. In de situatie voor het baggeren zijn gebieden dieper dan 5 m en ondieper dan 2,5 m te vinden in de buiten- en binnenbocht respectievelijk. Een verschilfiguur van de situaties voor en na het baggeren is weergegeven in figuur 38.

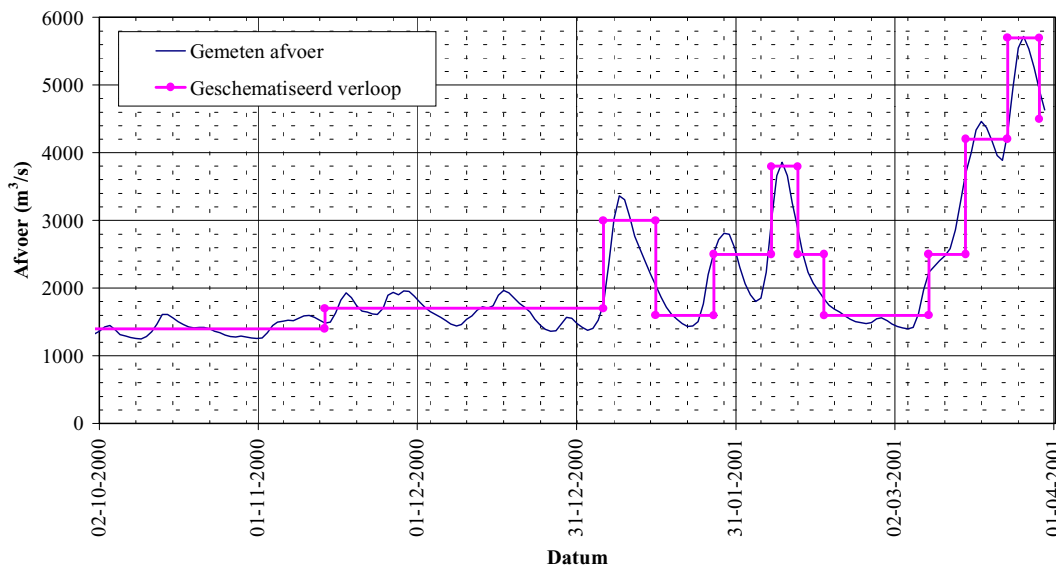


Figuur 38 Gemeten bagger en stort gebaseerd op verschil in inpeiling en uitpeiling in september 2000 ter plaatse van de bocht bij Hulhuizen

Uit bovenstaande gegevens volgt dat in de binnenbocht bij Hulhuizen (tussen km 869 en 872) een volume van circa 115 duizend  $m^3$  is verwijderd, terwijl in de buitenbocht (op hetzelfde traject) een volume van 83 duizend  $m^3$  is toegevoegd (een deel van het materiaal lijkt te zijn teruggestort in omringende trajecten).

Voor de simulaties is uitgegaan van de afvoerreeks gemeten op de Pannerdense Kop voor de periode 1/10/2000 tot en met 31/3/2001. Deze reeks is voor efficiëntie van de berekening (zie paragraaf 3.2) geschematiseerd door een trapsgewijs (discreet) verloop zoals aangegeven in figuur 39.

Afvoerverloop Waal 2000 - 2001



Figuur 39 Afvoerverloop Waal voor baggerberekening

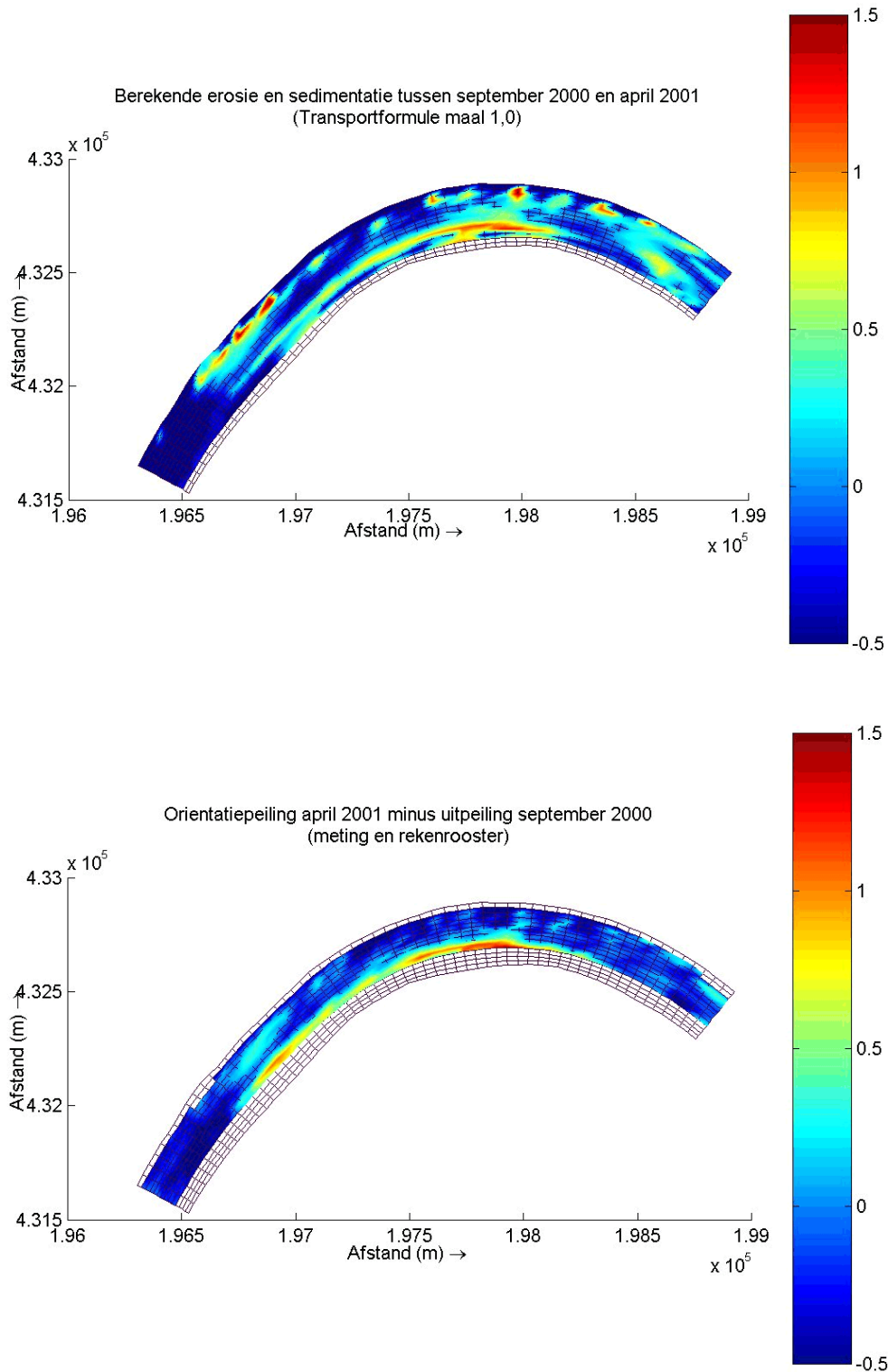
Ten behoeve van efficiëntie is tevens slechts gerekend met een deel van het model. Dit is gedaan door de 'enclosure' van het rooster te beperken tot de eerste 300 roosterpunten in langsrichting (roostergebied met dimensies 16×300 punten). De benedenrand ligt in dit geval op km 883.

Overige kenmerken van de simulatie zijn:

- Randconditie bovenrand: de afvoer wordt verdeeld over de bovenrand op de in paragraaf 2.4 aangegeven wijze waarbij 25 % grotere afvoeren aan de rechterzijde en 25 % lager afvoeren aan de linkerzijde optreden.
- Randconditie benedenrand: uit berekeningen voor het totale model is een Q/h-relatie afgeleid voor raai 300, waarmee de opgelegde waterstand wordt berekend als  $h = 0,217795 \cdot Q_{\text{tot}}^{0,484984}$
- Gerekend is met een totale tijdsduur van 197 dagen (september 2000 tot en met april 2001)
- Aanvullende berekeningen zijn gemaakt waarbij het berekende sedimenttransport (gebruik makend van de Engelund en Hansen transport formule) is vermenigvuldigd met een factor 1,5 en 2,0 respectievelijk. Hiermee is onderzocht in hoeverre het berekende herstel van baggerwerk wordt beïnvloed door de grootte van het transport (dat een vrij onzekere grootte is), en in hoeverre deze in overeenstemming is met de waarnemingen.
- Voor beginsituatie van het model is gebruik gemaakt van een bodemligging die is samengesteld uit een aantal afzonderlijke uitpeilingen van de aannemer (Combinatie Van de Herik - D.I.) voor de dagen 25/8/00; 1/9/00; 6/9/00; 8/9/00; 14/9/00; 15/9/00; 19/9/00 en 20/9/00. Deze peiling bedekt echter niet de gehele breedte van de rivier. Op een aantal locaties (stroken langs de buitenranden) is gebruik gemaakt van de dwarspeiling van 2000 of (waar de 2000 peiling ontbreekt) van de dwarspeiling van 1999. Op een smalle strook in de binnenbocht ontbraken de gegevens geheel (deze waren achteraf wel beschikbaar in andere bestanden maar deze zijn niet gebruikt). Op deze strook is de



bodemligging vanuit het hoogste beschikbare meetpunt min of meer horizontaal naar binnen is geëxtrapoleerd.



Figuur 40 Gemeten en berekende bodemverandering over de periode september 2000 en april 2001

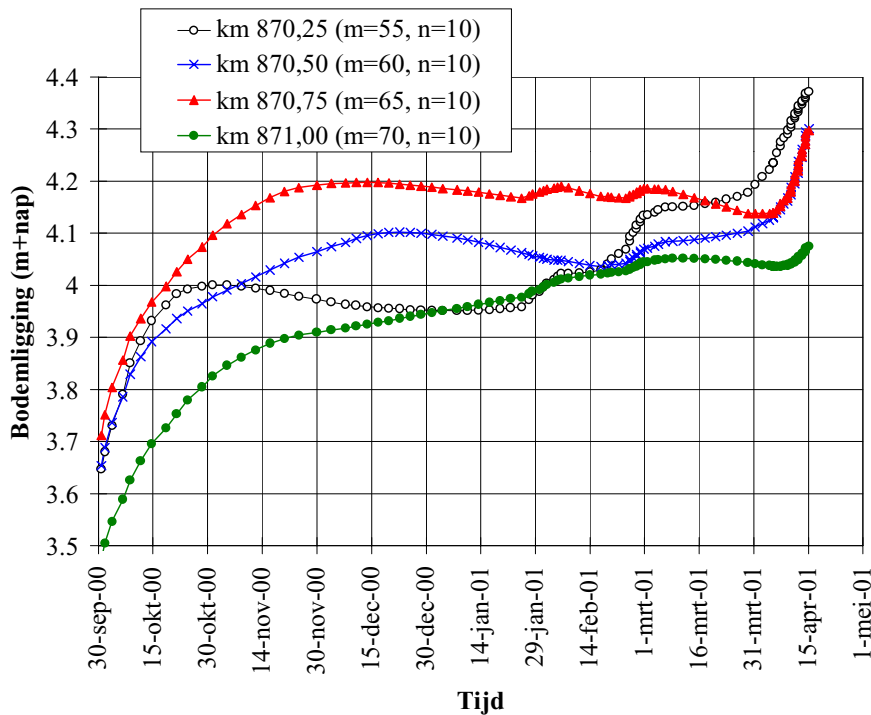
De resultaten van de berekende en gemeten bodemverandering zijn gepresenteerd in figuur 40. De metingen zijn gebaseerd op het verschil tussen de uitpeiling en de dwarspeiling (multibeam OR2001) uitgevoerd in april 2001. Nadere analyse van deze resultaten toont dat de overeenstemming tussen de berekeningen en metingen groot is. In tabel 1 zijn bijvoorbeeld de berekende aanzandingsvolumes uitgezet ter plaatse van de gebaggerde geul, waarbij de volumes van meting en berekening vrijwel gelijk zijn. Wanneer de transportformule wordt vermenigvuldigd met een factor hoger dan 1 neemt het volume ongeveer evenredig toe. De oorspronkelijke keuze voor een vermenigvuldigingsfactor van 1,0 wordt hiermee dus onderbouwd.

Tabel 1 Berekende en gemeten aanzanding in en rond de gebaggerde geul

Bron	Volume aanzanding periode sept.2000 - april 2001 op binnenbocht (m = 25 - 85; n = 8 - 13)
Meting (peiling OR2001 - uitpeiling)	65 duizend m <sup>3</sup>
Berekening T24-1: Transport maal 1,0	66 duizend m <sup>3</sup>
Berekening T24-05: Transport maal 1,5	93 duizend m <sup>3</sup>
Berekening T24-15: Transport maal 2,0	112 duizend m <sup>3</sup>

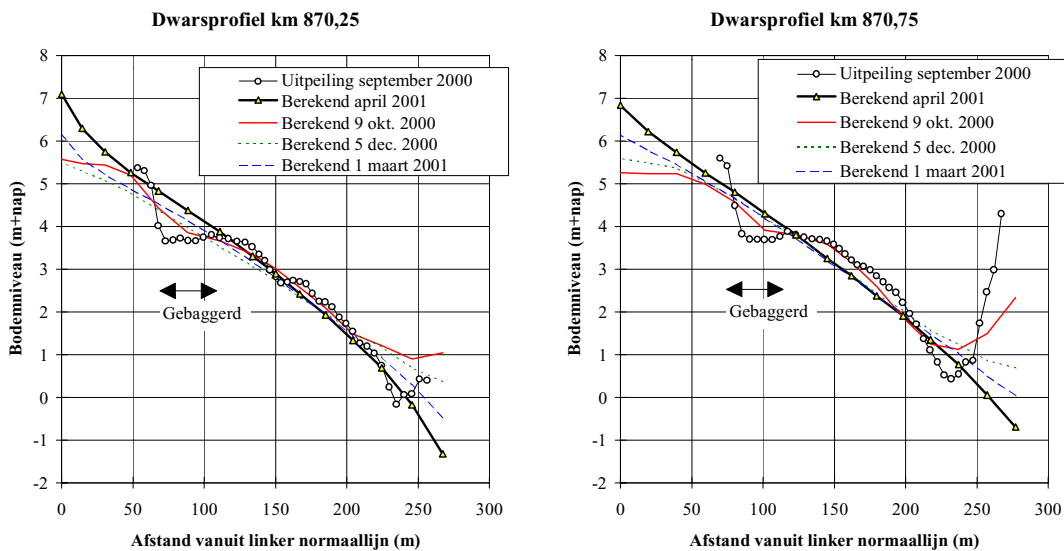
In Bijlage B zijn voor een aantal dwarsprofielen de berekende en gemeten waarden tezamen gepresenteerd. Uit de dwarsprofielen blijkt dat na de hoogwaterperiode de gebaggerde geul vrijwel volledig is verdwenen. Tevens volgt dat in de stroken grenzend aan de oevers de resultaten onnauwkeurig zijn (dit was reeds geconstateerd in de ijkingsberekening). Enerzijds komt dit door het ontbreken van kribben, anderzijds door gebruik van een te lage bodemligging in de binnenbocht (buiten het invloedsgebied van het baggerwerk). Opgemerkt wordt dat tijdens de hoogwaters in maart en april 2001 er mogelijk stroming door de uiterwaarden is opgetreden. Dit effect is eveneens niet meegenomen in de berekeningen, maar in welke mate dit van belang is geweest voor de morfologie is onbekend. Onnauwkeurigheden in de oeverzones blijken, zo volgt uit ervaring, uiteindelijk weinig effect te hebben op de nauwkeurigheden waarmee de bodemligging in het binnengebied (met name de vaargeul) wordt gesimuleerd.

Het verloop van de bodemligging in de tijd toont dat tijdens de berekening een snelle opvulling optreedt van de gebaggerde geul waardoor het profiel vervlakt. In figuur 41 is het verloop van de bodemligging weergegeven voor een aantal locaties in het diepste deel van de gebaggerde sleuf. De belangrijkste opvulling treedt daarbij op in de eerste 2 maanden. De kleine hoogwaters in december en januari hebben relatief weinig effect; tijdens de hoogwatergolf in april treedt echter nog een verdere aanvulling van de geul op. Deze laatste verandering is van een grootschaliger karakter, waarbij door de hoge afvoer het bochtprofiel steiler wordt: de buitenbocht wordt dieper en de binnenbocht ondieper (de binnenbocht komt in zijn geheel omhoog).



Figuur 41 Verloop van de berekende bodemligging als functie van de tijd

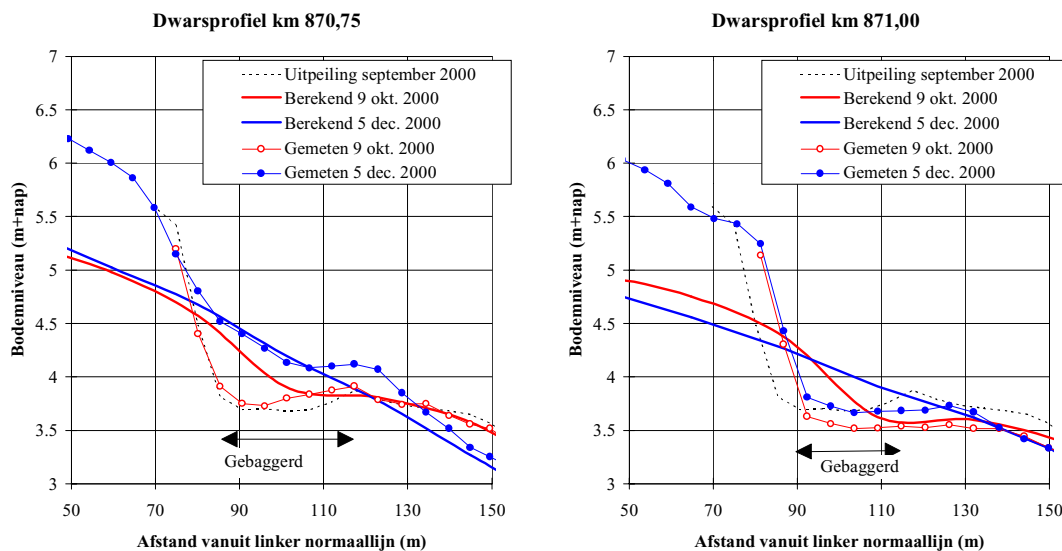
Dit gedrag volgt ook uit de ontwikkeling van de dwarsprofielen in de tijd. In figuur 42 zijn een aantal tussenresultaten gepresenteerd van de berekeningen ter plaatse van km 870,25 en 870,75. Hieruit blijkt hoe reeds snel na aanleg van de geul herstel optreedt.



Figuur 42 Ontwikkeling van het dwarsprofiel ter plaatse van de gebaggerde geul in de tijd

In figuur 43 is door middel van dwarsprofielen geïllustreerd hoe het resultaat zich verhoudt tot de metingen. Voor een tweetal tussentijdse peilingen, op 9 oktober en 5 december respectievelijk, zijn de profielen bepaald en vergeleken met de berekende bodem op km

870,75 en km 871. Uit deze figuren blijkt dat, ondanks de goede overeenstemming met de metingen in de eindsituatie, het herstel van de gebaggerde geul in de beginfasen (tijdens relatief lage afvoeren) in de berekeningen hoogst waarschijnlijk sneller verloopt dan in het prototype. De modelresultaten zijn daarmee mogelijk iets te conservatief. Opgemerkt moet worden dat meetonnauwkeurigheden in de peilingen in onderstaande figuren mogelijk zijn opgetreden (fouten van enkele decimeters zijn niet uit te sluiten), hetgeen de overeenstemming tussen meting en berekening niet noodzakelijkerwijs verbetert.



Figuur 43 Berekenende en gemeten bodemveranderingen in dwarsprofiel

Het relatief snelle herstel van de gebaggerde geul in de eerste maanden na aanleg is mogelijk versterkt door numeriek diffusief gedrag (diffusie geeft afvlakking van profielen). Dit kan worden onderzocht door aanvullende berekeningen uit te voeren met een verlaagde diffusieparameter, d.w.z. een minder sterk langshellingeffect die wordt gebruikt om de instabiliteiten afkomstig uit de geknikte oeverlijn te dempen. Een dergelijke berekening vraagt dan wel om een iets gladdere oeverbelijning. Hiervoor is het noodzakelijk het rooster te herdefiniëren op basis van nieuwe gladdere normaallijnen.

Overigens kan de versnelde aanzanding bij lage afvoeren ook samenhangen met de gebruikte sedimenttransportformulering. De Engelund Hansen transport formule geeft ook bij lage afvoeren nog een redelijk groot transport. Nabij Hulhuizen is echter nog sprake van relatief grof sediment met een gegraadeerd karakter. Hiervoor kan mogelijk een ander transportregime optreden. De gekozen transportformule zal in dat geval wel goed voldoen voor de Midden-Waal waar het materiaal fijner is. Het verlagen van het berekende sedimenttransport wordt voorsnog niet als noodzakelijk geacht.

Geconcludeerd is dat met het gekijkte model de in de gebaggerde geul opgetreden aanzanding tussen september 2000 en april 2001 kan worden gesimuleerd. Echter, ook is geconcludeerd dat de gesimuleerde aanzanding direct na aanleg van de gebaggerde geul in de eerste maanden sneller lijkt te verlopen dan in het prototype.

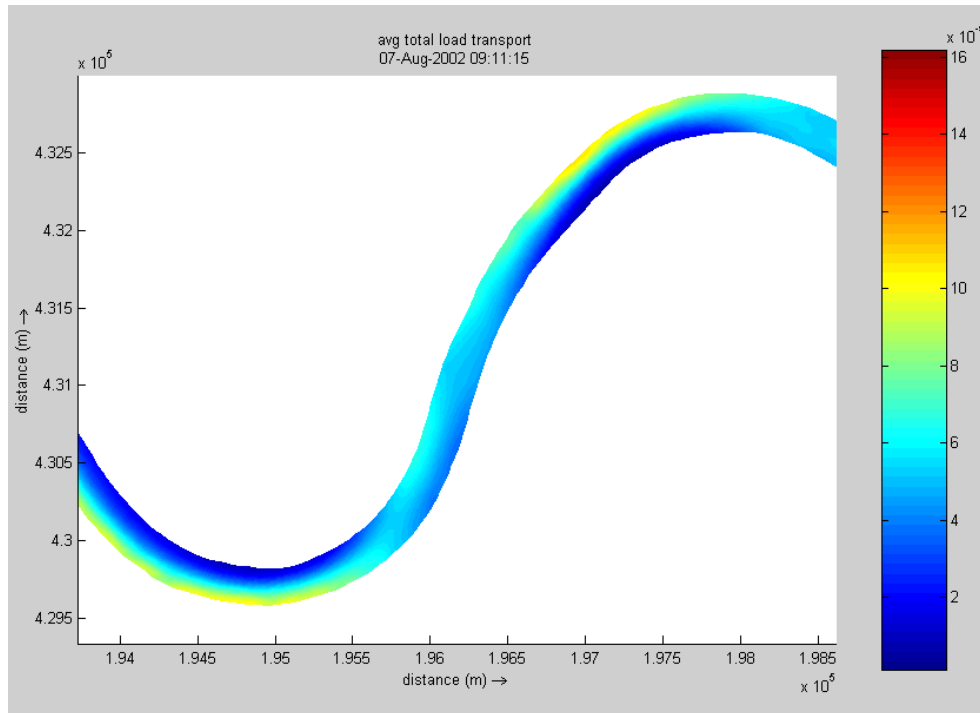


## 5 Berekende sedimenttransporten

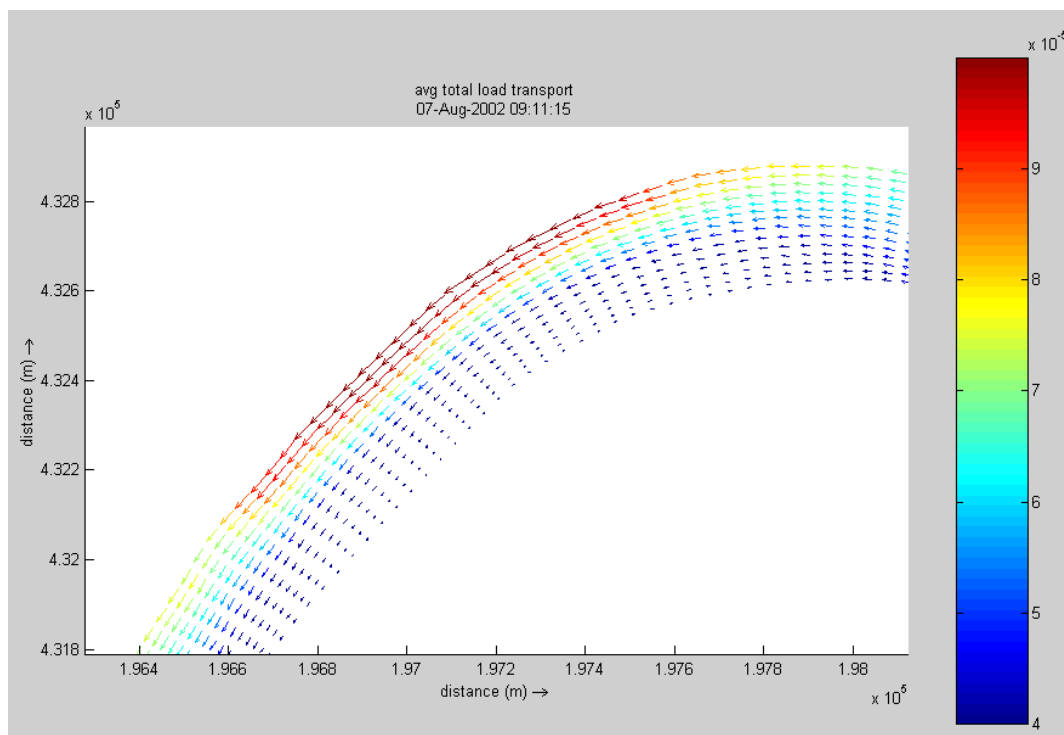
Ten behoeve van de weergave van sedimenttransporten in BOS Baggeren is een ruwe schatting gemaakt van deze transporten op basis van Delft2D-Rivieren berekeningen. Het betreft de uitvoer van het sterk geschematiseerde 2D model. Samengevat uit voorgaande hoofdstukken kan worden gesteld dat het model wordt gekenmerkt door:

- Simuleert 2DH-stroming, sedimenttransport (totaal transport) en morfologie van het zomerbed (rekenrooster wordt begrensd door de normaallijnen).
- Bodemligging in model is berekende evenwichtsbodem die overeenstemt met de gemiddelde Waalbodembodem die volgt uit middeling van de JDP's over de periode 1988-1999 (kenmerkend voor de 2D opgedrongen morfologie).
- Een constante Chézy waarde voor de bodemruwheid van  $45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$  wordt gehanteerd.
- Gerekend wordt met uniform sediment met een constante  $D_{50}$  van 2 mm
- Het sedimenttransport wordt gesimuleerd met de Engelund en Hansen transportformule (vermenigvuldigingsfactor 1,0). Porositeit van het bodemmateriaal is 0,4.
- Er wordt gerekend met “non-equilibrium” spiraalstroomeffect, met een coëfficiënt  $\beta = 0,5$ .
- Voor de ijkparameters voor richtingseffect van sedimenttransport zijn de voor de Waal gebruikelijke waarden gekozen: ASHLD = 0,7 en BSHLD = 0,5.
- Ten behoeve van een goede weergave van de waterstanden op en nabij de benedenrand (km 953) is uitgegaan van de Q/h-relatie bij Vuren. Voor Vuren km 951 gelden de volgende waarden voor de waterstanden (met tussen haakjes wat het model in is gegaan).
  - $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ : 0.569 m+nap (km 953: ca. 0.35)
  - $Q = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$ : 1.0952 m+nap (km 953: ca. 0.9)
  - $Q = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$ : 1.752 m+nap (km 953: ca. 1.55)

In figuur 44 en 45 zijn voorbeelden gegeven van de ruimtelijk verdeling van het berekende sedimenttransport. De grootste transporten treden op in de diepere delen van het dwarsprofiel, de buitenbochten. De figuren zijn gemaakt voor berekeningsresultaten bij een afvoer van  $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Figuur 44 Voorbeeld van berekend transport (in  $m^2/s$ ) in bocht bij Hulhuizen en Erlecom



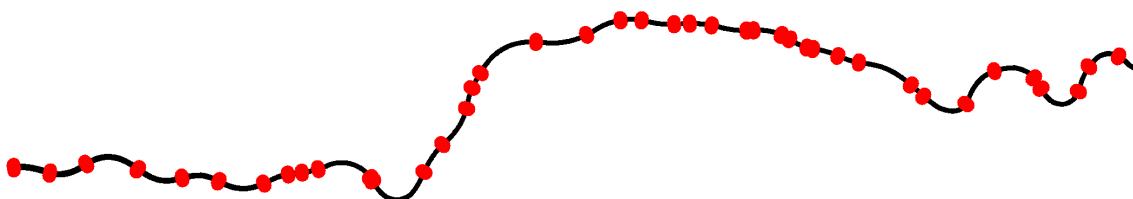
Figuur 45 Detail van vectorplot met berekende sedimenttransport bij Hulhuizen

Met bovengenoemde instellingen worden globaal de volgende jaarlijkse sedimenttransporten berekend met het model voor de Waal:

Jaargemid. afvoer (m <sup>3</sup> /s)	Jaartransport (m <sup>3</sup> /jaar)
1.000	250.000
1.600	630.000
2.400	1.480.000

Het jaartransport van circa 0,5 miljoen m<sup>3</sup> wordt als een reële schatting van het werkelijke jaartransport van beddingmateriaal in de Waal beschouwd.

Op basis van de berekende waarden voor het sedimenttransport zijn vervolgens gemiddeld per morfologische eenheid, waarbij onderscheid is gemaakt tussen de zone links en rechts van de as respectievelijk (om onderscheid tussen transport in ondiepe binnen- en diepe buitenbochten te kunnen weergeven).

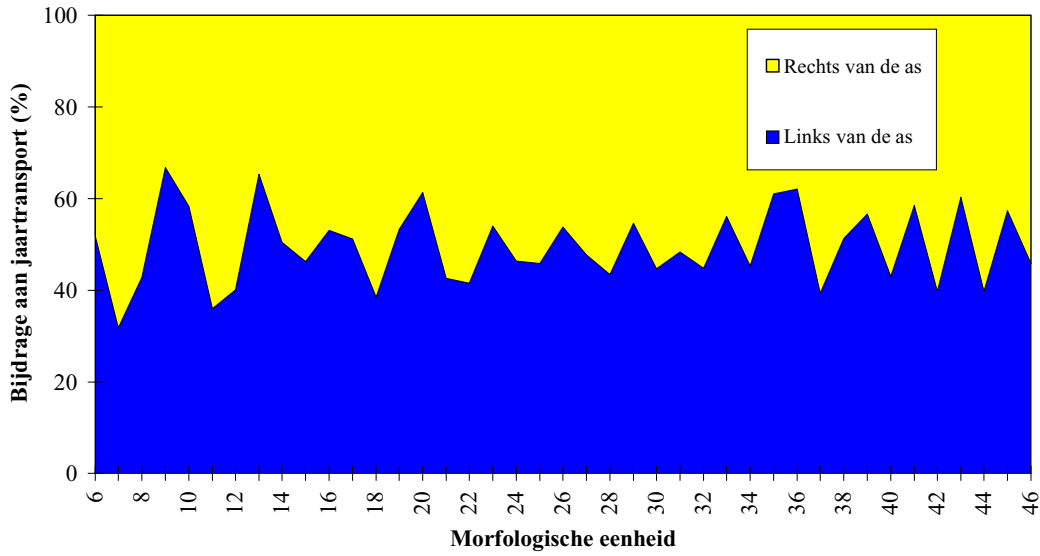


Figuur 46 Overzicht morfologische eenheden in modelgebied

De morfologische eenheden 6 t/m 48 (tellend in stroomafwaartse richting) liggen binnen het modelgebied, en zijn globaal weergegeven in figuur 46. In de figuren hierna zijn vervolgens de over de morfologische eenheden gemiddelde waarden (links en rechts van de as, en bij verschillende afvoeren) op een aantal manieren gepresenteerd. Opvallend is in figuur 47 de toename dan wel afname van het transport nabij de benedenstroomse rand. Dit is de invloed van de gebruikte vaste waterstandsrandvoorwaarde op de benedenrand, en het daarmee samenhangende stuwefect. Bij lage afvoeren is deze waterstand te hoog (en daarmee de snelheden en transporten te laag), en andersom bij hoge afvoeren.

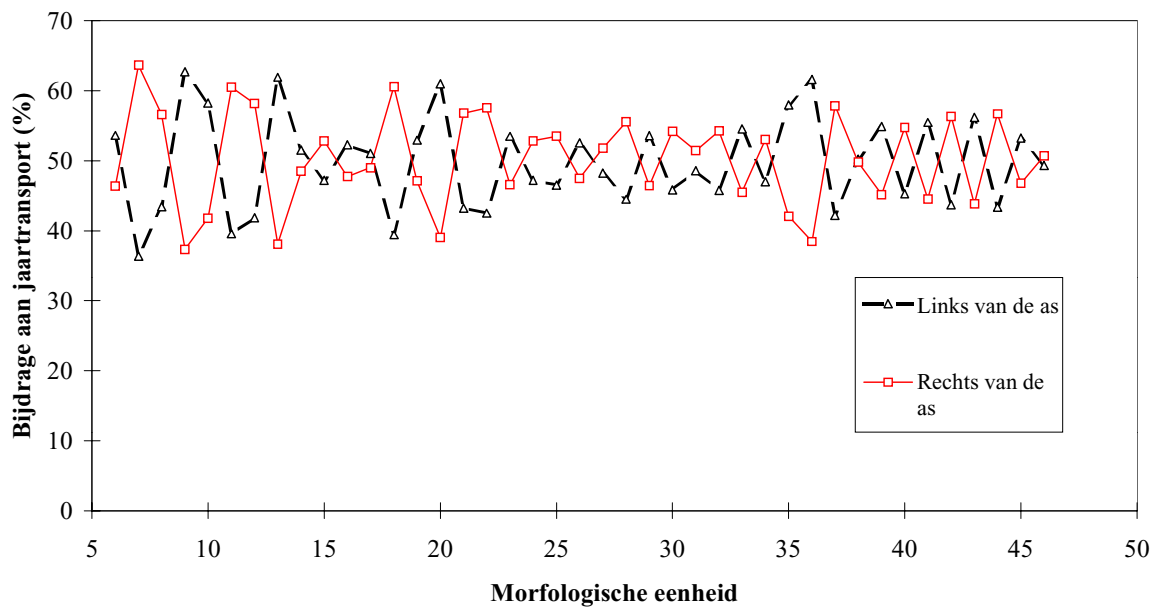


**Zandtransport bij 1600 m<sup>3</sup>/s**

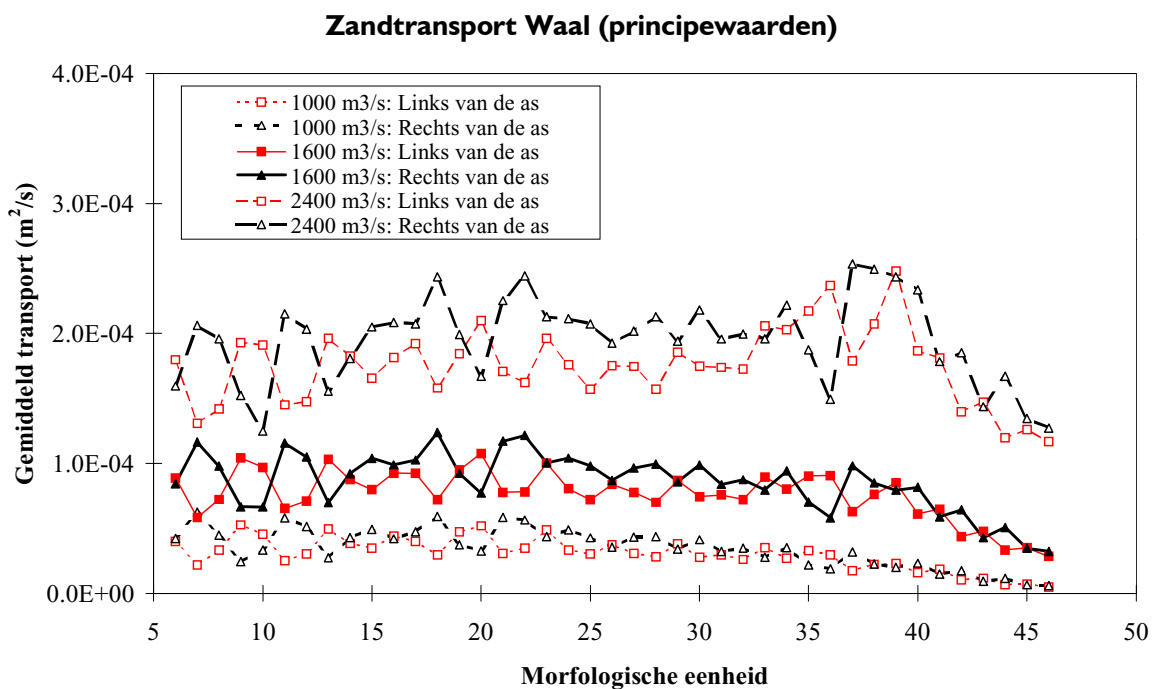


Figuur 47 De procentuele bijdrage van zone links en rechts van de rivieras aan het sedimenttransport per morfologische eenheid

**Zandtransport bij 1600 m<sup>3</sup>/s**



Figuur 48 Procentuele bijdrage aan het transport links en rechts van de as



Figuur 49 Berekende waarde van het sedimenttransport per eenheid van breedte, gemiddeld per morfologische eenheid, afzonderlijk links en rechts van de as.



## 6 Morfologische dynamiek

In paragraaf 3.2 is getoond hoe onder invloed van de afvoervariaties de opgedrongen 2D bodemligging in de Waal fluctueert. Naast deze fluctuaties in opgedrongen morfologie treden ook variaties op door vrije verschijnselen (beddingvormen, hoogwatersedimentatie) die niet door het 2D model worden voorspeld. De door verschijnselen veroorzaakte dynamiek in de bodemligging is daarom onderzocht met behulp van bodempeilingen.

De natuurlijke dynamiek in de bodemligging speelt een belangrijke rol bij voorspelling van het herstel van baggerwerk. Het is veilig te veronderstellen dat bij baggerwerk op locaties met een grote variatie/dynamiek in bodemligging snel herstel zal optreden. Baggerwerk in relatief stabiele delen van de rivier zal daarentegen naar verwachting lang in stand kunnen blijven.

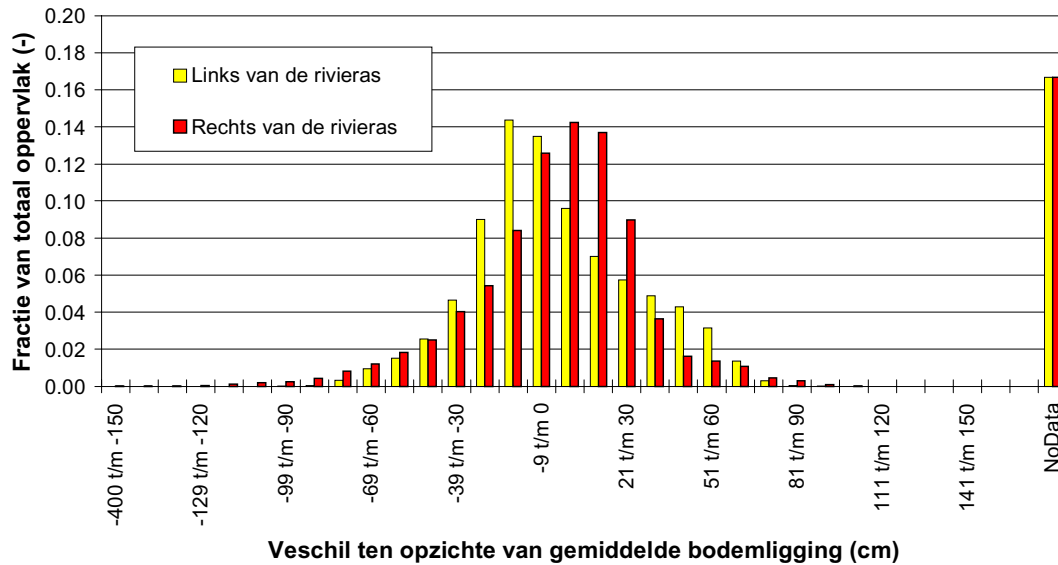
Een manier om de dynamiek zichtbaar te maken is door middel van een statistische analyse van de metingen in Arcview. Door Frieke Schepman (Schepman, 2000) is een figuur gemaakt met frequentieverdelingen van de bodemvariaties rond de gemiddelde bodemligging. Deze variaties zijn ruimtelijk te bepalen, en vervolgens voor 'helften van morfologische eenheden' (linker en rechter helft) te combineren tot een frequentieverdeling. Frieke heeft dit gedaan voor de linker en rechter helft van de gehele rivier, maar dit is ook te doen op kleinere schaal.

Voor het BOS baggeren zijn figuren met frequentieverdelingen bepaald voor alle morfologische eenheden. De frequentieverdelingen zijn gemaakt door uit te gaan van alle jaarlijkse dwarspeilingen van 1988 tot en met 1999, echter zonder correctie voor baggerwerkzaamheden en eventuele meetfouten. De bodemvariatie is bepaald door het verschil tussen de afzonderlijke JDP-bodemligging ieder jaar en het gemiddelde van alle JDP's voor periode 1988-1999. De maximaal opgetreden verschillen voor elk punt in het gebied zijn opgeslagen. De maximaal opgetreden verschillen voor elk punt in het gebied zijn opgeslagen. Vervolgens is per morfologische eenheid een klasse-verdeling gehanteerd (klassen van maximaal waargenomen variaties, in cm), en is per morfologische eenheid nagegaan welk deel (oppervlak) valt in iedere klasse. Onderscheid is gemaakt tussen de linker- (zuidelijke) en rechterhelft (noordelijke helft) van iedere morfologische eenheid. In de figuren is aangegeven welk percentage van het totaal oppervlak van een (halve) morfologische eenheid aan een bepaalde variatie voldoet. De technische beschrijving van gebruikte macro's en aanpak is gepresenteerd in bijlage C.

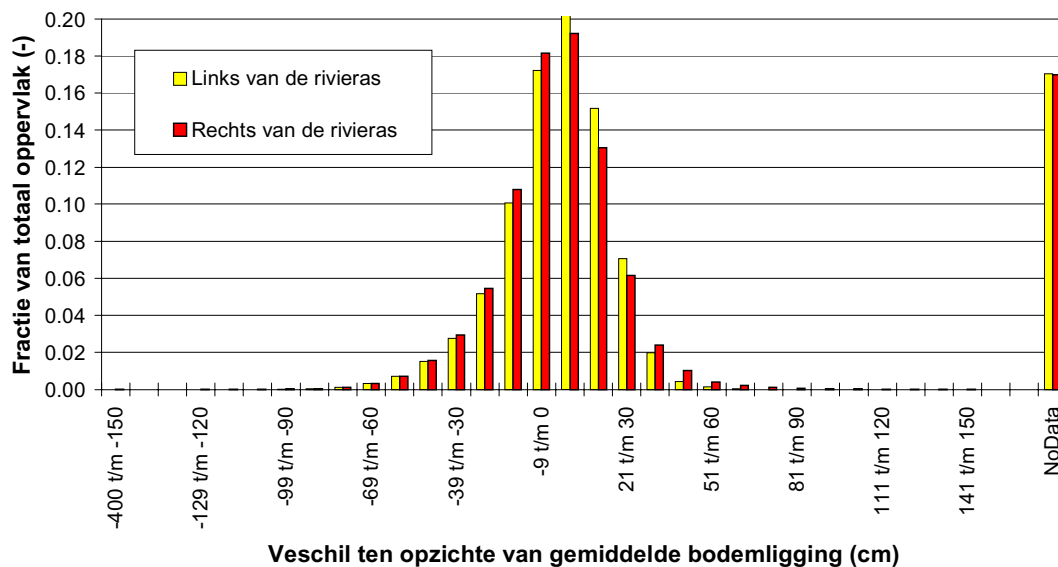
In figuur 50 en 51 zijn voorbeelden gegeven van de berekende frequentieverdeling voor morfologische eenheden in de Waalbochten bovenstrooms van Nijmegen en in de Midden-Waal. Ieder figuur toont de in JDP's maximaal opgetreden morfologische variaties in een morfologische eenheid in de periode 1988-1999. Het betreft de variatie in bodemligging (t.o.v. OLR) ten opzichte van de gemiddelde bodemligging (t.o.v. OLR) over die periode. De variatie in bodemligging staat aangegeven op de horizontale as. Op de verticale as staat aangegeven welk deel/percentage van het oppervlak de genoemde variatie heeft getoond. Over het algemeen geldt dat een grotere breedte van de kromme duidt op een hogere

morfologische activiteit van de betreffende morfologische eenheid (er zijn dan meer grote variaties opgetreden). Onderscheid is gemaakt tussen linker (zuidelijke) en rechter (noordelijke) helft van de morfologische eenheid omdat bochtinvloeden en scheepvaarteffecten belangrijk worden geacht. Over het algemeen geven de figuren voor alle morfologische eenheden een vergelijkbaar beeld (overeenkomstig figuur 50 en 51). De relatie tussen de resultaten van paragraaf 3.2 en deze waarnemingen wordt overschaduwd door de dynamiek van de vrije verschijnselen.

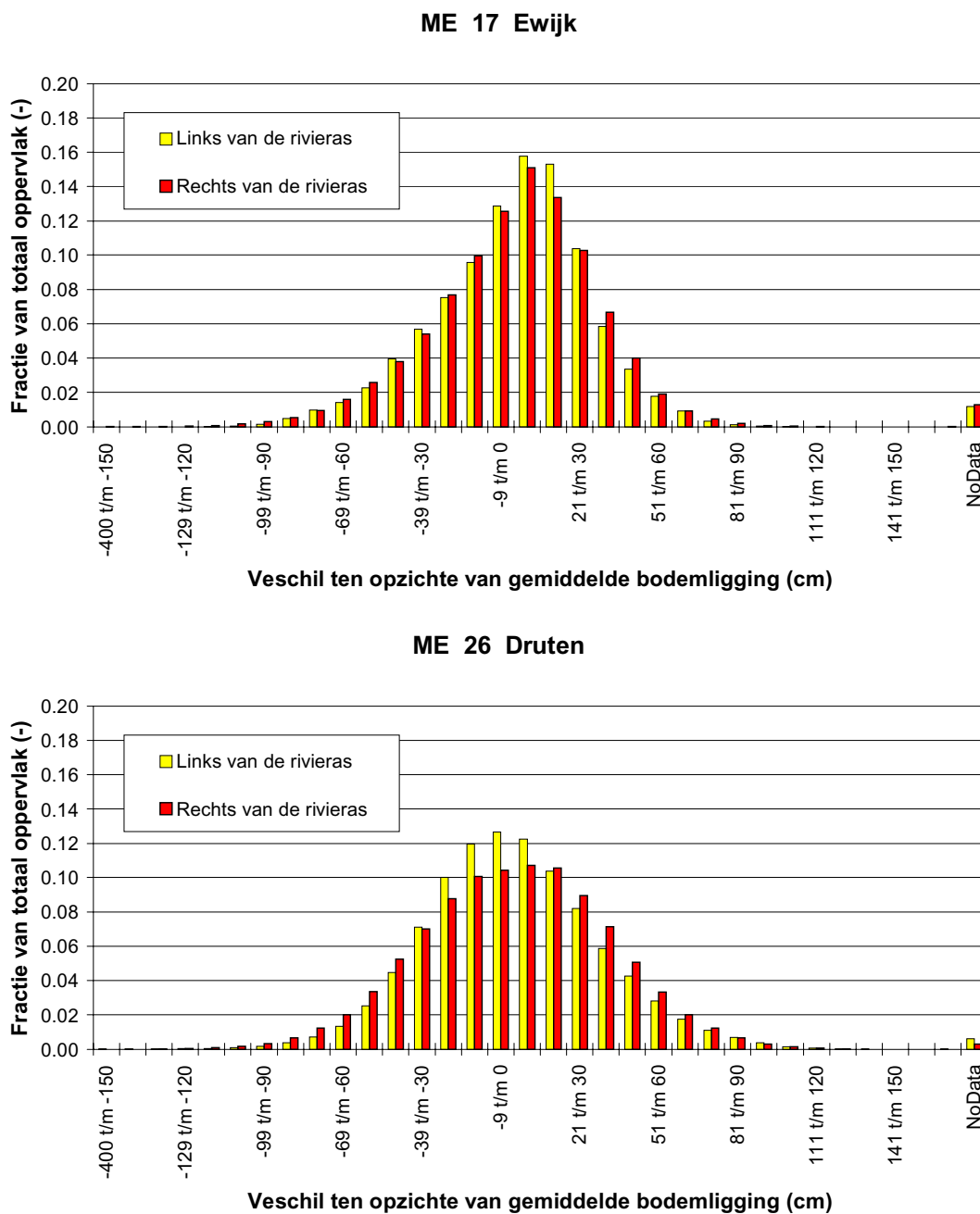
**ME 10 Kommerdijk**



**ME 12 Haalderen 2**



Figuur 50 Figuren voor waargenomen morfologische dynamiek in de periode 1988-1999 (Waalbochten)



Figuur 51 Figuren voor waargenomen morfologische dynamiek in de periode 1988-1999 (Midden-Waal)



## 7 Conclusies

Voor de ontwikkeling van een morfologische voorspellingsmodule in het BOS Baggeren is een studie uitgevoerd naar de “opgedrongen” tweedimensionale morfologie. Deze opgedrongen morfologie wordt met name bepaald door de geometrie van het zomerbed van de Waal (bochtstralen, breedtevariates), en kan worden gesimuleerd met een tweedimensionaal (2D) morfologisch model. Hiervoor is een 2D model ontwikkeld in het Delft3D modelsysteem en zijn diverse berekeningen gemaakt en geanalyseerd. Daarnaast zijn uit de modelresultaten ook sedimenttransporten afgeleid per morfologische eenheid, en is op basis van metingen onderzoek gedaan naar de variaties in bodemligging die zijn opgetreden in de periode 1988-1999. De belangrijkste conclusies die zijn getrokken zijn:

- Met het ontwikkelde 2D morfologisch model kan het waargenomen gedrag van de langjarig gemiddelde bodemligging (periode 1988-1999) goed worden benaderd. Dat wil zeggen dat de gesimuleerde bochtprofielen overeenstemmen met het prototype. Alleen in een strook naast de normaallijn (buitenzijde van het rekenmodel nabij de kribkoppen en kribvakken) zijn de simulaties met het model slechter. Dit laatste is niet van belang voor de betrouwbaarheid van de berekeningen binnen de vaargeul.
- De variatie van de "opgedrongen" morfologie door het hydrologische jaar heen, toont dat in de Waalbochten (Pannerdense Kop - Nijmegen) de bodemligging fluctueert met een hoogte van circa 0,5 m, en in de Midden-Waal de bodemligging fluctueert met een hoogte van circa 0,1 m (met name door afvoerafhankelijke variaties in de dwarshelling van bochtprofielen). De variaties treden relatief snel op.
- Herstel van baggerwerk en stort in de Waal is sterk afvoerafhankelijk. Bij lagere afvoeren is het herstel aanzienlijk minder dan bij hoge afvoeren. Bij het herstel van baggerwerk en stort speelt ook een rol dat gebaggerde geulen een gecombineerde gedrag vertonen van aanvulling van bovenstroomse zijde (1D effect) en het terugkantelen van het dwarsprofiel (2D, dispersief effect). De 1D aanvulling vanaf bovenstrooms is over het algemeen maatgevend voor het herstel van het baggerwerk.
- Toetsing van het gesimuleerde herstel van baggerwerk heeft plaatsgevonden voor de bocht bij Hulhuizen. De berekende ontwikkeling van de bodemligging na het baggerwerk in september 2000 (baggerbestek ON-1023) tot aan april 2001 is vergeleken met de waarnemingen. De totale aanzanding van de gebaggerde geul over deze periode wordt met het model goed weergegeven. Echter, de berekeningen geven aan dat in de eerste maanden na oplevering van het baggerwerk, het berekende herstel te snel is in vergelijking met het prototype.

Op basis van de resultaten van deze studie zijn verder de volgende aanbevelingen te geven voor verdere analyses:

- Het berekende gedrag ter plaatse van baggerlocaties en stortlocaties kan worden vertaald naar herstelrelaties. De modelresultaten bieden goede mogelijkheden om dergelijke theoretische analyses uit te voeren. Gezien de omvang van de uitvoergegevens wordt aanbevolen hiervoor gebruik te maken van Matlab en de daarin beschikbare Delft3D leesfuncties.



- Het herstel van een gebaggerd profiel in een bocht wordt bij de berekeningen mogelijk beïnvloed door numerieke diffusie. Aanbevolen wordt om dit effect te onderzoeken voor het baggerwerk bij Hulhuizen met een aantal extra berekeningen waarbij langshellingseffecten en roostergrootte kunnen worden gevarieerd. Daarnaast kan het herstel ook afhankelijk zijn van gekozen transportformule. De berekening kan worden herhaald met een transportformule van het type Meyer-Peter en Müller welke bij lagere afvoeren een geringer transport berekend. Daardoor wordt het berekende herstel van de gebaggerde geul bij lagere afvoeren geringer, en een betere overeenstemming opleveren met de waarnemingen in de bocht bij Hulhuizen.
- Het model kan worden gebruikt om de interactie tussen baggerlocaties en stortlocaties in één morfologische eenheid te onderzoeken, en om de interactie tussen bagger- en stortwerkzaamheden in achtereenvolgende morfologische eenheden te bepalen. Daarvoor zijn eveneens aanvullende berekeningen nodig.
- Een vergelijking van de hier gevonden resultaten met de relaties voorgesteld in Klaassen en Sloff (2000) en met de analyses van prototypemetingen (Siegfried, 2000, Schepman, 2001, Taal, 1999) is gewenst.

## Literatuur

- Klaassen, G.J. en C.J. Sloff (2000) Voorspelling bodemligging en herstelrelaties voor baggeren op de Waal. Eenvoudige relaties en benodigd onderzoek. Rapport Q2669, WL | Delft Hydraulics.
- Schepman, F. (2001) Morfologie van de Midden-Waal zonder en met baggeren. Afstudeeronderzoek. Rapport Q2734, WL | Delft Hydraulics.
- Siegfried, A. (2000) Morphologische Reaktionen der Waal auf Baggermassnahmen. Universität Karlsruhe, Diplom Arbeit.
- Sloff, C.J. en N. Struikma (1997) Detailontwerp bodemschermen Hulhuizen, RIVCOM berekeningen. Rapport Q2302, WL | Delft Hydraulics.
- Taal, M. (1999) Metingen proef morfologie, CD-ROM Rijkswaterstaat Directie Oost Nederland, WBG99110 - versie 2, Oktober 1999.
- Ten Brinke, W. (2001) Sedimenthuishouding Rijntakken. Bijdrage PAO cursus "Moderne Rivierkunde", St. PAO, Delft.
- Wolters, A.F. (1998) Vaste laag bij Nijmegen. Casestudy in het kader van 'kennisontwikkeling 2D morfologie'. RIZA-Rapport 98.058.



## A Parameters

Tabel A1 Karakteristieken voor de Boven-Waal afgeleid uit 2D berekeningen (Morfologische eenheden 6-14, km 867-886)

<b>Traject km 867 - 868 (Boven-Waal, Waalbochten)</b>			
<b>Afvoer</b>	<b>1000</b>	<b>1600</b>	<b>2400</b>
gemiddelde diepte $h$ (m)	3.99	5.48	7.17
maximum diepte $h_{\max}$ (buitenbocht) (m)	8.22	9.85	11.82
minimum diepte $h_{\min}$ (binnenbocht) (m)	0.14	1.62	3.09
gemiddelde stroomsnelheid $u$ (m/s)	0.91	1.08	1.25
maximum snelheid $u_{\max}$ (m/s)	1.34	1.43	1.55
minimum snelheid $u_{\min}$ (m/s)	0.23	0.68	0.95
gemidd. transport per breedte-eenh. $s$ (m <sup>2</sup> /s)	2.28E-05	4.95E-05	9.88E-05
max. transport per breedte-eenh. $s_{\max}$ (m <sup>2</sup> /s)	1.23E-04	1.77E-04	2.77E-04
min. transport per breedte-eenh. $s_{\min}$ (m <sup>2</sup> /s)	2.42E-08	5.94E-06	3.03E-05
Sedimenttransport $S$ (m <sup>3</sup> /s)	0.0102	0.0221	0.0439
gemiddelde Shields param. $\theta$ (D=2mm)	0.1245	0.1743	0.2321
max. Shields param. $\theta_{\max}$	0.2685	0.3052	0.3603
min. Shields param. $\theta_{\min}$	0.0078	0.0699	0.1339
lengte $\lambda_w$ (met $C=45$ m <sup>1/2</sup> /s) (m)	412	566	740
lengte $\lambda_s$ (met $A_{\text{shld}}=0.7$ , $W=260$ ) (m)	424	365	322
IP	1.03	0.65	0.44
dempingslengte $L_D$ (met $b=5$ ) (m)	29072	-2060	-1142
lengte $L_p$ (met $b=5$ ) (m)	2626	2928	3394

Tabel A2 Karakteristieken voor de bocht bij St.Andries afgeleid uit 2D berekeningen (Morfologische eenheid 36, km 924-928)

<b>Traject km 924 - 928 (St. Andries)</b>			
<b>Afvoer</b>	<b>1000 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>1600 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>2400 m<sup>3</sup>/s</b>
gemiddelde diepte h (m)	4.35	5.60	6.99
maximum diepte h <sub>max</sub> (buitenbocht) (m)	6.88	8.25	9.93
minimum diepte h <sub>min</sub> (binnenbocht) (m)	2.03	3.23	4.37
gemiddelde stroomsnelheid u (m/s)	0.85	1.07	1.29
maximum snelheid u <sub>max</sub> (m/s)	1.01	1.21	1.44
minimum snelheid u <sub>min</sub> (m/s)	0.65	0.89	1.10
gemidd. transport per breedte-eenh. s (m <sup>2</sup> /s)	1.58E-05	4.63E-05	1.17E-04
max. transport per breedte-eenh. s <sub>max</sub> (m <sup>2</sup> /s)	3.00E-05	7.54E-05	1.77E-04
min. transport per breedte-eenh. s <sub>min</sub> (m <sup>2</sup> /s)	4.37E-06	2.03E-05	6.01E-05
Sedimenttransport S (m <sup>3</sup> /s)	0.0070	0.0205	0.0514
gemiddelde Shields param. $\theta$ (D=2mm)	0.1090	0.1705	0.2484
max. Shields param. $\theta_{max}$	0.1522	0.2197	0.3105
min. Shields param. $\theta_{min}$	0.0641	0.1184	0.1819
lengte $\lambda_w$ (met C=45 m <sup>1/2</sup> /s) (m)	449	578	721
lengte $\lambda_s$ (met A <sub>shld</sub> =0.7, W=260) (m)	364	353	342
IP	0.81	0.61	0.47
dempingslengte L <sub>D</sub> (met b=5) (m)	-3858	-1818	-1300
lengte L <sub>p</sub> (met b=5) (m)	2554	2932	3376

Tabel A3 Karakteristieken voor de Midden-Waal afgeleid uit 2D berekeningen (Morfologische eenheid 15-35 en 37 - 46, km 886-924 en km 928-953)

<b>Traject km 868 - 924 en 928 - 953 (Midden-Waal)</b>			
<b>Afvoer</b>	<b>1000 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>1600 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>2400 m<sup>3</sup>/s</b>
gemiddelde diepte h (m)	4.30	5.52	6.90
maximum diepte h <sub>max</sub> (buitenbocht) (m)	6.96	7.94	9.51
minimum diepte h <sub>min</sub> (binnenbocht) (m)	2.21	2.90	3.57
gemiddelde stroomsnelheid u (m/s)	0.85	1.05	1.26
maximum snelheid u <sub>max</sub> (m/s)	1.08	1.23	1.45
minimum snelheid u <sub>min</sub> (m/s)	0.45	0.67	0.91
gemidd. transport per breedte-eenh. s (m <sup>2</sup> /s)	1.61E-05	4.27E-05	1.04E-04
max. transport per breedte-eenh. s <sub>max</sub> (m <sup>2</sup> /s)	3.98E-05	7.57E-05	1.69E-04
min. transport per breedte-eenh. s <sub>min</sub> (m <sup>2</sup> /s)	6.66E-07	4.87E-06	2.40E-05
Sedimenttransport S (m <sup>3</sup> /s)	0.0072	0.0193	0.0473
gemiddelde Shields param. $\theta$ (D=2mm)	0.1070	0.1639	0.2368
max. Shields param. $\theta_{max}$	0.1732	0.2254	0.3152
min. Shields param. $\theta_{min}$	0.0300	0.0664	0.1250
lengte $\lambda_w$ (met C=45 m <sup>1/2</sup> /s) (m)	443	570	712
lengte $\lambda_s$ (met A <sub>shld</sub> =0.7, W=260) (m)	365	351	338
IP	0.82	0.62	0.47
dempingslengte L <sub>D</sub> (met b=5) (m)	-4127	-1833	-1287
lengte L <sub>p</sub> (met b=5) (m)	2540	2900	3335

Tabel A4 Karakteristieken voor de Boven-Waal afgeleid uit 1D berekeningen SOBEK Rijntakken-model (Morfologische eenheden 6-14, km 867-886)

<b>Traject km 867 - 868 (Boven-Waal, Waalbochten)</b>					
<b>Afvoer</b>	<b>1000</b>	<b>1600</b>	<b>2400</b>	<b>3000</b>	<b>3500</b>
Zomerbedafvoer Q (m <sup>3</sup> /s)	999	1596	2389	2981	3282
Gemiddelde diepte zomerbed (m)	4.02	5.46	7.22	8.47	9.07
Gemiddelde stroomsnelheid (m/s)	0.94	1.11	1.25	1.33	1.37
Breedte zomerbed W (m)	265	265	265	265	265
Chézy ruwheid zomerbed C (m <sup>1/2</sup> /s)	48	48	47	46	45
Afvoer door winterbed (m <sup>3</sup> /s)	0	0	0	37	127
Sedimenttransport S (m <sup>3</sup> /s)	0.01502	0.02300	0.03201	0.03801	0.04404
gemiddelde Shields param. $\theta$	0.15763	0.21357	0.28253	0.33153	0.37302
lengte $\lambda_w$ (m)	470	639	812	900	928
lengte $\lambda_s$ (m)	492	422	367	339	336
IP	1.05	0.66	0.45	0.38	0.36
dempingslengte L <sub>D</sub> (met b=5) (m)	20886	-2486	-1339	-1086	-1051
lengte L <sub>p</sub> (met b=5) (m)	3025	3335	3756	4030	4137

Tabel A5 Karakteristieken voor de bocht bij St.Andries afgeleid uit 1D berekeningen SOBEK Rijntakken-model (Morfologische eenheid 36, km 924-928)

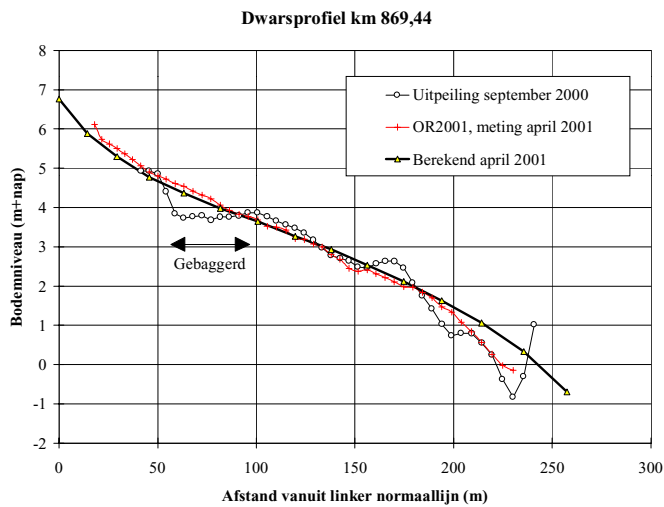
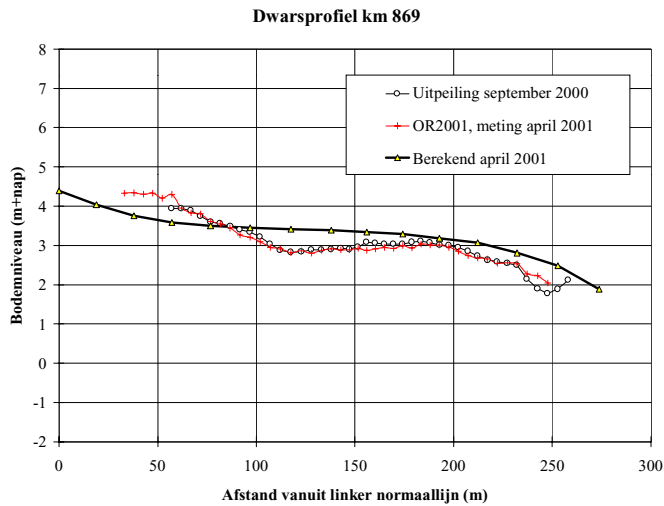
<b>Traject km 924 - 928 (St. Andries)</b>					
<b>Afvoer</b>	<b>1000</b>	<b>1600</b>	<b>2400</b>	<b>3000</b>	<b>3500</b>
Zomerbedafvoer Q (m <sup>3</sup> /s)	999	1596	2374	2899	2806
Gemiddelde diepte zomerbed (m)	4.46	5.66	7.15	8.22	8.67
Gemiddelde stroomsnelheid (m/s)	0.86	1.09	1.28	1.36	1.25
Breedte zomerbed W (m)	260	260	260	260	260
Chézy ruwheid zomerbed C (m <sup>1/2</sup> /s)	39.78	40.17	39.70	38.74	38.38
Afvoer door winterbed (m <sup>3</sup> /s)	0.00	0.00	1.42	68.67	568.82
Sedimenttransport S (m <sup>3</sup> /s)	0.01216	0.02245	0.03270	0.03650	0.03094
gemiddelde Shields param. $\theta$	0.32465	0.49898	0.70382	0.81696	0.71523
lengte $\lambda_w$ (m)	359	465	574	629	651
lengte $\lambda_s$ (m)	611	597	561	526	466
IP	1.70	1.28	0.98	0.84	0.72
dempingslengte L <sub>D</sub> (met b=5) (m)	1746	4207	-47448	-6424	-3283
lengte L <sub>p</sub> (met b=5) (m)	3057	3337	3567	3627	3512

Tabel A6 Karakteristieken voor de Midden-Waal afgeleid uit 1D berekeningen SOBEK Rijntakken model  
(Morfologische eenheid 15-35 en 37 - 46, km 886-924 en km 928-953)

<b>Traject km 868 - 924 en 928 - 953 (Midden-Waal)</b>					
<b>Afvoer</b>	<b>1000</b>	<b>1600</b>	<b>2400</b>	<b>3000</b>	<b>3500</b>
Zomerbedafvoer $Q$ ( $m^3/s$ )	999	1595	2384	2970	3268
Gemiddelde diepte zomerbed (m)	4.33	5.47	6.90	7.94	8.44
Gemiddelde stroomsnelheid (m/s)	0.87	1.08	1.28	1.38	1.43
Breedte zomerbed $W$ (m)	273	273	273	273	273
Chézy ruwheid zomerbed $C$ ( $m^{1/2}/s$ )	49.71	47.93	45.49	43.97	43.36
Afvoer door winterbed ( $m^3/s$ )	0.00	0.16	2.97	45.86	146.74
Sedimenttransport $S$ ( $m^3/s$ )	0.01290	0.02464	0.04171	0.05284	0.06102
gemiddelde Shields param. $\theta$	0.18822	0.30942	0.49055	0.61329	0.68956
lengte $\lambda_w$ (m)	545	640	727	783	809
lengte $\lambda_s$ (m)	531	538	537	522	521
IP	0.97	0.84	0.74	0.67	0.64
dempingslengte $L_D$ (met $b=5$ ) (m)	-40418	-6738	-4111	-3123	-2926
lengte $L_p$ (met $b=5$ ) (m)	3378	3703	3974	4102	4181

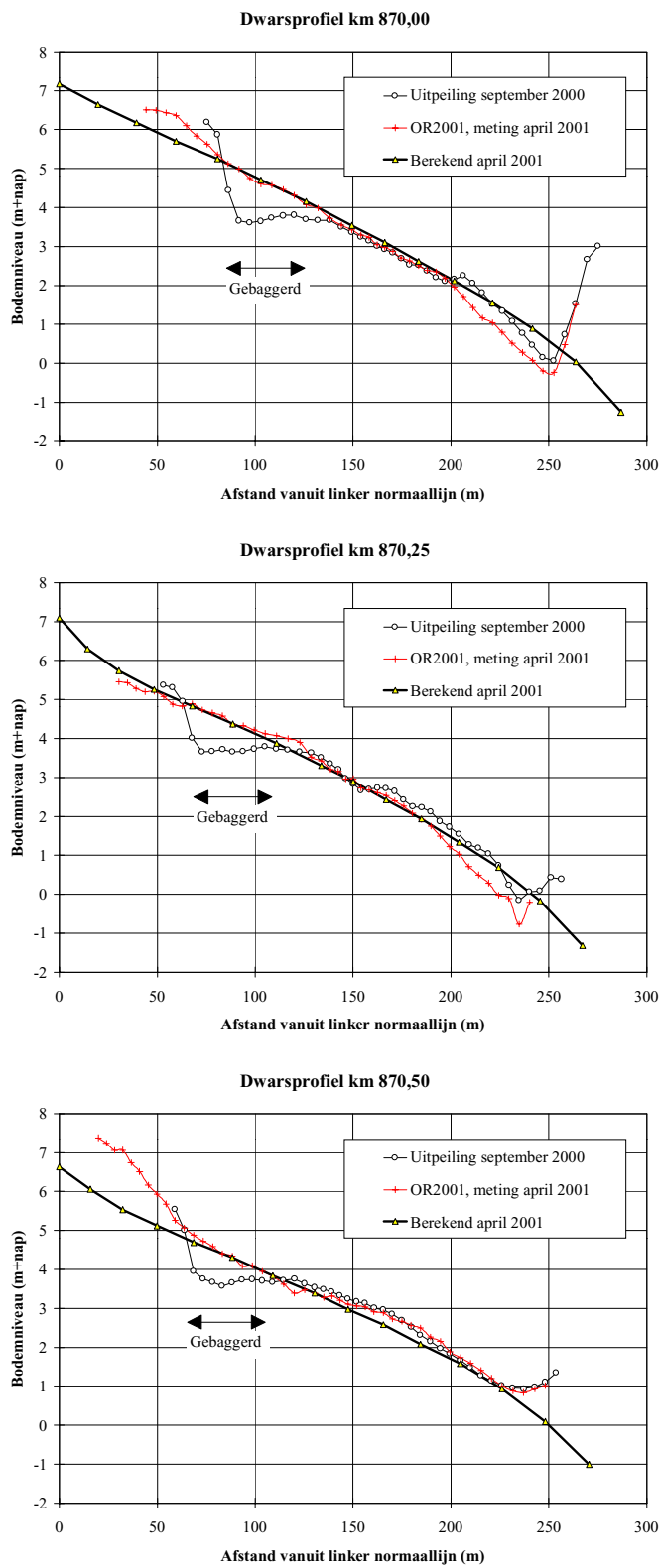
## B Dwarsprofielen Hulhuizen

Figuur B1 Dwarsprofielen berekend en gemeten in de bocht bij Hulhuizen (beginsituatie is de uitpeiling van sept. '00)

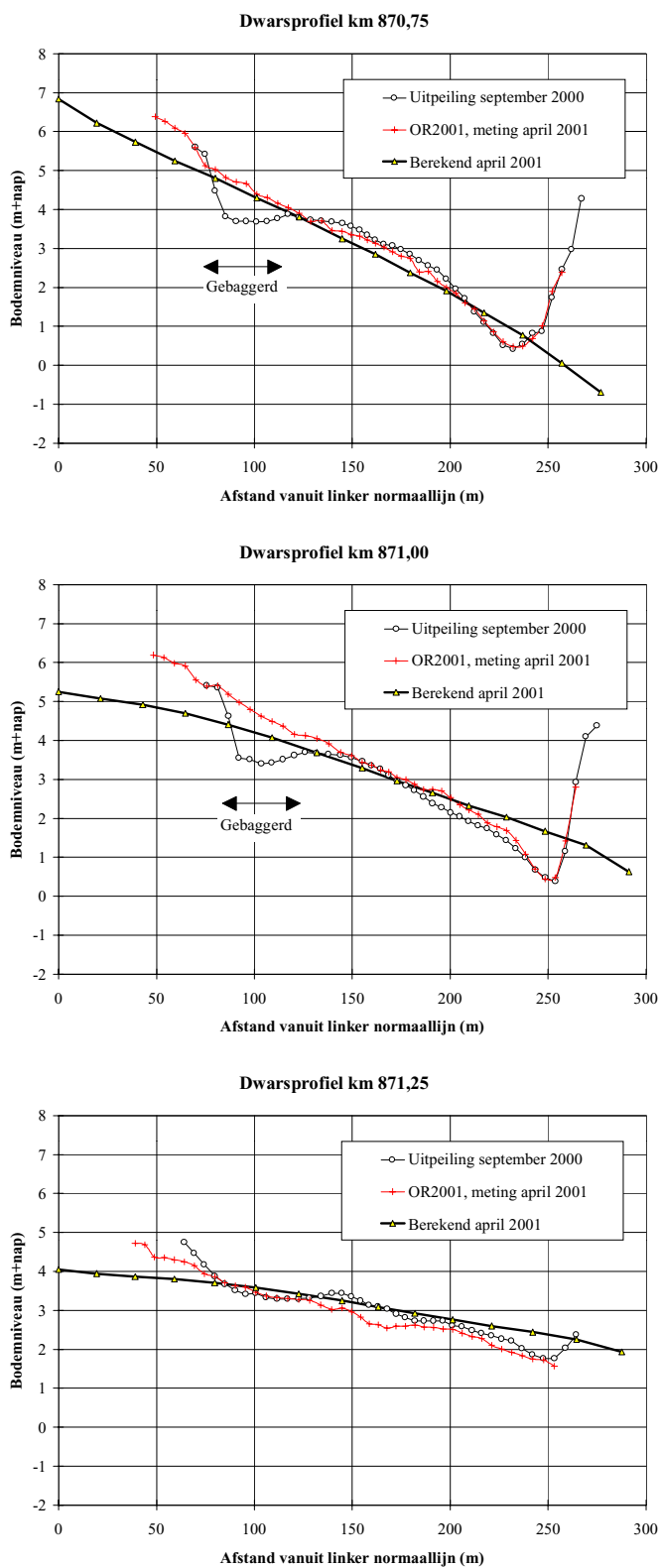




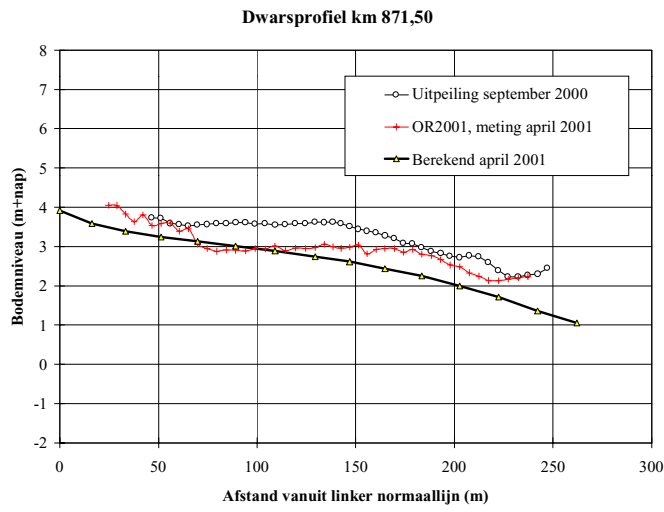
Figuur B2 Dwarsprofielen berekend en gemeten in de bocht bij Hulhuizen (beginsituatie is de uitpeiling van sept. '00)



Figuur B3 Dwarsprofielen berekend en gemeten in de bocht bij Hulhuizen (beginsituatie is de uitpeiling van sept. '00)



Figuur B4 Dwarsprofielen berekend en gemeten in de bocht bij Hulhuizen (beginsituatie is de uitpeiling van sept. '00)



## C Beschrijving aanpak voor figuren voor morfologische dynamiek

### Software technische functionaliteit

#### Berekening van de fractie van totaal oppervlak

In het onderstaande figuur worden de bewerkingen, die tot de berekening van de fracties leiden, weergegeven. Een morfologische eenheid wordt verder met ME aangeduid.



Figure 1 : berekening van de fractie

#### 1. Bepalen van de omtrek van elke ME

Voor de berekening wordt alleen dat deel van een ME gebruikt, dat binnen een vaargeul valt. Bovendien dienen er twee fracties per ME berekend worden : voor een ME-deel links van de rivieras en voor een ME-deel rechts van de rivieras. Om de voor de berekening relevante omtrek van een ME te bepalen, worden de onderstaande bewerkingen uitgevoerd:

- afknippen van dat deel van een ME, dat buiten de vaargeul valt :  
`thmME.ClipSelected(shpVaargeulShape)`

- splitsen de ME met de rivieras: `thmME.Split(linRivierasLine)`
- bepalen van het middelpunt van een ME: `pntMECenter = polME.ReturnCenter`
- bepalen of het ME middelpunt links dan wel rechts van de rivieras ligt :  
`plnRivierasLine.QueryPointDistance(pntMECenter,numDistance)`

Implementatie opmerkingen :

Het bestand van de vaargeul en het bestand van de rivieras dienen slechts één shape te bevatten. Het bestand van de rivieras dient in stroomafwaartse richting opgebouwd te zijn (zodat de linkerkant van de lijn stroomafwaarts gezien links van de rivieras ligt).

Avenue script: `BOSBasic.MEContourDetermine`

## 2. Bepalen van aantal cellen totaal in een ME

Voor de berekening wordt de gemiddelde grid genomen. Om het aantal cellen in de ME te bepalen, worden voor elke ME de onderstaande bewerkingen uitgevoerd:

- er wordt dat deel van een grid gebruikt, dat door een ME polygoon begrensd is :  
`grdGridNew = grdGridGem.ExtractByPolygon(polME,projectionME,FALSE)`
- het aantal cellen in dit nieuwe grid wordt bepaald door alle waarden van het veld 'Count' in de VTab op te tellen:  
`numCellTot = numCellTot + vtbGridNew.ReturnValue(fldCount,recGrd)`

Avenue script: `BOSBasic.MEnumCellsDetermine`

## 3. Bepalen van een verschil-grid

Een verschil-grid wordt bepaald door een gemiddelde grid van de jaar-grid af te trekken:  
`grdGridDiff = grdGrid - grdGridGem`

Avenue script: `BOSBasic.CalculateStatistics`

## 4. Opdelen in klasse-grids

Voor de berekening wordt de verschil-grid genomen. Alle cellen, waarvan de waarde binnen een bepaalde bodemligging-klasse ligt, worden gekopieerd en vormen een klasse-grid:

```
strQuery = "([Value] >= "+beginValue+") and ([Value] <= "+endValue+)"
grdGridExtract = grdGridDiff.ExtractByAttributes(strQuery)
```

Avenue script: `BOSBasic.CalculateStatistics`

## 5. Bepalen van aantal cellen in een ME voor een klasse-grid

Voor de berekening wordt de klasse-grid genomen. Om het aantal cellen in een ME te bepalen, worden voor elke ME de onderstaande bewerkingen uitgevoerd:

- er wordt dat deel van een klasse-grid gekopieerd, dat door een ME polygoon begrensd is : `grdGridNew =`  
`grdGridExtract.ExtractByPolygon(polME,projectionME,FALSE)`
- het aantal cellen in deze nieuwe grid wordt bepaald d.m.v. alle waarden van het veld 'Count' in de VTab op te tellen:  
`numCellClass = numCellClass + vtbGridNew.ReturnValue(fldCount,recGrd)`

Avenue script: `BOSBasic.MEstatisticsDetermine`

## 6. Bepalen van een fractie van totaal oppervlak voor een ME

De fractie wordt bepaald als:

$$\text{fractie} = (\text{cellArea} * \text{numCellClass}) / (\text{cellArea} * \text{numCellTot})$$

waar:

cellArea = cell oppervlak in m<sup>2</sup>

numCellClass = aantal cellen van de klasse-grid, die binnen een ME vallen

numCellTot = aantal cellen totaal in een ME

Avenue script: BOSBasic.MEstatisticsDetermine

## **Additionele functionaliteiten**

### **Omgaan met de celwaarde 'NoData'**

Om de juiste aantal cellen in een ME te bepalen, dienen ook de cellen met de waarde 'NoData' meegeteld te worden. De 'NoData' cellen moeten daarom meegenomen worden bij de diverse gridbewerkingen. Om dit te bewerkstelligen, wordt de waarde 'NoData' door een andere waarde als volgt vervangen:

```
grdGridnew = grdGrid.IsNull.Con(30999.AsGrid,grdGrid)
```

Aan de lijst met de bodemliggingklassen wordt tevens een klasse 30999 - 30999 toegevoegd.

Relevante Avenue script: BOSBasic.CalculateStatistics

### **Automatische berekening van de bodemliggingklassen**

De bodemliggingklassen worden gebruikt t.b.v. de indeling van de verschillen ten opzichte van gemiddelde bodemligging. Omdat vaak veel klassen onderscheiden worden, kunnen de bodemliggingklassen automatisch gegenereerd worden op basis van de instellingen in het initiële bestand. Met behulp van twee intervallen worden de klassen aangemaakt. Eén interval bevat de bovengrens en ondergrens van respectievelijk de hoogste en de laagste klasse. Het tweede interval bevat de grenzen van het interval waarbinnen klassen gevormd worden met een klassebreedte zoals ingesteld in het initiële bestand. Aan de gegenereerde lijst van de klassen wordt een 'NoData' klasse toegevoegd, te weten 30999 - 30999.

Het genereren van de bodemliggingklassen gebeurt op basis van de onderstaande gegevens: het begin van de eerste bodemliggingklasse (sleutel 'ClassOuterRange=', eerste getal), het eind van de laatste bodemliggingklasse (sleutel 'ClassOuterRange=', tweede getal), het eind van de eerste bodemliggingklasse (sleutel 'ClassInnerRange=', eerste getal), het begin van de laatste bodemliggingklasse (sleutel 'ClassInnerRange=', tweede getal), de breedte van elke bodemliggingklasse (sleutel 'ClassStep').

Relevante Avenue script: BOSBasic.ValueClassesDetermine

### **Gebruik van werk View voor de berekening en voor het debuggen**

Om de ME thema te bewerken, wordt er gebruik van een werk View gemaakt. Deze werk View heeft de naam 'BOSBasic - Compute Statistics', wordt aan het begin van de berekening gemaakt en na afloop van de berekening weer verwijderd. Indien de gebruiker Debug informatie wenst (sleutel 'Debug=' in het ini-bestand), wordt deze werk View echter niet verwijderd en de gebruiker kan dan in deze View de volgende informatie inzien: het bewerkte ME thema, de verschil-grid, die als laatste behandeld is, de klasse-grid, die als laatste behandeld is.

Relevante Avenue script: BOSBasic.CalculateStatistics, BOSBasic.ViewWorkMake, BOSBasic.CloseStatisticsCalculation

### **Inlezen van het initiële bestand**

Voor het inlezen van de instellingen vanuit het ini-bestand wordt een script BOSIni.GetValue gebruikt. Dit is een standaard manier van het inlezen van de ini-bestanden in het Bos Baggeren systeem.

Relevante Avenue script: BOSTest.CalculateStatistics, BOSIni.GetValue

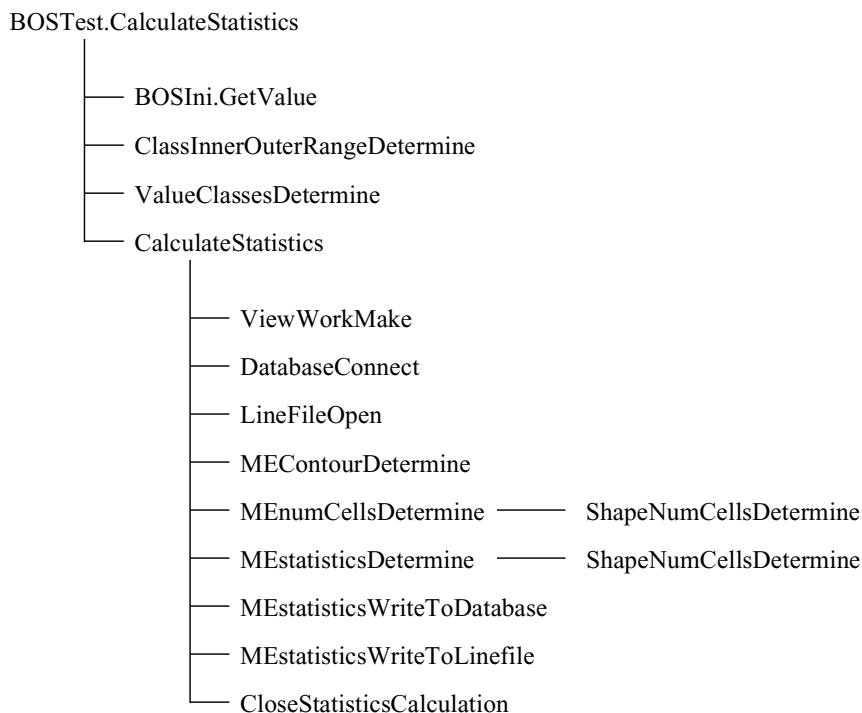
### **Wegschrijven resultaten**

De resultaten kan de gebruiker naar een Access database of naar een tekstbestand laten wegschrijven. Dit wordt door de instellingen in het ini-bestand gestuurd. De relevante sleutels zijn 'ResultFile =' en 'DatabaseLogin =' (zie beschrijving in het ini-bestand). De nieuwe resultaten worden aan de database toegevoegd, de reeds bestaande resultaten in de database worden met de nieuwe waarden overgeschreven. Dit geldt niet voor het tekstbestand. Het tekstbestand wordt aan het begin van elke berekening in zijn geheel overgeschreven.

Relevante Avenue script: BOSBasic.CalculateStatistics, BOSBasic.MEstatisticsWriteToDatabase, BOSBasic.MEstatisticsWriteToLinefile

### **Overzicht van de Avenue scripts**

Alle scripts zijn onderdeel van BOSBasic, tenzij iets anders is opgegeven.



## Beschrijving van de invoerbestanden

In dit hoofdstuk worden de bestanden beschreven, waarvan de script CalculateStatistics gebruikt maakt.

### Shapebestand met morf.eenheden

Verwijzing naar shapefile met de morfologische eenheden in de vorm van polygonen. Het bestand wordt opgegeven als pad met bestandsnaam en extensie.

### Shapebestand met een rivieras

Verwijzing naar shapefile met de rivieras als lijn. De rivieras moet van bovenstrooms naar benedenstrooms gedigitaliseerd zijn. Het bestand wordt opgegeven als pad met bestandsnaam en extensie.

### Shapebestand met een vaargeul

Verwijzing naar shapefile met de vaargeul in de vorm een polygoon. Het bestand wordt opgegeven als pad met bestandsnaam en extensie.

### Gemiddelde grid

Verwijzing naar gridbestand met de bodemhoogte gegevens over een aantal jaren gemiddeld. De bodemhoogte gegevens die binnen de morfologische eenheden en binnen de vaarbaan liggen worden meegenomen in de berekening. Het bestand wordt opgegeven als pad met bestandsnaam.

### Jaar grid



Verwijzing naar gridbestand met de bodemhoogte gegevens van één jaar (op een bepaald moment gemeten). De bodemhoogte gegevens die binnen de morfologische eenheden en binnen de vaarbaan liggen worden meegenomen in de berekening. Het bestand wordt opgegeven als pad met bestandsnaam.

### Initiële bestand

In een initiële bestand onder de sectie [Statistics] kunnen de specifieke instellingen voor de berekening 'CalculateStatistics' opgegeven worden.

Hieronder worden de sleutels uit deze sectie beschreven.

ThemeMorfEenheid =

De locatie en de naam van het shapebestand met morf.eenheden

ThemeRivierAs =

De locatie en de naam van het shapebestand met een rivieras

ThemeVaargeul =

De locatie en de naam van het shapebestand met een vaargeul

ThemeGridGem =

De locatie van het gridbestand met een gemiddelde grid

ThemeGridI = t/m ThemeGrid<sub>n</sub>=

De locatie van het gridbestand met een jaargrid. De gebruiker kan meerdere jaargrids opgegeven d.m.v. het getal achter het woord ThemeGrid steeds met 1 op te hogen (zie een voorbeeld van een ini-bestand verderop)

ClassStep =

De grootte van een klasse t.b.v. het automatisch bepalen van de bodemligging-klassen

ClassOuterRange =

Twee getallen, gescheiden door de komma's. Het eerste getal geeft een begin van de eerste bodemligging-klasse aan. Het tweede getal geeft een eind van de laatste bodemligging-klasse aan.

ClassInnerRange =

Twee getallen, gescheiden door de komma's, t.b.v. het automatisch bepalen van een begin en eind van elke bodemligging-klasse.

LoggingFile =

De locatie en de naam van het logging bestand. Indien hier geen naam opgegeven is, wordt er geen logging bestand aangemaakt.

ResultFile =

De naam van het bestand, waarin de resultaten geschreven worden.

Indien de gebruiker de resultaten in een database wenst, dient bij deze sleutel de naam van een Access database opgegeven worden (zonder extensie mdb, b.v. MyRes). Deze database moet in 'ODBC Data Sources' opgenomen worden. Verder moet bij de sleutel 'DatabaseLogin' een login string opgegeven worden.

Indien de gebruiker de resultaten in een textbestand wenst, dient bij deze sleutel de locatie en de naam van dit textbestand opgegeven worden.

DatabaseLogin =

Alleen van toepassing, indien bij de sleutel 'ResultFile' een database naam opgegeven is.

In dit geval moet bij deze sleutel een login string opgegeven worden als volgt:

DSN=<database name> (bvb DSN=MyRes).

Debug =

Een getal 1 (=wel debug) of 0 (=geen debug).

Een voorbeeld van het ini-bestand:

```
[Statistics]
ThemeMorfEenheid = d:\bosbaggeren\aanleveringen\algemeen\me_waal0.shp
ThemeRivierAs = d:\bosbaggeren\aanleveringen\algemeen\rivasnew.shp
ThemeVaargeul = d:\bosbaggeren\aanleveringen\vaarbaan\vaargeul170.shp
ThemeGridGem = d:\bosbaggeren\aanleveringen\jdp\jdp88tm99gem
ThemeGrid1 = d:\bosbaggeren\aanleveringen\jdp\wl88dolr
ThemeGrid2 = d:\bosbaggeren\aanleveringen\jdp\wl89dolr
ThemeGrid3 = d:\bosbaggeren\aanleveringen\jdp\wl90dolr

ClassStep = 5
ClassOuterRange = 0,100
ClassInnerRange = 20, 80

LoggingFile = d:\bosbaggeren\logging.txt
:ResultFile = d:\bosbaggeren\result.txt
ResultFile = MyRes
DatabaseLogin = "DSN=MyRes"
Debug = 1
```

## Beschrijving van de uitvoerbestanden

Afhankelijk van de instellingen in het initiële bestand worden de resultaten naar een Access database of naar een tekstbestand weggeschreven. Daarnaast kan de gebruiker ook een logging bestand laten aanmaken.

### Access database met resultaten

De resultaten worden naar een Access database weggeschreven, indien bij de sleutel 'ResultFile' een naam van een database opgegeven worden (zonder pad en zonder de extensie mdb, b.v. MyRes). Deze database moet in 'ODBC Data Sources' (op Control Panel) opgenomen worden. De resultaten worden naar een tabel ME\_STATISTICS geschreven.

Beschrijving van de tabel ME\_STATISTICS:

Veld naam	Veld datatype	Veld omschrijving
ID	Long Integer (autonumber)	record ID
ME_ID	Long Integer	Morf.eenheid ID
ME_NAME	Text (max 50 char.)	Morf.eenheid naam
ME_RL	Text (max 50 char.)	Aanduiding R(echts) of L(inks) van de rivieras
SERIE_NAME	Text (max 50 char.)	Naam van het jaargrid bestand
CLASS_NAME	Text (max 50 char.)	Naam van de bodemligging-klasse
ME_VALUE	Double	Fractie van totaal oppervlak

### Tekstbestand met resultaten

De resultaten worden naar een tekstbestand weggeschreven, indien bij de sleutel 'ResultFile' een locatie en een naam (incl. de extensie) van een tekstbestand opgegeven wordt.

De eerste regel van het tekstbestand is een header:

ME\_ID, ME\_NAME, ME\_RL, SERIE\_NAME, CLASS\_NAME, ME\_VALUE

Op de volgende regels worden de gegevens afgedrukt, gesepareerd door komma's.

### Loggingbestand

Naar dit bestand worden enkele informatieën m.b.t. de voortgang van de berekening geschreven. Het loggingbestand wordt alleen aangemaakt, indien bij de sleutel 'LogFile =' een geldige bestandsnaam opgegeven wordt.



## **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](mailto:info@wldelft.nl)  
internet [www.wldelft.nl](http://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](mailto:info@wldelft.nl)  
internet [www.wldelft.nl](http://www.wldelft.nl)**

