

Q4082.00

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

Voorspelinstrument duurzame vaarweg


Initiele modelbouw en demonstratieberekeningen

rapport

november 2006

wl | delft hydraulics

Q4082.00

	Exlibris postbus 177 - 2600 MH Delft waterbouw@wv.nl laboratoriewl@wl
0-13 07-17	
WL Q4082.00	
EXPL	WL Delft Hydraulics



C 150918

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

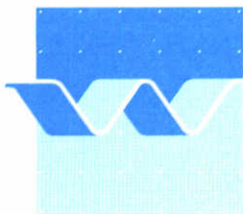
Voorspelinstrument duurzame vaarweg

Initiele modelbouw en demonstratieberekeningen

Saskia van Vuren, Erik Mosselman, Kees Sloff & Bart
Vermeulen

rapport

november 2006



wl | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER:	Rijkswaterstaat RIZA				
TITEL:	Voorspelinstrument duurzame vaarweg; Initiële modelbouw en demonstratieberekeningen				
SAMENVATTING:	<p>Vaarwegverruiming is een van de onderdelen van het project Toekomstvisie Waal binnen het Meerjarenprogramma Infrastructuur en Transport (MIT). Omdat hierbij in toenemende mate knelpunten verwacht worden, heeft de rivierbeheerder behoefte aan een morfologisch voorspelinstrument voor het traject Rijnmond-Duisburg. Dit zal geleidelijk ontwikkeld worden, waarbij het volledige model over een aantal jaren (binnen 2012) beschikbaar zal komen.</p> <p>In januari 2006 verleende Rijkswaterstaat RIZA opdracht tot het bouwen van een tweedimensionaal morfologisch model van de Nederlandse Rijntakken en het uitwerken en testen van enkele innovaties die voor dit model nodig zijn. De resultaten worden in twee rapporten gepresenteerd. Het voorliggende rapport behandelt de bouw van het model en enkele demonstratieberekeningen. Het andere rapport (Yossef et al, 2006) presenteert de innovatieve aspecten.</p> <p>De bouw van het model bestaat uit de constructie van een rekenrooster en het invoeren van gegevens. Daarbij wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van de gegevensbestanden in Baseline. De demonstratieberekeningen worden voor een traject van Wesel in Duitsland tot de Rijnmond uitgevoerd. Daarvoor worden twee aparte modellen gebruikt:</p> <ul style="list-style-type: none">• Het nieuw ontwikkelde en op Rijksdriehoekskoördinaten gebaseerde 2D model voor de Nederlandse Rijntakken;• Het bestaande en op Gauss-Krügercoördinaten gebaseerde Grensprojectmodel van Wesel tot aan Lobith. <p>Omdat het model nog niet gekalibreerd is, hebben de demonstratieberekeningen slechts een indicatief karakter. Er kunnen nog geen kwantitatieve conclusies aan verbonden worden.</p> <p>Voor toepassing op korte termijn in de planstudiefase wordt geadviseerd om rekestijden te reduceren door over te schakelen op parallel rekenen en door berekeningen van het grootschalige gedrag op lange termijn uit te voeren met een grover rooster.</p>				
REFERENTIES:	RI-4538 "Bouw 2D morfologisch model splitsingspuntengebied"				
VER	EINDREDACTIE	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
1.2	Erik Mosselman	13 april 2006		Frans van der Knaap	Kees Bons
1.3	Erik Mosselman	28 april 2006		Frans van der Knaap	Kees Bons
2.0	Erik Mosselman	28 juli 2006		Henk Verheij	Kees Bons
3.0	Erik Mosselman	10 nov 2006		Frans van der Knaap	Kees Bons
PROJECTNUMMER:	Q4082				
TREFWOORDEN:	Riviermorfologie, tweedimensionaal model				
AANTAL BLADZIJDEN:	53				
VERTROUWELIJK:	<input checked="" type="checkbox"/> JA, tot januari 2007		<input type="checkbox"/> NEE		
STATUS:	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG		<input type="checkbox"/> CONCEPT		<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF

Inhoud

1	Inleiding	1—1
1.1	Achtergrond.....	1—1
1.2	Opdracht.....	1—1
1.3	Organisatie.....	1—3
2	Rekenrooster	2—1
2.1	Inleiding.....	2—1
2.2	Domainedecompositie.....	2—1
2.3	Rekenroosters per deeldomein.....	2—3
2.3.1	Vijf deeldomeinen.....	2—3
2.3.2	Zomerbedroosters.....	2—4
2.3.3	Winterbedroosters.....	2—6
2.3.4	Resulterende roosterkarakteristieken.....	2—8
3	Modelschematisatie	3—1
3.1	Inleiding.....	3—1
3.2	Baseline-projectie.....	3—1
3.2.1	Riviergeometrie.....	3—1
3.2.2	Ruwheidsdefinitie.....	3—5
3.2.3	Kribben, kades en overlaten.....	3—5
3.3	Bodemsamenstelling.....	3—6
3.4	Vaste-laagoptie.....	3—7
3.5	Randvoorwaarden.....	3—11
3.6	Sedimenttransportformule.....	3—12
3.7	Effect van bodemdwarshellingen op sedimenttransport.....	3—13

3.8	Parameters voor Delft3D-3DMOR	3—14
3.9	Grensprojectmodel	3—14
4	Demonstratieberekeningen.....	4—1
4.1	Inleiding	4—1
4.2	Trajetschaal en korte termijn.....	4—1
4.2.1	Verificatie voor traject van Pannerdensche Kop tot Nijmegen... 4—1	
4.2.2	Probleem met ruimtelijk variërende korreldiameter	4—2
4.2.3	Probleem met verschillende transportformule voor elk domein. 4—6	
4.3	Riviertakkenschaal en middellange termijn.....	4—11
4.3.1	Ontwikkeling van het bodemlengteprofiel.....	4—11
4.3.2	Duurzaamheid van vaste lagen.....	4—14
5	Advies voor vervolgtoeppassing in planstudiefase	5—1
5.1	Stand van zaken	5—1
5.1.1	Huidig model.....	5—1
5.1.2	Basering op Delft3D-3DMOR	5—2
5.1.3	Toepasbaarheid in 2006	5—2
5.2	Benodigde verdere ontwikkeling.....	5—3
5.2.1	Kalibratie en verificatie	5—3
5.2.2	Domeindecompositie	5—3
5.2.3	Integratie van Duitse en Nederlandse coördinaten	5—3
5.2.4	Uitbreiding van functionaliteit	5—4
5.2.5	Bodemlengteprofielen met zand en grind.....	5—4
5.2.6	Tijduishouding in de berekeningen.....	5—4
5.3	Technische aspecten.....	5—5
5.3.1	Rekentijden	5—5
5.3.2	Data-opslag	5—6

6	Conclusies	6—1
7	Literatuurverwijzingen	7—1

I Inleiding

I.1 Achtergrond

Tot eind 2012 is binnen de Directie Oost-Nederland van Rijkswaterstaat het project Toekomstvisie Waal in uitvoering. Dit project valt onder het Meerjarenprogramma Infrastructuur en Transport (MIT) en bestaat uit investeringen in uitwijkhavens, verkeersbegeleiding en vaarwegverruiming. Het doel van de vaarwegverruiming is vaarweggebruikers zekerheid te bieden ten aanzien van een 170 m brede en 2,80 m diepe vaargeul op het traject Rijnmond-Duisburg op langere termijn. Door de bodemontwikkelingen in de Rijntakken worden echter in toenemende mate knelpunten verwacht. In de komende jaren kunnen vaker ondiepten in de vaarweg optreden en kan erosie constructies in de bovenrivieren verder ondermijnen. Met ingrepen in de sedimenthuishouding of lokale stromingscondities kan dit worden voorkomen.

De benodigde vaarwegverruiming zou aanvankelijk worden gerealiseerd met bodemconstructies in de Waalbochten en baggerwerken in de vaargeul (Rijkswaterstaat, 1993). Echter, vanwege twijfel over de effectiviteit van de voorgestelde bodemconstructies (Smedes, 2005) wordt er binnen het bestaande project Toekomstvisie Waal een nieuw uitvoeringsprogramma uitgewerkt in een deelproject Duurzame Vaardiepte Rijndelta (DVR). Dit nieuwe deelproject is min of meer een vervolg op het Grensproject (Baur et al, 2002) en vervangt de deelprojecten Bodemschermen Hulhuizen en Bodemschermen Haalderen. Het nieuwe deelproject richt zich niet alleen op wijzigingen ten opzichte van de voorgestelde bodemschermen, maar ook op langere termijnen en afstemming tussen grotere riviertrajecten. Daarmee komen ook andere ingrepen ter verbetering van de vaarweg voor toepassing in aanmerking.

Binnen Duurzame Vaardiepte Rijndelta is behoefte aan een instrument voor voorspelling van morfologische reacties op ingrepen, diagnose van historische trends in vaarwegdimensies en prognose van toekomstige trends. Voorbereidende studies zijn uitgevoerd door Sieben et al (2005), Barneveld & Vermeer (2005) en Mosselman et al (2005). Als eerste stap op weg naar een totaalmodel heeft Rijkswaterstaat RIZA opdracht verleend aan WL | Delft Hydraulics om een tweedimensionaal morfologisch model te bouwen van het splitsingspuntengebied. Dit gebied betreft de Nederlandse Rijntakken van Lobith tot Doesburg (km 903), Driel (km 891) en Werkendam (km 953). Het resulterende eerste model is een tussenproduct dat dient (i) als test van een aantal innovatieve aspecten, (ii) als voorlopig middel bij de definitie van veldproeven en (iii) als gereedschap voor de verdere kennisontwikkeling.

I.2 Opdracht

De opdracht behelst het bouwen van een tweedimensionaal morfologisch model van het splitsingspuntengebied en het uitwerken en testen van enkele innovaties die voor dit model nodig zijn.

Het tweedimensionale morfologische model wordt gebaseerd op Delft3D-3DMOR (voorheen “Delft3D Sed-online” genoemd). Het model van deze opdracht is nog grof ten aanzien van de functionaliteit en de mate van kalibratie, maar geschikt voor toekomstige uitbreidingen naar een fijn model (Sieben et al, 2005). Naast het zomerbed behoort ook het winterbed tot het modeldomein. De bovenrand wordt zodanig geschematiseerd dat het model in de toekomst op een consistente manier stroomopwaarts tot Duisburg kan worden doorgetrokken. De bodemsamenstelling is in dit model vast, maar kent wel variaties in langsrichting. In de toekomst kan de vaste bodemsamenstelling worden vervangen door procesbeschrijvingen voor menging en sortering van gegradeerd sediment. Verder is het model geschikt voor berekeningen met variërende afvoeren. Kribben en kribvakken worden zodanig geschematiseerd dat maatregelen die hier genomen worden op een realistische wijze kunnen worden doorgerekend.

De resultaten worden in twee rapporten gepresenteerd. Het voorliggende rapport behandelt de bouw van het model en enkele demonstratieberekeningen. Het andere rapport (Yossef et al, 2006) presenteert de innovatieve aspecten. De bouw van het model bestaat uit de constructie van een rekenrooster en het invoeren van gegevens. Daarbij wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van de gegevensbestanden in Baseline. De demonstratieberekeningen worden voor een traject van Wesel (km 825) tot de Rijnmond uitgevoerd. Daarvoor worden twee aparte modellen gebruikt:

- Het nieuw ontwikkelde en op RD-coördinaten gebaseerde 2D model voor het splitsingspuntengebied;
- Het bestaande en op Gauss-Krüger-coördinaten gebaseerde Grensprojectmodel (Baur et al, 2002) van km 825 tot aan Lobith (eigenlijk zelfs tot aan de Pannerdensch Kop).

De bijbehorende rekenvolgorde is:

1. Berekening met het Grensprojectmodel om tijdreeksen van afvoerverdelingen en bodemliggingen te genereren voor een dwarsprofiel bij Lobith, als randvoorwaarden voor het nieuwe 2D model;
2. Berekening met het nieuwe 2D model en de in de eerste stap gegenereerde randvoorwaarden, waarbij ook tijdreeksen gegenereerd worden van waterstanden op de bovenrand bij Lobith;
3. Berekening (een eerste verfijningsslag) met het Grensprojectmodel: als de eerste stap, maar met de in de tweede stap gevonden waterstanden als benedenstroomse randvoorwaarden.

De opdracht is vastgelegd in de overeenkomst RI-4538 betreffende “Bouw 2D morfologisch model splitsingspuntengebied”. Het project is bij WL | Delft Hydraulics bekend onder nummer Q4082.00.

1.3 Organisatie

De opdracht is uitgevoerd door Saskia van Vuren, Mohamed Yossef, Bart Vermeulen, Bert Jagers, Kees Sloff en Erik Mosselman. Laatstgenoemde was tevens de projectleider. Max Schropp en Arjan Sieben begeleidden het project vanuit Rijkswaterstaat RIZA, terwijl Roelof Smedes en Hendrik Havinga hierbij de Directie Oost-Nederland van Rijkswaterstaat als eindgebruiker vertegenwoordigden.

2 Rekenrooster

2.1 Inleiding

Het rekenrooster bestrijkt zowel het zomerbed als het winterbed van de Bovenrijn vanaf Lobith, de Waal tot aan Werkendam, het Pannerdensch Kanaal, de IJssel tot aan Doesburg en de Nederrijn tot aan Driel. Daarmee bevat het tevens de twee riviersplitsingen Pannerdensch Kop en IJsselkop. De waterbeweging kan over het gehele rooster berekend worden, afhankelijk van de waterstand, maar het sedimenttransport en de morfologische ontwikkeling van de bodem worden alleen berekend voor het zomerbed. Dat is het alluviale deel van de rivier waar zich ook de vaarweg bevindt. Een goede representatie van de vaarweg betekent dat hoge eisen gesteld worden aan de berekening van de bodemontwikkeling in het zomerbed.

Het zomerbed wordt aan weerszijden begrensd door normaallijnen, die zijn gedefinieerd over de koppen van de kribben langs de rivier. Als roosterlijnen in het model de normaallijnen snijden, ontstaan trapjeslijnen die numerieke oscillaties genereren. Deze oscillaties plaatsen zich in benedenstroomse richting voort en kunnen tot ernstige verstoringen leiden. Om deze onnauwkeurigheden en verstoringen in het morfologische gedrag te voorkomen is het van belang dat de roosterlijnen de normaallijnen langs het zomerbed volgen. Dat roosterlijnen met de belijning van het zomerbed samenvallen is vooral van belang voor locaties waar een gestrekte oever het zomerbed begrenst, zoals bijvoorbeeld net benedenstrooms van de splitsingspunten het geval is. Het meest recente kromlijnige WAQUA-rooster voldoet niet aan deze voorwaarden en kan dus niet gebruikt worden als basis voor het nieuwe morfologische model. Het WAQUA-rooster voor de Pannerdensch Kop in Figuur 2-1 laat zien hoe roosterlijnen het zomerbed in- en uittreden. Daarom moet voor het nieuwe model een ander rooster gebouwd worden.

2.2 Domeindecompositie

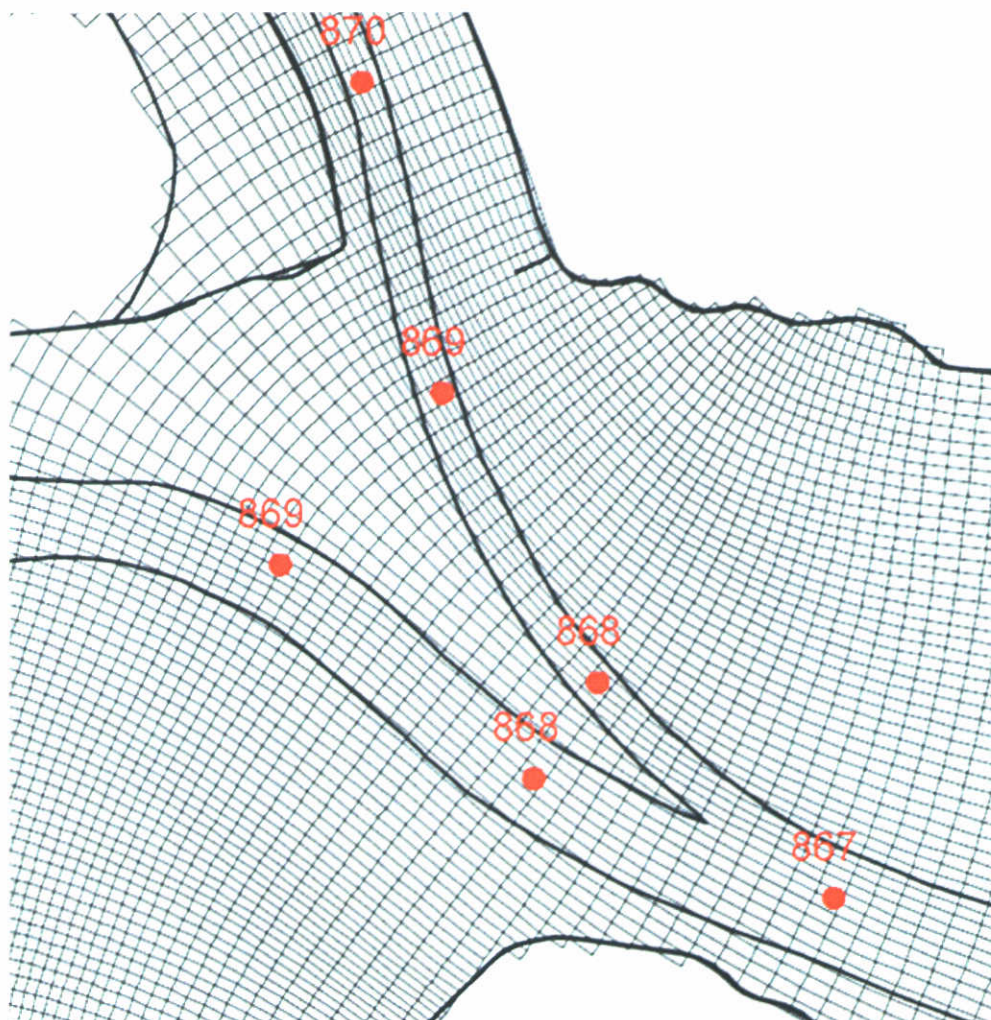
De beperking om geen trapjeslijnen toe te staan langs het zomerbed levert de nodige complicaties op bij de bouw van het modelrooster. Er valt niet aan deze voorwaarde te voldoen indien voor het hele model, dus inclusief de splitsingspunten en uiterwaarden, één gestructureerd rooster wordt gebruikt. De functionaliteit domeindecompositie biedt uitkomst. Hiermee wordt het modeldomein opgesplitst in een aantal deeldomeinen. Voor elk deeldomein worden losse roosters en modelschematisaties gemaakt die vervolgens aan elkaar worden gekoppeld. De fysische processen worden voor elk deeldomein afzonderlijk doorgerekend, waarbij de uitwisseling van informatie en gegevens tussen de deelmodellen op de domeinranden *online* plaats vindt. Dat wordt voor het nieuwe model toegepast.

Voorheen was de functionaliteit ten aanzien van domeindecompositie slechts beperkt gevalideerd voor rivierkundige toepassingen. In de huidige opdracht is deze functionaliteit verder getest en geschikt gemaakt voor rivierkundige toepassingen. Yossef et al (2006) beschrijven dit in een afzonderlijk rapport.

Zij vinden dat de functionaliteit in principe werkt, maar nog wel de tekortkoming kent dat de sedimenttransportgegevens op een domeinrand niet goed worden doorgegeven van een domein met een hoog naar een domein met een laag rangnummer. Deze telrichtingafhankelijkheid zal uiteindelijk wel moeten worden opgelost, maar valt buiten het kader van dit project.

Bij de modelbouw wordt voorlopig met deze tekortkoming omgegaan door:

1. de domeinnummers te laten oplopen in stroomafwaartse richting;
2. de domeingrenzen bij de splitsingen tegen de splitsingskop te leggen, zodat laterale sedimentuitwisseling tussen naastgelegen domeinen verwaarloosbaar is.



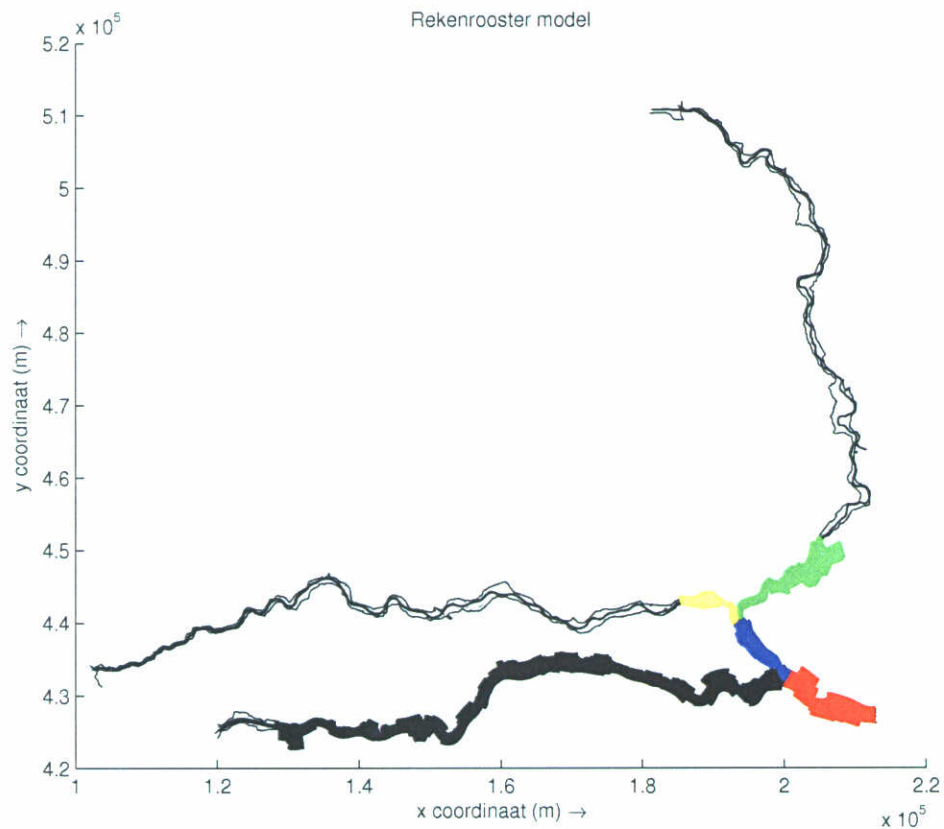
Figuur 2-1. WAQUA-rekenrooster ter plaatse van de Pannerdenschekop met roosterlijnen die niet de belijning van het zomerbed volgen.

2.3 Rekenroosters per deeldomein

2.3.1 Vijf deeldomeinen

Figuur 2-2 laat zien hoe het modelgebied is opgesplitst in de volgende vijf deeldomeinen:

- Bovenrijn van een paar kilometer onder Emmerich tot de Pannerdensch Kop (km 853-867);
- Waal vanaf de Pannerdensch Kop tot Werkendam (km 867-953);
- Pannerdensch Kanaal en begin van Nederrijn (km 867-879);
- IJssel tot aan Doesburg (km 879-912);
- Nederrijn tot aan Driel (km 879-889).



Figuur 2-2. Opsplitsing van het modeldomein in vijf deeldomeinen met bijbehorende rekenroosters.

Voor ieder deeldomein is het rekenrooster opgezet in Rijksdriehoekskoördinaten. Bij de splitsingen zijn de roosters van elk deeldomein met elkaar verbonden door middel van twee domeinranden ter plaatse van de splitsingen.

De benedenstroomse domeinrand van de tak bovenstrooms is daarbij steeds tegen de splitsingskop gelegd, zodat laterale sedimentuitwisseling tussen de naast elkaar gelegen domeinen benedenstrooms verwaarloosbaar is.

De bouw van de roosters per deeldomein bestaat uit twee stappen:

1. het maken van een rooster voor het zomerbed langs de normaallijnen;
2. het maken van een rooster voor het winterbed uitgaande van het nieuwe rooster van het zomerbed.

2.3.2 Zomerbedroosters

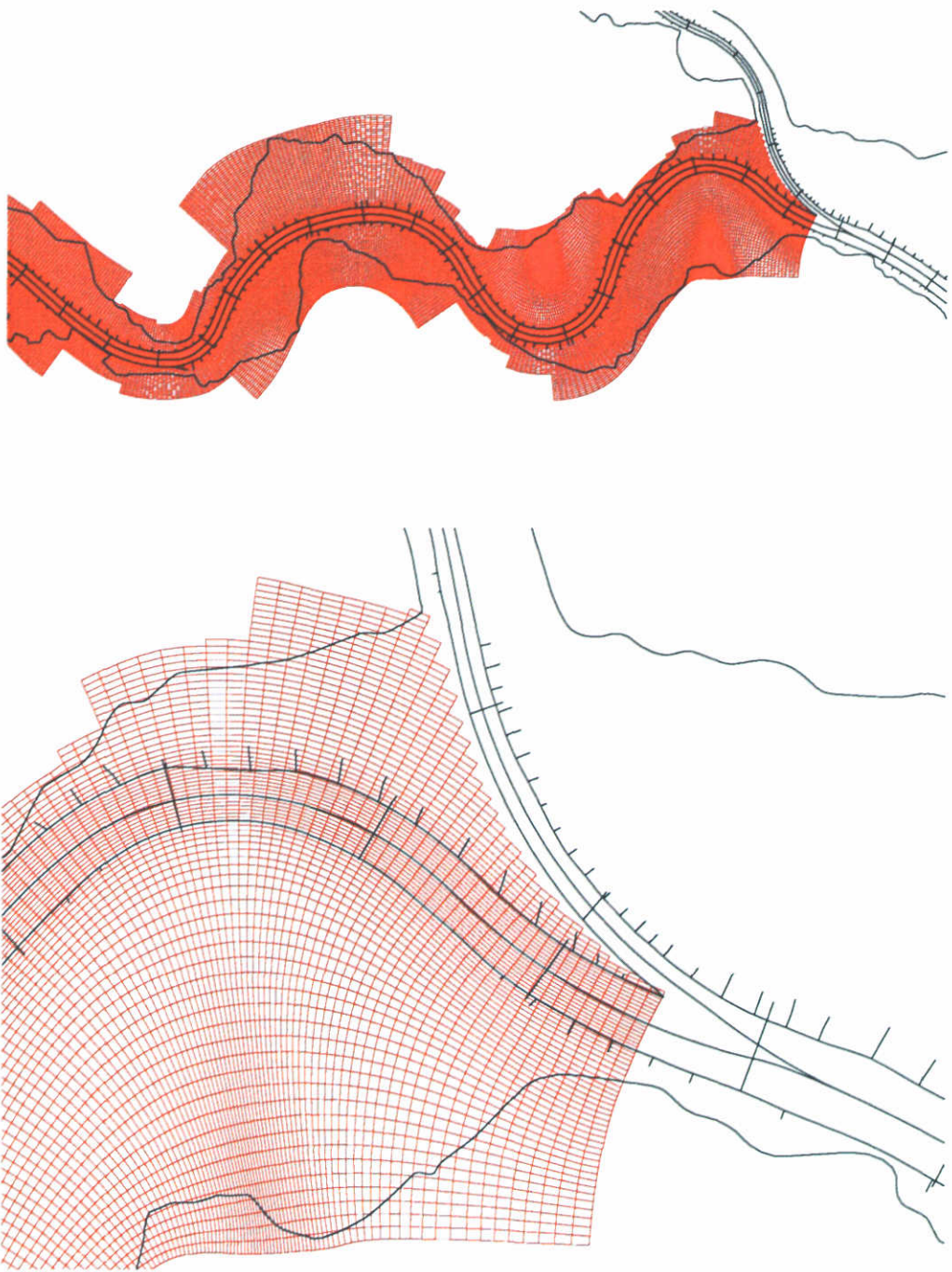
Mosselman et al (2005) specificeren de volgende eisen voor de resolutie van het zomerbedrooster:

- Een onnauwkeurigheid van 10 m in de bepaling van de begrenzing van de vaarbaan vereist een minimale roosterresolutie van 20 m in dwarsrichting;
- Omdat de langsafmetingen niet teveel mogen verschillen van de dwarsafmetingen, moet voor de rekencellen een maximale lengte-breedteverhouding van 4 worden nagestreefd;
- Voor een goede reproductie van het dwarsprofiel moet het zomerbed met minimaal 6 roosterlijnen worden geschematiseerd;
- Voor een goede weergave van een naijlende aanpassing moeten de roostercellen niet groter zijn dan 20% van de karakteristieke lengteschaal van de aanpassing. Belangrijke lengteschalen voor 2D morfologie zijn λ_s en λ_w uit de theorie van Struiksma et al (1985).

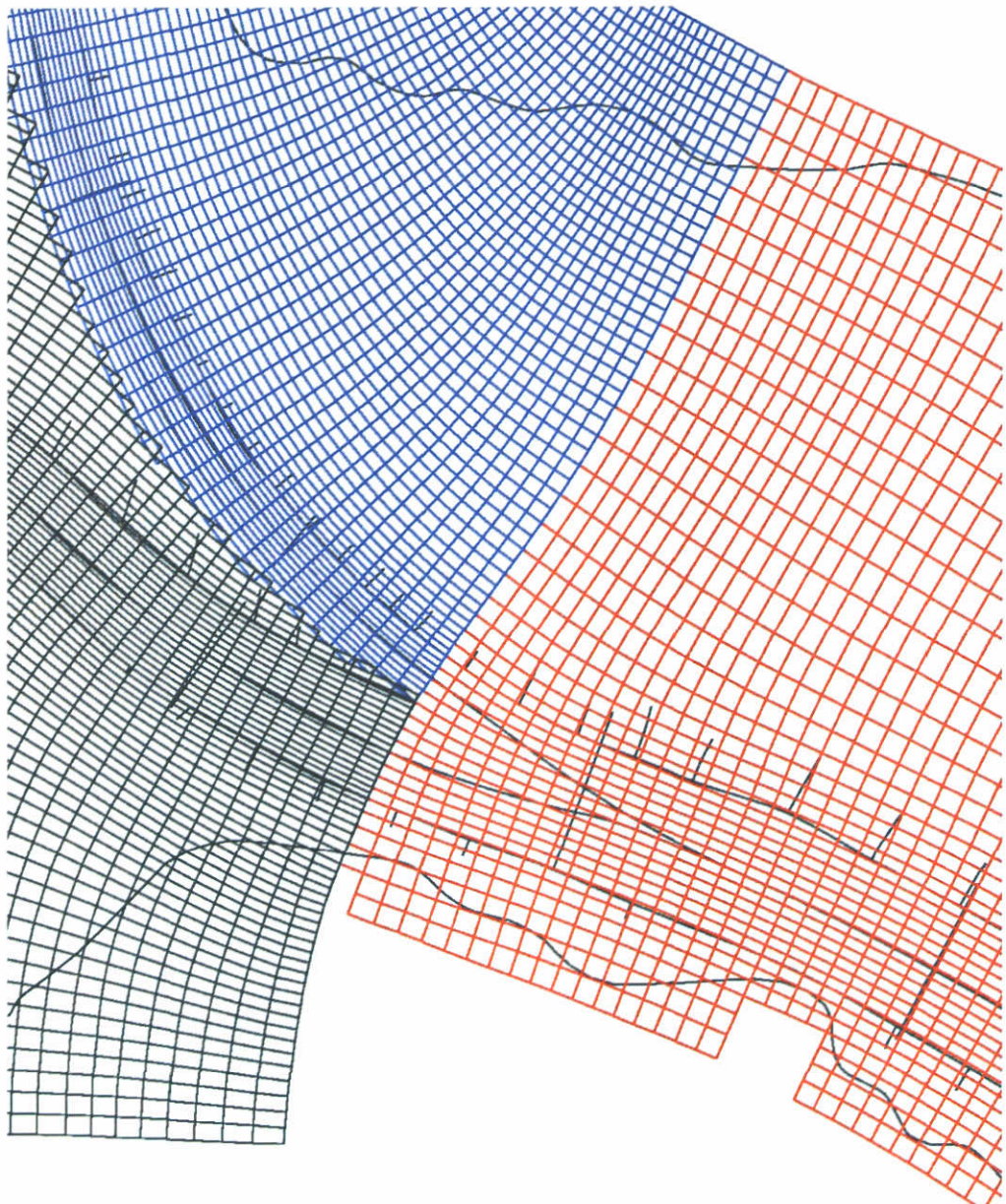
Naast de eisen aan de roosterresolutie en het vermijden van trapjeslijnen langs de normaallijnen van het zomerbed, gelden eisen ten aanzien van gladheid en orthogonaliteit. De gladheidseis is dat de verschillen tussen opeenvolgende roostereclafmetingen langs een roosterlijn in het zomerbed niet groter mogen zijn dan 10%. Voor het winterbed is de eis minder streng en mogen de verschillen oplopen tot maximaal 25%. De orthogonaliteitseis is dat de roosterhoeken niet meer dan 5° mogen afwijken van rechte hoeken. Dit betekent dat de orthogonaliteitsparameter, die de mate van niet-orthogonaliteit uitdrukt, kleiner moet zijn dan $\sin(5^\circ) = 0,087$.

Op basis van deze roostereisen voor het zomerbed is gestreefd naar een rooster met een resolutie van 60 m in langsrichting en 15 à 25 m in dwarsrichting, afhankelijk van de beschouwde riviertak. Aangezien de verschillende Rijntakken niet allemaal even breed zijn, is voor iedere tak een ander aantal roosterlijnen per dwarsprofiel toegepast. Voor elk deeldomein is het zomerbedrooster gedefinieerd langs de normaallijnen afkomstig uit Baseline. Het rekenrooster voor de Boven-Waal in Figuur 2-3 laat zien dat de roosterlijnen de normaallijnen goed volgen.

Voor een goede aansluiting tussen de roosters van de verschillende deeldomeinen is het van belang dat de roosterlijnen in het grofste rooster doorlopen in het fijnere rooster. Figuur 2-4 laat een goede overgang zien van de roosterlijnen tussen de roosters van de Bovenrijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal zien.



Figuur 2-3. Rekenrooster voor de Boven-Waal.

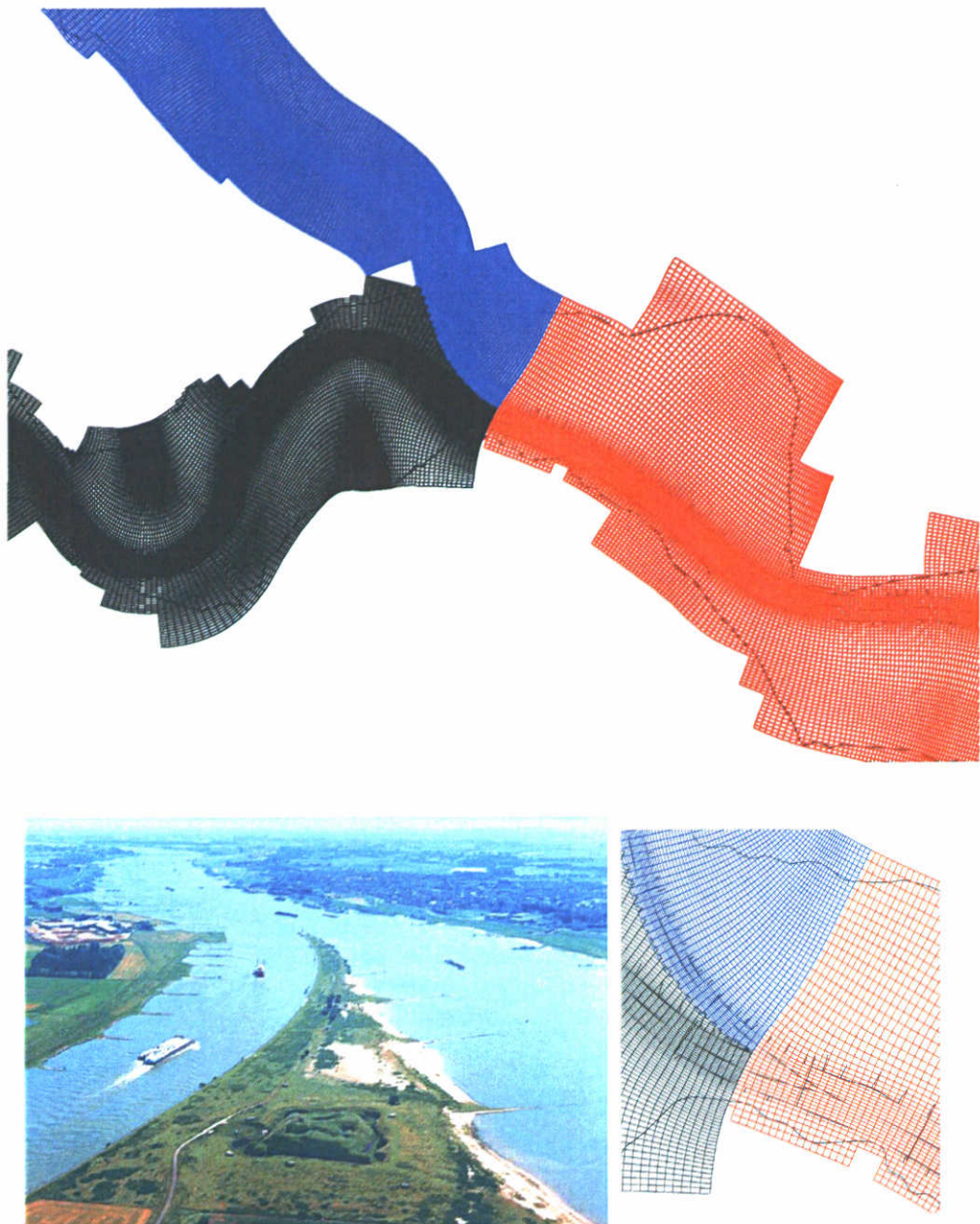


Figuur 2-4. Aansluiting van het rekenrooster van de Bovenrijn op de roosters van de Waal en het Pannerdensch Kanaal ter plaatse van de Pannerdensch Kop.

2.3.3 Winterbedroosters

De uitbreiding van de zomerbedroosters naar kribvakken, oevers en het winterbed is de volgende stap. Om kribvakmaatregelen goed te kunnen weergeven, is de zone van oever en kribben geschematiseerd met minimaal twee cellen. De uitbreiding naar het winterbed geschiedt door aan weerszijden van het zomerbed roosterlijnen toe te voegen. Bij riviersplitsingen ontstaan dan echter complicaties, zoals Figuur 2-5 laat zien voor de Waal en het Pannerdensch Kanaal bij de Pannerdensch Kop. Op de grens van de twee deeldomeinen op de tussenliggende uiterwaard overlappen de roosters elkaar en ontstaan trapjeslijnen.

De trapjeslijnen zijn hier op zich geen probleem, maar de overlap houdt in dat door deze grens geen stroming mogelijk is van het ene rooster naar het andere. Bij de Pannerdensch Kop wordt die stroming overigens ook in werkelijkheid grotendeels geblokkeerd door een hoge strekdam. Hetzelfde geldt voor de IJsselkop. Mosselman et al (2005) geven suggesties om met behulp van in elkaar hakende roosters of ongestructureerde roosters in de toekomst toch een domeingrens te creëren die uitwisseling tussen naastgelegen deeldomeinen mogelijk maakt. Omdat bij in elkaar hakende roosters numerieke problemen verwacht worden en ongestructureerde roosters nog niet in Delft3D beschikbaar zijn, wordt hier vooralsnog gewerkt met de overlappende roosters.



Figuur 2-5. Rekenrooster voor de Pannerdensch Kop met overlap en trapjeslijnen in de door Waal en Pannerdensch Kanaal ingesloten uiterwaard.

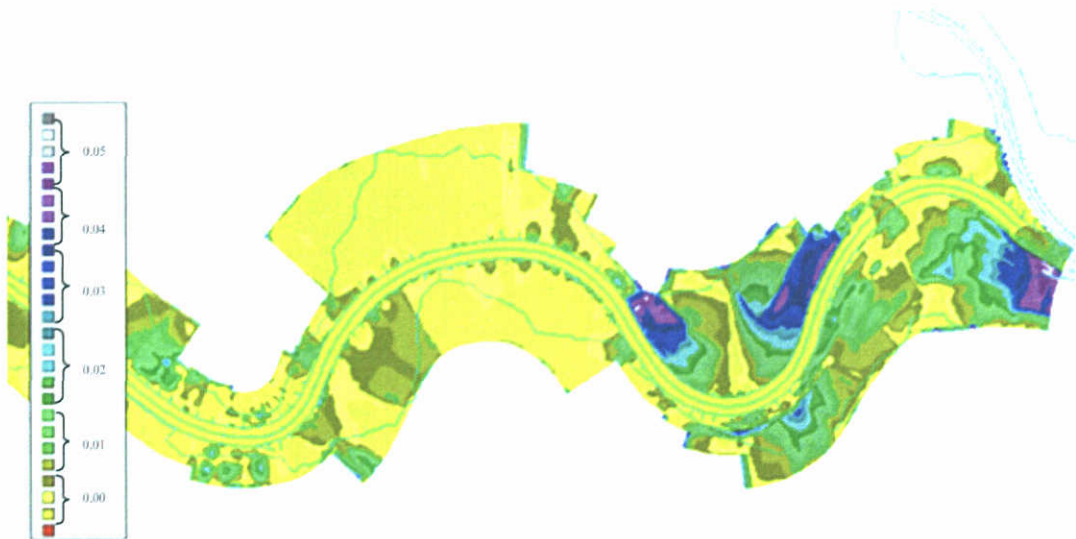
2.3.4 Resulterende roosterkarakteristieken

Tabel 2-1 specificeert voor het zomerbed en het winterbed van ieder deeldomcijn het resulterende aantal roostercellen en de afmetingen van de roostercellen.

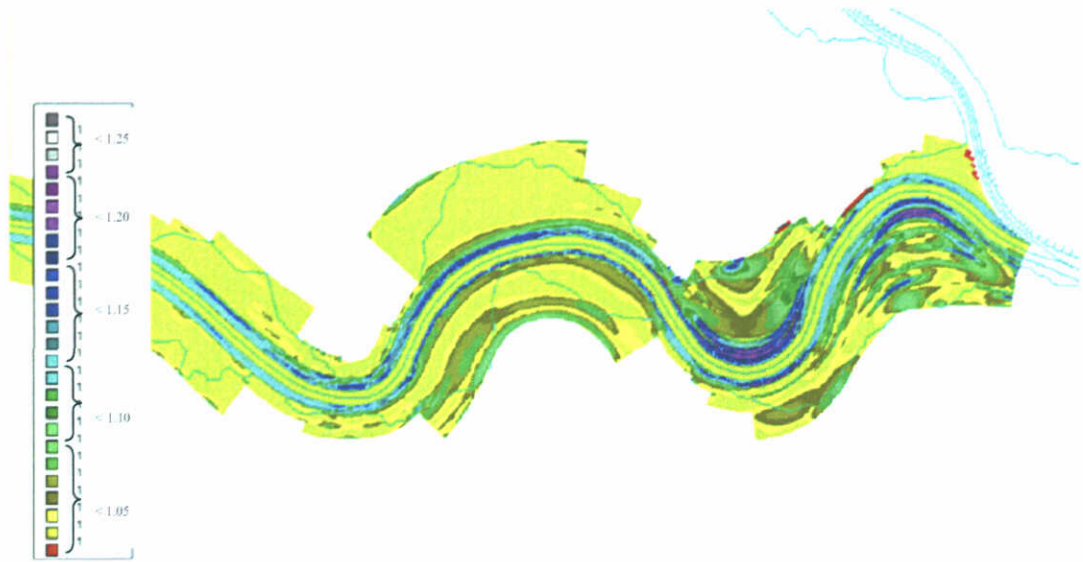
Tabel 2-1. Karakteristieken van de roosters per deeldomcijn.

Deeldomcijn	Totaal aantal cellen	Zomerbed			Winterbed			
		Aantal cellen	Breedte (m)	Lengte (m)	Aantal cellen links	Aantal cellen rechts	Breedte (m)	Lengte (m)
Bovenrijn	88 × 235	12	~ 28	~ 60	35	40	40-105	30-110
Waal	122 × 1401	16	~ 20	~ 60	63	43	25-86	10-150
Pan. Kanaal	94 × 182	8	~ 17	~ 60	40	46	25-65	30-100
IJssel	180 × 403	8	~ 10	~ 60	83	89	20-85	15-130
Nederrijn	91 × 177	8	~ 13	~ 60	44	39	20-60	20-80

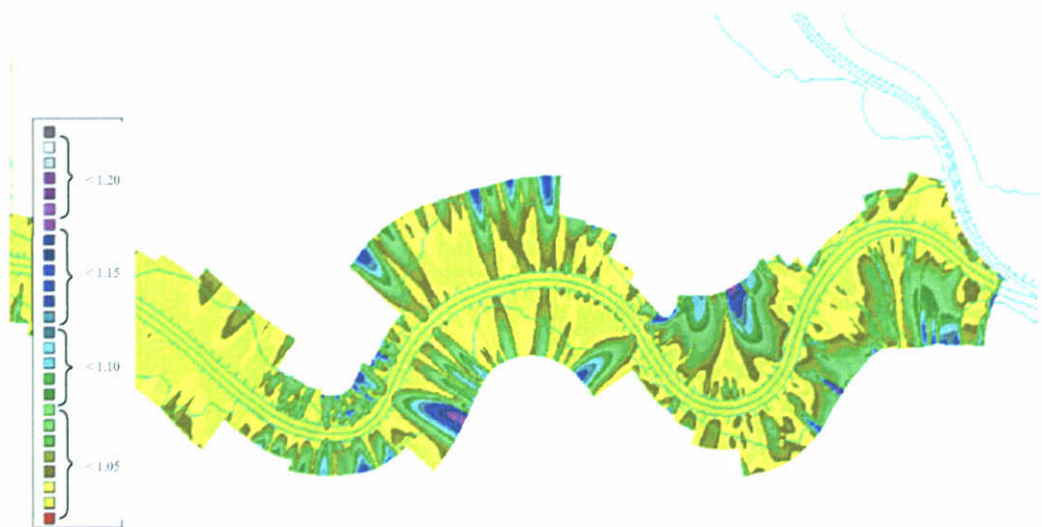
Voor alle deeldomcijnen voldoen de roosters aan de eisen ten aanzien van gladheid en orthogonaliteit. Voor de afwijkingen van de orthogonaliteit geldt zelfs dat deze overal kleiner zijn dan 3°. Figuren 2-6 tot en met 2-8 geven hiervan een beeld voor de Boven-Waal. De grootteverschillen tussen opeenvolgende roostercellen zijn voor het zomerbed kleiner dan 10% en voor het winterbed kleiner dan 23%, zowel in m-richting (dwarsrichting, Figuur 2-7) als n-richting (langsrichting, Figuur 2-8).



Figuur 2-6. Afwijkingen van orthogonaliteit, gedefinieerd als de sinus van de afwijkhoek, voor het rekenrooster van de Boven-Waal.



Figuur 2-7. Relatieve groottes van roostercellen ten opzichte van in m-richting aanliggende kleinere cellen.



Figuur 2-8. Relatieve groottes van roostercellen ten opzichte van in n-richting aanliggende kleinere cellen.

3 Modelschematisatie

3.1 Inleiding

Na het gereedkomen van de rekenroosters is de modelschematisatie in twee stappen opgezet. Met behulp van Baseline is de hydraulische schematisatie van het model aangemaakt. Dit betreft de bodemgeometrie, de hydraulische ruwheden en de schematisatie en de locatie van kribben, kades en overlatten. Er is gebruikt gemaakt van Baseline-versie 3.3 en de basisschematisatie die is toegepast in de PKB-studie en de Hydraulische Randvoorwaarden 2002. Vervolgens zijn de bodemsamenstelling, de vaste lagen (inclusief winterbed en oevers), de randvoorwaarden en de sedimenttransportformules toegevoegd om het model geschikt te maken voor de morfologische berekeningen.

In deze opdracht worden berekeningen gemaakt voor zowel de Nederlandse Rijntakken als het daarop aansluitende stuk van de Niederrhein benedenstrooms van Wesel (km 825). Daarvoor worden twee aparte modellen gebruikt: het nieuwe model en het bestaande Grensprojectmodel (Baur & Jagers, 2002; Baur et al, 2002). Te zijner tijd zal het Duitse deel ook in het nieuwe model worden opgenomen. De bovenrand van het huidige nieuwe model ligt even benedenstrooms van Emmerich op km 853. De Pannerdensch Kop vormt de benedenrand van het Grensprojectmodel. Er is dus een overlap tussen de modellen. Er wordt een tweetrapsbenadering toegepast:

- Eerst wordt een berekening met het Grensprojectmodel uitgevoerd om de afvoerverdeling en de autonome bodemdaling ter plaatse van de bovenrand van het nieuwe model te bepalen;
- Vervolgens wordt met de aldus gevonden hydraulische en morfologische voorwaarden een berekening uitgevoerd met het nieuwe 2D model.

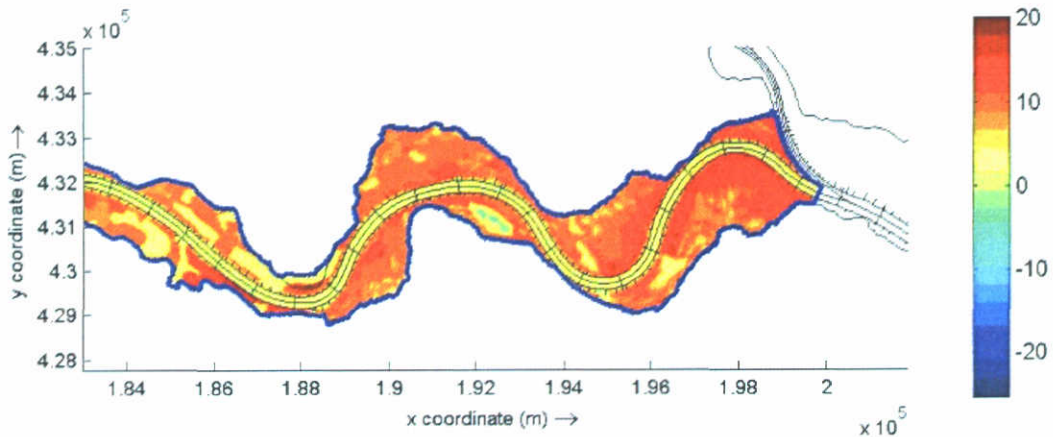
Oorspronkelijk lag het in de bedoeling om, als een derde trap, de berekende waterstanden van de Bovenrijn te gebruiken voor een tweede berekening met het Grensprojectmodel met verbeterde hydraulische voorwaarden op de benedenrand. Daarmee kan recht gedaan worden aan de geleidelijke daling van waterstanden als gevolg van de "autonome" bodemdaling. Omdat de eerste, ongekalibreerde berekeningen echter geen daling te zien gaven, zou een derde trap zijn neergekomen op een herhaling van de eerste trap. De derde trap is daarom achterwege gelaten.

3.2 Baseline-projectie

3.2.1 Riviergeometrie

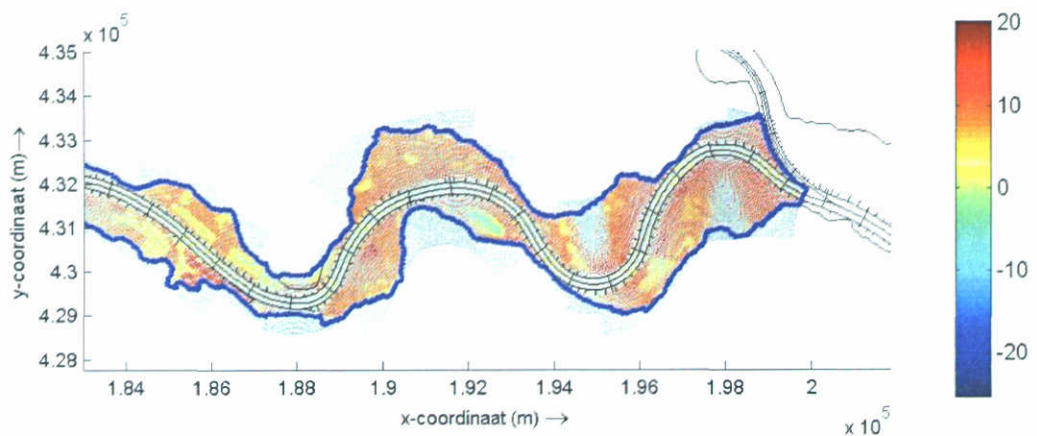
De Baseline-schematisatie wordt onder andere gekenmerkt door de bodemligging uit bodempeilingen in 1997. Voor ieder deeldomein is deze gepeilde bodemligging met behulp van Baseline op de rekenroosters geprojecteerd.

Naast deze projectie worden in Baseline ook *enclosure*-bestanden aangemaakt. Deze bestanden zorgen ervoor dat roosterdelen buiten de bandijken uiteindelijk niet worden meegenomen in de modelsimulatie. Figuur 3-1 geeft de aldus verkregen initiële bodemligging van de Boven-Waal weer.



Figuur 3-1. Initiële bodemligging van Boven-Waal.

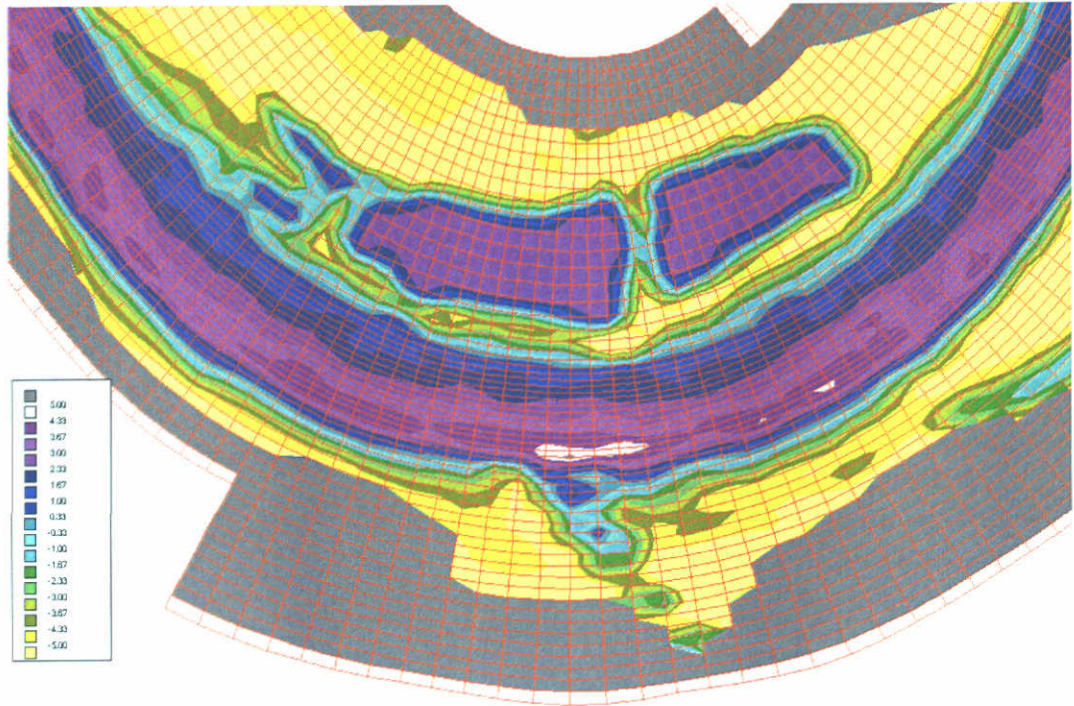
De vetgedrukte blauwe lijnen in Figuur 3-2 geven de *enclosure*-lijnen weer die in het rekenmodel de begrenzing van het rooster vormen. De *enclosure*-lijnen vallen samen met de bandijken.



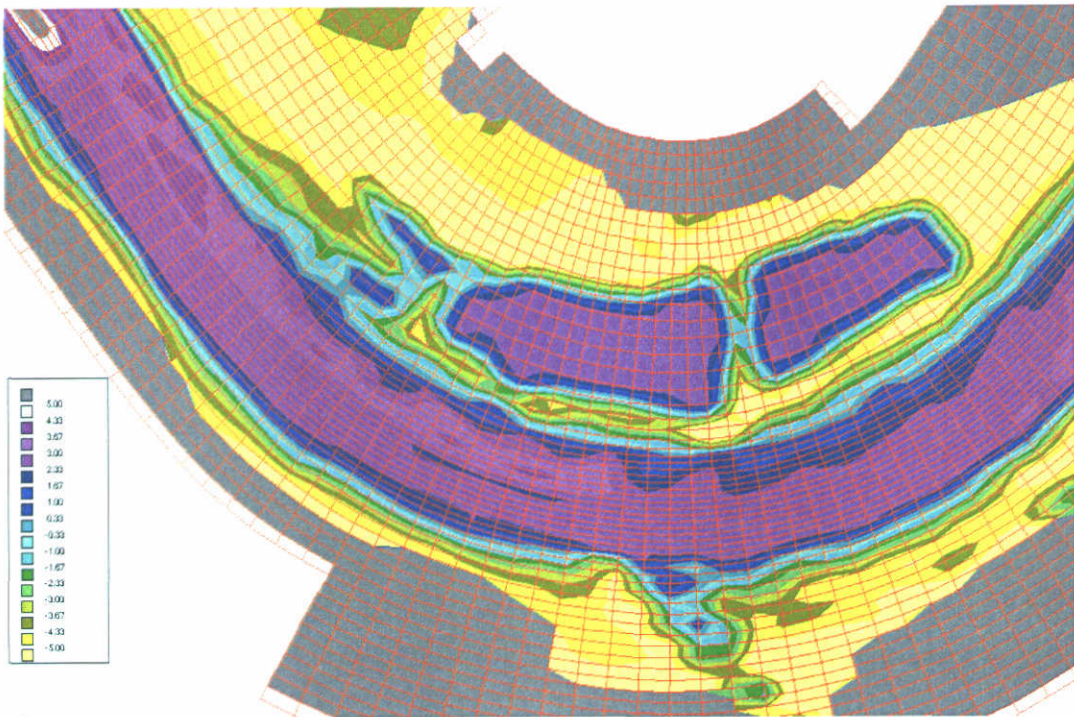
Figuur 3-2. *Enclosure* binnen het rekenrooster, begrensd door blauwe lijnen die de bandijken volgen.

Om de vaarweg te verbeteren zijn in het verleden vaste lagen aangebracht in het zomerbed van de scherpe Waalbochten bij Nijmegen en St. Andries. De vaste laag bij Nijmegen werd in de periode 1985-1988 aangelegd, de vaste laag bij St. Andries in de periode 1996-1998. Laatstgenoemde vaste laag was nog niet aanwezig tijdens de bodempeiling van 1997. Om de vaste laag in de bodemschematisatie op te nemen zijn daarom de uit Baseline afkomstige bodemliggingen over een traject van ongeveer 10 kilometer boven- en benedenstrooms van St. Andries in het bodembestand vervangen door gegevens uit de bodempeiling van 1999.

De Figuren 3-3 en 3-4 laten zien dat de overgang tussen de bodems van 1997 en 1999 glad verloopt.

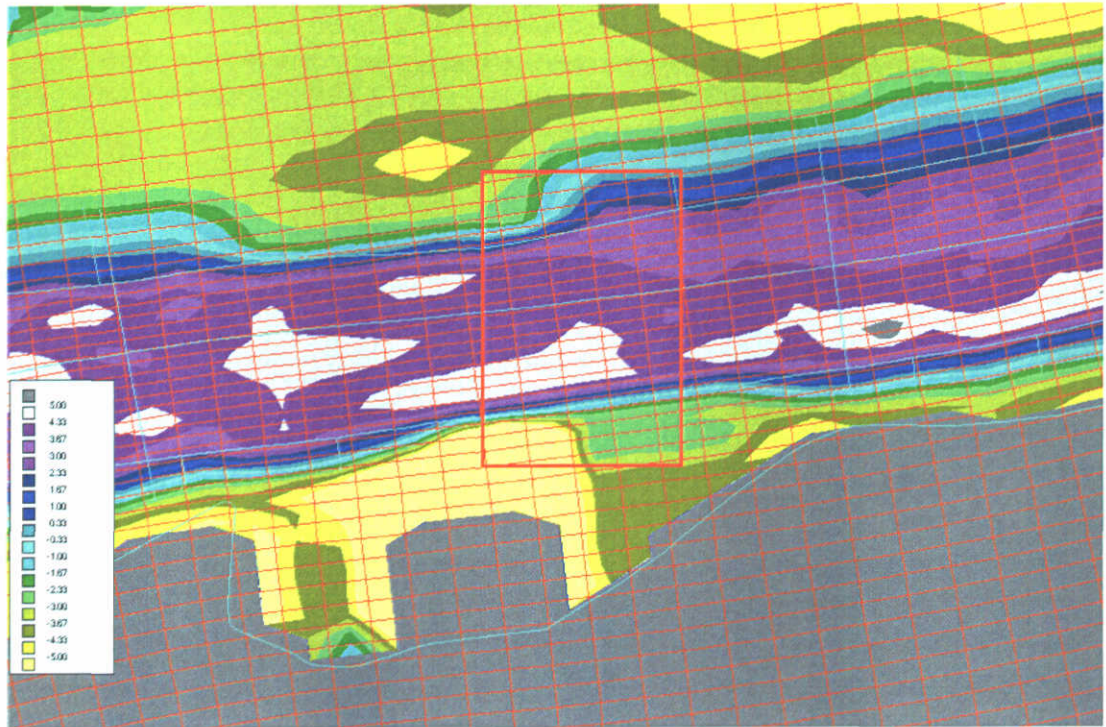


bodempelling van 1997, zonder vaste laag

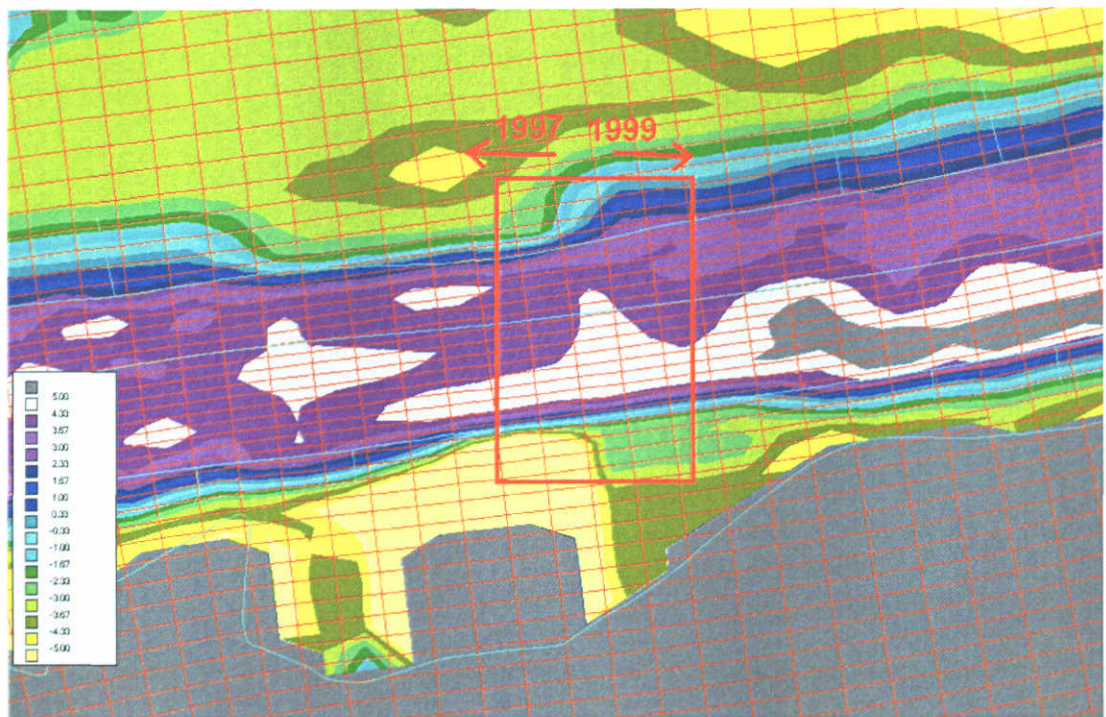


bodempelling van 1999, met vaste laag

Figuur 3-3. Verschillen en overgang tussen bodemschematisaties ter plaatse van St. Andries op basis van peilingen uit 1997 en 1999.



bodempeiling van 1997



overgang tussen peilingen van 1999 en 1997

Figuur 3-4. Verschillen en overgang tussen bodemschematisaties ter plaatse van Zaltbommel (km 933) op basis van peilingen uit 1997 en 1999.

3.2.2 Ruwheidsdefinitie

De ruwheid in het alluviale zomerbed wordt beschreven met de duinhoogte- en ruwheidsvoorspeller van Van Rijn. Door deze voorspeller te gebruiken wordt rekening gehouden met de variatie in ruwheid onder variërende stroomcondities. Bodemvormen van kleine ribbels tot grote duinen kunnen zich ontwikkelen onder verschillende stromingsregimes en beïnvloeden de bodemruwheid. De toepassing van de voorspeller van Van Rijn resulteert in ruimtelijk variërende Nikuradse-ruwheidswaarden die ook nog in de tijd kunnen variëren. In Baseline is deze ruwheidsdefinitie opgenomen. Per riviertraject tussen MSW-stations zijn de parameters van de Van-Rijnformule gespecificeerd.

In de uiterwaarden is de hydraulische ruwheid gerelateerd aan de aanwezige vegetatietypen of “ecotopen” en hun ruimtelijke verdeling. Baseline bevat ruimtelijk variërende Nikuradse-coëfficiënten in de vorm van ruwheidstabellen. De ruwheden van bepaalde vegetatietypen hebben echter niet altijd een vaste waarde, maar zijn afhankelijk van de inundatiediepte. Dit is het geval voor struwelen, bosachtige ecotopen en heggen. Het analytische model van Klopstra et al (1997) is toegepast voor de ruwheid van overstroomde vegetatie.

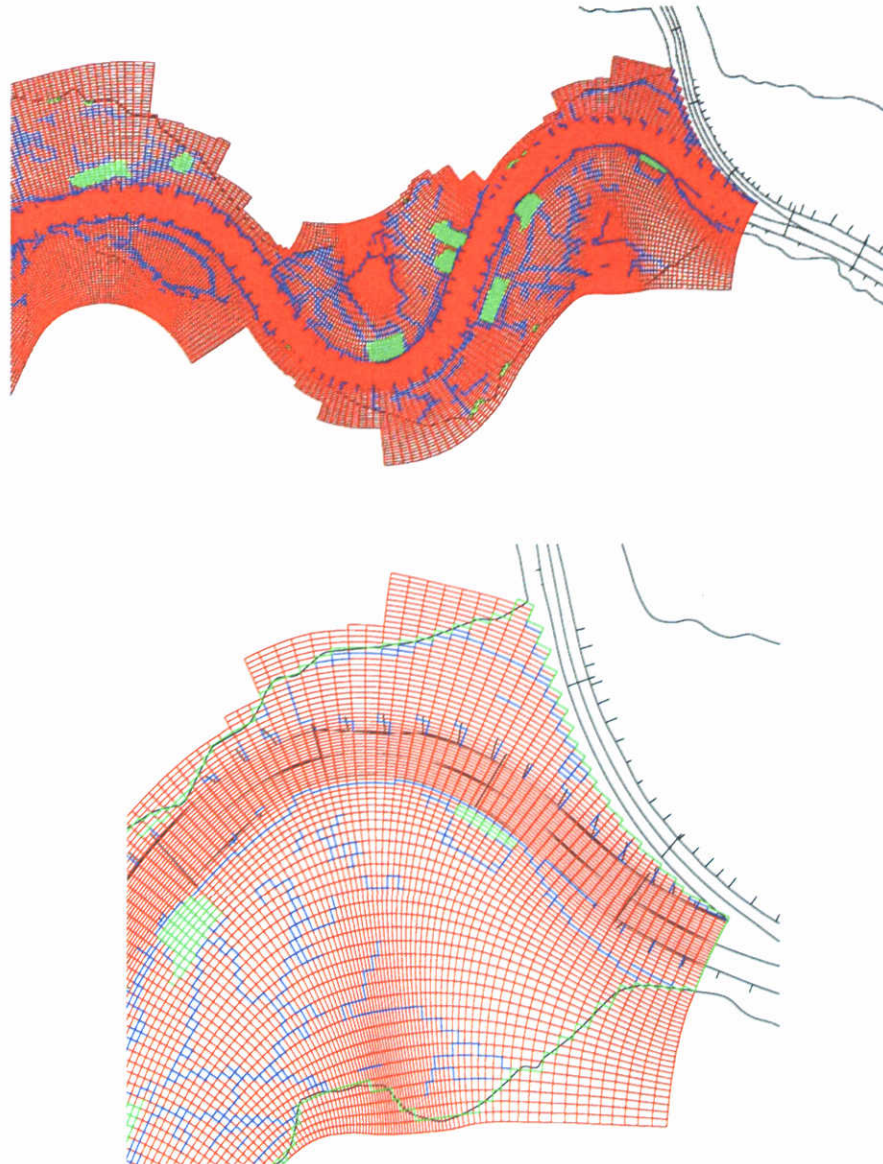
Met deze ruimtelijk variërende ruwheidsformulering hebben Sloff & Jagers (2004b) en Yossef & Jagers (2005) in eerdere studies goede ervaringen opgedaan. Het effect van de ruwheidsdefinitie op bochtprofielen en bankenpatronen in het zomerbed verdient wel aandacht.

In principe moet naast het gebruik van deze ruwheidvoorspeller óók met gegradeerd sediment worden gerekend. Deze stap wordt echter in het kader van de huidige opdracht nog niet gemaakt.

3.2.3 Kribben, kades en overlaten

Kades, kribben en andere obstakels zijn in het model als overlaten (“weirs”) geschematiseerd. De blauwe lijnen in Figuur 3-5 geven de kribben, zomerkades en obstakels in de Boven-Waal weer. De groene lijnen zijn ondoorlaatbare dammetjes (“thin dams”) in het model.

In tegenstelling tot WAQUA biedt Delft3D geen mogelijkheden om schuin over het rooster lopende overlaten te definiëren. Dat leidt onder meer tot knikken in de schematisatie van een aantal kribben in Figuur 3-5. Uit eerdere simulaties voor de Rijntakken is echter gebleken dat dit geen merkbare gevolgen heeft voor het stroombeeld en de morfologie.



Figuur 3-5. Kades, kribben en andere obstakels in de modelschematisatie voor de Boven-Waal. Roosterlijnen zijn rood, overlaten (kribben, zomerkaden en obstakels) blauw en ondoorlatende dammetjes groen.

3.3 Bodemsamenstelling

Hoewel menging en uitzeying van gegradeerd sediment belangrijke processen zijn in de Nederlandse Rijntakken, wordt in deze opdracht nog gewerkt met uniform sediment. Daarbij worden twee situaties in ogenschouw genomen:

- Constante mediane korrel diameter D_{50} voor het gehele modelgebied, gelijk aan 1,5 mm;
- Ruimtelijk verlopende mediane korrel diameter D_{50} .

Bij een ruimtelijk verlopende korrel diameter kan in Delft3D slechts één waarde van de diameter uit de zeefkromme worden opgegeven.

Hiervoor is de mediane korreldiameter D_{50} gebruikt. Waar nodig leidt het model daaruit andere karakteristieke diameters af op basis van een lognormale sedimentverdeling.

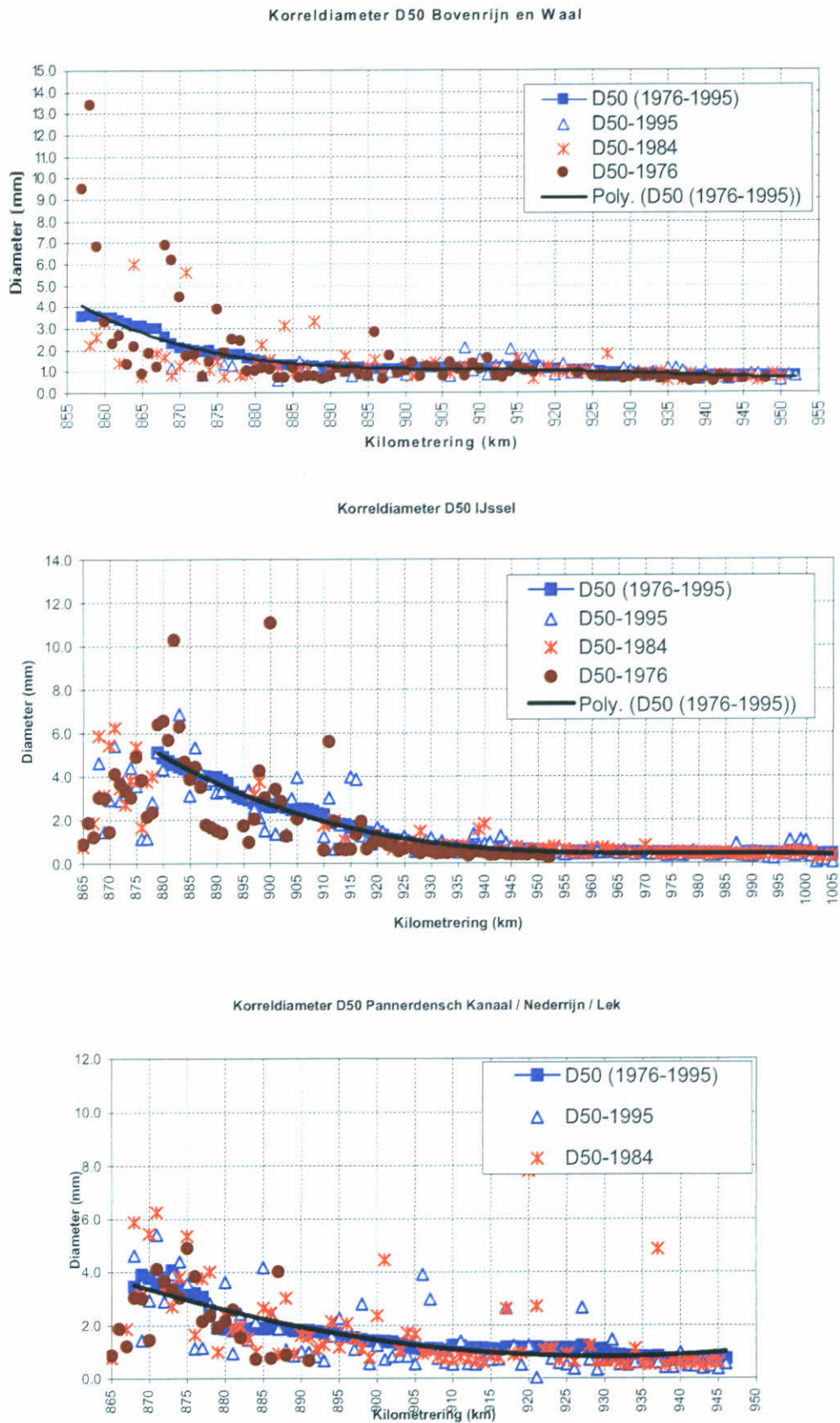
Het ruimtelijke verloop van korreldiameters is gebaseerd op de drie meetcampagnes van 1976, 1984 en 1995. Voor elke rivierkilometer is een bodemonmonster genomen op de rivieras, op de linkeroever en op de rechteroever. Uit de zeefkrommes zijn de percentielwaarden D_{10} , D_{50} en D_{90} afgeleid en opgeslagen in een database. Voor het rekenmodel is het van belang dat het ruimtelijke verloop van de korreldiameter glad is. Daarom zijn de meetwaarden gemiddeld over de breedte (rivieras, linkeroever en rechteroever) en over trajecten van 20 km lengte. Figuur 3-6 geeft hiervan de resultaten weer. Ook bevat Figuur 3-6 op polynomen gebaseerde krommen die de meetwaarden zo goed mogelijk benaderen. Op de domeinranden is de korreldiameter van de eerste roostercel van een benedenstrooms deeldomein steeds gelijkgehouden aan die van de laatste rekencel van het bovenstroomse deeldomein. Vervolgens verlopen de korreldiameters over een afstand van 2 km geleidelijk naar de vastgestelde waarden.

3.4 Vaste-laagoptie

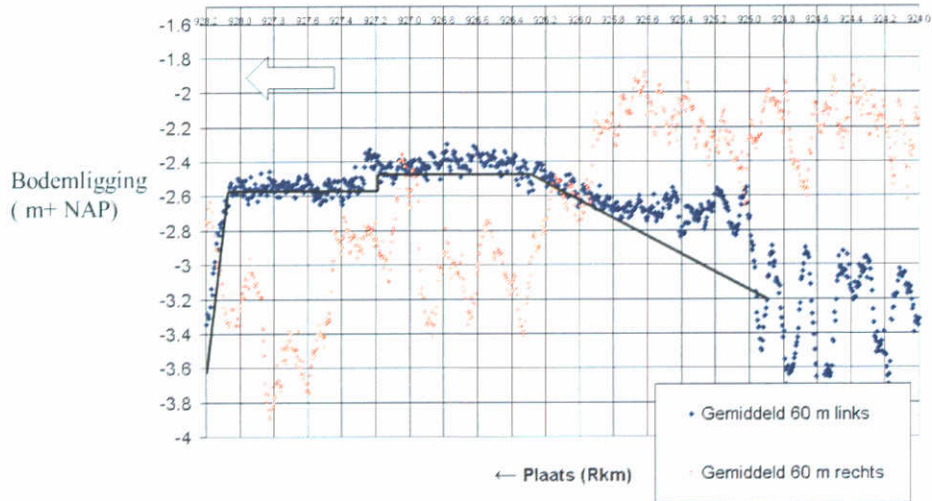
Overeenkomstig de aanpak in eerdere studies (Sloff & Jagers, 2004a,b) is in het model de vaste-laagoptie toegepast. Deze functionaliteit vereist dat op alle punten in het rekenrooster een sedimentlaagdikte wordt gespecificeerd. Het concept van een vaste of niet-erodeerbare laag is dat er wel sedimentatie en erosie kan optreden, maar dat erosie belemmerd wordt daar waar de vaste laag bloot komt te liggen. Met behulp van de vaste-laagoptie zijn de uiterwaarden tot aan de kribkoppen vastgelegd door daarop een sedimentlaagdikte van nul te specificeren. De uiterwaarden kunnen dan in het model niet verder eroderen.

De sedimentlaagdikte op de vaste lagen bij St. Andries en Nijmegen is bepaald uit het verschil tussen de initiële bodemligging en de ligging van de vaste laag. In Figuur 3-7 is de ligging van de vaste laag bij St. Andries weergegeven. De figuur laat ook de beschikbare sedimentlaag aan het begin van de berekening zien. In Figuur 3-8 staan dezelfde gegevens voor de vaste laag bij Nijmegen.

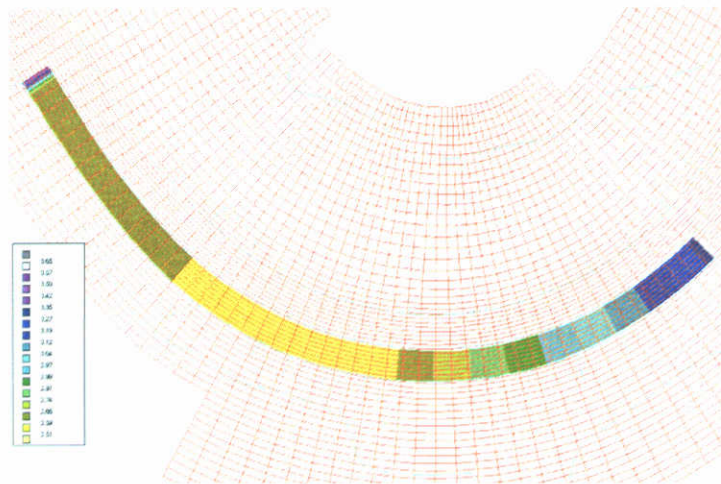
De vaste laag bij Nijmegen is over de gehele breedte van het zomerbed aangebracht. Voor St. Andries is de laag van de buitenbocht tot aan de rivieras uitgevoerd. Voor het alluviale zomerbed is een zeer dikke sedimentlaag gespecificeerd. Uit berekeningen is overigens gebleken dat de grotere breedte van de vaste laag bij Nijmegen de resultaten niet beïnvloedt. De virtuele vaste laag ligt voldoende diep onder de ondiepte van de binnenbocht.



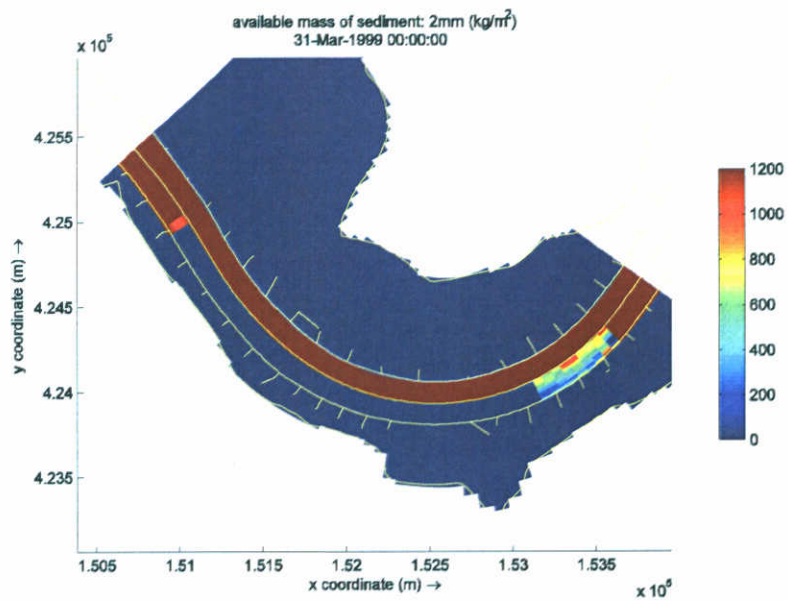
Figuur 3-6. Ruimtelijke verloop van de mediane korrel diameter: meetwaarden uit drie meetcampagnes en modelschematisatie.



a) de ligging van de vaste laag (zwarte lijn) en de bodemligging op de linker en de rechter oever

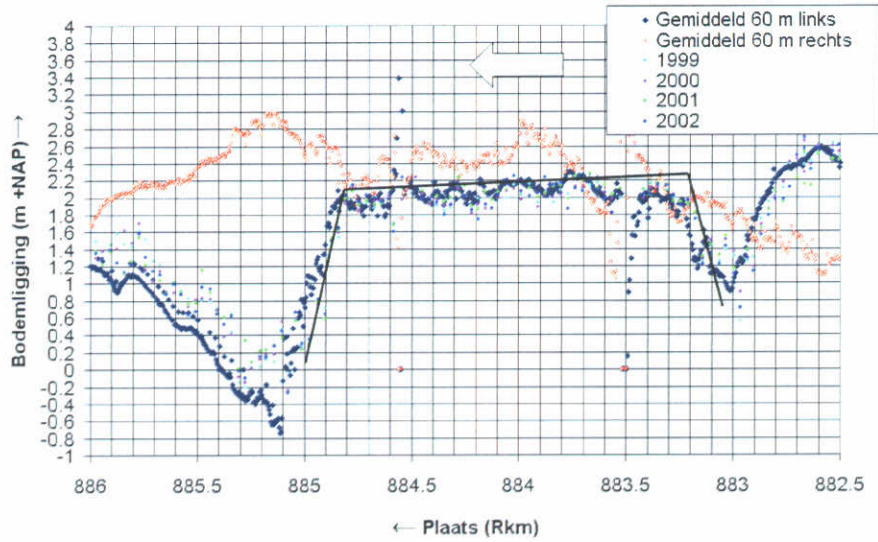


b) de ligging van de vaste laag in het model

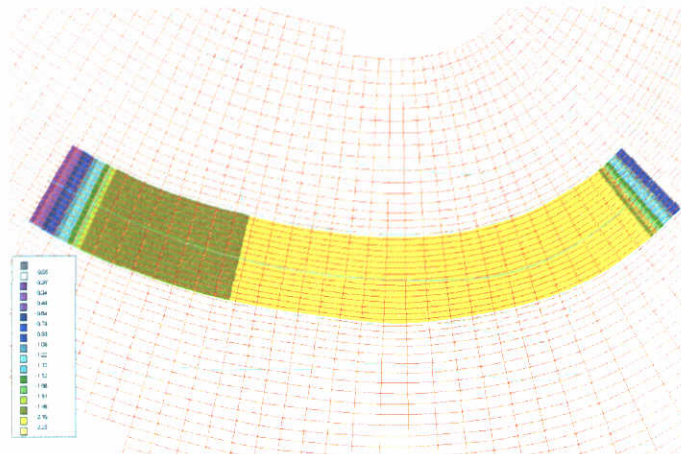


c) beschikbare sedimentlaagdikte op de vaste laag in het model in kg/m^2

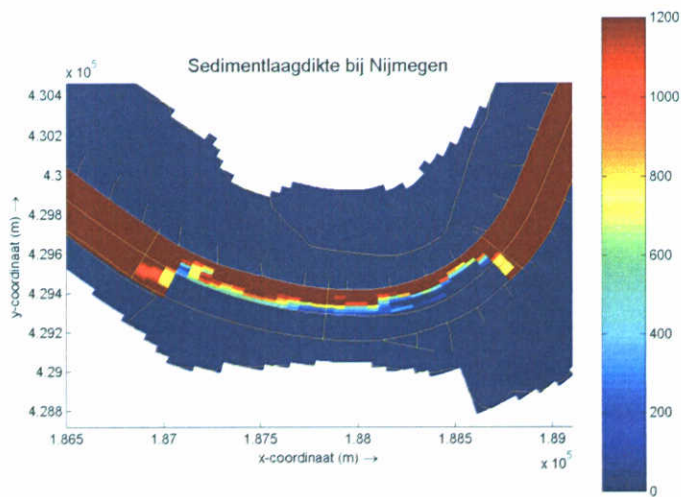
Figuur 3-7. Ligging van vaste laag bij St. Andries en beschikbare sedimentlaagdikte in het model.



a) de ligging van de vaste laag (zwarte lijn) en de bodemligging op de linker en de rechter oever



b) de ligging van de vaste laag in het model

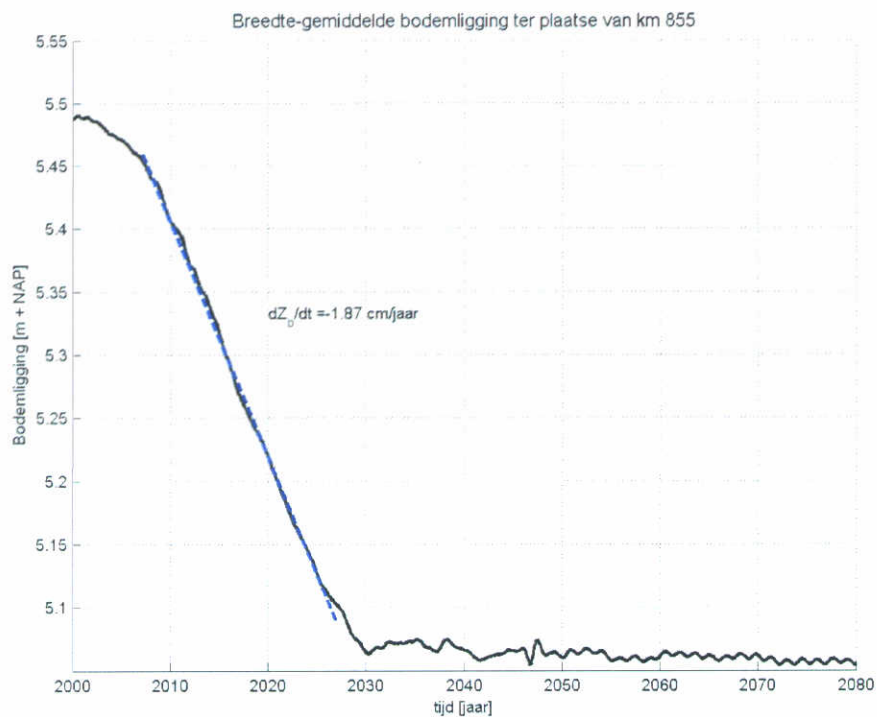


c) beschikbare sedimentlaagdikte op de vaste laag in het model in kg/m^2

Figuur 3-8. Ligging van vaste laag bij Nijmegen en beschikbare sedimentlaagdikte in het model.

3.5 Randvoorwaarden

De randvoorwaarden bestaan uit afvoeren en morfologische condities op de bovenrand en waterstanden of afvoeren op de benedenranden. Een langjarige berekening met het Grensprojectmodel gaf voor een constante afvoer van 2500 m³/s als resultaat dat de bodem bij km 855 ¹ tot 2030 daalt met een snelheid van 18,7 mm/jaar (Figuur 3-9). De benedenstroomse randvoorwaarde was daarbij zo gekozen dat de daling in 2030 werd stopgezet. De waarde van 18,7 mm/jaar is als morfologische randvoorwaarde aan de bovenrand van het nieuwe model opgelegd. Als hydraulische randvoorwaarde is de constante afvoer van 2500 m³/s aan de bovenrand opgelegd.



Figuur 3-9. Ontwikkeling van bodemligging op km 855 volgens berekening met Grensprojectmodel.

Op de benedenranden in de Waal en de IJssel zijn waterstand-afvoerrelaties gebruikt die door RIZA zijn afgeleid uit DONAR-gegevens. Voor de Waal luidt de relatie:

$$h_{953.2} = 4,5 \left(\frac{Q_{\text{waal}}}{1515} \right)^{0.12} - 3,7 \quad (3-1)$$

waarin de index van de waterstand h de rivierkilometer aanduidt en de index van afvoer Q de riviertak.

¹ De bovenrand van het nieuwe model ligt op km 853. Dit is direct benedenstrooms van de vaste laag bij Emmerich. Vanwege de grote morfologische variabiliteit die op deze locatie in het Grensprojectmodel optreedt, is gekozen om de "autonome" bodemdaling een paar kilometer stroomafwaarts te bepalen, op km 855, en deze daling als randvoorwaarde in het nieuwe model op te nemen.

Voor de IJssel luidt de waterstand-afvoerrelatie:

$$h_{911.7} = 3,8 \cdot 10^{-9} \cdot Q_{\text{IJssel}}^3 - 1,409 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{\text{IJssel}}^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot Q + 1,431 \quad (3-2)$$

De relaties komen voor de gebruikte constante afvoer neer op een waterstand van 0,88 m +NAP op de benedenrand van de Waal en 5,8 m +NAP op de benedenrand van de IJssel.

De randvoorwaarde in de Nederrijn wordt beïnvloed door de stuw bij Driel. Op deze rand is een constante afvoer van 444 m³/s opgelegd, conform de volgende relatie van RIZA:

$$Q_{\text{Nederrijn}} = 25 + \frac{1}{2} \left[\frac{12}{55} Q_{\text{Bovenrijn}} - 125 - 200 \cdot e^{-\frac{Q_{\text{Bovenrijn}} - 1450}{225}} + \sqrt{\left(\frac{12}{55} Q_{\text{Bovenrijn}} - 125 - 200 \cdot e^{-\frac{Q_{\text{Bovenrijn}} - 1450}{225}} \right)^2} \right] \quad (3-3)$$

3.6 Sedimenttransportformule

In de Bovenrijn en het Pannerdensch Kanaal wordt sediment vooral als bodemtransport getransporteerd. Daarom is voor deze takken vooral een bodemtransportformule geschikt. Verder stroomafwaarts neemt de bijdrage van zwevend transport aan het totale transport toe en is een totaaltransportformule meer geschikt.

Sloff & Jagers (2004b) hebben het effect geanalyseerd van het gebruik van de totaaltransportformule van Engelund & Hansen (1967) en de bodemtransportformule van Meyer-Peter & Müller (1948) geanalyseerd. De resultaten van beide transportformules lagen dicht bij elkaar. Aangezien de bodemtransportformule van Meyer-Peter & Müller beter aansluit bij de instellingen van het Grensprojectmodel, is die formule in het nieuwe model:

$$s = 8\alpha D_{50} \sqrt{\Delta g D_{50}} (\mu\theta - \theta_k)^{2/3} \quad (3-4)$$

met

- α = kalibratiefactor (-); $\alpha = 0,4$
- g = versnelling ten gevolge van de zwaartekracht (m·s⁻²)
- Δ = relatieve massadichtheid van sediment (-); $\Delta = 1,65$
- D_{50} = mediane korreldiameter van het bodemmateriaal (m)
- μ = ribbelfactor (-)
- θ = Shieldsparameter (-)
- θ_k = kritieke Shieldsparameter voor begin van beweging (-); $\theta_k = 0,047$

De ribbelfactor wordt bepaald met

$$\mu = \min \left(\left(\frac{C}{C_{90}} \right)^{1.5}; 1,0 \right) \quad (3-5)$$

$$C_{90} = 18 \log \left(\frac{12h}{3D_{90}} \right)$$

waarin

C	=	Chézycoëfficiënt voor hydraulische ruwheid ($m^{1/2}s^{-1}$)
C_{90}	=	Chézycoëfficiënt voor hydraulische korrelruwheid van D_{90} ($m^{1/2}s^{-1}$)
D_{90}	=	sedimentkorrelgrootte die door 90% van het sedimentmengsel wordt onderschreden (m)
h	=	waterdiepte (m)

De Shieldsparameter wordt berekend met

$$\theta = \left(\frac{u}{C} \right)^2 \frac{1}{\Delta D_{50}} \quad (3-6)$$

waarin

u	=	stroomsnelheid (ms^{-1})
-----	---	------------------------------

In tegenstelling tot in het Grensprojectmodel is in het nieuwe model de kritieke Shieldsparameter niet verlaagd. Van Vuren & Sloff (2006) hebben gevonden dat een te lage kritieke Shieldsparameter kan leiden tot een te geringe mate van niet-lineariteit in de relatie tussen sedimenttransport en stroomsnelheid. Deze mate van niet-lineariteit wordt gedefinieerd als $n = (u/s)(ds/du)$ en is voor transportformules in de vorm van een machtswet gelijk aan de exponent: $s = mu^n$. De parameter voor de mate van niet-lineariteit is bepalend voor de mate waarin de rivierbodem reageert op gradiënten in stroomsnelheden (b.v. Mosselman, 2005) en daarom essentieel voor een goede effectbepaling van rivierkundige ingrepen. Voor morfologische veranderingen in de Rijntakken is een combinatie van bodemtransport en zwevend transport bepalend. Fysisch wordt het niet-lineaire gedrag van deze transporten op de Nederlandse Rijntakken correct beschreven met een waarde voor de parameter n tussen 4 en 6. Met de originele kritieke Shieldsparameter van 0,047 voldoet de bodemtransportformule van Meyer-Peter & Müller hieraan.

3.7 Effect van bodemdwarshellingen op sedimenttransport

Een voorname factor in 2D morfologie is de parameter $f_s(\theta)$ die het effect beschrijft van bodemdwarshellingen op de richting van sedimenttransport (Struikma et al, 1985). Talmon et al (1995) geven hiervoor de relatie

$$f_s(\theta) = 9 \left(\frac{D_{50}}{h} \right)^{0.3} \sqrt{\theta} = A_{shld} \cdot \theta^{B_{shld}} \quad (3-7)$$

Hierin zijn A_{shld} en B_{shld} invoerparameters voor het model. Voor coëfficiënt A_{shld} is een waarde 0,8 genomen, voor coëfficiënt B_{shld} een waarde 0,5.

3.8 Parameters voor Delft3D-3DMOR

Een aantal belangrijke parameterinstellingen is gerelateerd aan de specifieke opzet van Delft3D-3DMOR. Deze hebben te maken met de wijze waarop de morfologische veranderingen in het model worden berekend. Het gaat hierbij om de *dichtheid van sediment*, de *rekeningstap*, de *hydraulische inspeelperiode* en de *morfologische factor*.

In Delft3D-3DMOR wordt de bodemligging elke tijdstap dynamisch in de hydrodynamische rekenlus aangepast. Na elke tijdstap wordt de sedimentbalans opgelost en wordt de verandering in de sedimentmassa op de rivierbodem berekend. Deze verandering in massa wordt vertaald naar een verandering in de sedimentlaagdikte. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de *dichtheid van sediment*. De droge sedimentdichtheid in het model is gelijk aan 1600 kg/m^3 . De bodemverandering is gelijk aan de verandering in de laagdikte van het bodemmateriaal. De *rekeningstap* is gelijk aan 0,2 minuten.

Het duurt vaak enige tijd voordat het stroombeeld zich heeft aangepast aan nieuwe hydrodynamische condities. Erosie en sedimentatie worden tijdens deze aanpassingsperiode vaak niet goed weergegeven. In het model kan een *inspeelperiode* worden gedefinieerd. Pas na het verstrijken van deze inspeelperiode worden de morfologische veranderingen in het systeem voor de eerste keer berekend. De inspeelperiode is 1 dag.

Morfologische ontwikkelingen spelen zich op een veel grotere tijdschaal af dan de aanpassingen in het stroombeeld. Morfologische ontwikkelingen zouden dus met een grotere tijdstap berekend worden dan hydrodynamische ontwikkelingen. In Delft3D-3DMOR worden de waterbeweging en de morfologie echter tegelijkertijd opgelost, in tegenstelling tot de afzonderlijke berekeningen in Delft3D-MORSYS. Om dan toch recht te doen aan de verschillende tijdschalen wordt de snelheid van de morfologische veranderingen opgeschaald met een *morfologische factor*. Elke tijdstap worden de hoeveelheden erosie en sedimentatie met deze factor vermenigvuldigd. De factor moet zodanig worden gekozen dat de morfologische verandering per tijdstap kleiner is dan 5% van de waterdiepte. Op deze wijze worden 'versnelde' morfologische veranderingen op een dynamische manier meegenomen in de hydrodynamische berekening, met een aanzienlijke reductie van de rekestijd als gevolg. In het model is de morfologische factor gelijk aan 100. Dit betekent dat bijvoorbeeld na 5 dagen hydrodynamica 500 dagen morfologie zijn doorgerekend. Daarbij wordt aangenomen dat de waterbeweging zich binnen 5 dagen aanpast aan de nieuwe bodemligging en vervolgens 495 dagen niet meer verandert.

3.9 Grensprojectmodel

Het Grensprojectmodel is in Delft3D-MORSYS ontwikkeld voor het Nederlands-Duitse grensgebied (Baur & Jagers, 2002; Baur et al, 2002). Het model bestrijkt een 42 km lang riviertraject tussen km 825 en km 867. Zowel zomer- als winterbed is in het model opgenomen. Het hydraulische deel van het model is gekalibreerd op een set van vier constante afvoeren die variëren van laagwater tot de hoogst waargenomen afvoer.

De morfologie is op ruimtelijke karakteristieken gekalibreerd door middel van een lange-termijnsimulatie met een constante en morfologisch representatieve afvoer van $2500 \text{ m}^3/\text{s}$. Het model is vervolgens gevalideerd aan de hand van de waargenomen bodemdaling van $2,5 \text{ cm/jaar}$ in de periode 1995-2000. Tabel 3-1 geeft een overzicht van karakteristieken van het Grensprojectmodel.

Tabel 3-1. Karakteristieken van Grensprojectmodel.

Delft3D-versie	MORSYS
Rooster	<ul style="list-style-type: none"> • in Duitse Gauß-Krügercoördinaten • instroomrand km 825,2 km, Xanten • uitstroomrand km 867,2 km, Pannerdensche Kop • roostergrootte $n \times m = 43 \times 281 = 12.083$, waarvan er 8632 actief zijn • 10 roostercellen over breedte van zomerbed, circa 150 m lang en 35 m breed • 15 cellen voor winterbed links, 17 cellen voor winterbed rechts, met lengtes van 20 tot 544 m en breedtes van 23 tot 417 m • rivieras heeft roosterlijnummer 23
Bodemgeometrie	<ul style="list-style-type: none"> • Zomerbed: bodempeilingen (echolodingen) om de 100 m, uit 1995 voor km 825 – 865,4, uit 1997 voor km 865,4 – 868,0 • Winterbed: gegevens afkomstig van een digitaal terreinmodel uit 2000 voor km 849 – 867,2, uit bodempeilingen in 1990 en 1995 voor km 825,2 – 838,5 en uit topografische lijnen uit 1990 voor km 838,5 – 849,0
Ruwheidsdefinitie	<ul style="list-style-type: none"> • Zomerbedruwheid op basis van Chézycoëfficiënten, met onderscheid tussen drie trajecten: traject 1 km 825 – 835, traject 2 km 835 – 850, traject 3 km 850 – 868 • Winterbedruwheid op basis van Chézycoëfficiënten, met behulp van White-Colebrookformule afgeleid uit Nikuradsewaarden onder aanname van een constante waterdiepte. Nikuradsewaarden afgeleid uit verdeling van vegetatie over de uiterwaarden in Duitse ATKIS-database.
Bodemsamenstelling	<ul style="list-style-type: none"> • Ruimtelijk variërende mediane korreldiameter D_{50}, die alleen in langsrichting varieert en in dwarsrichting constant is.
Transportformule	<ul style="list-style-type: none"> • Formule van Meyer-Peter & Müller met een verlaagde kritieke Shields-parameter van 0,02, een ribbelfactor van 1 en een kalibratiefactor van 0,3375 (zodat de coëfficiënt gelijk is aan 2,7 in plaats van 8).

4 Demonstratieberekeningen

4.1 Inleiding

Kalibratie van het model maakte geen deel uit van de opdracht. Met het ongekalibreerde model zijn desalniettemin enkele berekeningen gemaakt om de huidige stand van zaken en de potentie voor toepassingen in de toekomst te demonstreren. Bij deze demonstratieberekeningen is onderscheid gemaakt tussen berekeningen (1) op trajectschaal én korte termijn (2 jaar), en (2) op riviertakkschaal én middellange termijn (15 jaar). Met de korte-termijnberekening op trajectschaal kan het tweedimensionale morfologische gedrag worden geanalyseerd. De middellange-termijnberekening op riviertakkschaal is uitgevoerd om de grootschalige morfologische ontwikkeling van bodemlengteprofielen te analyseren. Beide berekeningen zijn uitgevoerd met een constante afvoer van $2500 \text{ m}^3/\text{s}$. Ook is uiteindelijk met een ruimtelijk constante korrel diameter gewerkt, omdat aanvankelijke berekeningen met een ruimtelijke variërende korrel diameter problemen gaven in de combinatie met domeindecompositie en open randen (Paragraaf 4.2.2).

4.2 Trajectschaal en korte termijn

4.2.1 Verificatie voor traject van Pannerdensche Kop tot Nijmegen

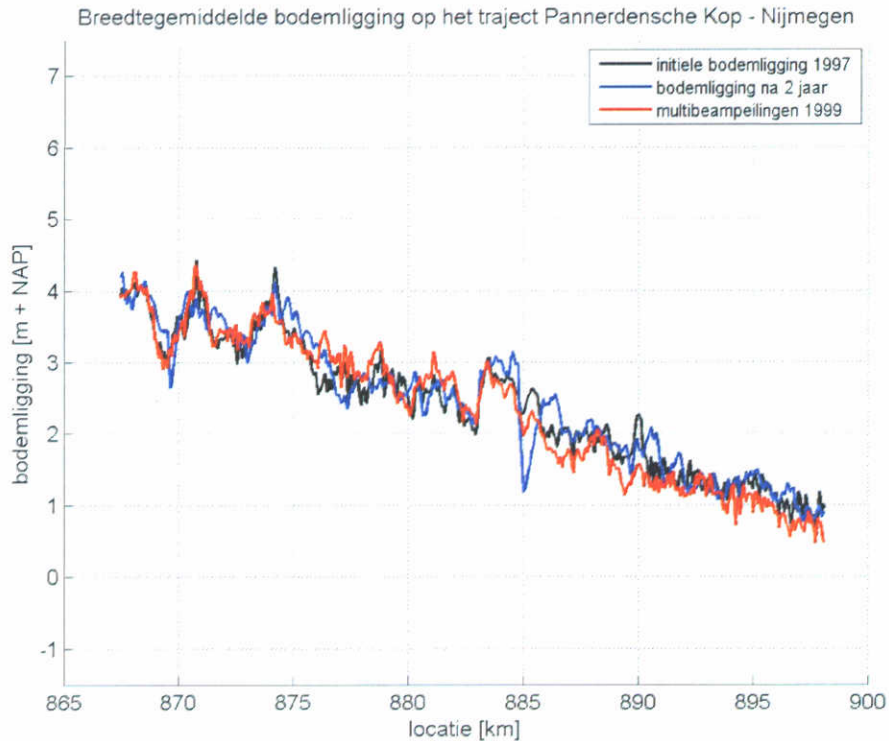
De korte-termijnberekening op trajectschaal is uitgevoerd voor de Waal tussen de Pannerdensche Kop en Nijmegen. De beginsituatie is gebaseerd op bodempeilingen uit 1997. Vervolgens zijn *multibeam* peilingen uit 1999 gebruikt om de berekende bodemligging na een periode van twee jaar te vergelijken met waarnemingen.

De initiële, de berekende en de na twee jaar gemeten bodemliggingen zijn weergegeven in de Figuren 4-1 tot en met 4-4. Figuur 4-1 toont lengteprofielen van over de breedte gemiddelde bodemliggingen. Figuren Figuur 4-2 en Figuur 4-3 geven de bijbehorende tweedimensionale topografieën. Figuur 4-4 toont lengteprofielen langs de linker oever (roosterlijn $m = 67$), het midden (roosterlijn $m = 72$) en de rechter oever van de rivier (roosterlijn $m = 78$).

De figuren laten zien dat het model zonder uitvoerige kalibratie al een goed beeld geeft van de tweedimensionale morfologie tussen de Pannerdensche Kop (km 867) en Nijmegen (km 885). Deze conclusie zou verdacht kunnen lijken, omdat ook de initiële bodemligging al heel dicht bij de uiteindelijke bodemligging ligt. De ervaring leert echter dat een model met verkeerde parameterinstellingen in deze situatie tot grote veranderingen zou leiden, zonder in staat te zijn om het gemeten bankenpatroon en de bochtprofielen te reproduceren.

Wel is het zo dat de modelberekeningen de erosiekuil direct benedenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen overschatten. Daarnaast is in de buitenbocht ter plaatse van km 870 een toename van de diepte te zien die in de peilingen niet is waargenomen.

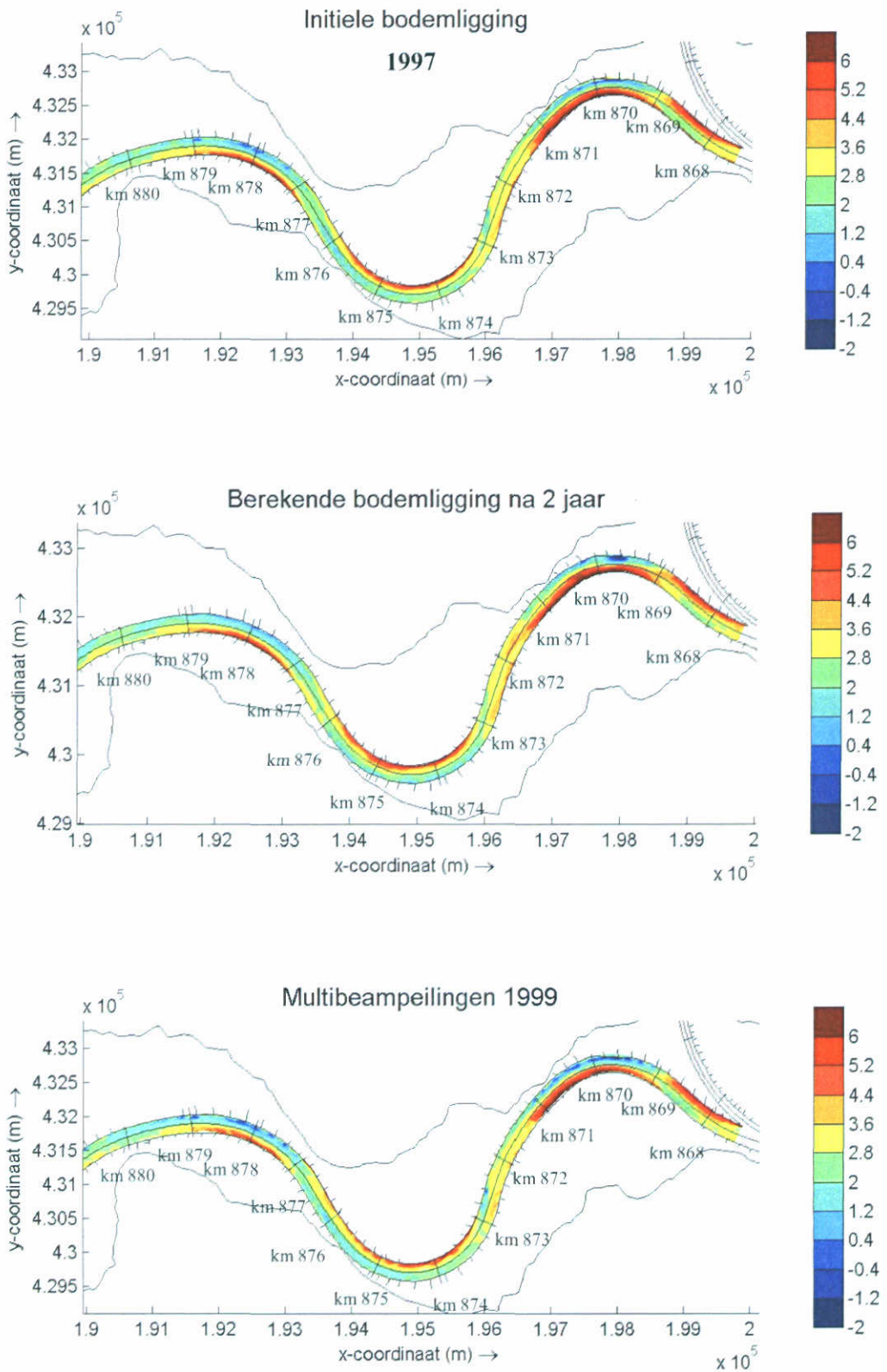
De Baseline-gegevens bevatten voor deze locatie een uitstulping in de normaallijn, maar deze uitstulping was bij de bouw van het model juist gecorrigeerd. Het vermoeden bestaat nu dat de correctie niet overal in de data is doorgevoerd. Dit zal nog nader gecontroleerd moeten worden.



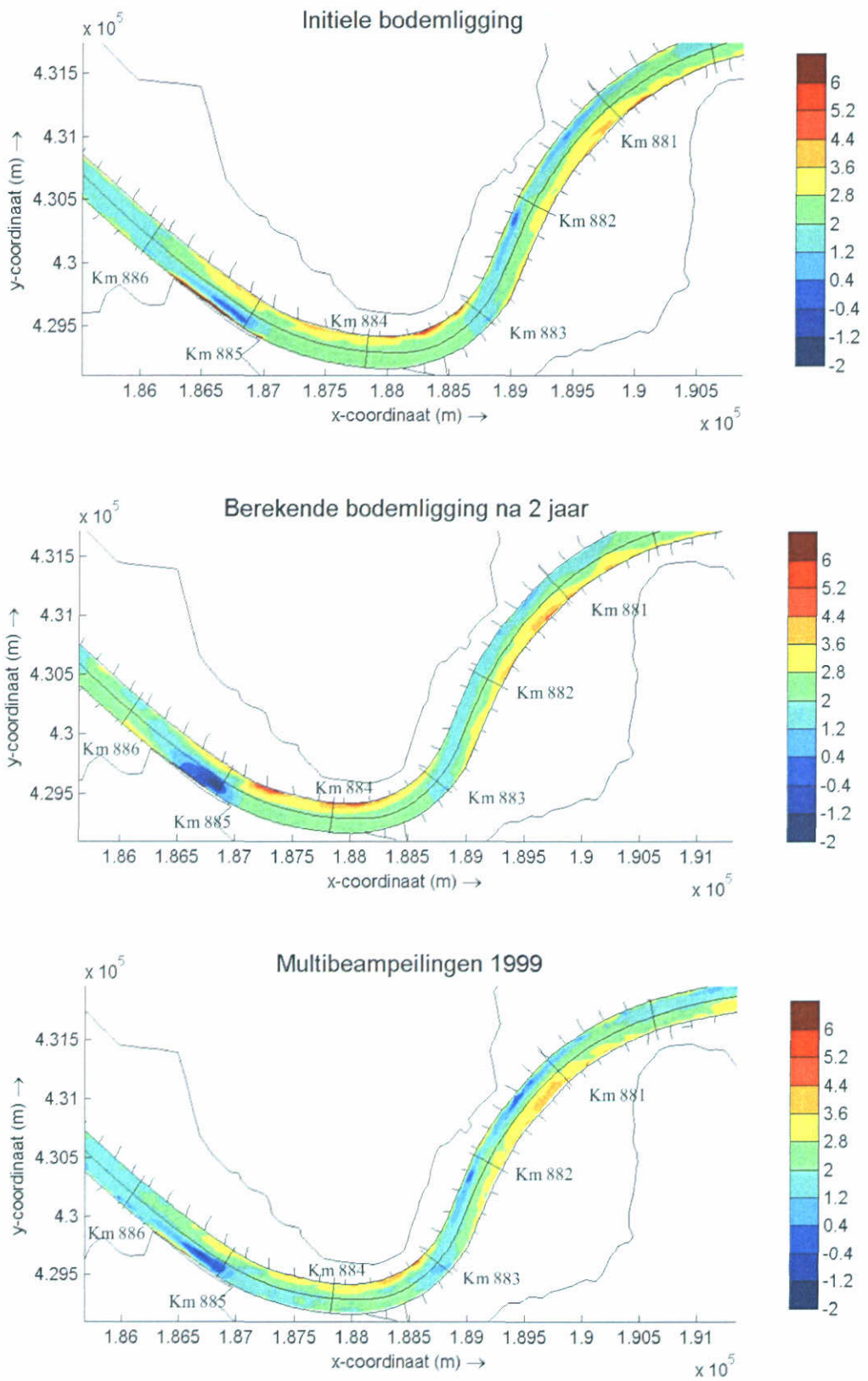
Figuur 4-1. Gemeten en berekende breedtegemiddelde bodemliggingen in de Waal tussen de Pannerdenschekop (km 867) en Nijmegen (km 885): initiële ligging op basis van peilingen in 1997, berekende ligging voor 1999 en ligging uit bodempeilingen in 1999.

4.2.2 Probleem met ruimtelijk variërende korreldiameter

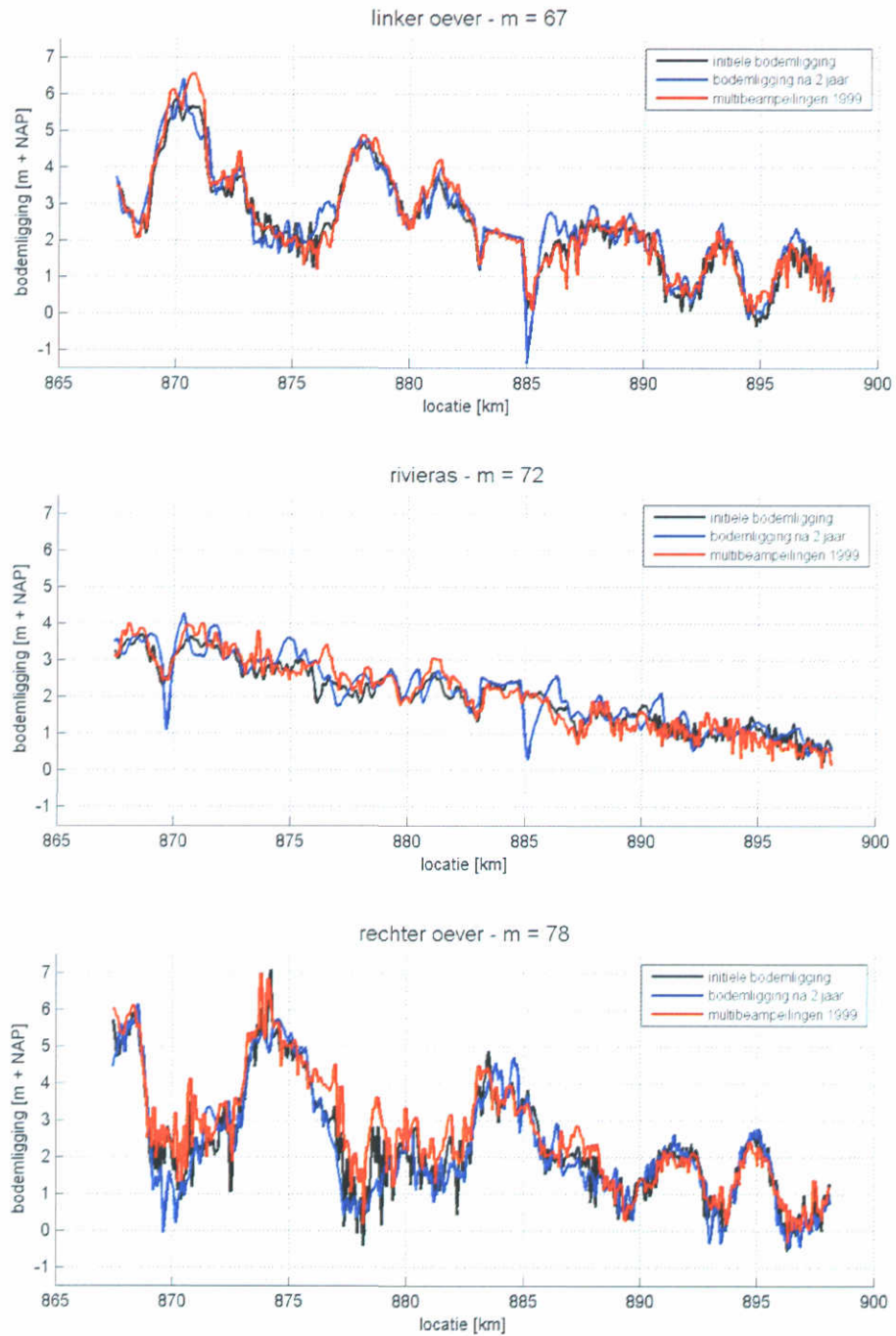
Aanvankelijk was het de bedoeling de modelberekeningen uit te voeren met een ruimtelijk variërende korreldiameter. De combinatie met domeindecompositie, open randen en een ruimtelijk variërende korreldiameter leidt echter nog tot problemen in de Delft3D-software. Figuur 4-5 laat zien dat de morfologische ontwikkeling op de Pannerdenschekop instabiel wordt en Figuur 4-6 laat zien dat de afvoerverdeling op de splitsing als gevolg van de instabiliteit aan de haal gaat. Daarom is hier vooralsnog een ruimtelijk constante korreldiameter aangehouden.



Figuur 4-2. Gemeten en berekende bodemtopografieën in de Waal tussen de Pannerdensche Kop en Nijmegen: initiële ligging op basis van peilingen in 1997, berekende ligging voor 1999 en ligging uit bodempeilingen in 1999.

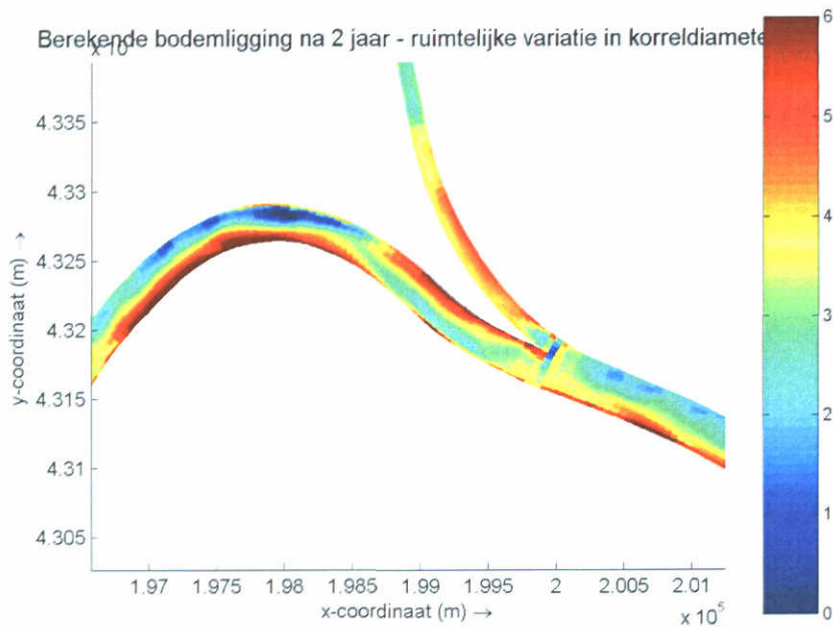


Figuur 4-3. Gemeten en berekende breedtegemiddelde bodemliggingen in de Waal bij Nijmegen: initiële ligging op basis van peilingen in 1997, berekende ligging voor 1999 en ligging uit bodempeilingen in 1999.

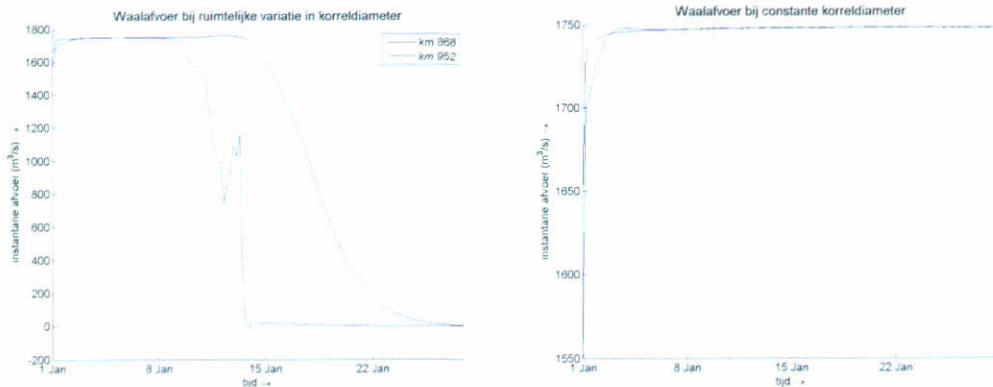


DVI model simulatie nr 16 (15.06.11 en 17u.13b.06r.2006)

Figuur 4.4. Langsprofilen langs linker oever (m = 67), rivieras (m = 72) en rechter oever (m = 78) van gemeten en berekende bodempliggingen in de Waal tussen de Pannerdensch Kop en Nijmegen: initiële ligging op basis van peilingen in 1997, berekende ligging voor 1999 en ligging uit bodempeilingen in 1999.



Figuur 4-5. Instabiliteiten in de berekende bodemligging op de Pannerdensch Kop na 2 jaar.



Figuur 4-6. Instantane Waalafvoer op de Pannerdensch Kop en de benedenrand van het deeldomein de Waal als functie van tijd bij een ruimtelijk variërende en een constante korreldiameter (NB de tijdindicatie is de hydraulische rekentijd, die met een morfologische factor 25 moet worden vermenigvuldigd om tot de morfologische rekentijd te komen).

4.2.3 Probleem met verschillende transportformule voor elk domein

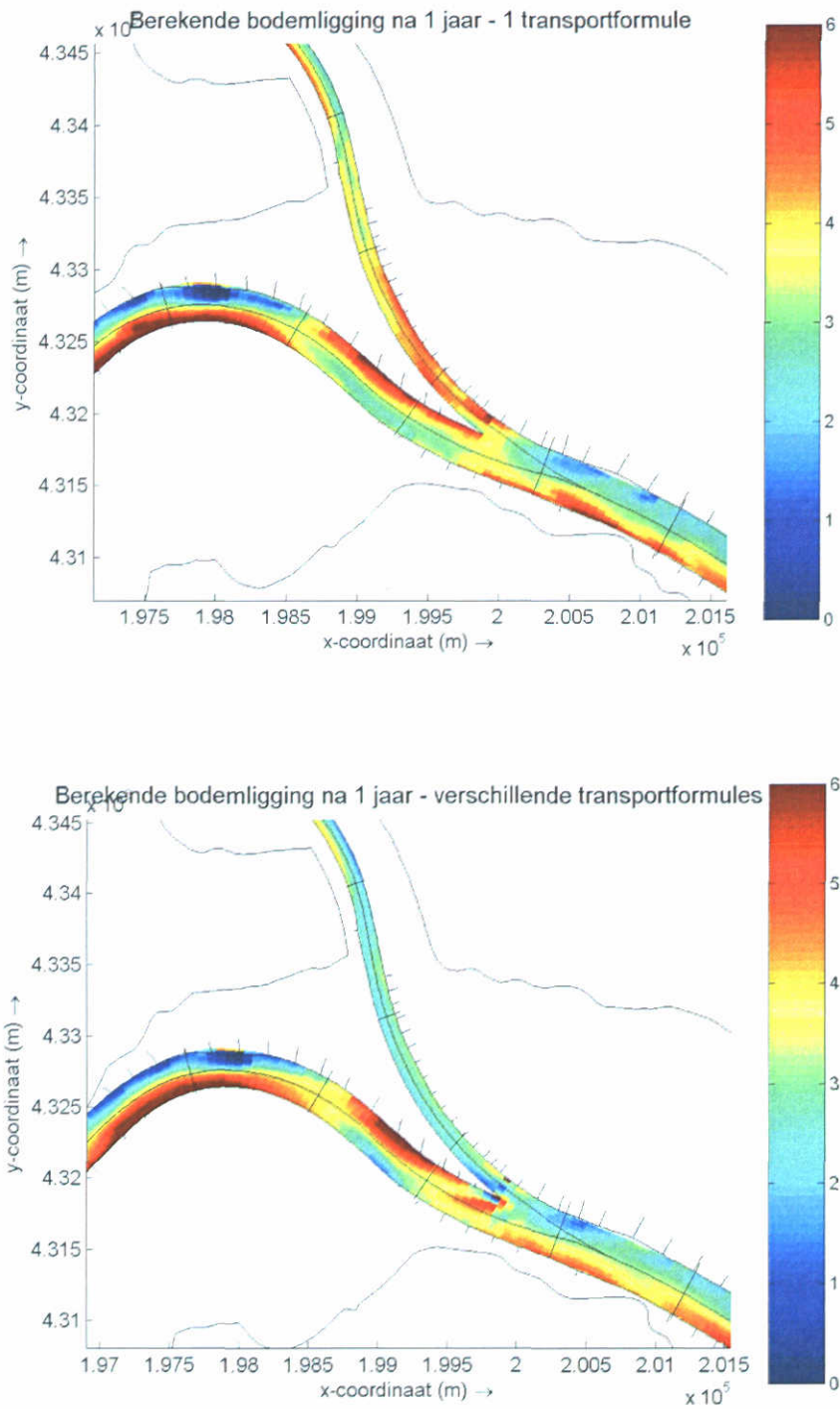
Vanuit fysisch oogpunt zou voor elk rekendomein een verschillende transportformule wenselijk zijn. Een bodemtransportformule met een drempelwaarde voor het begin van sedimentbeweging is vooral geschikt voor de Bovenrijn en het Pannerdensch Kanaal. Verder stroomafwaarts neemt de bijdrage van zwevend transport toe en is een totaaltransportformule meer van toepassing. De voor bodemtransport zeer geschikte formule van Meyer-Peter & Müller leidt voor situaties met aanzienlijk zwevend transport zelfs tot fysisch onrealistisch gedrag.

In een testberekening is voor ieder domein een verschillende transportformule gedefinieerd, waarbij de keuze van de transportformules gebaseerd is op eerder uitgevoerde studies. Voor de Waal en de IJssel is de originele transportformule van Meyer-Peter & Müller toegepast. Voor de Bovenrijn en het Pannerdensch Kanaal is deze formule in een aangepaste vorm toegepast, waarbij de kritieke waarde van de Shieldsparameter is verlaagd tot 0,02 respectievelijk 0,035. Op de Nederrijn is gebruik gemaakt van de formule van Engelund & Hansen. De instellingen van de transportformules per rekendomein zijn gespecificeerd in Tabel 4-1.

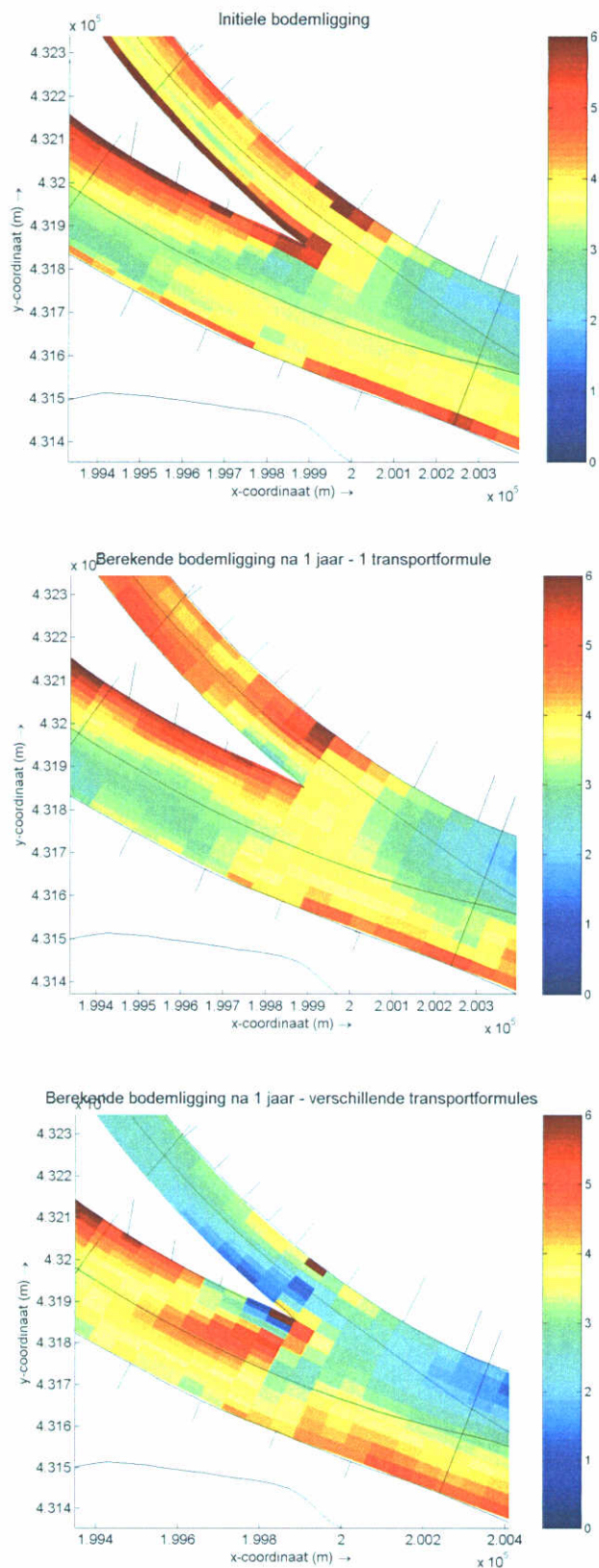
Tabel 4-1. Instellingen van transportformules per domein.

Domein	Kalibratie-factor (-)	Ribbel-factor (-)	Kritieke waarde Shields-parameter (-)	Mediane korrel-diameter (mm)	Bron
Bovenrijn	2,7	1	0,02	5,0	Baur & Jagers, 2002
Waal	3,2	0,7	0,047	1,5	Sloff & Jagers, 2004a
Pannerdensch Kanaal	10	0,7	0,035	2,0	Van Vuren & Sloff, 2006
IJssel	14,8	0,7	0,047	1,5	Van Vuren & Sloff, 2006
Nederrijn	0,93	-	-	1,0	Van Vuren & Sloff, 2006

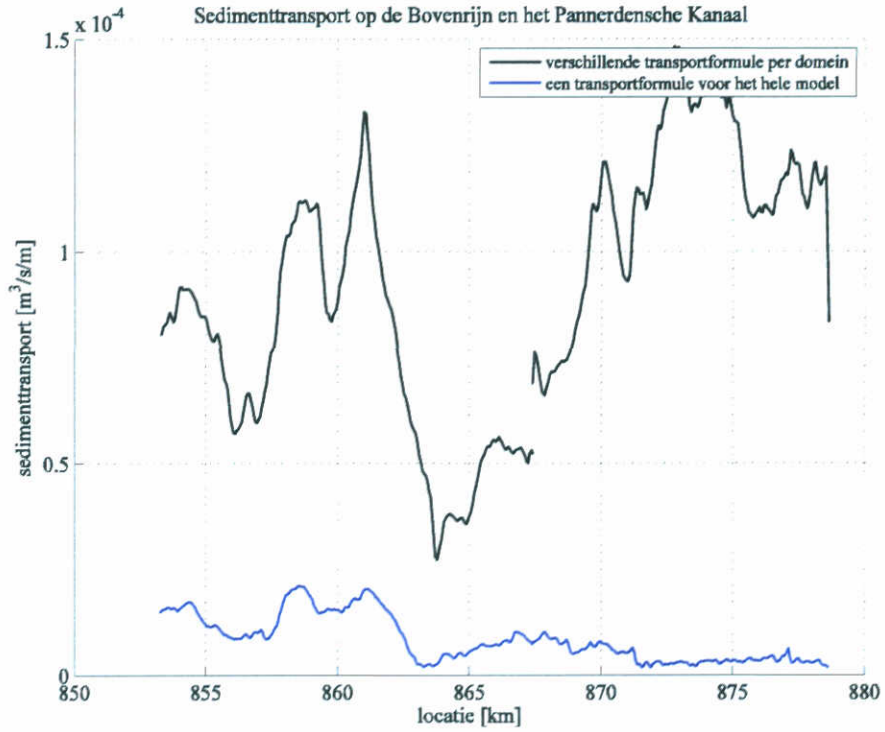
Figuur 4-7 en Figuur 4-8 tonen de morfologische ontwikkeling na een periode van 1 jaar voor een berekening met één transportformule voor het hele model en een berekening met verschillende transportformules voor ieder domein. Figuur 4-9 en Figuur 4-10 laten zien dat in een berekening met verschillende transportformules op de domeinranden grote gradiënten in de sedimenttransportcapaciteit ontstaan. Deze veroorzaken aanzanding en erosie die in werkelijkheid niet worden waargenomen. Op de overgang tussen de Bovenrijn en de Waal neemt de sedimenttransportcapaciteit af en zandt de rivier aan. In het Pannerdensch Kanaal neemt de transportcapaciteit juist aanzienlijk toe met erosie over vrijwel de gehele lengte van het kanaal als gevolg. In de berekening met één transportformule voor het hele model verandert de transportcapaciteit slechts geleidelijk. Dit geeft voorlopig de beste resultaten. Voor de toekomst voorzien we twee mogelijkheden om zonder abrupte overgangen op de domeinranden te komen tot gelijktijdige toepassing van een bodemtransportformule bovenstrooms en een totaaltransportformule benedenstrooms. De eerste mogelijkheid is de toepassing van een veralgemeniseerde transportformule, die voor de omstandigheden bovenstrooms een bodemtransportformule benadert en voor de omstandigheden benedenstrooms een totaaltransportformule. Een aanzet hiertoe is de formule van Sieben (cf. Sloff & Mosselman, 1998). De tweede mogelijkheid is het rekenen met gegradeerd sediment, waarbij voor elke sedimentfractie afzonderlijk een andere transportformule wordt gebruikt. Beide mogelijkheden vragen nog nader onderzoek.



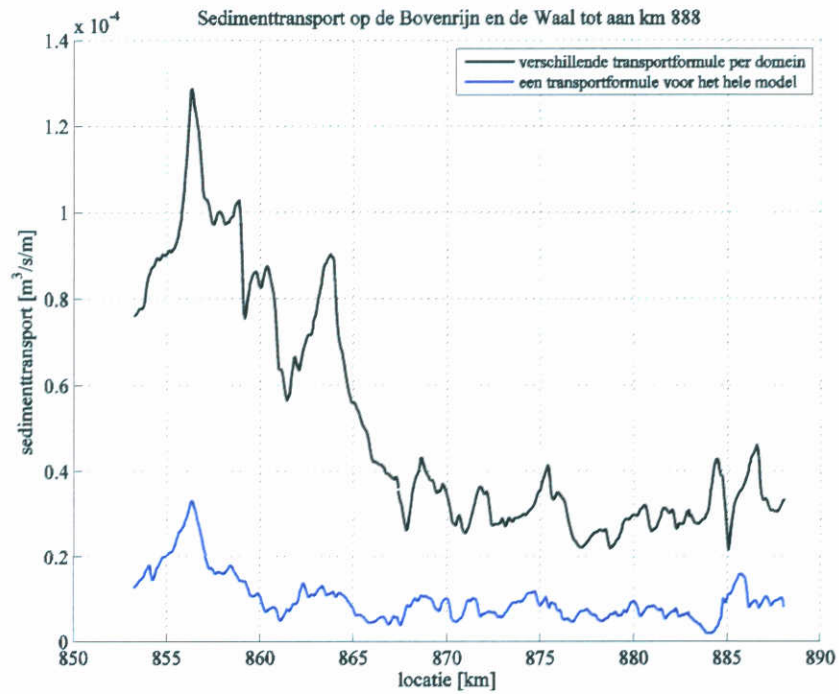
Figuur 4-7. Berekende bodemligging na 1 jaar op de Pannerdensche Kop met één transportformule voor het hele model en met verschillende transportformules voor ieder deeldomein.



Figuur 4-8. Initiële en berekende bodemligging na 1 jaar op de Pannerdenschekop met één transportformule voor het hele model en met verschillende transportformules voor ieder deeldomein.



Figuur 4-9. Langsprofiel van de sedimenttransportcapaciteit op de overgang van de Bovenrijn (roosterlijn $m = 46$) naar het Pannerdensch Kanaal (rivieras $m = 45$) met één transportformule voor het hele model en met verschillende transportformules voor ieder deeldomein.

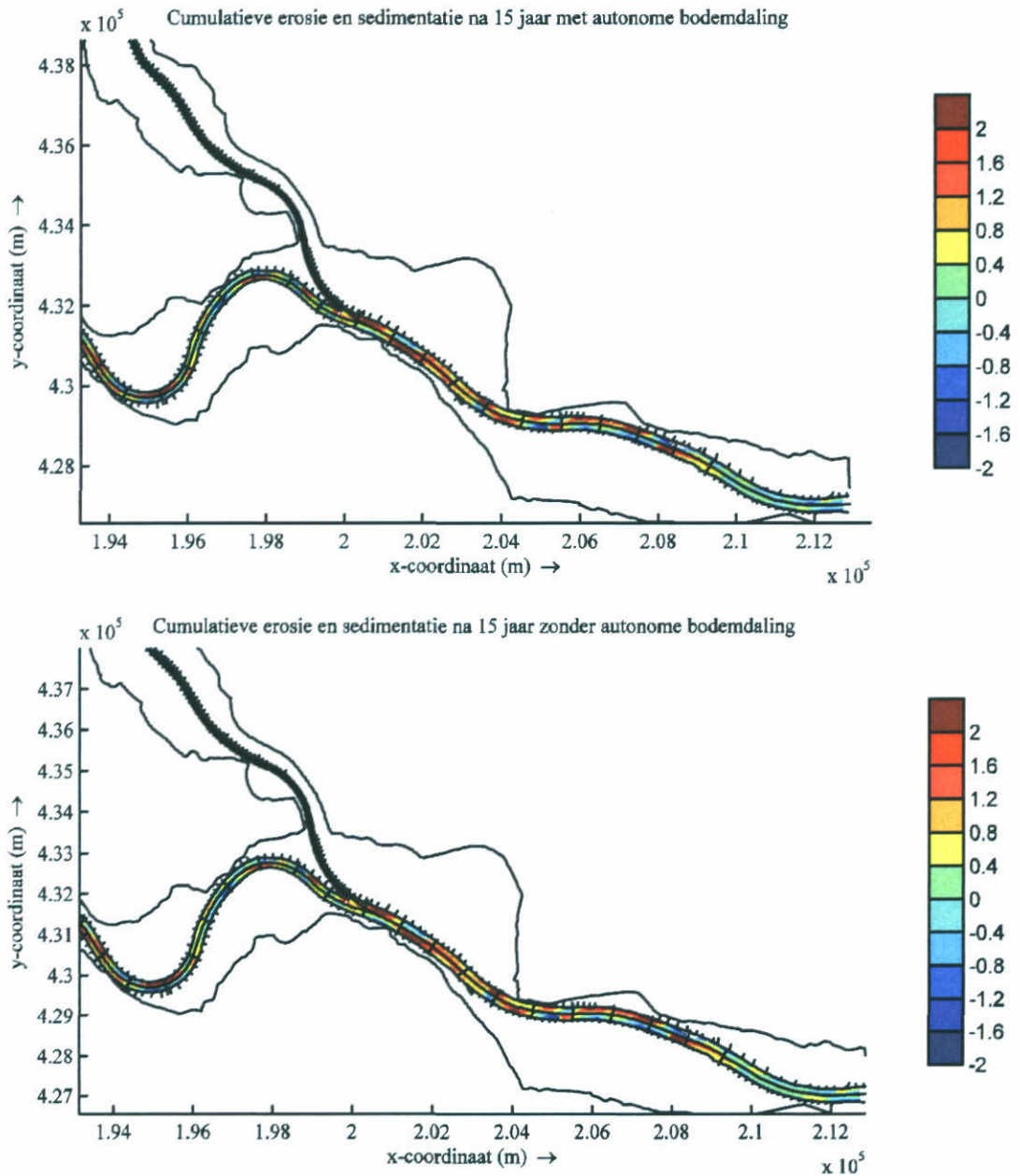


Figuur 4-10. Langsprofiel van de sedimenttransportcapaciteit op de overgang van de Bovenrijn (roosterlijn $m = 40$) naar de Waal (rivieras $m = 72$) met één transportformule voor het hele model en met verschillende transportformules voor ieder deeldomein.

4.3 Riviertakkenschaal en middellange termijn

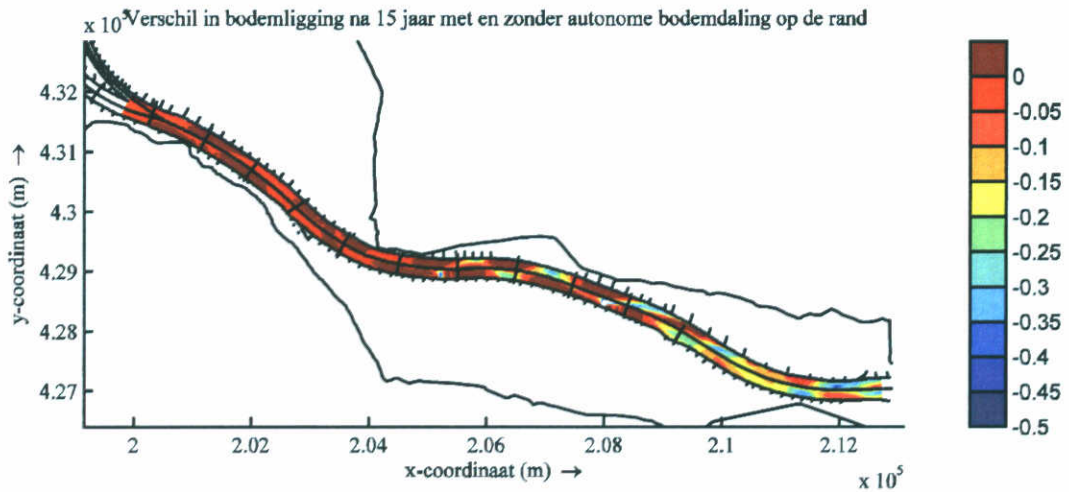
4.3.1 Ontwikkeling van het bodemlengteprofiel

Om het morfologische gedrag op de schaal van een riviertak en middellange termijn te analyseren is een periode van 15 jaar doorgerekend. Figuur 4-11 toont de cumulatieve erosie- en sedimentatiepatronen uit berekeningen met en zonder een autonome bodemdaling van 18,7 mm/jaar op de bovenrand van het model.



Figuur 4-11. Cumulatieve erosie- en sedimentatie na een periode van 15 jaar voor berekeningen met en zonder autonome bodemdaling.

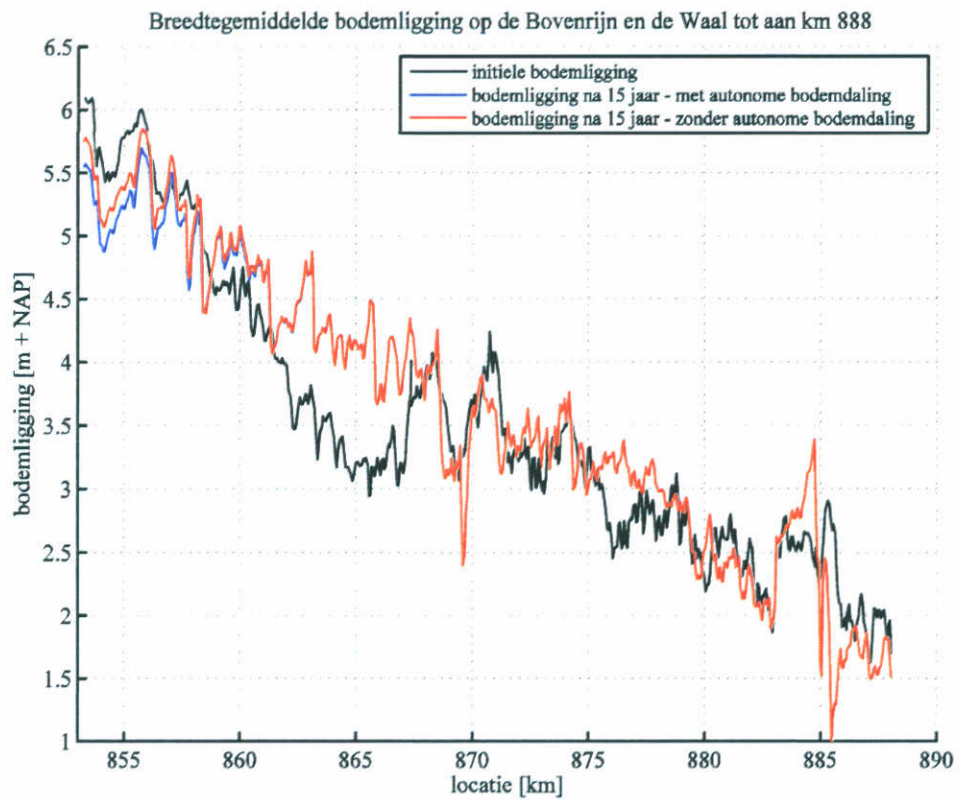
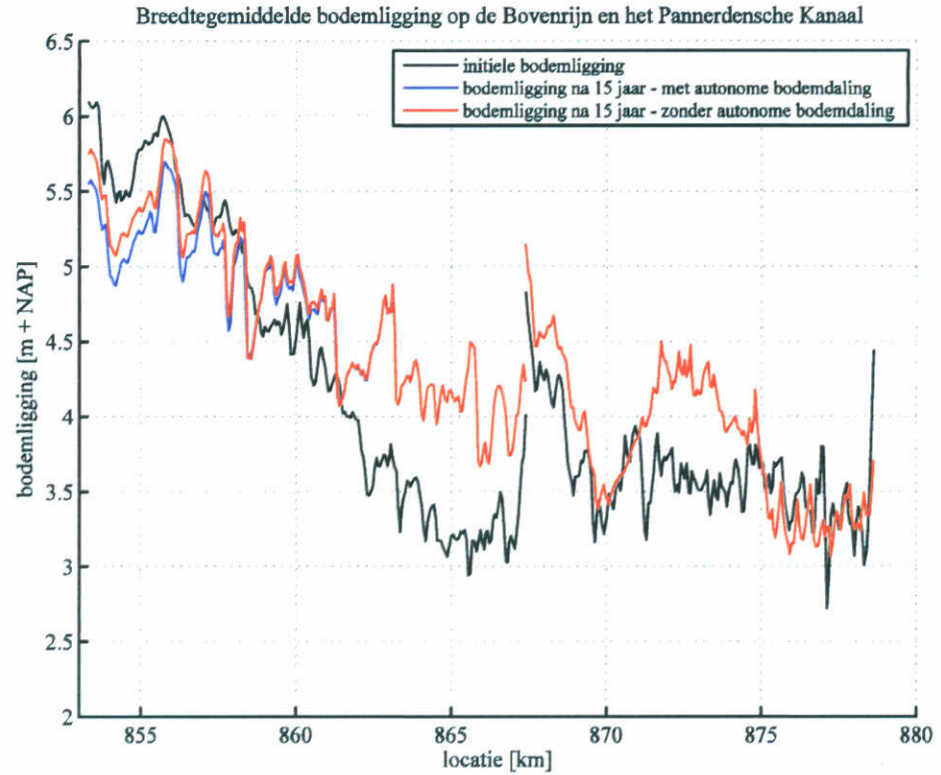
Het in Figuur 4-12 weergegeven verschil tussen de berekende bodemliggingen brengt het effect van de autonome bodemdaling aan het licht. Dit effect heeft zich na 15 jaar over een afstand van 8 km voortgeplant.



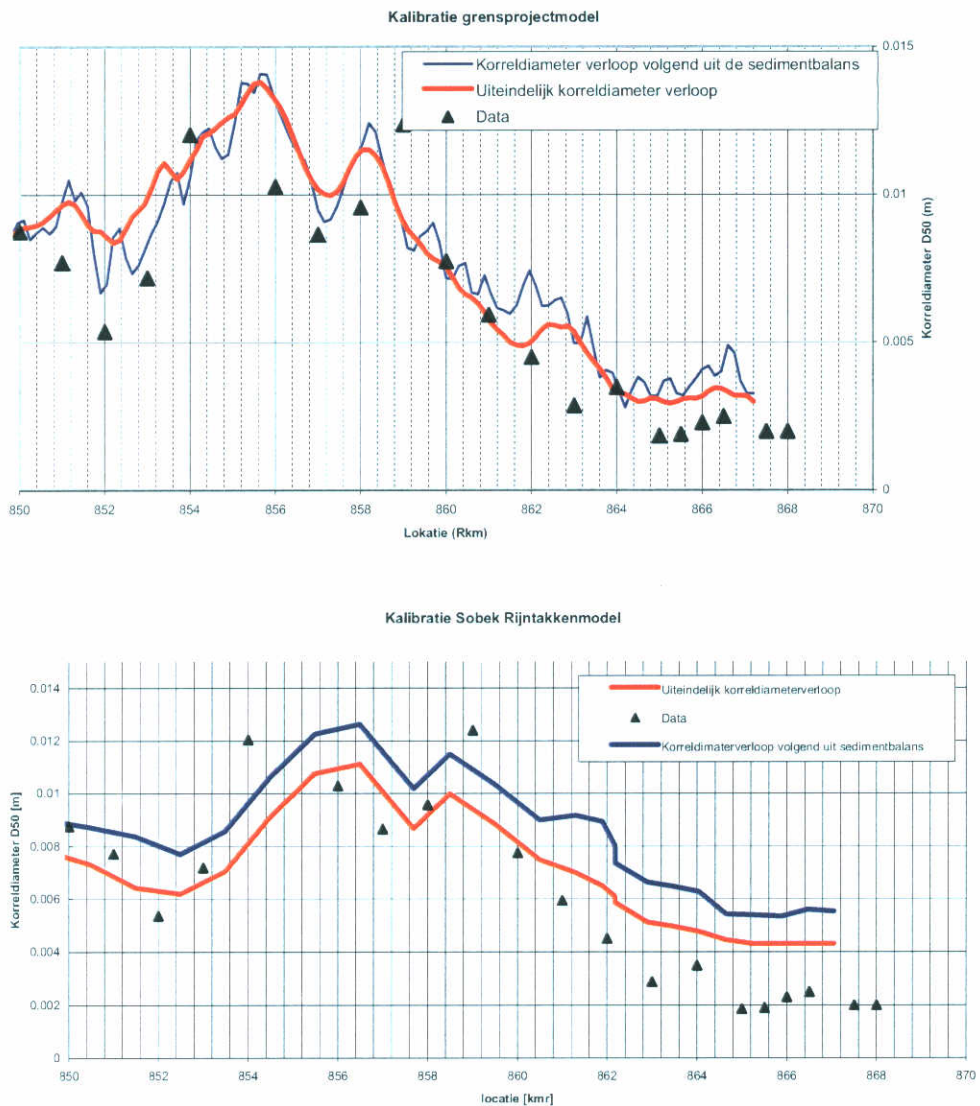
Figuur 4-12. Verschil in morfologische ontwikkeling na een periode van 15 jaar voor berekeningen met en zonder autonome bodemdaling.

Uit Figuur 4-11 blijkt dat er voor het Pannerdensch Kanaal en het benedenstroomse deel van de Bovenrijn flinke aanzanding wordt berekend. De breedtegemiddelde bodemlengteprofielen in Figuur 4-13 laten dit nog duidelijker zien.

Sieben (2005) heeft op basis van jaarlijkse dwarspeilingen de grootschalige trends in de bodemligging per traject van de Nederlandse Rijntakken beschreven. In de periode 1979-2000 is de bodem op de Bovenrijn en de Boven-Waal tot aan km 886 gemiddeld 3 cm/jaar gedaald. Op het Pannerdensch Kanaal was de daling gemiddeld 4 cm/jaar. De rekenresultaten laten zien dat het model zonder kalibratie geen goed beeld geeft van het grootschalige morfologische gedrag per riviertak. Een goede globale weergave van de grootschalige morfologie op middellange termijn vraagt een uitvoerige kalibratie, in tegenstelling tot de weergave van het tweedimensionale morfologische gedrag op korte termijn. Dit komt overeen met ervaringen uit eerdere studies. Het Grensprojectmodel is gekalibreerd op een tussen 1995 en 2000 opgetreden bodemdaling van 2,5 cm/jaar door de mediane korreldiameters zodanig af te regelen dat de gradiënten in transportcapaciteit volgens een sedimentbalans overeenstemmen met de jaarlijkse bodemveranderingen. Voor deze afregeling zijn de korreldiameters van plaats tot plaats gevarieerd binnen het bereik van de meetnauwkeurigheid en de op kleinere schalen waargenomen spreiding (Baur & Sloff, 2003). Dezelfde procedure is toegepast tijdens de kalibratie van een 1D SOBEK-model van de Nederlandse Rijntakken (Van Vuren & Sloff, 2006). Figuur 4-14 geeft voor beide studies het ruimtelijke korreldiameterverloop dat volgt uit de sedimentbalans alsmede het uiteindelijk toegepaste verloop. Een dergelijke kalibratie is ook vereist voor het nieuwe model.



Figuur 4-13. Breedtegemiddelde bodemligging aan het begin en aan het einde (na 15 jaar) van de modelberekening voor de situaties met en zonder autonome bodemdaling op de bovenrand.

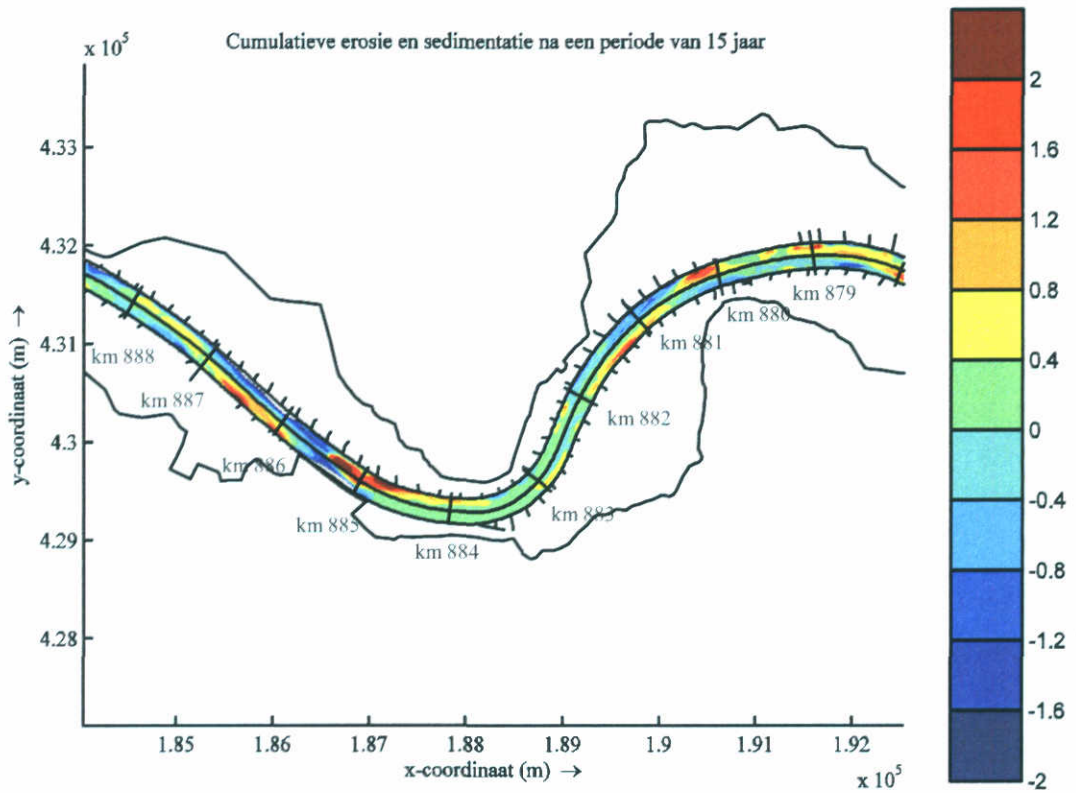


Figuur 4-14. Ruimtelijk verloop van korrel diameter in de Bovenrijn in het Delft3D-Grensprojectmodel en het SOBEK-Rijntakkenmodel.

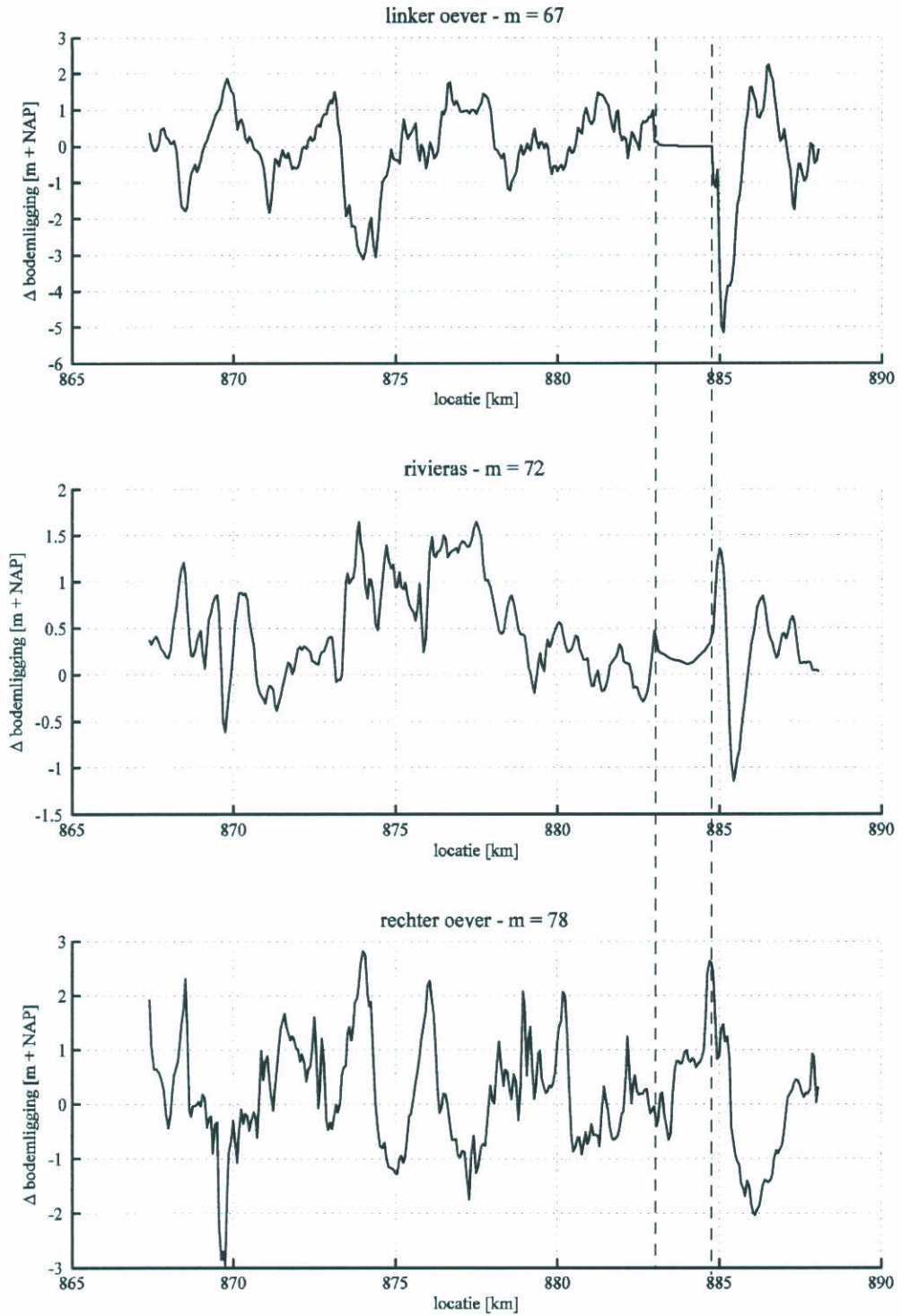
4.3.2 Duurzaamheid van vaste lagen

In de periode 1979-2000 is de rivierbodembodem op de Boven-Waal tot aan km 886 gemiddeld 3 cm/jaar gedaald. Als deze trend zich voortzet, ontstaan op termijn knelpunten in de vaarweg ter plaatse van de vaste lagen (Sieben et al, 2005). Deze lagen zakken immers niet mee en gaan drempels vormen die de vaardiepte beperken. Dit tast de duurzaamheid aan van vaste lagen als maatregel ter verbetering van de bevaarbaarheid. Analyse van deze duurzaamheid is een van de beoogde toepassingen van het hier ontwikkelde model. De voorgaande subparagraaf laat echter zien dat het model in de huidige, ongekalibreerde vorm geen goed beeld geeft van het grootschalige morfologische gedrag. Daarom kan in dit stadium met het model nog weinig worden gezegd over de duurzaamheid van de vaste lagen in de Waal.

Figuur 4-15 en Figuur 4-16 laten de bodemveranderingen op de Boven-Waal zien na een rekenperiode van 15 jaar. De op de rivier waargenomen bodemdaling van 3 cm/jaar wordt niet gereproduceerd, maar uit Figuur 4-15 blijkt wel duidelijk dat de vaste laag bij Nijmegen niet kan eroderen. Aangezien er over het gehele traject geen significante bodemdaling wordt voorspeld, vormt de vaste laag in deze berekening nog geen drempel in de rivier.



Figuur 4-15. Cumulatieve erosie- en sedimentatie rond vaste laag bij Nijmegen na een periode van 15 jaar.



DVR model simulatie nr 16 (14:58:25 on Tue 25th Apr 2006)

Figuur 4-16 Bodemverandering op Boven-Waal na een periode van 15 jaar (stippellijn geeft de positie van de vaste laag aan).

5 Advies voor vervolgtoepassing in planstudiefase

5.1 Stand van zaken

5.1.1 Huidig model

Door gebruik te maken van domeindecompositie, is voor het eerst een tweedimensionaal morfologisch riviermodel gerealiseerd dat zowel uiterwaarden als splitsingen omvat. Het model beslaat de Nederlandse Rijntakken van Lobith tot Doesburg, Driel en Werkendam, en laat zich in de toekomst op een consistente manier stroomopwaarts tot Duisburg doortrekken. De huidige versie is een tussenproduct van een voortschrijdende ontwikkeling die over een aantal jaren (binnen 2012) moet leiden tot een betrouwbaar en geavanceerd instrument waarmee het Nederlandse vaarwegbeleid afgestemd kan worden op trends en ingrepen in het traject Rijnmond-Duisburg op korte en lange termijn.

Het huidige model voorspelt een bodemligging waarbij bodemvormen op de schaal van de waterdiepte (duinen, kribkuilen, kribvlammen) zijn uitgemiddeld. In deze bodemdaling manifesteren zich het bodemlengteprofiel, bochtprofielen en banken. Het uiteindelijk beoogde instrument zal ook de kleinschaliger bodemfluctuaties ten gevolge van de bodemvormen op de schaal van de waterdiepte voorspellen. Uit de rekenresultaten kunnen karakteristieke vaarwegafmetingen en het benodigde onderhoud van de vaarweg worden afgeleid. Het uiteindelijk beoogde instrument zal ook de onzekerheidsmarge in de voorspelde vaarwegafmetingen aangeven.

Kribben en kribvakken worden zodanig geschematiseerd dat maatregelen die hier genomen worden op een realistische wijze kunnen worden doorgerekend. Kribben zijn in het model geschematiseerd als overlaten op lijnen van het rekenrooster. Verhogingen en verlagingen van de kribben kunnen daarmee rechtstreeks in het model worden aangebracht. Verlengingen en verkortingen van de kribben zijn echter alleen mogelijk in stappen die overeenkomen met de breedtes van rekencellen (10 tot 30 m). Het effect van verlengingen en verkortingen over tussenliggende afstanden moet benaderd worden door middel van equivalente verhogingen of verlagingen van de kribben. Een berekening van kribaanpassingen heeft met dit model alleen zin als de aanpassingen zijn toegepast op groepen van kribben, niet op afzonderlijke kribben.

De bodemsamenstelling is in dit model vast, maar kent wel variaties in langsrichting. In de toekomst kan de vaste bodemsamenstelling worden vervangen door procesbeschrijvingen voor menging en sortering van gegradeerd sediment. Verder kan het model rekenen met variërende afvoeren, vaste lagen en strategieën voor baggeren en storten.

5.1.2 Basing op Delft3D-3DMOR

Het model is gebaseerd op Delft3D-3DMOR, dat voorheen de naam “Delft3D Sed-online” droeg. Dit is een bewuste keuze, omdat met Delft3D-3DMOR domeindecompositie mogelijk is. Het oude Delft3D-MORSYS, waarin op zich veel riviermorfologische ervaring verwerkt is, heeft geen functionaliteit voor domeindecompositie en zal in de toekomst ook niet meer verder worden ontwikkeld en onderhouden. Delft3D-MORSYS is daarom minder geschikt. Ook WAQUA is minder geschikt. Weliswaar is beperkte morfologische functionaliteit aan WAQUA gekoppeld om de ruggegraat van een open-modelsysteem (*OMS backbone*) te testen (Jagers, 2005), maar volledige ontwikkeling van WAQUA in deze richting vereist een omvangrijke onderzoeksinspanning. WAQUA mist functionaliteit ten aanzien van de spiraalstroming (convectief effect op primaire stroming), de invloed van sediment op de stroming (alluviale ruwheid) en het efficiënt doorrekenen van afvoerhydrografen in langjarige berekeningen zoals deze is ontwikkeld als een van de innovatieve aspecten van deze opdracht (Yossef et al, 2006). Op termijn ligt het overigens wel in de bedoeling om te komen tot een enkel stromingspakket, omdat Rijkswaterstaat investeringen in OMS niet verloren wil laten gaan en omdat Rijkswaterstaat niet twee pakketten wil blijven onderhouden. Binnen Rijkswaterstaat is echter overeengekomen dat Duurzame Vaardiepte Rijndelta hiervan geen nadelen mag ondervinden. Een eventuele overstap wordt alleen gemaakt als WAQUA met de benodigde functionaliteit is uitgebreid en met goed gevolg een grondig verificatietraject heeft doorlopen. Daarnaast geldt dat de bestaande, voor hoogwaterberekeningen gebruikte WAQUA-roosters ongeschikt zijn voor morfologische berekeningen, omdat roosterlijnen niet de normaallijnen van het zomerbed volgen. Dat veroorzaakt onnauwkeurigheden en verstoringen in het morfologische gedrag”.

5.1.3 Toepasbaarheid in 2006

Hoewel het model nog niet geijkt is, kan het toch al op korte termijn toegepast worden voor enkele *case studies* van de Waal, omdat gebruik gemaakt is van de ervaringen uit eerdere Waalmodellen. Rijkswaterstaat heeft in 2006 al de volgende *case studies* van de Waal opgedragen (RIZA-overeenkomst RI-4651, bij WL | Delft Hydraulics bekend onder projectnummer Q4245):

1. Vergelijking tussen het huidige beheer op basis van een diepte van 2,5 m onder OLR met een toekomstig beheer op basis van een diepte van 2,8 m onder OLR, waarbij de bijbehorende toename van de beheersinspanning geschat wordt met behulp van de nieuwe functionaliteit voor baggeren en storten;
2. Studie naar een maatregel die de vaarweg onder OLR versmalt en boven OLR verruimt, waarbij de maatregel als een afvoeronttrekking geschematiseerd wordt;

3. Studie naar het effect van sedimentsuppletie. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de functionaliteit voor gegradeerd sediment. Daarbij wordt de verspreiding van het gesuppleerde materiaal gevolgd door hiervoor een aparte korrelgroottefractie te definiëren, die initieel overal 0% aanwezig is, behalve op de plek waar gedumpt wordt. Er worden dus geen individuele deeltjes gevolgd, maar hoeveelheden tracer materiaal in een formulering die past in het modelconcept. De implementatie van gegradeerd sediment in de 3DMOR-module laat het toe om fracties willekeurig ten opzichte van elkaar te definiëren. Fracties mogen aansluiten of overlappen. Daardoor is het mogelijk om bijvoorbeeld twee sedimentfracties met allebei diameters van 1 tot 2 mm te definiëren, de ene fractie als aanwezig bodemmateriaal, de andere als gesuppleerde tracer. Testen hebben aangetoond dat bij een initiële 50%-50% verdeling en identieke fractiekenmerken, de gelijke verdeling gedurende de gehele simulatie gehandhaafd blijft, zonder uitzuivering.

Deze *case studies* lijken goed uitvoerbaar met de huidige versie van het model.

5.2 Benodigde verdere ontwikkeling

5.2.1 Kalibratie en verificatie

De uitgevoerde demonstratieberekeningen geven redelijke resultaten, omdat gebruik gemaakt kon worden van ervaringen uit eerdere ijkingen van tweedimensionale morfologische riviermodellen van de Nederlandse Rijntakken. Kalibratie en verificatie maakten echter geen deel uit van de huidige opdracht. Deze zullen derhalve nog uitgevoerd moeten worden. Daarbij kan worden aangesloten op het rapport van Barneveld & Vermeer (2005) en op Hoofdstuk 6 in het rapport van Mosselman et al (2005).

5.2.2 Domeindecompositie

Hoewel testen van domeindecompositie goed verliepen bij toepassing op een experiment in de Olesengoot (Yossef et al, 2006), zijn bij toepassing in het 2D model van het splitsingspuntengebied toch nog problemen aan het licht gekomen. De problemen lijken samen te hangen met de uitwisseling van sediment tussen deeldomeinen, maar de precieze oorzaak is nog niet duidelijk. Dit zal in een vervolg nader uitgezocht en gerepareerd moeten worden.

5.2.3 Integratie van Duitse en Nederlandse coördinaten

Nederlandse rivierkundige gegevens zijn gebaseerd op Rijksdriehoekskoördinaten (RD-coördinaten), maar Duitse rivierkundige gegevens op Gauss-Krügercoördinaten. Er moet een methode gevonden worden om met gegevens uit twee coördinatensystemen te kunnen werken wanneer het model van de Nederlandse Rijntakken naar Duisburg wordt uitgebreid. De berekeningen moeten in ieder geval in slechts één systeem worden uitgevoerd. Het gaat derhalve vooral om methoden voor de voorbereiding en nabewerking van gegevens. Hiervoor zullen duidelijke procedures afgesproken moeten worden. De betrouwbaarheid en de nauwkeurigheid van algoritmes voor coördinaatconversie zullen aan de hand van testen onderzocht moeten worden.

5.2.4 Uitbreiding van functionaliteit

Tijdens de voorbereiding voor deze opdracht onderscheidde Mosselman et al (2005) verscheidene tekortkomingen in de functionaliteit van bestaande modellen en de kennis van de fysische processen die aan morfologische ontwikkelingen in de Rijntakken ten grondslag liggen. Deze tekortkomingen betroffen de parametrisatie van de spiraalstroming, het effect van bodemhellingen op sedimenttransport, het transport van sediment over vaste, niet-erodeerbare lagen, het transport van gegradeerd sediment, de ontwikkeling van duinen en bodemruwheid, formuleringen voor baggeren en storten, de keuze van een sedimenttransportformule en de beweging van water en zand over kribben, kades en overlaten. In de huidige opdracht zijn vorderingen gemaakt ten aanzien van het sedimenttransport over vaste lagen en de functionaliteit voor baggeren en storten. Voor kennisontwikkeling ten aanzien van het effect van bodemhellingen op sedimenttransport heeft de Technische Universiteit Delft op 17 februari 2006 een vierjarig onderzoeksvoorstel ingediend bij STW. Voor gegradeerd sediment waren klassieke modelformuleringen al ingebouwd en wordt de ontwikkeling van verbeterde modelformuleringen aan de Universiteit Twente door WL | Delft Hydraulics nauw gevolgd en ondersteund. Onderzoek naar de ontwikkeling van duinen en bodemruwheid vindt plaats in het programma Rough Water aan de Universiteit Twente, in het Delft Cluster onderzoek naar de wiskundige modellering van duinen onder water aan de Technische Universiteit Delft en in de door Rijkswaterstaat RIZA aan WL | Delft Hydraulics verleende opdracht voor de inbouw van een duinhoogtevoorspeller in Delft3D. Een parallelle studie met een cendimensionaal morfologisch model van de Rijntakken vanaf Andernach (van Vuren & Sloff, 2006) heeft het inzicht in de benodigde parameterinstellingen van sedimenttransportformules verdiept, maar heeft nog geen formule geleverd die over de gehele Rijn in Duitsland en Nederland kan worden toegepast.

5.2.5 Bodemlengteprofielen met zand en grind

Rivieren kennen meestal een vrij abrupte overgang van een grindbodem op een zandbodem, die gepaard gaat met een knik in het bodemlengteprofiel. Een dergelijke verhangknik bevindt zich ook in de Bovenrijn. Ondanks studies als die van Hoey & Ferguson (1994), Cui et al (1996) en Murillo-Muñoz (1998), wordt nog steeds niet goed begrepen waardoor dit markante verschijnsel precies optreedt en in welke mate de huidige modelconcepten dit goed kunnen reproduceren. Geadviseerd wordt om hieraan in de verdere ontwikkeling speciale aandacht te schenken.

5.2.6 Tijdhuishouding in de berekeningen

In tegenstelling tot de situatie in het oude Delft3D-MORSYS, zijn de berekeningen van waterbeweging en morfologie in het nieuwe Delft3D-3DMOR nauw verstrengeld. Om toch recht te doen aan het verschil in de tijdschalen waarop waterbeweging en morfologie veranderen, beschikt Delft3D-3DMOR over een morfologische factor (Roelvink, 2006). Deze is oorspronkelijk ontwikkeld voor toepassingen op getijdewateren. Voor toepassingen op rivieren is nog niet volledig duidelijk hoe met deze morfologische factor moet worden omgegaan. Voor langjarige simulaties met een quasi-stationaire aanpak worden geen problemen verwacht.

Voor simulaties van individuele hoogwaters rijst echter de vraag hoe de randvoorwaarden hierbij op passende wijze kunnen worden opgegeven. Aanbevolen wordt om dit in een korte bureaustudie nader te analyseren.

5.3 Technische aspecten

5.3.1 Rekentijden

De demonstratieberekening met het nieuwe 2D model had 19 uur nodig om een periode van een jaar te simuleren. Het doorrekenen van een periode van 50 jaar neemt dus naar verwachting 6 weken in beslag. Dit is langer dan Mosselman et al (2005) schatten op basis van ervaringen met een model voor Dubai. Verkorting van de rekestijd verdient derhalve aandacht. Binnen deze opdracht zijn hiervoor twee innovaties uitgewerkt (Yossef et al, 2006). De eerste innovatie betreft een efficiëntere afhandeling van variërende afvoeren. Deze werkt goed, maar kon geen rol spelen in de demonstratieberekening met constante afvoer. De tweede innovatie betreft het gebruik van lokale grovere deeldomeinen. Deze blijken echter geen tijdswinst op te leveren. Voor de toekomst zijn er de volgende perspectieven om de rekestijden verder te reduceren:

1. Vertrouwen op verdere voortdoring van de geldigheid van de Wet van Moore, die stelt dat de rekenkracht van computers elke 18 maanden verdubbelt. Dit betekent een factor 4 over een periode van 3 jaar. Op basis van deze (in de afgelopen 30 jaar geldig gebleken) wet, valt dus te verwachten dat het doorrekenen van een periode van 50 jaar in 2009 anderhalve week in beslag zal nemen.
2. Parallel rekenen door voor elk deeldomein een aparte processor te gebruiken. De huidige opzet met domeindecompositie maakt het model hiervoor bij uitstek geschikt. Op dit moment zijn de rekestijden voor het deeldomein van de Waal het grootst. Verdere optimalisaties zijn dan alleen effectief als ze voor de Waal worden uitgevoerd. Bij andere deeldomeinen vergroten ze de wachttijden zonder de totale rekestijd te beïnvloeden. Te overwegen valt om het deeldomein van de Waal in twee of drie stukken te knippen, zodat alle deeldomeinen ongeveer dezelfde rekestijden vergen. Dat verkort de rekestijden en zorgt ervoor dat de processoren optimaal benut worden.
3. Het model aanpassen aan het doel van specifieke toepassingen. Voor kortetermijnberekeningen van het effect van ingrepen kan met een enkel deeldomein of zelfs een stuk uit een deeldomein volstaan worden. Voor grootschalig gedrag op lange termijn zijn daarentegen tweedimensionale details minder belangrijk en kunnen de ontwikkelingen van het bodemlengteprofiel met een grover rekenrooster berekend worden. Het totale model vormt voor beide gevallen een goed uitgangspunt. Het isoleren van een enkel deeldomein of een stuk van een deeldomein is betrekkelijk eenvoudig. Voor de vergroving van het rooster zou een procedure ontwikkeld moeten worden, waarbij er onder meer voor gezorgd moet worden dat de juiste verdeling van afvoeren over zomer- en winterbed behouden blijft. Het in deze opdracht ontwikkelde hulpmiddel voor grootschalige kalibratie (Yossef et al, 2006) kan daarbij gebruikt worden.

Voor een goede weergave van tweedimensionale bodemtopografieën in het zomerbed is de ervaring dat het aantal rekencellen over de breedte van het zomerbed niet kleiner mag zijn dan zes. Beperkt de interesse zich echter tot louter het eendimensionale gedrag ("SOBEK-plus"), dan is wellicht een verdere reductie mogelijk. In dit licht zijn drie schalen te onderscheiden: een trajectschaal (Duisburg-Werkendam) voor simulaties van 50 tot 100 jaar, een riviertschaal (b.v. Niederrhein, splitsingspuntengebied of Waal) voor simulaties van 15 jaar en een bochtschaal van enkele kilometers voor simulaties van 2 tot 5 jaar. Voor de trajectschaal zou "SOBEK-plus" van toepassing zijn. Een nader onderzoek zou moeten uitwijzen hoever het aantal rekencellen over de breedte van het zomerbed gereduceerd kan worden zonder het eendimensionale gedrag te verstoren. Op de riviertschaal zouden delen van het in deze opdracht ontwikkelde rekenrooster gebruikt worden. Voor de bochtschaal zou dit rekenrooster zelfs verder verfijnd kunnen worden om maatregelen optimaal te ontwerpen.

4. Uitwijken naar supercomputers bij een extern rekencentrum. Rond 1995 deed WL | Delft Hydraulics dat routinematig, omdat een voor het desbetreffende systeem geschikte gecompileerde versie van TRISULA en RIVCOM (= voorloper van DELFT3D-MORSYS) op het systeem aanwezig was. Door de toegenomen rekenkracht van werkstations en PCs werden de berekeningen na 1995 echter steeds *in-house* gemaakt. Voor berekeningen op een externe supercomputer zou het huidige model eerst voor het andere systeem gecompileerd moeten worden, een actie die enige inspanning vergt omdat daarbij gewoonlijk kleine problemen optreden die opgelost moeten worden. Naar verwachting blijft een snelle Windows-machine met parallelle processoren voorlopig te verkiezen boven een externe computer.
5. Optimaliseren van de afwisseling van waterbewegingsstappen en morfologische stappen in het rekenschema. Voor totaaltransportformules (bodemtransport en zwevend transport zonder advection-diffusievergelijking) lijkt de daarvoor benodigde aanpak van de code gering te zijn. Voor zwevend transport met advection en diffusie lijkt een dergelijke optimalisatie echter niet haalbaar, vanwege de sterkere koppeling tussen de berekeningen van waterbeweging en transport.
6. Bestuderen of de *Mormerge*-aanpak kan worden toegepast, waarbij het parallel rekenen niet alleen wordt toegepast voor verschillende domeinen maar ook voor verschillende periodes uit het tijdsverloop (Roelvink, 2006).

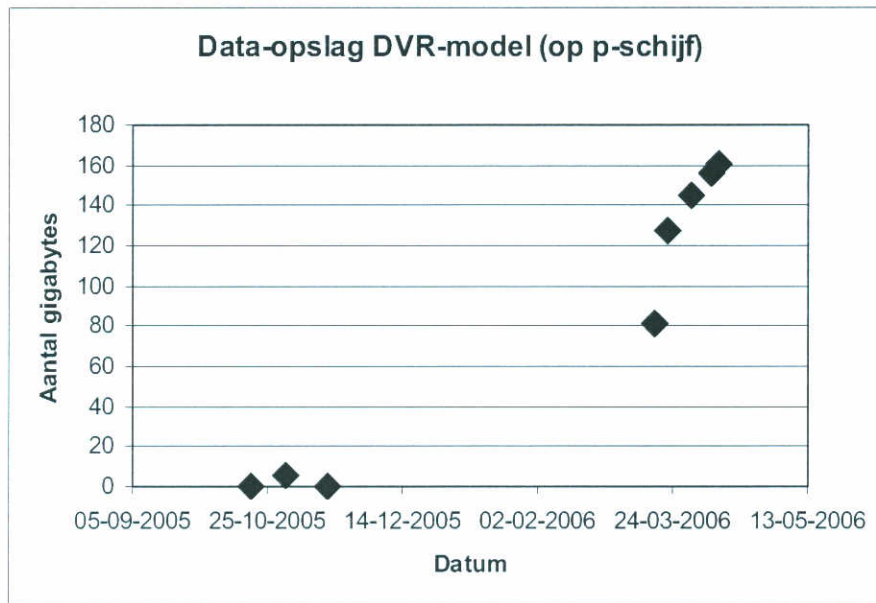
Voor toepassing op korte termijn in de planstudiefase wordt geadviseerd om rekestijden te reduceren door over te schakelen op parallel rekenen (punt 2) en door berekeningen van het grootschalige gedrag op lange termijn uit te voeren met een grover rooster (punt 3). Tijdens de uitvoering van de opdracht is overigens al aan de parallelisatie gewerkt, maar dit heeft vooralsnog niet tot succes geleid.

5.3.2 Data-opslag

Met grote modellen als in deze opdracht gaan grote hoeveelheden data gemoeid. Dit zou eventueel kunnen leiden tot substantiële kosten. Bij WL | Delft Hydraulics geldt hiervoor een maandtarief van 5 euro per gigabyte. Opslag op losse harde schijven lijkt goedkoper, maar ontbeert de frequente automatische *backups* die van de centrale netwerkschijven gemaakt worden.

Dan zijn extra metingen en discipline nodig om met dezelfde regelmaat *backups* te maken. Figuur 5-1 laat zien dat in de eindfase van het project circa 150 Gb aan data in gebruik was.

Dit komt overeen met een tarief van $150 \times 5 = 750$ euro/maand. Een dergelijk bedrag is niet te verwaarlozen, maar ook niet uitgesproken hoog. Data-opslag vormt derhalve geen belemmering.



Figuur 5-1. Monitoring van data-opslag in loop van project.

6 Conclusies

Een eerste tweedimensionaal morfologisch model is gerealiseerd voor de Nederlandse Rijntakken van Lobith tot Doesburg, Driel en Werkendam. Het is een tussenproduct op weg naar een totaalmodel dat gebruikt kan worden als instrument voor voorspelling van morfologische reacties op ingrepen, diagnose van historische trends in vaarwegdimensies en prognose van toekomstige trends. Het tussenproduct dient (i) als test van een aantal innovatieve aspecten (Yossef et al, 2006), (ii) als voorlopig middel bij de definitie van veldproeven en (iii) als gereedschap voor de verdere kennisontwikkeling.

Zonder kalibratie zijn met het model enkele demonstratieberekeningen gemaakt. Het blijkt dat de tweedimensionale morfologie al behoorlijk goed gereproduceerd wordt, maar dat de eendimensionale ontwikkeling van bodemlengteprofielen nog nadere kalibratie vergt. Dat de tweedimensionale morfologie zo goed gaat, is te danken aan de ervaringen uit eerdere morfologische modellen van de Waal.

Gebleken is dat berekeningen met een ruimtelijke variërende korreldiameter nog problemen opleveren in de combinatie met domeindecompositie en open randen. De implementatie van domeindecompositie zal daarom nog robuuster gemaakt moeten worden, zowel op dit punt als op de door Yossef et al (2006) geconstateerde tekortkomingen.

Voor toepassing op korte termijn in de planstudiefase wordt geadviseerd om rekestijden te reduceren door over te schakelen op parallel rekenen (punt 2) en door berekeningen van het grootschalige gedrag op lange termijn uit te voeren met een grover rooster (punt 3). De huidige opzet met domeindecompositie maakt het model al bij uitstek geschikt voor parallel rekenen. De huidige verdeling in deeldomeinen valt nog te optimaliseren door de Waal in twee of drie stukken te knippen. Dat verkort de rekestijden en zorgt ervoor dat de processoren optimaal benut worden. Voor de vergroving van het rooster zou een procedure ontwikkeld moeten worden, waarbij er onder meer voor gezorgd moet worden dat de juiste verdeling van afvoeren over zomer- en winterbed behouden blijft. Het in deze opdracht ontwikkelde hulpmiddel voor grootschalige kalibratie (Yossef et al, 2006) kan daarbij zijn dienst bewijzen.

7 Literatuurverwijzingen

- Barneveld, H.J. & K. Vermeer (2005), Voorspelinstrument duurzame vaarweg; Calibratie en verificatie. Rapport PR956.10, HKV Lijn in Water.
- Baur, T & H. R. A. Jagers (2002), Grensproject Bovenrijn/Grenzprojekt Niederrhein; Model construction, calibration and verification. Rapport Q2496.00, WL | Delft Hydraulics.
- Baur, T., H. Havinga & D. Abel (2002), Internationale Zusammenarbeit bei der Planung von Regulierungsmaßnahmen am Niederrhein: Durchführung flussmorphologischer Simulationen. HANSA International Maritime Journal, 10/2002, pp.51-56.
- Baur, T. & K. Sloff (2003), Calibration 2D model Rijn. Memo ZWS0471/Q2496/am, WL | Delft Hydraulics.
- Cui, Y., G. Parker & C. Paola (1996), Numerical simulation of aggradation and downstream fining. J. Hydr. Res., IAHR, Vol.34, No.2, pp.185-204.
- Engelund, F. & E. Hansen (1967), A monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk Forlag, Copenhagen.
- Hoey, T.B. & R. Ferguson (1994), Numerical simulation of downstream fining by selective transport in gravel bed rivers: Model development and illustration. Water Resources Res., AGU, Vol.30, No.7, pp.2251-2260.
- Klopstra, D., H. J. Barneveld, J. van Noortwijk, & E.H. van Velzen (1997), Analytical model for hydraulic roughness of submerged vegetation. Proc. 27th Congress IAHR, San Francisco, Vol. A., pp.775-780.
- Jagers, H.R.A. (2005), WAQUA-Delft3D online morfologie koppeling. Rapport M3822, WL | Delft Hydraulics.
- Meyer-Peter, E. & R. Müller (1948), Formulas for bed-load transport. Proc. 2nd Congress IAHR, Stockholm, Paper No.2, pp.39-64.
- Mosselman, E. (2005), Basic equations for sediment transport in CFD for fluvial morphodynamics. Chapter 4 in: Computational Fluid Dynamics; Applications in environmental hydraulics, Eds. P.D. Bates, S.N. Lane & R.I. Ferguson, Wiley, pp.71-89.
- Mosselman, E., C.J. Sloff & H.R.A. Jagers (2005), Voorspelinstrument duurzame vaarweg; Voorbereiding. Rapport Q3963.00, WL | Delft Hydraulics.
- Murillo-Muñoz, R.E. (1998), Downstream fining of sediments in the Meuse River. M.Sc. Thesis H.H.341, IHE, Delft.
- Rijkswaterstaat (1993), Toekomstvisie Waal Hoofdtransportas. Nota III, Eindrapportage, Rijkswaterstaat Directie Gelderland, Projectbureau Waal.
- Roelvink, J.A. (2006), Coastal morphodynamic evolution techniques. Coastal Engrg., Vol.53, pp.277-287.
- Sieben, J. (2004), Morfologische effecten van herinrichting; PKB ruimte voor de rivier. Werkdocument 2005.044x, Rijkswaterstaat-RIZA.
- Sieben, J., M.H.I. Schropp & E.H. van Velzen (2005), Voorspelinstrument duurzame vaarweg; Functioneel ontwerp. Werkdocument 2005.085x, Rijkswaterstaat RIZA.
- Sloff, C.J. & E. Mosselman (1998), Voorbereiding ijking Rijntakkenmodel. Report Q2460, WL | Delft Hydraulics. November 1998.
- Sloff, C.J. & H. R. A. Jagers (2004a), 2D morfologische berekeningen Lent. Rapport Q3560.00, WL | Delft Hydraulics.
- Sloff, C.J. & H. R. A. Jagers (2004b), Tweedimensionale bodemveranderingen in de vaarweg van de Waal. Rapport Q3811.00, WL | Delft Hydraulics.
- Smedes, R.H. (2005), Toekomstige Waal; Duurzame vaardiepte Rijndelta. Projectplan, Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland.
- Struiksmā, N., K.W. Olesen, C. Flokstra & H.J. de Vriend (1985), Bed deformation in curved alluvial channels. Journal of Hydraulic Research, Vol.23, No.1, pp.57-79.
- Talmon, A.M., M.C.L.M. van Mierlo & N. Struiksmā, (1995). Laboratory measurements of the direction of sediment transport on tranverse alluvial-bed slopes. Journal of Hydraulic Research, Vol.33, No.4, pp.495-517.

- Van Vuren, S. & C.J. Sloff (2006), Verbetering 1-D Rijntakkenmodel vanaf Andernach. Rapport Q4130.00, WL | Delft Hydraulics.
- Yossef, M. F. M. & H. R. A. Jagers (2006), Delft3D berekeningen Heesseltsche Uiterwaarden. Rapport Q4039, WL | Delft Hydraulics.
- Yossef, M., E. Mosselman, B. Jagers, K. Sloff, S. van Vuren & B. Vermeulen (2006), Voorspelinstrument duurzame vaarweg; Innovatieve aspecten. Rapport Q4082.00, WL | Delft Hydraulics.



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

