

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

Voorspelinstrument duurzame vaarweg

Innovatieve aspecten

rapport

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

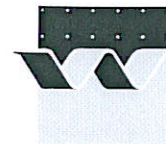
Voorspelinstrument duurzame vaarweg

Innovatieve aspecten

Mohamed Yossef, Erik Mosselman, Bert Jagers, Kees Sloff,
Saskia van Vuren & Bart Vermeulen

rapport

september 2006



OPDRACHTGEVER:	Rijkswaterstaat RIZA				
TITEL:	Voorspelinstrument duurzame vaarweg; Innovatieve aspecten				
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 het uitwerken en testen van enkele innovatieve aspecten. Het andere rapport (Van Vuren et al, 2006) presenteert de bouw van het model en enkele demonstratieberekeningen.</p> <p>De volgende innovatieve aspecten zijn uitgewerkt en getest:</p> <ul style="list-style-type: none">• Invloed van domeindecompositie op de resultaten;• Weergave van sedimenttransport over vaste lagen;• Verkorting van reketijden voor variërende afvoeren;• Verkorting van reketijden met grovere deeldomeinen;• Hulpmiddel voor grootschalige ijking van de waterbeweging;• Functionaliteit voor baggeren en storten (sedimentbeheer);• Functionaliteit voor morfologische randvoorwaarde.				
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	27 juli 2006		Henk Verheij	Kees Bons
3.0	Erik Mosselman	28 sept. 2006		Frans van der Knaap	Kees Bons
PROJECTNUMMER:	Q4082				
TREFWOORDEN:	Riviermorfologie, tweedimensionaal model				
AANTAL BLADZIJDEN:					
VERTROUWELIJK:	<input checked="" type="checkbox"/> JA, tot september 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—2
2	Domeindecompositie.....	2—1
2.1	Beschrijving.....	2—1
2.1.1	Probleemstelling.....	2—1
2.1.2	Functionaliteit domeindecompositie.....	2—1
2.2	Testen	2—2
2.2.1	Experimenten in de Olesengoot	2—2
2.2.2	Delft3D-schematisatie van de Olesengoot	2—4
2.2.3	Testsimulaties	2—6
2.3	Resultaten	2—8
2.3.1	Aanvankelijke problemen en toegepaste remedies.....	2—8
2.3.2	Resultaten van de modelsimulaties.....	2—9
3	Vaste lagen	3—1
3.1	Beschrijving.....	3—1
3.2	Testen	3—4
3.3	Resultaten	3—8
4	Verkorting van reketijden voor variërende afvoeren	4—1
4.1	Beschrijving.....	4—1
4.2	Testen	4—4
4.3	Resultaten	4—4

5	Verkorting van reketijden door grovere deeldomeinen.....	5—1
5.1	Beschrijving.....	5—1
5.2	Testen	5—1
5.3	Resultaten	5—2
6	Hulpmiddel voor grootschalige ijking van waterbeweging	6—1
6.1	Beschrijving.....	6—1
6.2	Testen	6—2
6.3	Resultaten	6—5
7	Functionaliteit voor baggeren en storten	7—1
7.1	Beschrijving.....	7—1
7.2	Testen	7—3
7.3	Resultaten	7—5
7.4	Toetsing aan gebruikswensen	7—6
7.4.1	Inleiding.....	7—6
7.4.2	Criteria en opties voor baggeren.....	7—6
7.4.3	Criteria en opties voor storten	7—7
7.4.4	Bijdrage van bodemvormen aan vaardiepte	7—7
7.4.5	Verdere afbakening.....	7—7
7.4.6	Presentatie van resultaten.....	7—8
8	Functionaliteit voor morfologische randvoorwaarde	8—1
8.1	Beschrijving.....	8—1
8.2	Testen	8—2
8.3	Resultaten	8—2
9	Conclusies en aanbevelingen	9—1
10	Literatuurverwijzingen	10—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 langsricting. 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 het uitwerken en testen van enkele innovatieve aspecten. Het andere rapport (Van Vuren et al, 2006) presenteert de bouw van het model en enkele demonstratieberekeningen. De volgende innovatieve aspecten worden in het voorliggende rapport uitgewerkt en getest:

- Invloed van domeindecompositie op de resultaten;
- Weergave van sedimenttransport over vaste lagen;
- Verkorting van reketijden voor variërende afvoeren;
- Verkorting van reketijden met grovere deeldomeinen;
- Hulpmiddel voor grootschalige ijking van de waterbeweging;
- Functionaliteit voor baggeren en storten (sedimentbeheer);
- Functionaliteit voor morfologische randvoorwaarde.

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 Domeindecompositie

2.1 Beschrijving

2.1.1 Probleemstelling

Voor riviermorfologische modellen geldt dat de roosterlijnen de normaallijnen van het zomerbed zo goed mogelijk moeten volgen om onnauwkeurigheden en onnodige verstoringen in het morfologische gedrag te voorkomen. Bij riviersplitsingen levert deze eis complicaties op, die opgelost kunnen worden door het rekendomein in meerdere afzonderlijke domeinen te splitsen (Mosselman et al, 2005). Daarom is besloten om domeindecompositie toe te passen in het nieuwe 2D model van het splitsingspuntengebied. Per deeldomein wordt een modelschematisatie gemaakt en deze schematisaties worden onderling gekoppeld. Een bijkomend voordeel van domeindecompositie is dat hiermee mogelijkheden ontstaan om de reketijden te bekorten. Zo kunnen berekeningen voor verschillende deeldomeinen parallel worden uitgevoerd. Bovendien kan de resolutie sterker over het modeldomein gevarieerd worden, zodat met minder detail kan worden volstaan in zones die er minder toe doen.

De bestaande functionaliteit voor domeindecompositie is slechts beperkt gevalideerd voor rivierkundige toepassingen. Sommige rekenmodules binnen Delft3D, waaronder die voor spiraalstroming, zijn nog niet eerder in combinatie met domeindecompositie toegepast. Rivierkundige toepassingen worden in deze opdracht getest.

2.1.2 Functionaliteit domeindecompositie

Met domeindecompositie wordt het rekenrooster 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 informatie- en gegevensuitwisseling tussen de deelmodellen op de domeinranden *online* plaats vindt. In principe kan met deze opzet elke deelmodelsimulatie op een aparte processor worden uitgevoerd. Dit geeft de mogelijkheid tot parallel rekenen.

Een model bestaande uit meerdere deeldomeinen kan als volgt worden opgezet:

1. Decompositie van het totale modeldomein in deeldomeinen;
2. Genereren van rekenroosters per deeldomein;
3. Definiëren van domeinranden tussen de deeldomeinen;
4. Compileren van de koppelingen tussen de deeldomeinen;
5. Genereren van de bodemligging per deeldomein;
6. Opzetten van het model per deeldomein;
7. Modellsimulatie in een *batch mode* waarin de verschillende deelmodellen afzonderlijk worden doorgerekend en de informatie op de domeinranden online wordt uitgewisseld.

Voor elk deeldomein moeten dus een afzonderlijk rooster en een afzonderlijke modelschematisatie worden gemaakt. De volgende voorwaarden worden gesteld aan de rekenroosters van de deeldomeinen:

- Roosterlijnen in het grovere deeldomein moeten doorlopen in het fijnere deeldomein;
- Roosters van deeldomeinen moeten van hetzelfde type zijn (metrisch of geografisch);
- Roosters van deeldomeinen moeten dezelfde m-n-oriëntatie hebben;
- De domeinrand tussen deeldomeinen moet samenvallen;
- De diepten op de domeinrand tussen deeldomeinen moeten gelijk zijn;
- Een eventuele verfijning van het rooster in het ene domein moet zodanig zijn dat het resulterende aantal cellen op de domeinrand een geheel veelvoud is van het aantal cellen op de domeinrand van het andere rooster.

In elk deelmodel worden uitsluitend modelgegevens opgenomen die betrekking hebben op het desbetreffende deeldomein. Niet elk deelmodel heeft randvoorwaarden op de boven- of de benedenrand nodig, omdat deze uit andere deelmodellen kunnen worden doorgegeven. De simulatieperiode en de tijdstap moeten voor elk deelmodel hetzelfde zijn. Daarnaast moeten in elk deelmodel dezelfde processen worden beschouwd en mogen er geen droge punten of constructies op de domeinranden aanwezig zijn.

2.2 Testen

2.2.1 Experimenten in de Olesengoot

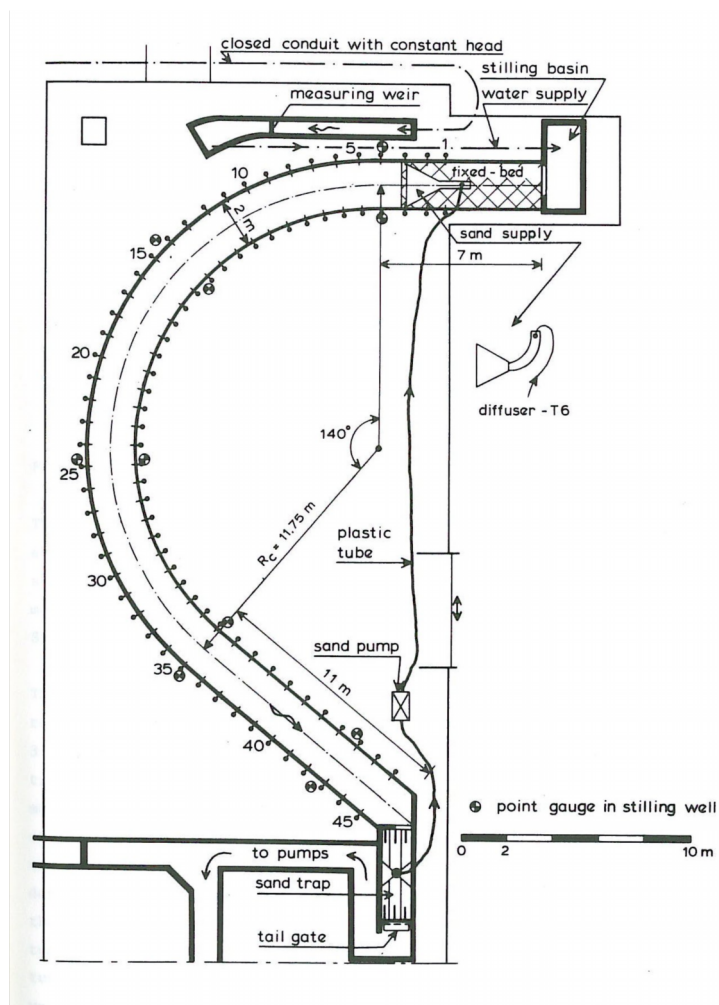
De functionaliteit voor domeindecompositie wordt getest aan de hand van goed gedocumenteerde experimenten die Kim Olesen in de zomer van 1984 heeft uitgevoerd in een voormalige gekromde laboratoriumgoot van WL | Delft Hydraulics. Deze goot wordt sindsdien aangeduid als “Olesengoot”. De experimenten richtten zich op het effect van de korrelgrootteverdeling van het bodemmateriaal op de bodemontwikkeling in een gekromde alluviale stroomgeul, onder stationaire condities. Figuur 2-1 toont de laboratoriumopstelling van de Olesengoot. De goot bestond uit een 7 m lange rechte instroomsectie, een bocht met een straal van 11,75 m over een hoek van 144 graden en een 11 m lange uitstroomsectie. De goot was 2 m breed. Het initiële verhang bedroeg gemiddeld 1,5 mm/m (1,35 mm/m in de buitenbocht en 1,6 mm/m in de binnenbocht).

Kim Olesen heeft in de goot verscheidene experimenten uitgevoerd. Voor het testen van domeindecompositie wordt experiment T5 gebruikt. Hierin werd zowel water als sediment rondgepompt. Het sediment bestond voor 2/3 uit fijn sediment en voor 1/3 uit grof sediment. De diameter van de fijne fractie varieert tussen 0,3 en 1 mm en de diameter van de grove fractie varieert tussen 1 en 2 mm. Met een sedimentdiffusor werd het sediment op een afstand van 6 m van de instroomrand gelijkmatig over de breedte van de goot verdeeld. Op de bodem van de eerste 6 m van de goot was grof bodemmateriaal aangebracht om erosie op de bovenrand te voorkomen. Bij constante afvoer werd na drie weken een evenwichtssituatie bereikt. Daarvoor zijn de bodemligging, de bodemsamenstelling, het waterstandsverhang, het sedimenttransport en de snelheidsverdeling achtereenvolgens gemeten.

Tabel 2-1 geeft een overzicht van de condities en parameters tijdens het experiment.

Tabel 2-1. Conditie en parameters tijdens het experiment.

Conditie en parameters tijdens Experiment T5	
Afvoer Q (m ³ /s)	0,125
Breedte B (m)	2
Chézy-ruwheid (m ^{1/2} /s)	32,7
Initiële waterdiepte (m)	0,1353
Waterstand op benedenrand (m)	0,0656
Gemiddelde diameter fijne sedimentfractie (mm)	0,46
Gemiddelde diameter grove sedimentfractie (mm)	1,61

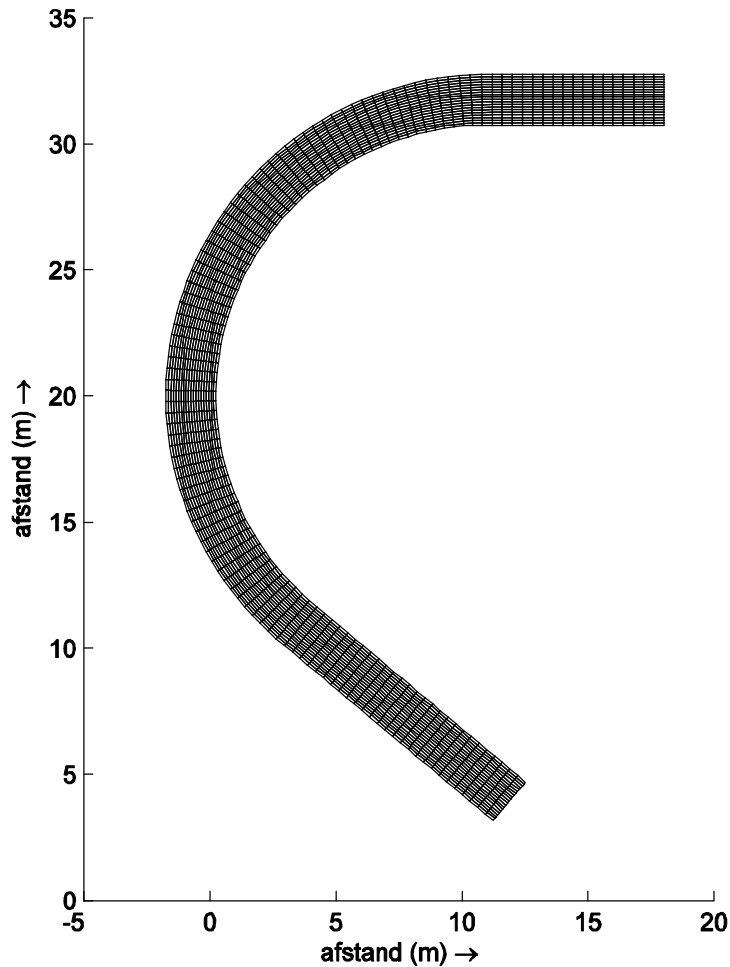


Figuur 2-1. Schets van de laboratoriumopstelling van de Olesengoot.

2.2.2 Delft3D-schematisatie van de Olesengoot

De Olesengoot is in Delft3D-3DMOR geschematiseerd met een curvilineair rekenrooster dat bestaat uit 20 cellen bij 115 cellen, waarbij de roosterlijnen loodrecht op elkaar staan (Figuur 2-2). De nummering van roosterlijnen in m-richting loopt van benedenstrooms naar bovenstrooms. De nummering van de roosterlijnen in n-richting loopt van de binnenbocht naar de buitenbocht.

Op de bovenrand van het model is een constante afvoer van $0,00625 \text{ m}^3/\text{s}$ per cel opgelegd. Op de benedenrand wordt de waterstand gelijk gehouden aan $0,065640 \text{ m}$ boven het gebruikte referentieniveau. Op de bovenrand is het inkomende sedimenttransport per eenheid van breedte gelijk aan de lokale sedimenttransportcapaciteit op de rand.



Figuur 2-2. Rekenrooster van het model van de Olesengoot (20 cellen × 115 cellen).

De ruwheid wordt in het model beschreven met een constante Chézy-waarde van $32,7 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. Het sedimenttransport wordt beschreven met de volgende generieke formule voor totaaltransport:

$$s = \alpha D_c (\Delta g D_c)^{0.5} \theta^b (\mu \theta - \theta_k)^c$$

$$\theta = \left(\frac{u}{C} \right)^2 \frac{1}{\Delta D_c} \quad (2-1)$$

waarin:

- α = vermenigvuldigingsfactor voor kalibratiedoeleinden (-) (gelijk aan 6,4)
- g = versnelling ten gevolge van de zwaartekracht ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
- s = sedimenttransport per eenheid van breedte ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
- Δ = relatieve dichtheid van sediment (-) (gelijk aan 1,65)
- D_c = karakteristieke korrelgrootte, vaak gelijk aan de mediane korrelgrootte D_{50} (m)
- C = Chézycoëfficiënt voor hydraulische ruwheid ($\text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$)
- u = stroomsnelheid [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
- θ_k = kritieke Shieldswaarde voor begin van sedimentbeweging (-) (gelijk aan 0,025)

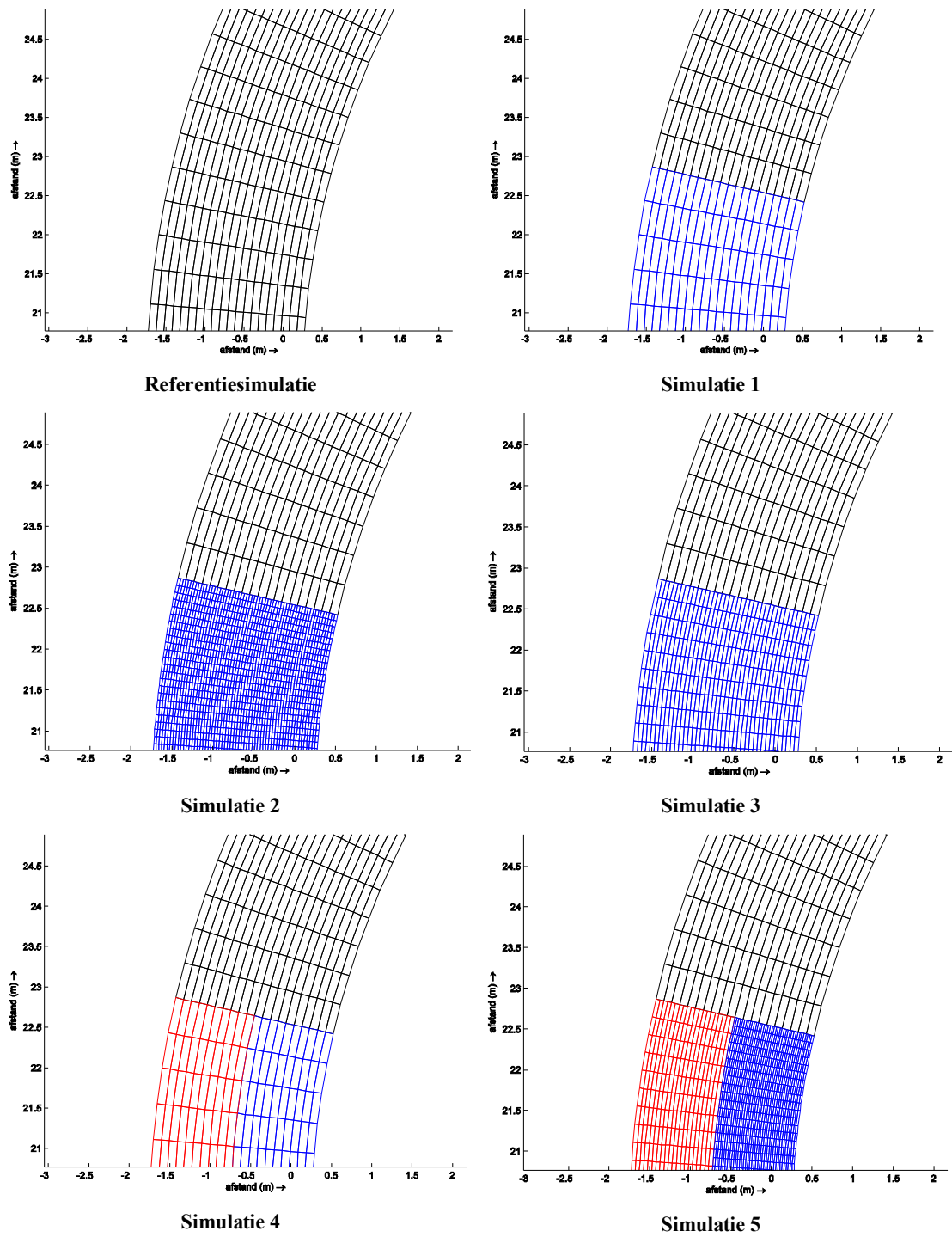
- b = constante (-) (gelijk aan 0)
- c = constante (-) (gelijk aan 1,5)
- μ = ribbelfactor (-) (gelijk aan 0,55)

2.2.3 Testsimulaties

De testen van de functionaliteit voor domeindecompositie richten zich op het effect van spiraalstroming, het gebruik van een totaaltransportformule, het aantal deeldomeinen en de roosterresoluties van die domeinen. Het aantal deeldomeinen en de roosterresoluties zijn als volgt gevarieerd. Het rekenrooster is eerst in langsricting opgesplitst in twee domeinen. Vervolgens is het benedenstroomse domein in dwarsrichting in tweeën verdeeld. In eerste instantie zijn daarbij de roosterresoluties niet aangepast, maar in aanvullende simulaties is het rooster van een van de deeldomeinen met factoren 2 en 3 verfijnd. De volgende simulaties zijn uitgevoerd:

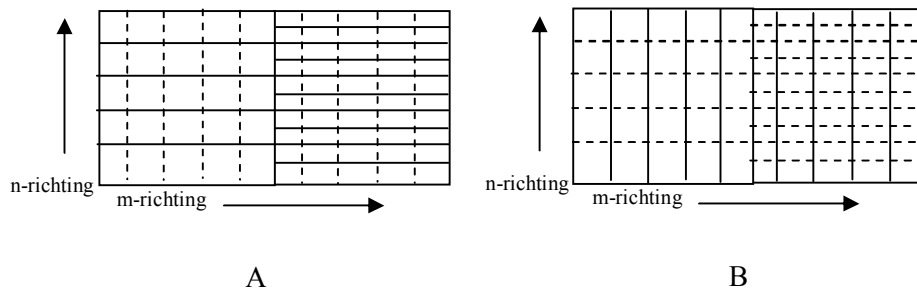
- Referentiesimulatie zonder domeindecompositie;
- Simulatie 1: opsplitsing in twee domeinen in lengterichting, zonder wijziging van de roosterresolutie;
- Simulatie 2: opsplitsing in twee domeinen in lengterichting, waarbij tevens het benedenstroomse rooster met een factor 3 verfijnd is;
- Simulatie 3: opsplitsing in twee domeinen in lengterichting, waarbij tevens het benedenstroomse rooster met een factor 2 verfijnd is;
- Simulatie 4: opsplitsing in twee domeinen in lengterichting, waarvan het benedenstroomse domein ook nog eens in dwarsrichting in twee domeinen is gesplitst, zonder wijziging van de roosterresolutie;
- Simulatie 5: dezelfde verdeling in drie deeldomeinen als in Simulatie 4, waarbij het benedenstroomse domein in de buitenbocht met een factor 2 is verfijnd en het benedenstroomse domein in de binnenbocht met een factor 4.

Figuur 2-3 geeft een overzicht van de deeldomeinen en roosterresoluties in de verschillende simulaties.

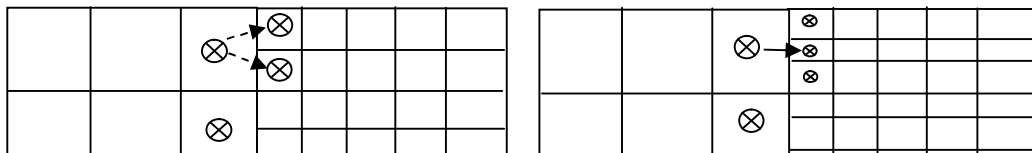


Figuur 2-3. Decompositie van het rekenrooster in deeldomeinen.

De roosterresolutie van de deeldomeinen wordt zowel met een even als een oneven factor verfijnd, omdat Delft3D gebruik maakt van een *Alternating Directional Implicit* (ADI) integratiemethode om de ondiepwatervergelijkingen numeriek op te lossen. De ADI-methode splitst elke tijdstap op in twee fasen. In de eerste fase worden de vergelijkingen voor de eerste halve tijdstap in m-richting impliciet en in n-richting expliciet opgelost. In de tweede fase is dit precies andersom, zie Figuur 2-4. Door verfijning met een even en een oneven aantal factor kan worden getest of er problemen ontstaan met de uitwisseling van informatie op de domeinrand. Waterstanden en snelheden worden uitgevoerd in het midden van de roostercel. Als de ondiepwatervergelijkingen tijdens de eerste halve tijdstap impliciet in m-richting en expliciet in n-richting worden opgelost en het rooster in twee domeinen is opgesplitst (zie Figuur 2-4), zal bij een splitsing in een oneven aantal roostercellen de uitvoer van het onverfijnde rooster aan de middelste cel van het verfijnde rooster gekoppeld worden. Dit is niet eenduidig voor een opsplitsing in een even aantal cellen.



Eerste halve tijdstap impliciet in m-richting, expliciet in n-richting (A), tweede halve tijdstap expliciet in m-richting, impliciet in n-richting (B)



Figuur 2-4. ADI-integratiemethode voor het oplossen van ondiepwatervergelijkingen in Delft3D.

2.3 Resultaten

2.3.1 Aanvankelijke problemen en toegepaste remedies

Simulatie 1 liep aanvankelijk al bij de eerste tijdstap vast. Stapsgewijs zijn de fouten in de simulatie onderzocht. Daarbij kwamen problemen aan het oppervlak ten aanzien van de sedimentuitwisseling op de domeinrand en de invloed van de telrichting in de nummering van de deeldomeinen.

Sedimentuitwisseling op de domeinrand

Een van de foutenbronnen bleek dat tijdens de informatieuitwisseling op de domeinrand een concentratie aan zwevend sediment gevraagd wordt. Was deze informatie niet beschikbaar, dan werden geen gegevens van het sedimenttransport tussen de deeldomeinen overgedragen. De oorzaak is dat de beschrijving van deze overdracht gekoppeld was aan de advection-diffusievergelijking. Door te werken met een totaaltransportformule werd dit onderdeel van de berekening overgeslagen. Als remedie is de code van Delft3D zo aangepast dat de uitwisseling van sedimenttransportgegevens niet meer samenhangt met het oplossen van de advection-diffusievergelijking.

Invloed van telrichting in nummering van deeldomeinen

Na het ontkoppelen van sedimentuitwisseling en advection-diffusieprocessen bleek de simulatie nog steeds niet goed te verlopen. Dit bleek samen te hangen met de telrichting in de nummering van deeldomeinen. Sedimenttransportgegevens worden niet goed doorgegeven van deeldomeinen met een hoog rangnummer naar deeldomeinen met een laag rangnummer. In het originele rooster liepen de nummers langs de goot op in een richting tegen de stroom in. Na omnummering met de stroom mee verliep de simulatie goed. De ongewenste afhankelijkheid van de telrichting is niet opgelost in de Delft3D-code. De telrichtingen worden bij toepassing zo gekozen dat de nummering met de stroom mee oploopt en ook oploopt in de richting van de buitenbocht naar de binnenbocht.

2.3.2 Resultaten van de modelsimulaties

Figuur 2-5 laat zien dat alle simulaties globaal gezien een zelfde beeld geven als de referentiesimulatie, ongeacht het aantal domeinen en de toegepaste roosterresolutie. De Figuren Figuur 2-6 tot en met Figuur 2-8 tonen voor elke simulatie de evenwichtsbodemliggingen op drie langsvaaien: rechts, midden en links. De simulaties waarin het rekenrooster in lengterichting in tweeën gesplitst is, komen redelijk overeen met de referentiesimulatie. Verfijning van het rekenrooster met een even of oneven factor leidt tot een vergelijkbaar beeld. Als het rooster ook in dwarsrichting wordt opgesplitst (Simulaties 4 en 5) ontstaan grotere verschillen. Figuur 2-9 laat deze verschillen duidelijker zien. Dit is toe te schrijven aan de tekortkoming dat sedimenttransportgegevens niet goed worden doorgegeven van deeldomeinen met een hoog rangnummer naar deeldomeinen met een laag rangnummer.

In de beginsituatie bestaat het sediment uit een uniforme mix van twee verschillende fracties. Tweederde van het sediment heeft een fijne fractie en een derde een grove fractie. De spiraalstroming transporteert sediment van de buitenbocht naar de binnenbocht, terwijl de dwarshelling van de bodem ervoor zorgt dat de zwaartekracht sediment van de binnenbocht naar de buitenbocht transporteert. De buitenbocht bestaat in de evenwichtssituatie uiteindelijk uit grover materiaal dan de binnenbocht. Figuur 2-10 geeft voor de evenwichtssituatie het 90%-percentiel van de sedimentdiameter weer in de referentiesimulatie en Simulatie 4.

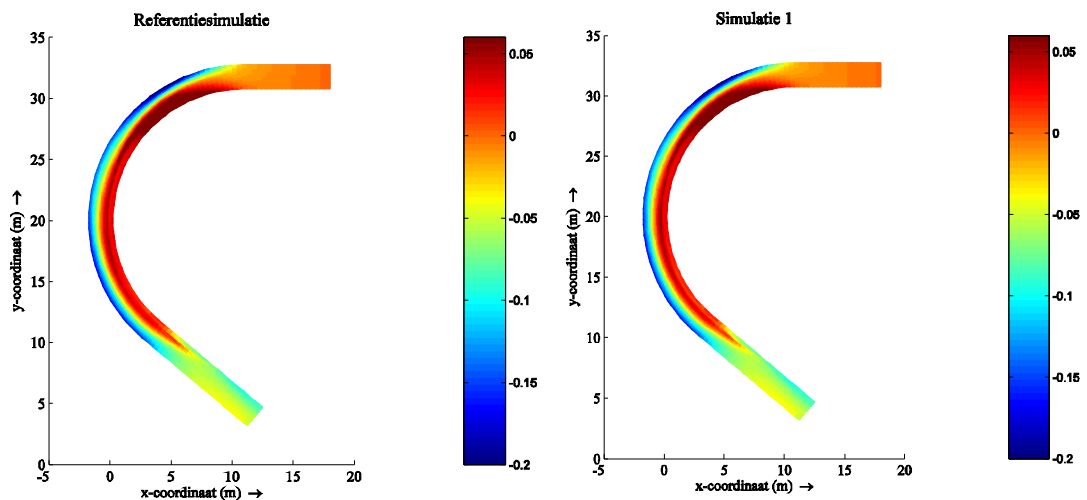
Voor de simulatie waarin het rekenrooster in dwarsrichting is opgesplitst, vormt het transport van fijn sediment van de buitenbocht naar de binnenbocht geen probleem, maar het transport van grof sediment van de binnenbocht naar de buitenbocht wel.

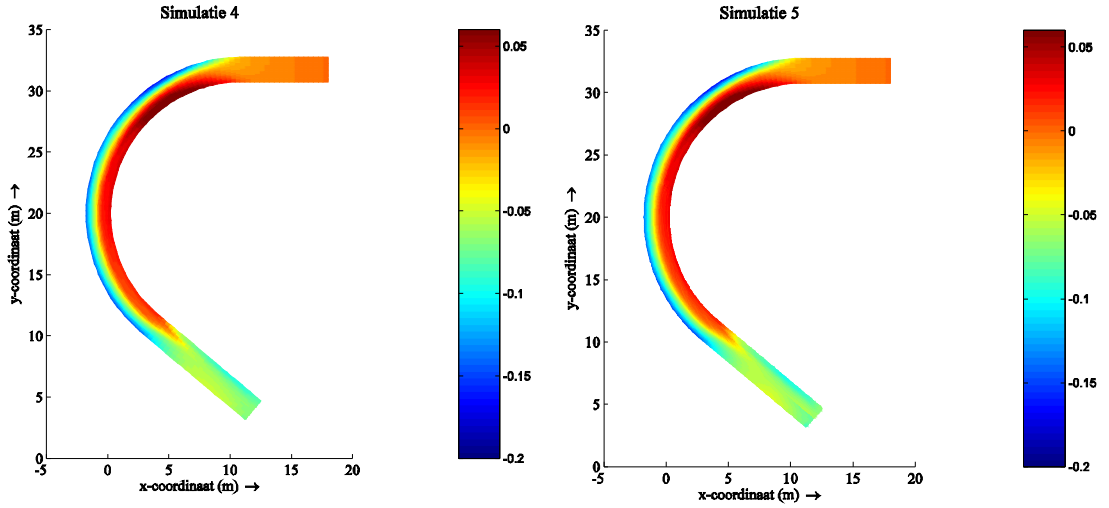
Door de afhankelijkheid van de telrichting wordt er geen sediment getransporteerd van een domein met een hoger rangnummer naar een domein met een lager rangnummer. Het resultaat is zichtbaar in het rechterdeel van Figuur 2-10, waar de binnenbocht in de evenwichtsituatie van Simulatie 4 grover is dan die van de referentiesituatie.

De tekortkoming van de telrichtingafhankelijkheid zal uiteindelijk wel moeten worden opgelost, maar die oplossing valt buiten het kader van deze opdracht. In het 2D model van het splitsingspuntgebied wordt met deze tekortkoming omgegaan door:

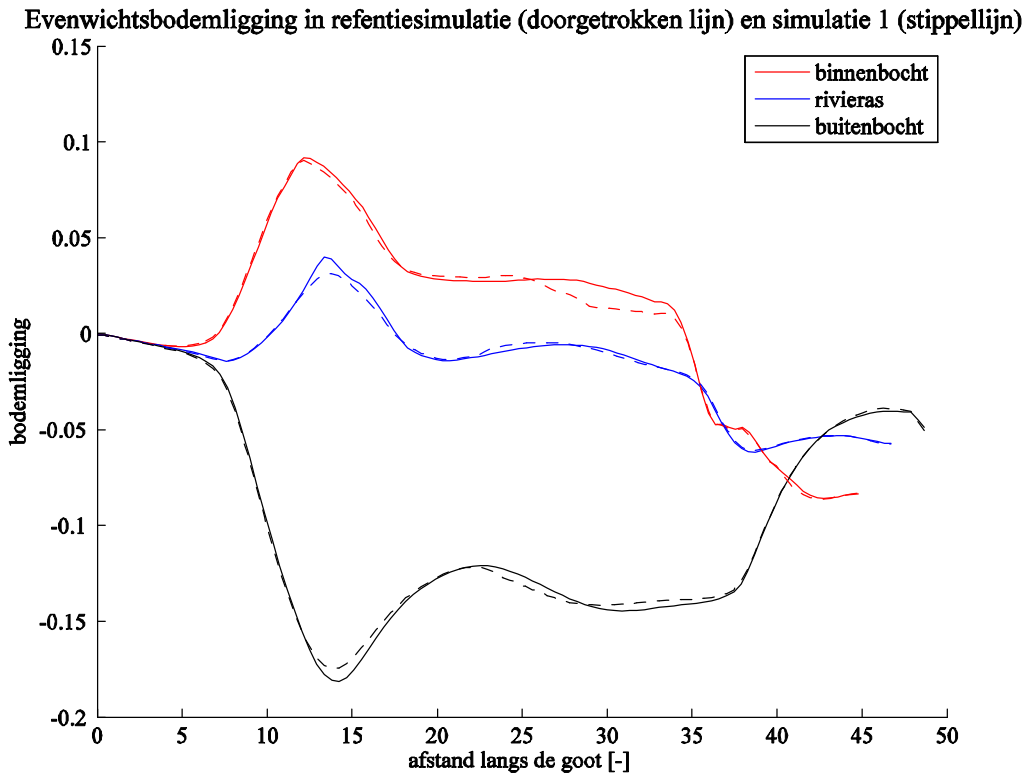
1. de domeinnummers te laten oplopen in stroomafwaartse richting;
2. de domeingrenzen bij de splitsingen tegen de splitsingskop te leggen, zodat laterale sedimentuitwisseling tussen naastgelegen deeldomeinen verwaarloosbaar is.

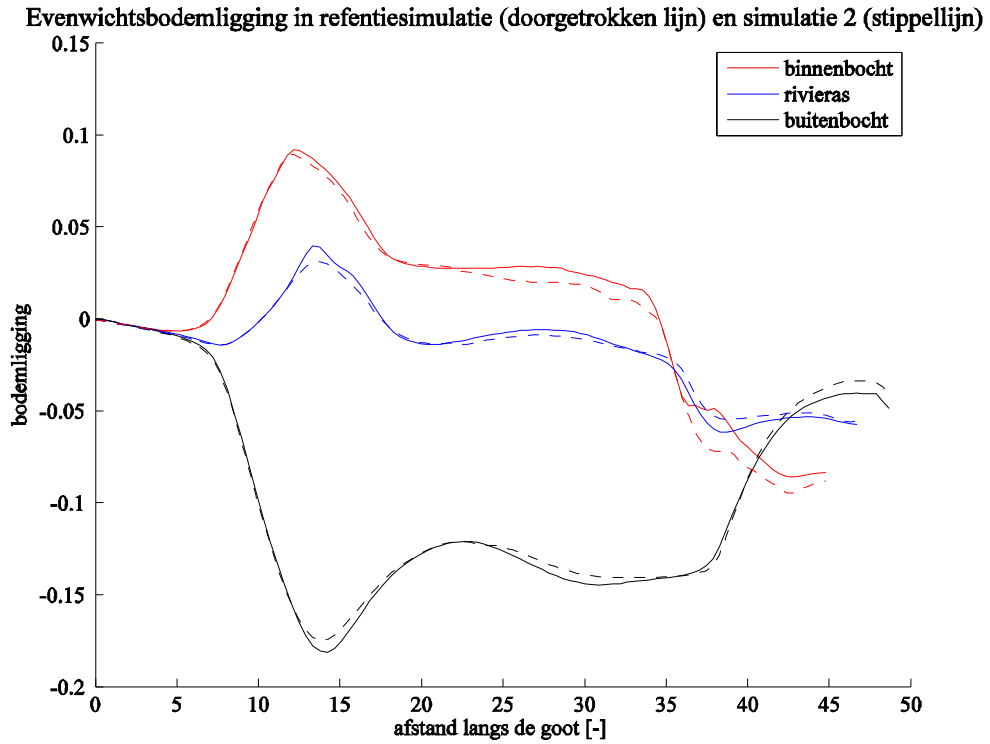
Aanbevolen wordt om de in de tweede helft van 2006 met het model uit te voeren *case studies* zoveel mogelijk te baseren op afzonderlijke, ontkoppelde deeldomeinen. Tevens wordt geadviseerd om het model pas grootschalig te ijken als de resterende problemen met domeindecompositie zijn opgelost.



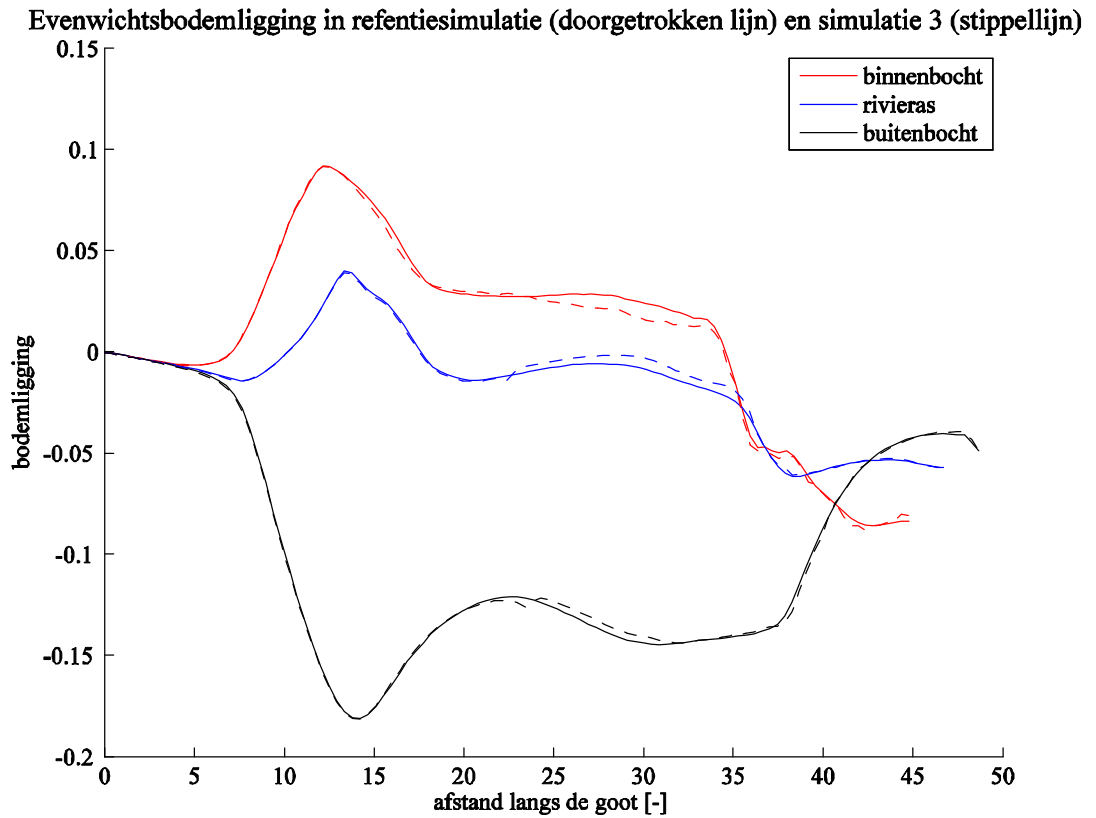


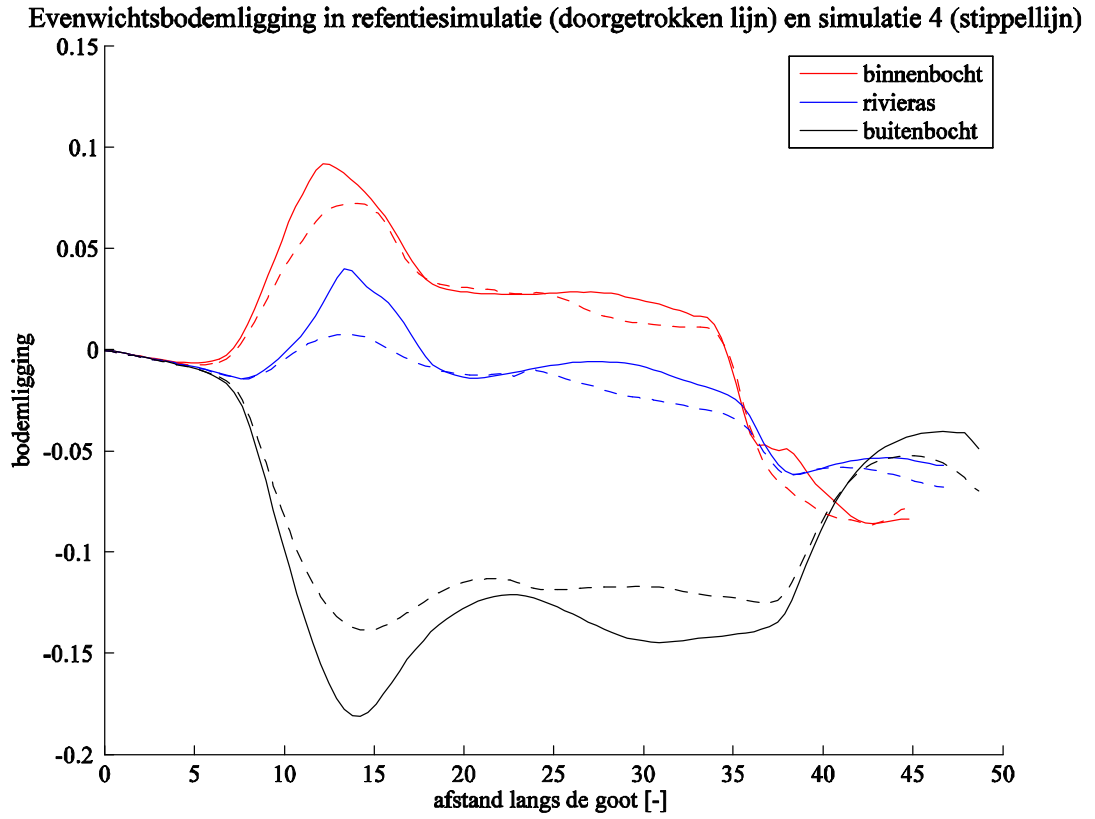
Figuur 2-5. Evenwichtsbodemliggingen in referentiesimulatie en Simulatie 1.



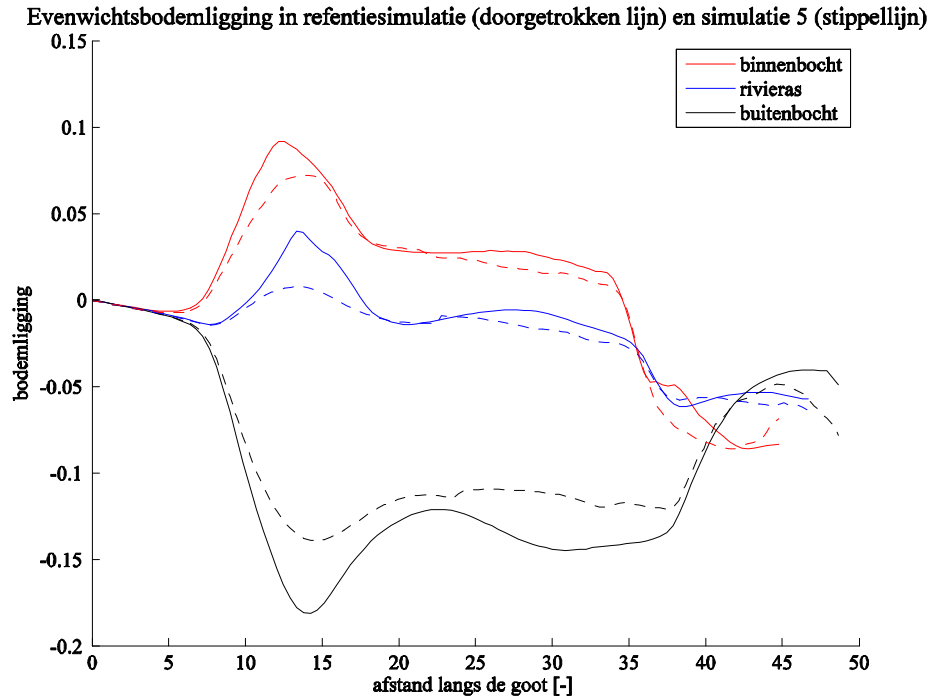


Figuur 2-6. Evenwichtsbodemliggingen in referentiesimulatie, Simulatie 1 en Simulatie 2.

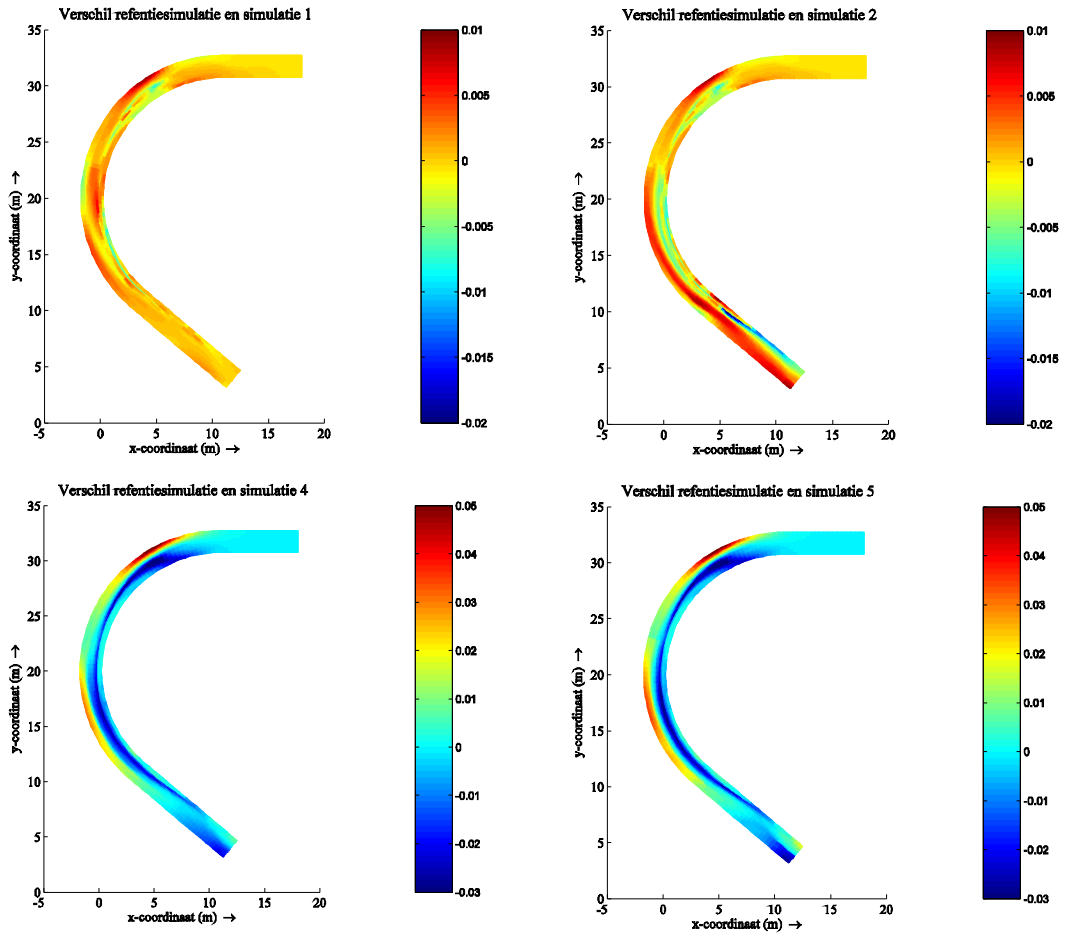




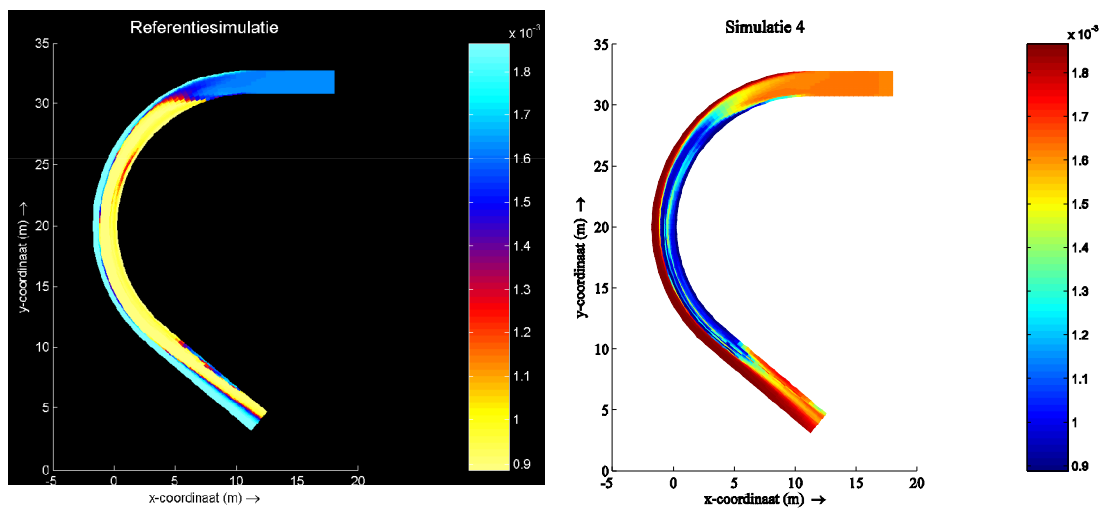
Figuur 2-7. Evenwichtsbodemliggingen in referentiesimulatie, Simulatie 3 en Simulatie 4.



Figuur 2-8. Evenwichtsbodemliggingen in referentiesituatie en Simulatie 5.



Figuur 2-9. Verschillen in evenwichtsbodemligging tussen referentiesituatie en Simulaties 1, 2, 4 en 5.



Figuur 2-10. Evenwichtsbodemsamenstelling in referentiesituatie en Simulatie 4.

3 Vaste lagen

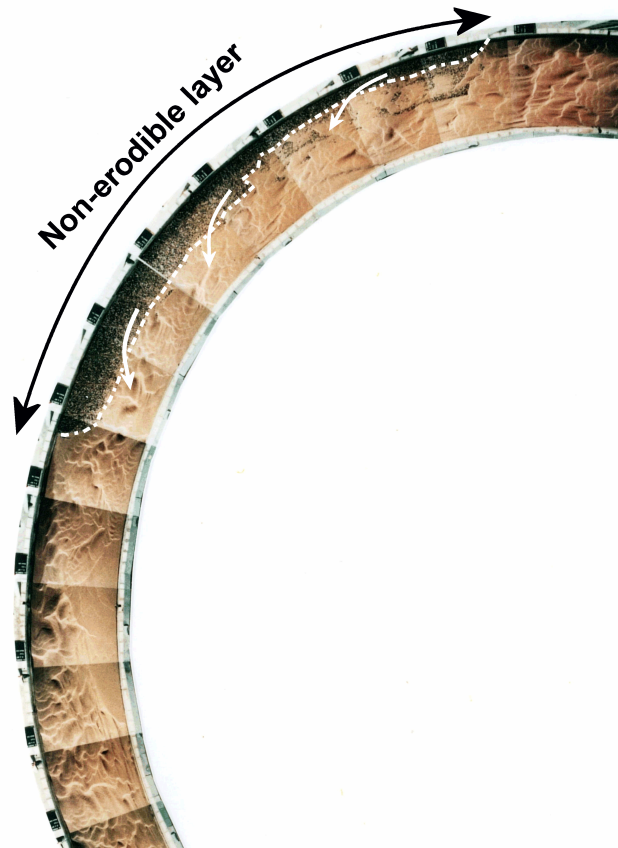
3.1 Beschrijving

Delft3D kent speciale functionaliteit voor het effect van vaste lagen. Vaste lagen in de Rijntakken kunnen worden toegepast als maatregel voor vaarwegverbetering in rivierbochten. Met deze maatregel wordt, door verondieping van de diepe buitenbocht, een verdieping van de binnenbocht gerealiseerd, waardoor de beschikbare bevaarbare breedte toeneemt. Het principe van deze maatregel is gebaseerd op een herverdeling van stroomsnelheden in het dwarsprofiel van de bocht ten gevolge van de verondieping van de buitenbocht. Door de hogere snelheden zal de binnenbocht uitschuren, hoewel dit deels teniet wordt gedaan door een toename van het sedimenttransport door de binnenbocht omdat de spiraalstroom sediment van de vaste laag naar de binnenbocht transporteert.

In de Waal zijn twee succesvolle toepassingen van vaste lagen gerealiseerd:

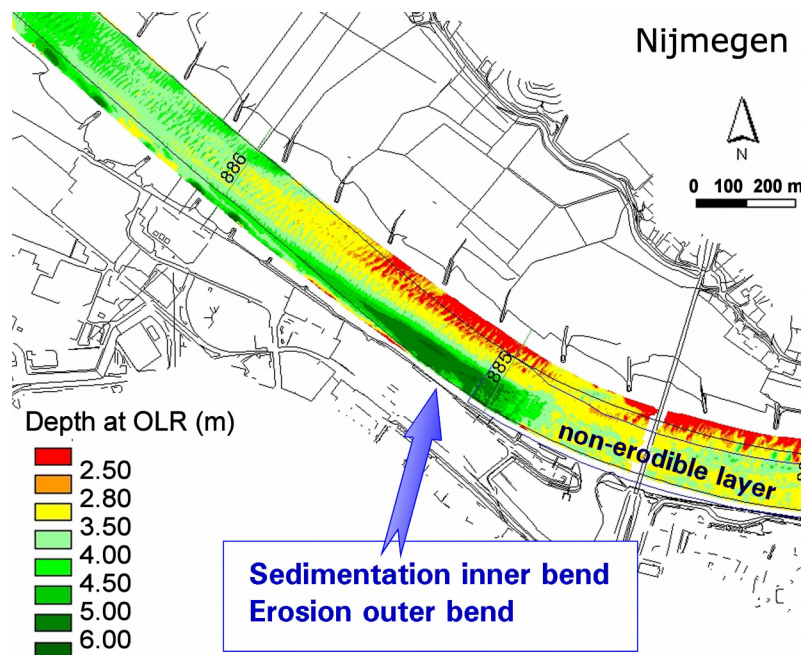
1. *Vaste laag Nijmegen*: Waalbocht km 882,5-885,0 (lengte 2,5 km); hoogteligging circa 2,0 m +NAP (ontwerpniveau was circa 2,3 m +NAP), aanleg 1985-1988. De bovenstroomse en benedenstroomse einden zijn onder een helling aangelegd.
2. *Vaste laag St. Andries*: Waalbocht km 925 – 928.2 (lengte 3,1 km); hoogteligging circa -2,5 m +NAP (ontwerpniveau was ca. -2,3 m +NAP), aanleg 1996-1999. Het bovenstroomse eind is aangelegd onder een helling 1:1600 (km 925-926,35) en het benedenstroomse eind onder een helling 1:100 (circa km 928-928,10).

Voor beide vaste lagen heeft de maatregel tot een netto verlaging van de bodem in de binnenbocht geleid. Dat betekent dat de stroomsnelheden in de binnenbocht voldoende zijn toegenomen om de extra hoeveelheid sedimenttransport door de binnenbocht af te voeren. Het sediment dat aan de bovenzijde van de vaste laag aankomt, schuift onder invloed van de spiraalstroom over het eerste deel van de vaste laag geleidelijk naar de binnenbocht. Na enige afstand komt vervolgens de vaste laag bloot te liggen en verplaatst al het zand zich door de binnenbocht. Figuur 3-1 illustreert dit verschijnsel op een foto uit 1987 van een laboratoriumexperiment met vaste laag bij WL | Delft Hydraulics.



Figuur 3-1. Vaste laag in buitenbocht in laboratoriumexperiment; witte pijlen geven aan hoe door spiraalstroming het sediment zich concentreert in de binnenbocht (WL, 1987).

Na de aanleg van de vaste lagen bij Nijmegen en St. Andries ontstonden forse ontgrondingskuilen aan de benedenranden van de vaste lagen. Tegelijkertijd ontstonden er ondieptes aan de tegenovergelegen rivierzijdes (op de uitloop van de *point bar*), die hinder opleveren voor scheepvaart en nopen tot periodiek onderhoudsbaggerwerk. De *multi-beam* peiling bij Nijmegen in Figuur 3-2 illustreert deze bodemreactie. Daarnaast leidt de toename van sedimenttransport door de binnenbocht ook tot hogere duinen in de resterende alluviale zone, wat in geval van scheepvaarthinder eveneens de effectiviteit van de maatregel reduceert.



Figuur 3-2. Morfologische reactie benedenstrooms van vaste laag: ontgronding in buitenbocht en aanzanding in de naastgelegen binnenbocht.

Om de vaste lagen te kunnen simuleren is in de tachtiger jaren van de vorige eeuw een rekenmethode ontwikkeld, waarbij berekende bodemtransporten worden gereduceerd wanneer erosie de vaste laag bereikt. De methode is toepasbaar wanneer de bodemontwikkeling ter plaatse van de vaste laag sterk wordt bepaald door gradiënten in bodemtransport of totaaltransport, dat wil zeggen gradiënten in sedimenttransporten die zich laten beschrijven met een formule voor de lokale transportcapaciteit. Het modelconcept is ontwikkeld door Struiksma (1999) en ook beschreven door Sloff, Mosselman & Sieben (2006).

Voor de desbetreffende vaste lagen in Nijmegen en St. Andries zijn in het verleden reeds berekeningen gemaakt met 2D morfologisch instrumentarium, namelijk Delft3D-MORSYS en de voorloper daarvan, RIVCOM. De berekeningen zijn in eerste instantie gemaakt ten behoeve van het ontwerp van de vaste lagen, maar later zijn de berekeningen herhaald voor toetsing. De overeenstemming tussen berekende en waargenomen bodemligging bij de vaste laag bleek erg goed, hoewel er met name bij Nijmegen wel aanpassingen nodig waren in de bodemsamenstelling in het model om de ontgrondingsdiepte, en daarmee de naastgelegen verondieping, goed te simuleren.

Een beperking van de eerder uitgevoerde simulaties is dat toetsing van sedimenttransport over de vaste lagen niet heeft kunnen plaatsvinden. Indertijd waren de gegevens hiervoor ontoereikend. Inmiddels geven gedetailleerde *multi-beam* metingen met hoge resolutie een goed beeld van de voortplanting van beddingvormen over de vaste lagen. Daarmee is het mogelijk geworden om indirect ook de berekende sedimenttransporten te valideren. Dat is de achtergrond van de testen die hier worden uitgevoerd.

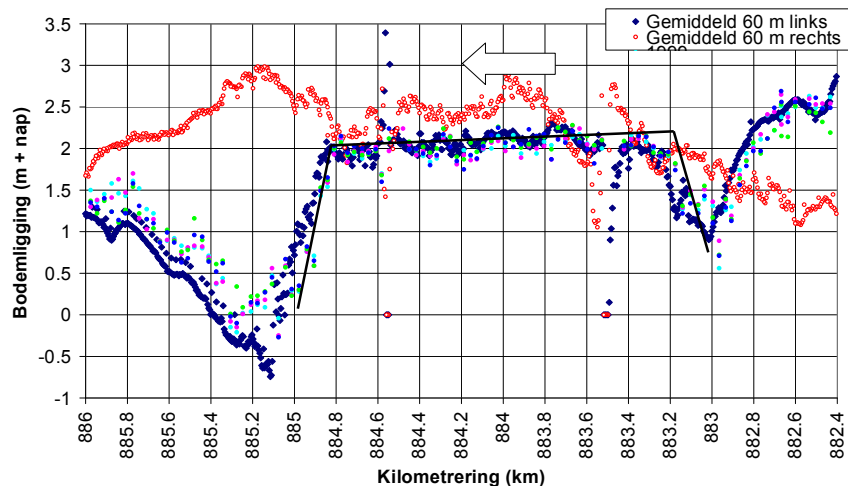
3.2 Testen

Berekeningen zijn uitgevoerd met een ongekalibreerde modelschematisatie voor de Waal die is afgeleid uit het in deze opdracht gebouwde nieuwe 2D model van het splitsingspuntengebied. De analyse is beperkt tot de bocht bij St. Andries, waarvoor de beste meetgegevens beschikbaar zijn.

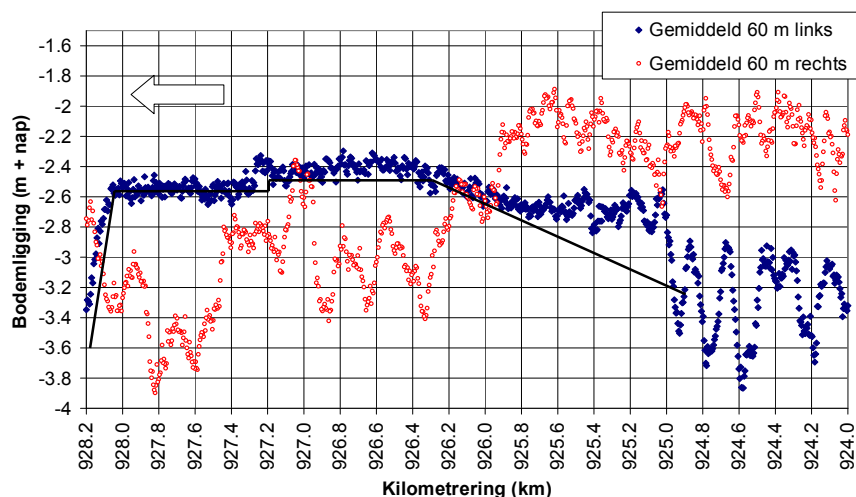
Op basis van recente *multi-beam* bodempeilingen (multi-beam metingen) ter plaatse van de vaste lagen heeft Rijkswaterstaat RIZA analyses uitgevoerd om inzicht te krijgen in de voortplanting van duinen over de vaste laag. Voor St. Andries is gebruik gemaakt van projectpeilingen in het najaar van 1999 na de aanleg van de vaste laag. Wilbers (2000) heeft deze verwerkt met behulp van zijn *dune-tracking* methode, waarbij uit de waargenomen duinmigratie een schatting kon worden gemaakt van transporten over de vaste laag. RIZA heeft een soortgelijke analyse opnieuw uitgevoerd met een iets andere methode. De daaruit afgeleide migratiesnelheden van de duinen bieden belangrijk vergelijkingsmateriaal voor deze testen.

Voor een correcte schematisatie van de vaste lagen zijn de volgende punten van belang:

- Vaste lagen worden in Delft3D-3DMOR gemodelleerd door de beschikbare hoeveelheid sediment in de bodem ter plaatse te beperken. Waar de vaste laag aan de oppervlakte ligt, is de beschikbare hoeveelheid nihil. Waar de bedding volledig alluviaal is, is deze hoeveelheid zeer groot, omdat de vaste laag dan als het ware zeer diep ligt.
- Uit de analyses van bodempeilingen door Sieben (2004) bleek dat de bovenzijde van de vaste lagen bij Nijmegen en St. Andries enkele decimeters onder de ontwerphoogte ligt. Zetting en toleranties in het werk hebben hierbij wellicht een rol gespeeld. De hoogteligging van de vaste lagen is daarom geschat uit de *multi-beam* metingen van meerdere jaren. In Figuren 3-3 en 3-4 staan voor een langsprofiel op 60 m uit de as de hoogteliggingen geplot voor de vaste lagen zoals toegepast in het model. In dwarsrichting is de vaste laag vervolgens horizontaal genomen. Bij St. Andries loopt deze door tot de rivieras, in Nijmegen over de gehele rivierbreedte.
- De ruwheid van de vaste laag wordt in eerste instantie gelijk genomen aan de alluviale ruwheid of de ruwheid van de laag stortsteen (wanneer deze schoon is). Maar zoals bleek uit proeven met sediment transport over vaste lagen door Van der Zwaard (1974a, b), kan door kleine transporten de ruwheid flink afnemen. Indien nodig kan dat bij een ijking mogelijkheden bieden voor fijnafregeling.
- De laagdikte voor reductie van transportcapaciteit op de vaste laag is bepalend voor de verplaatsingssnelheid van beddingvormen op het eerste (nog niet schoongeveegde) deel van de vaste laag. De keuze ervan kan worden gebaseerd op de waarnemingen van Sieben (2004).



Figuur 3-3. Niveau en locatie van de vaste laag bij Nijmegen in het model. De punten zijn met *multi-beam* gepeilde bodemliggingen in 1999-2001 (langsraaien links en rechts van de as).



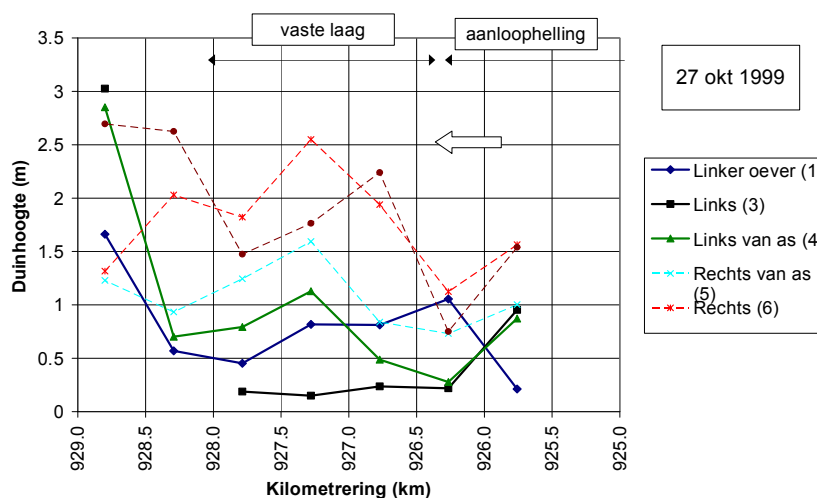
Figuur 3-4. Niveau en locatie van de vaste laag bij St. Andries in het model. De punten zijn met *multi-beam* gepeilde bodemliggingen in 1999-2001 (langsraaien links en rechts van de as).

Voor de testsimulaties en de analyses geldt:

- Metingen en analyses zijn uitgevoerd in de periode van 27 oktober tot 1 november 1999. In die periode varieerde de afvoer tussen 1450 en 1610 m³/s bij Lobith (tussen 1150 en 1250 m³/s op de Waal).
- Gerekend is met het deeldomein voor de Waal.
- In de beginsituatie van de berekening is de bodemligging uit Baseline gecombineerd met de vaste lagen. Op de vaste lagen is de bodemligging in de beginsituatie gelijk gesteld aan het vaste-laagniveau (voor het deel links van de rivieras). Initieel is de vaste laag dus geheel vrij van sediment. Bijkomend voordeel hiervan is dat de snelheid van het sedimentfront over de vaste laag kan worden vergeleken met de waarnemingen.

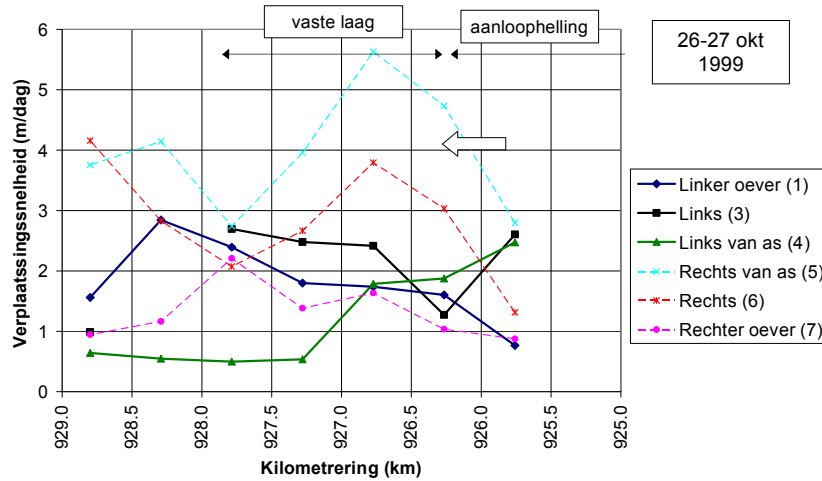
- De berekening is gemaakt voor de periode van 1 april 1999 tot 1 november 1999. Er is een inspeelperiode van 1 april tot eind oktober toegepast, zodat het model kan stabiliseren doordat de invloed van onregelmatigheden in de beginbodempligging uit de rekenresultaten verdwijnt.
- Gebruik is gemaakt van een D_{50} van 1,73 mm en een D_{90} van 2,69 mm. De sedimenttransporten zijn berekend met behulp van de formule van Meyer-Peter en Müller met een vermenigvuldigingsfactor van 0,4. De morfologische factor is gelijk genomen aan 100 en de tijdstap voor de waterbeweging gelijk aan 0,2 minuten. De morfologische tijdstap bedraagt dan 20 minuten.
- Op de bovenrand van het model is een afvoerreeks opgelegd die is afgeleid uit de waargenomen afvoerserie van 1999. De desbetreffende laagwaterperiode is geschematiseerd door twee periodes van constante afvoer:
 - Periode 1: 1 april tot circa 20 juli: afvoer Waal = 2063 m³/s
 - Periode 2: 5 augustus – begin november: afvoer Waal = 1208 m³/s
 - Tussenliggende periode: lineair geïnterpoleerd tussen bovengenoemde waarden.

Er is een grof rooster gebruikt met 500 m lange cellen, en 6 cellen in dwarsrichting. Per cel zijn de *multi-beam* data verwerkt tot een gemiddelde bodempligging, standaardafwijkingen, etc. Figuur 3-5 geeft de door RIZA (Sieben, 2004) berekende duinhoogten. Ze laten zien dat de hoogte van beddingvormen op het schuine bovenstroomse talud van de vaste laag afneemt. Dit blijkt ook uit de *multi-beam* peiling in Figuur 3-4. In de binnenbocht neemt de hoogte van de beddingvormen juist toe.

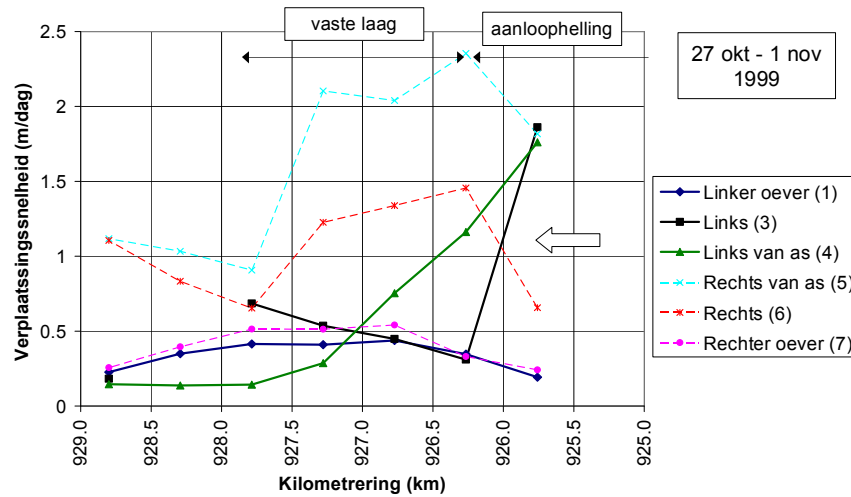


Figuur 3-5. Hoogte van bodemstoringen afgeleid door RIZA uit bodempeilingen in 1999.

Figuren 3-6 en 3-7 geven voor periodes van respectievelijk 1 dag en 5 dagen de voortplantingssnelheid van beddingvormen over de vaste laag. Op de vaste laag neemt de snelheid af, terwijl deze in de binnenbocht toeneemt. De desbetreffende figuren bevatten zowel de invloed van plaatsvaste als verplaatsende bodemvormen.



Figuur 3-6. Verplaatsingssnelheid van bodemstoringen afgeleid door RIZA uit bodempeilingen in 1999, gebaseerd op periode van 1 dag.



Figuur 3-7. Verplaatsingssnelheid van bodemstoringen afgeleid door RIZA uit bodempeilingen in 1999, gebaseerd op periode van 5 dagen.

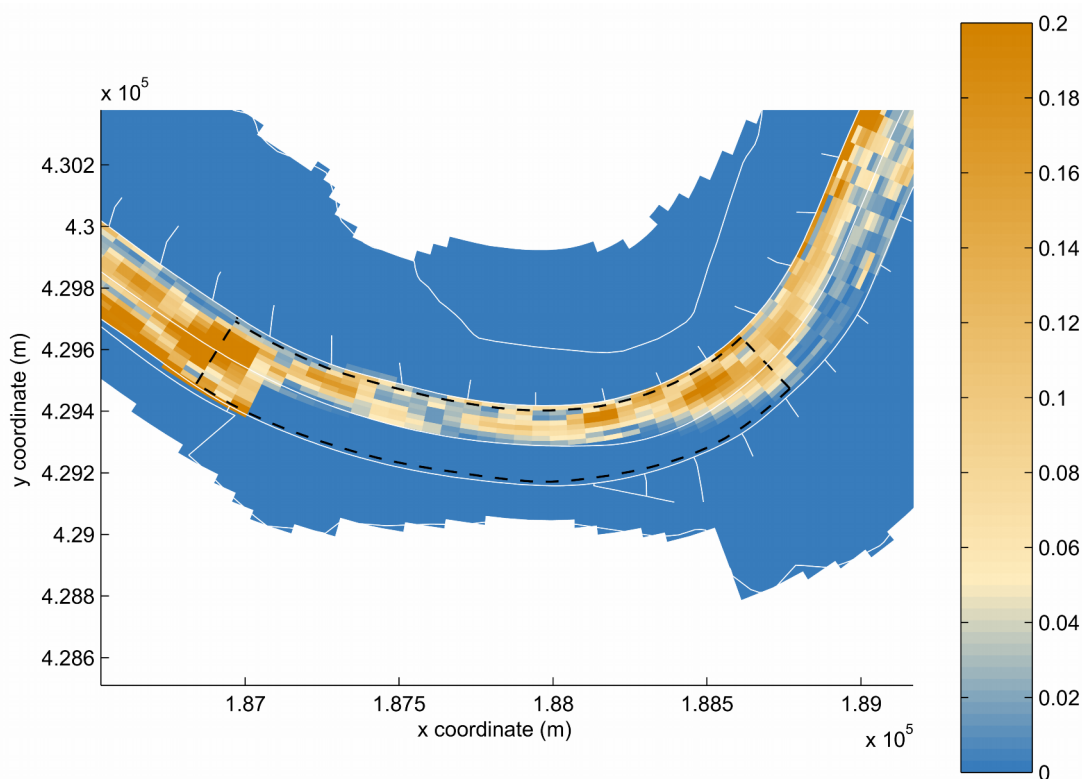
Eerden (2001) heeft uit projectmetingen in oktober 1999 voortplantingssnelheden afgeleid. Ondanks de aanwezigheid van een zandvang bovenstrooms, bleek zich een zandtong te ontwikkelen over het zojuist aangelegde werk. Tijdens de aanleg bedroeg de voortschrijding van de zandtong 25 tot 35 m per week, hetgeen neerkomt op een voortplantingssnelheid van 3,5 à 5 m/dag. Bij hoge afvoeren kon dit oplopen tot 40 à 50 m/week, of 6 à 7 m/dag. Dergelijke waarnemingen sluiten beter aan bij de uitkomsten van Figuur 3-6 dan de uitkomsten van Figuur 3-7.

3.3 Resultaten

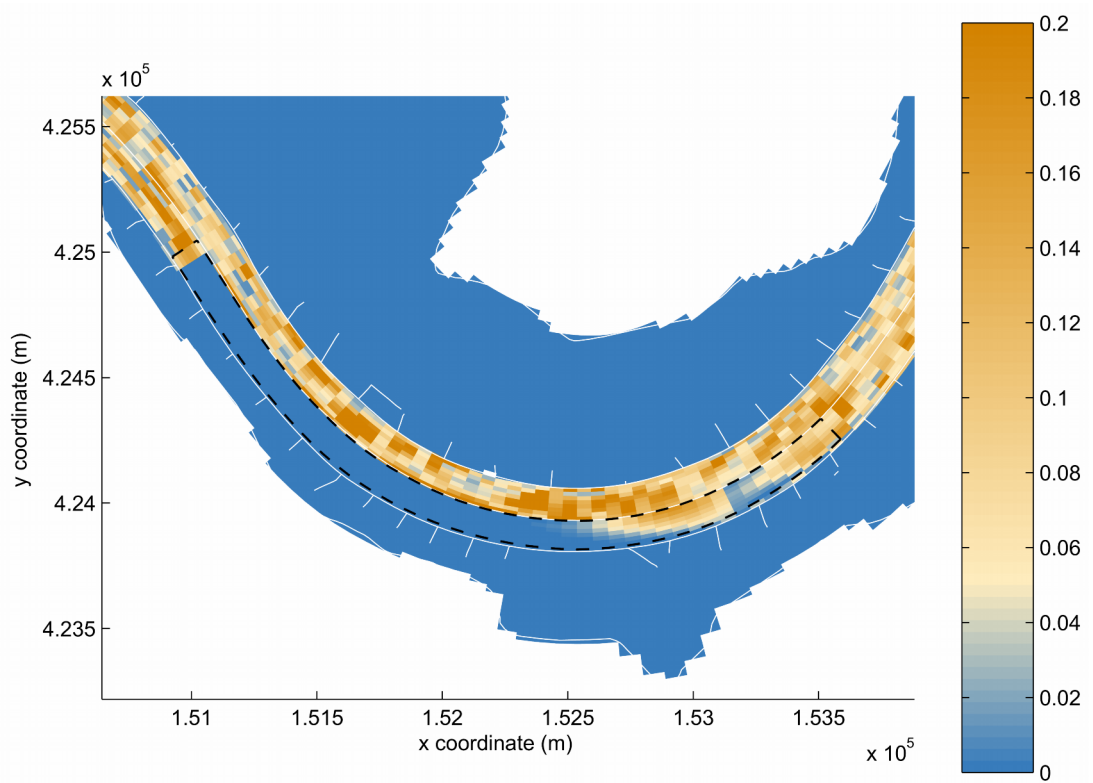
De berekeningen zijn uitgevoerd met een drietal instellingen voor de laagdikte δ_a die de reductie van de transportcapaciteit bepaalt: een laagdikte van 0,5 m (ruwweg gebaseerd op de duinhoogte op de vaste laag in Figuur 3-5), een laagdikte van 1 m (verdubbeling) en een laagdikte van 0,05 m (zeer kleine waarde). De resultaten zijn voornamelijk geanalyseerd op de voortplantingssnelheid van bodemvormen.

Zones met en zonder sedimenttransport zijn goed te onderscheiden op basis van de standaardafwijkingen van de in een berekening opgetreden bodemveranderingen. Figuren 3-8 en 3-9 geven deze standaardafwijkingen weer voor Nijmegen en St. Andries in een berekening met een laagdikte van 1,0 m. De standaardafwijking is nul op locaties waar geen transport optreedt, dat wil zeggen op de blootliggende vaste laag. De figuren laten de bovenstroomse zone zien waar nog sediment over de vaste laag getransporteerd wordt, en de benedenstroomse zone waar de gehele vaste laag schoon is.

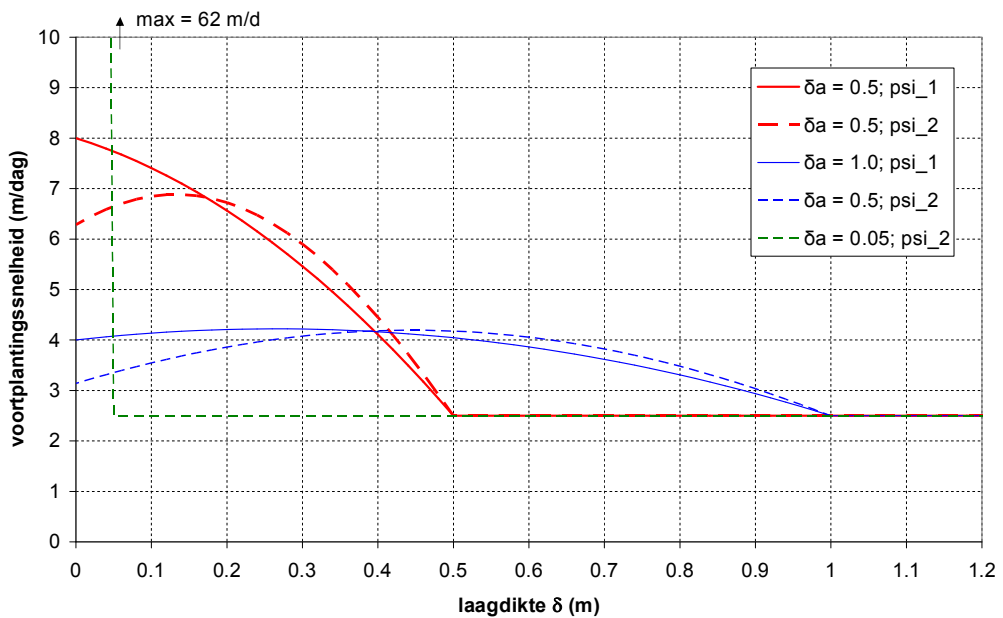
Uit de theorie van Struiksma (1999) blijkt dat de berekende voortplantingssnelheid in sterke mate bepaald wordt de reductiefunctie Ψ en de verhouding tussen de actuele laagdikte δ van alluvium op de vaste laag en de maximale laagdikte δ_a van alluvium waarop de vaste laag het transport nog beïnvloedt. Figuur 3-10 geeft voor de berekeningscondities bij St. Andries aan hoe de theoretische voortplantingssnelheid varieert als functie van de laagdikte δ . Uit de figuur blijkt dat voor situaties waarin de vaste laag “voelbaar” is ($\delta/\delta_a < 1$), de voortplantingssnelheid hoger wordt dan de alluviale voortplantingssnelheid c_a . Verder blijkt dat de voortplantingssnelheid kleiner is naarmate de laagdikte δ_a groter is gekozen.



Figuur 3-8. Standaardafwijking in de tijd van berekende bodemverandering ter plaatse van Nijmegen.

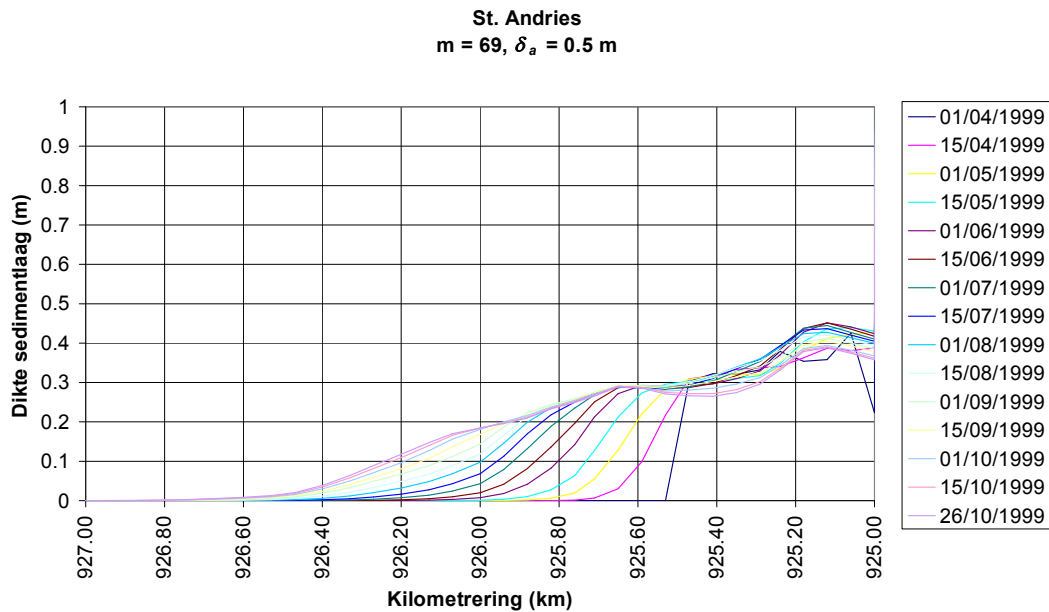


Figuur 3-9. Standaardafwijking in de tijd van berekende bodemverandering ter plaatse van St. Andries.

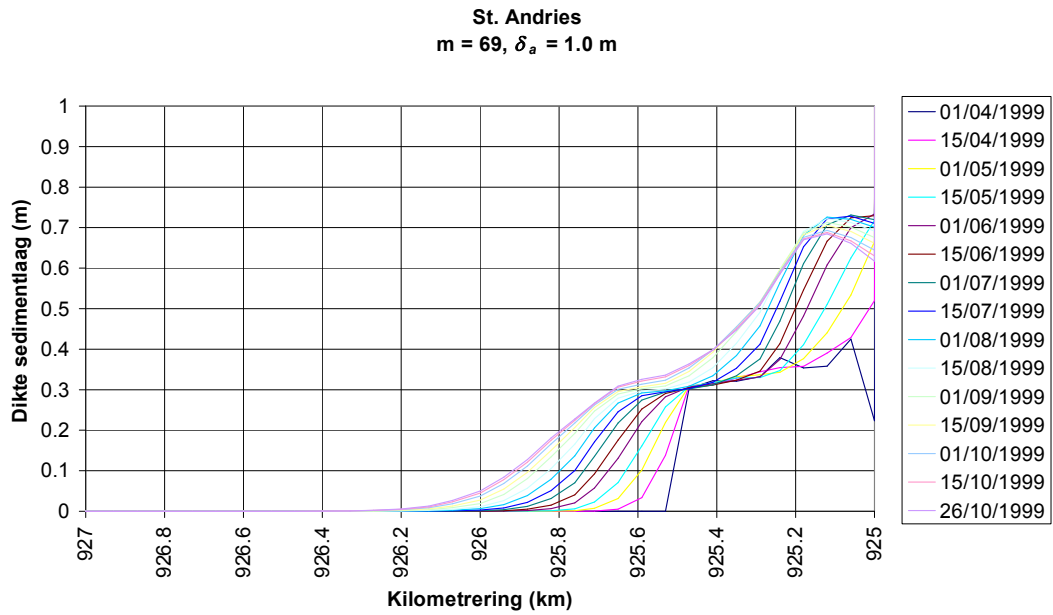


Figuur 3-10. Verplaatsingssnelheid van bodemverstoringen volgens de theorie van Struikma (1999), gebaseerd op gemiddelde condities voor de vaste laag bij St. Andries en een alluviale ongestoorde voortplantingssnelheid van 2,5 m/dag.

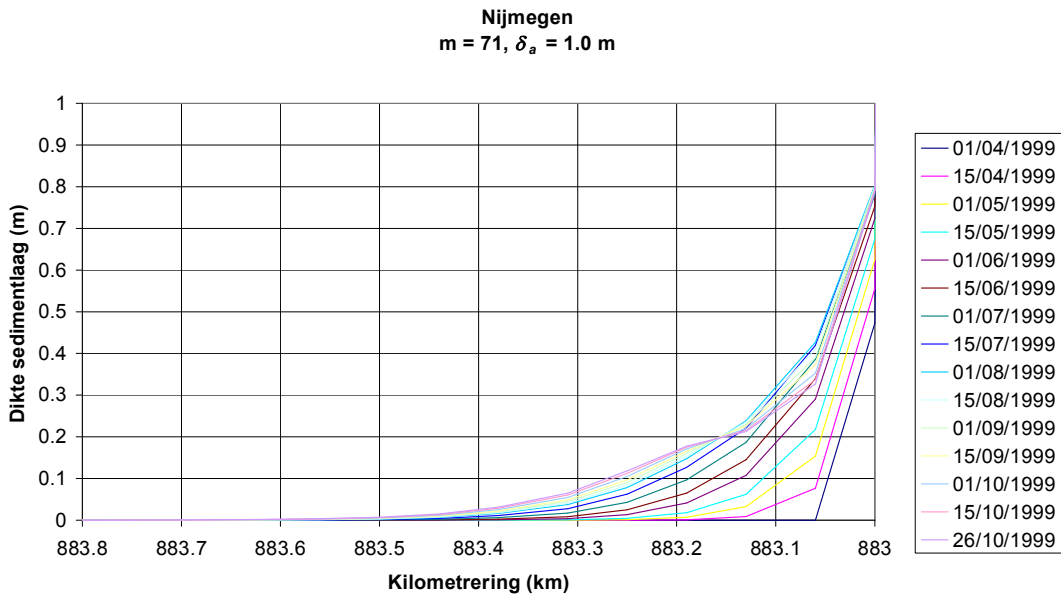
Ook uit de berekeningen kan een dergelijk gedrag worden afgeleid. De beste mogelijkheid om inzicht te krijgen in de voortplantingsnelheid van de storingen bleek het volgen van het sedimentfront dat zich na aanvang van de berekening over de vaste laag ontwikkelt. Dit front beperkt zich tot het eerste deel van de vaste laag, omdat verder benedenstrooms de spiraalstroom al het zand van de vaste laag heeft geveegd. Figuren 3-11 en 3-12 presenteren het berekende resultaat voor de vaste laag bij St. Andries. Een soortgelijk beeld is gevonden voor Nijmegen in Figuur 3-13. Berekeningen met een laagdikte van 0,05 m vertoonden geen duidelijk sedimentfront, hetgeen kan worden toegeschreven aan de zeer hoge voortplantingsnelheid (orde 6 m/dag in Figuur 3-10). Het front had zich al over de vaste laag verplaatst voordat de eerste uitvoerdata werden weggeschreven.



Figuur 3-11. Berekende ontwikkeling van sedimentfront over vaste laag bij St. Andries, met laagdikte $\delta_a = 0,5$ m en langsraai $m = 69$ (op vaste laag).



Figuur 3-12. Berekende ontwikkeling van sedimentfront over vaste laag bij St. Andries, met laagdikte $\delta_a = 1,0 \text{ m}$ en langsgraai $m = 69$ (op vaste laag).

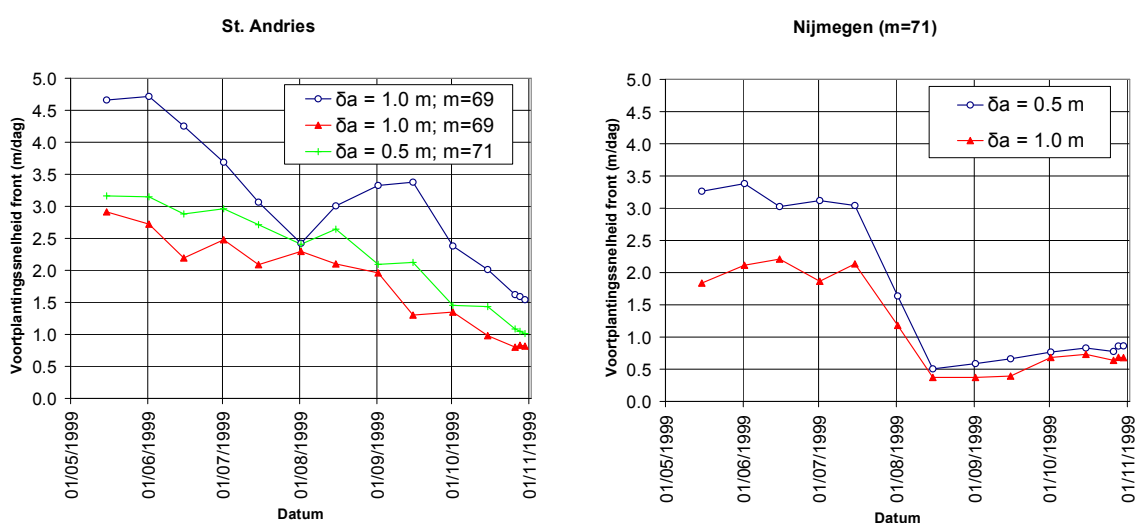


Figuur 3-13. Berekende ontwikkeling van sedimentfront over vaste laag bij Nijmegen, met laagdikte $\delta_a = 1,0 \text{ m}$ en langsgraai $m = 69$ (op vaste laag).

De voortplantingssnelheden laten zich uit Figuren 3-11, 3-12 en 3-13 aflezen door de verplaatsing per tijdseenheid af te leiden. Figuur 3-14 presenteert daarvan het resultaat. De voortplantingssnelheden zijn bepaald voor laagdiktes van 0,1 à 0,2 m.

Uit de figuren volgt:

- Voor beide berekeningen is er een duidelijk onderscheid tussen de periode met relatief hoge afvoeren tot juli en de overgang naar lage afvoeren vanaf augustus. Omdat deze overgang ook de waterbeweging beïnvloedt (er is niet tussentijds ingespeeld), is het niet zinvol de details van het verloop te analyseren. Wel van belang zijn de trends;
- De voortplantingssnelheden van het front nemen af naarmate deze voorschrijdt in de tijd. Uiteindelijk komt het front min of meer tot stilstand doordat zich een evenwicht heeft ingesteld;
- De voortplantingssnelheid voor een laagdikte van 1,0 m bedraagt ongeveer de helft van die voor een laagdikte van 0,5 m. Dit stemt overeen met de geschatte snelheid in Figuur 3-10.



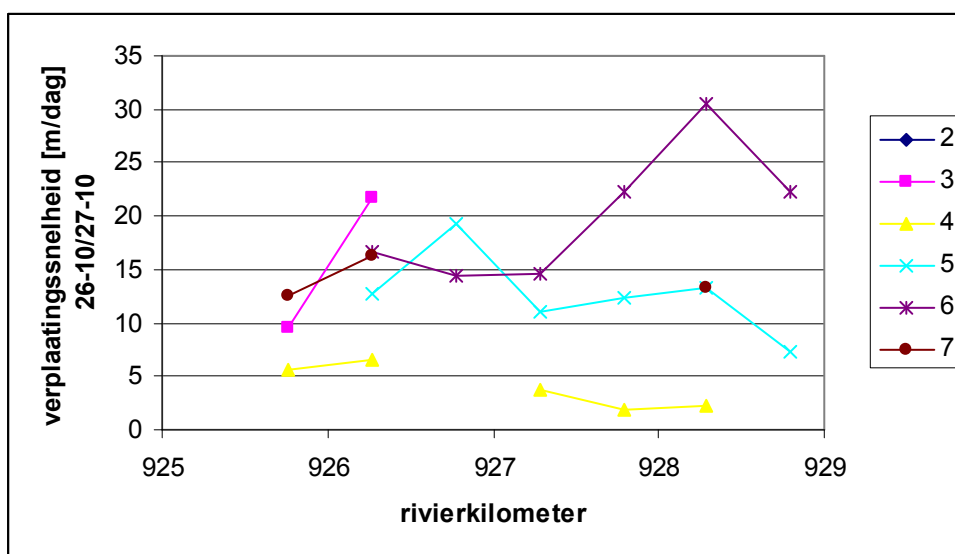
Figuur 3-14. Berekende voortplantingssnelheid van sedimentfront over vaste laag bij St. Andries, met laagdikten $\delta_a = 0,5$ m en $\delta_a = 1,0$ m, en langsgraai $m = 71$ nabij rivieras en langsgraai 69 op 33 m links daarvan.

In principe zijn deze resultaten te vergelijken met de waarnemingen van Eerden (2001) en Sieben (2004). De in Paragraaf 3.2 aangegeven waarden volgens Sieben (2004) zijn in eerste instantie afgeleid voor een combinatie van plaatsvaste en verplaatsende bodemvormen. Eliminatie van de plaatsvaste bodemveranderingen verandert de resultaten iets. Figuur 3-15 toont de resulterende verplaatsingssnelheden van de bodemvormen. Zowel de rekenresultaten als de waarnemingen van Eerden en Sieben geven aan dat de voortplantingssnelheid op het met sediment bedekte deel van de vaste laag ongeveer 3,5 tot 5 m/dag bedraagt. De berekening met een laagdikte δ_a van orde 1 m geeft voor St. Andries een redelijk goede benadering.

Opmerking ten aanzien van ruwheid

In de hier gepresenteerde analyses is steeds uitgegaan van een constante ruwheid van het zomerbed. Het ligt echter voor de hand dat de grofheid van de stortsteen tot een relatief hoge ruwheid van de vaste laag leidt.

Echter, wanneer zand over deze vaste laag wordt getransporteerd wijzigt de ruwheid. Deze kan zelfs aanzienlijk verminderen. Uit laboratoriumexperimenten van Van der Zwaard (1974a, b) is ook gebleken dat de Chézywaarde van de vaste laag vrij hoog kan worden, en de ruwheid dus laag, bij sedimenttransporten beneden 40% van de lokale transportcapaciteit in geval van een volledig alluviale bodem. Bij hogere transporten neemt de Chézywaarde geleidelijk af tot de waarde die hoort bij een volledig alluviale bodem. Dit verloop wordt verklaard door te veronderstellen dat het zand bij lage transporten zonder duinvorming over de vaste laag beweegt, en bij hogere transporten met duinvorming. Foto's van de experimenten bevestigen dit.



Figuur 3-15. Verplaatsingssnelheid van bodemstoringen afgeleid door RIZA uit bodempeilingen in 1999, na eliminatie van plaatsvast bodemvormen (raaien 2 tot en met 4 zijn op de vaste laag).

Opmerking ten aanzien van laagdikte

Theoretisch zou de laagdikte ongeveer overeen moeten komen met de helft van de duinhoogte, omdat de troggen tussen de duinen dan de vaste laag net raken. De gevonden laagdikte van 1,0 m impliceert dan 2 m hoge duinen die bij gemiddelde of zomerbedvullende afvoeren niet voorkomen. Frappant is dat berekeningen voor de Pannerdensche Kop met gegradeerd sediment ook de beste resultaten geven als wordt aangenomen dat de actieve laag of transportlaag circa 1 m dik is (Mosselman, 2003; Mosselman & Sloff, 2005). Ook van die laag wordt de dikte gewoonlijk gelijk gesteld aan de halve duinhoogte. Een mogelijke fysische verklaring is dat de bodem door afvoervariaties jaarlijks veel meer fluctuaties ondergaat dan uitsluitend de fluctuaties ten gevolge van passerende duinen.

4 Verkorting van rekentijden voor variërende afvoeren

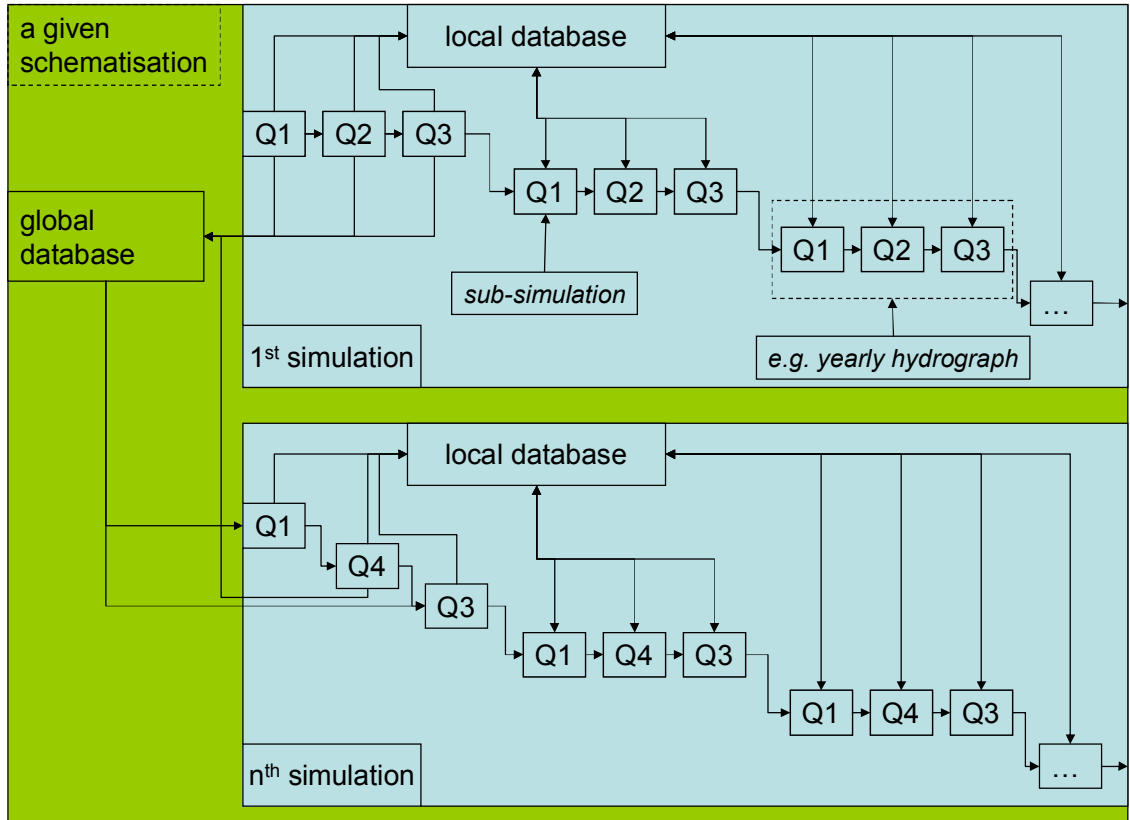
4.1 Beschrijving

Het reduceren van rekentijden heeft een hoge prioriteit vanwege de omvang van het beoogde 2D model van de Rijntakken tussen Duisburg en de Rijnmond. Bij eerdere modellen, zoals dat voor het Grensproject, is gebleken dat de rekentijd fors versneld kan worden met behulp van een quasi-stationaire aanpak, met een in discrete stappen geschematiseerde afvoerreeks en een database waarin berekende stroombeelden worden opgeslagen zodat het inspelen van een stromingsberekening bij een afvoerovergang niet telkens hoeft te worden herhaald.

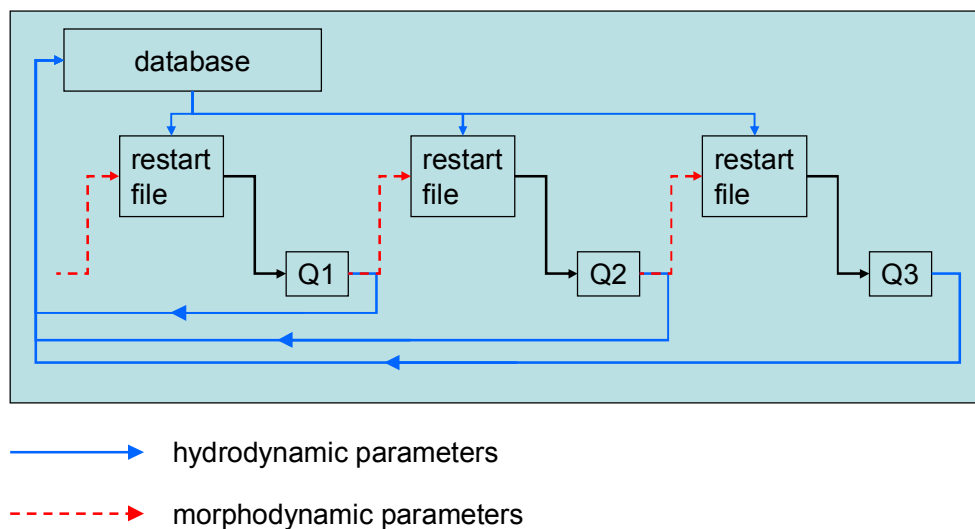
Een dergelijke aanpak, waarover het oude Delft3D-MORSYS reeds beschikt, is in deze opdracht ook voor Delft3D-3DMOR ontwikkeld. Dat was niet alleen een kwestie van gegevens lezen en schrijven in databases. Er moest ook een nieuwe methode ontwikkeld worden voor de afhandeling van de abrupte afvoerveranderingen die aan een quasi-stationaire aanpak eigen zijn. Het oude Delft3D-MORSYS beschikt namelijk over een *off-line* koppeling tussen de hydrodynamische en de morfodynamische modules. Deze maakt het mogelijk om de hydrodynamica genoeg tijd te geven om zich aan een nieuwe afvoer aan te passen alvorens het sedimenttransport en de morfologische veranderingen te berekenen. De hydrodynamische en morfodynamische simulaties hebben eigen tijdsuithoudingen en worden in een bepaalde voorgeschreven volgorde uitgevoerd. Daarbij delen ze een gemeenschappelijke *communication file*. Het nieuwe Delft3D-3DMOR is gebaseerd op een *on-line* koppeling tussen waterbeweging, sedimenttransport en morfologie, waarbij een volledige morfodynamische rekenstap in een enkele simulatie wordt uitgevoerd. Abrupte afvoerveranderingen kunnen dan niet meer als in het oude Delft3D-MORSYS worden afgehandeld.

Voor de quasi-stationaire aanpak is een speciale *simulation management tool* ontwikkeld. Deze bestaat uit twee componenten. De eerste regelt het lezen van en het schrijven naar de databases. De tweede component regelt de aanpassing van de invoerfiles en de randvoorwaardenfiles aan de vereisten van elke afvoer in de hydrograaf.

Een simulatie met meerdere afvoeren volgt het schema in Figuur 4-1, waar twee verschillende databases onderscheiden worden. De *global database* wordt voor verschillende simulaties gebruikt die met een bepaalde modelschematisatie worden uitgevoerd. Hiernaar worden hydrodynamische parameters geschreven als voor het eerst voor een bepaalde afvoer gegevens berekend zijn. Komt later in een simulatie nogmaals dezelfde afvoer voor, dan wordt de *global database* hiervoor niet meer bijgewerkt. De *local database* wordt daarentegen binnen een simulatie regelmatig gebruikt. Na iedere berekening voor een bepaald afvoerniveau wordt deze database bijgewerkt met de bijbehorende hydrodynamische parameters.



Figuur 4-1. Schematische weergave van de volgorde van uitvoering en de bijbehorende communicatie met databases in een simulatie met meerdere afvoeren.



Figuur 4-2. Gedetailleerde weergave van de communicatieprocedure tussen deelsimulaties.

De eerste simulatie start met lege databases. Verschijnt een bepaalde afvoer voor de eerste keer, dan worden beide databases gevuld met de bijbehorende hydrodynamische parameters aan het eind van de deelsimulatie. De morfologische parameters aan het eind van de deelsimulatie worden gebruikt als beginvoorwaarden voor de volgende deelsimulatie. Iedere latere deelsimulatie gaat uit van een *restart file* die *off-line* gecreëerd is.

Deze *restart file* is gebaseerd op de laatst berekende morfologische parameters en de bij de actuele afvoer horende hydrodynamische parameters uit de database (Figuur 4-2). Verschijnt een afvoer voor het eerst, dan worden de hydrodynamische condities van de meest nabije lagere afvoer gebruikt uit de *global database*. Bij domeindecompositie gelden dezelfde procedures voor elk deeldomein afzonderlijk.

Om storingen door abrupte afvoerovergangen te voorkomen, krijgt elke deelsimulatie voldoende inspeeltijd om de hydrodynamische condities uit de database zich te laten aanpassen aan de morfologie uit de voorafgaande deelsimulatie. De inspeeltijd (*spin-up time*) wordt door de gebruiker opgegeven door de parameter *InitialPeriod* van een waarde te voorzien voor elke waarde van *RestartLevel*. Voor de waarden van *RestartLevel* zijn er de volgende opties:

- *RestartLevel* = 0: de stroming wordt gevonden in de *local database*. De stroming behoeft slechts geringe aanpassing. De waarde van *InitialPeriod* kan minimaal zijn.
- *RestartLevel* = 1: de stroming wordt gevonden in de *global database*. De benodigde aanpassing van de stroming kan aanzienlijk zijn en *InitialPeriod* zou tamelijk lang moeten zijn.
- *RestartLevel* = 2: onder de *restart files* wordt geen passende file gevonden. Dan zou *InitialPeriod* erg lang moeten zijn om volledige aanpassing van de stroming te garanderen.
- *RestartLevel* = 9: er is geen *restart file* voorhanden. Ook dan zou *InitialPeriod* in principe erg lang moeten zijn.

Tijdens een simulatie worden de resultaten van elke deelsimulatie gegenereerd en opgeslagen in een aparte *map file*. Om tussenresultaten te kunnen volgen en dataopslag te kunnen beheersen, kan de gebruiker een *trace-back level* specificeren met de parameter *TraceBackInfo*:

- *TraceBackInfo* = 0: verplaats alleen NEFIS-files tijdelijk naar een *output directory*.
- *TraceBackInfo* = 1: verplaats alle files tijdelijk naar een *output directory* en wis alle files na iedere succesvolle rekenstap.
- *TraceBackInfo* = 2: verplaats alle files tijdelijk naar een *output directory* en wis alle NEFIS-files na iedere succesvolle stap.
- *TraceBackInfo* = 3: verplaats alle files tijdelijk naar een *output directory* en wis alle NEFIS-files, met uitzondering van *restart files*, na iedere succesvolle stap.
- *TraceBackInfo* = 4: verplaats alle files tijdelijk naar een *output directory* en bewaar alle files.

Een *TraceBackInfo*-waarde van 4 wordt aanbevolen, omdat dit garandeert dat resultaten uit de hele modelperiode worden opgeslagen.

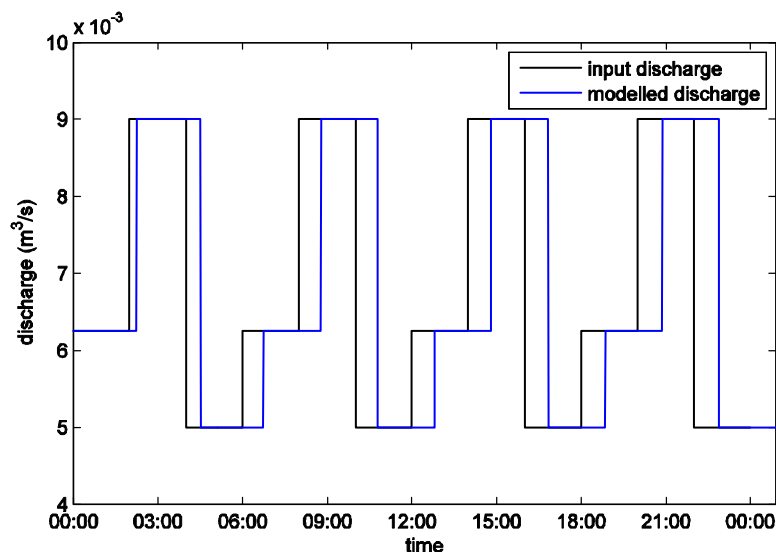
Een aanvullende parameter om de hoeveelheid opgeslagen gegevens uit deelsimulaties te beheren is *OutputOption*. Deze kent de volgende opties:

- *OutputOption* = 1: een gegeven aantal uitvoergegevens (*NOutput*), gelijkelijk verdeeld over de simulatieperiode, inclusief de inspeelperiode.
- *OutputOption* = 2: een interval voor gegevensuitvoer dat gelijk is aan de tijdstap die gedefinieerd is in de MDF-file.

Aan het eind van een simulatie worden de resultaten van alle deelsimulaties in een enkele file gecombineerd. Deze file bevat de resultaten van de gehele simulatie en kan gebruikt worden voor nabewerking. Deze stap wordt als nabewerking uitgevoerd met behulp van een Matlab-script.

4.2 Testen

De functionaliteit van de *simulation management tool* is getest voor simulaties met zowel een enkel domein als meerdere domeinen. Hiervoor werd het model van de Olesengoot gebruikt dat in Hoofdstuk 2 beschreven is. De toegepaste afvoertijdreeks bestaat uit drie verschillende afvoeren die elk 120 minuten aanhouden. Figuur 4-3 laat een voorbeeld zien waarin de als invoer opgegeven tijdreeks verschilt van de tijdreeks in het model. De verschuiving in de tijd is toe te schrijven aan de inspeeltijd.



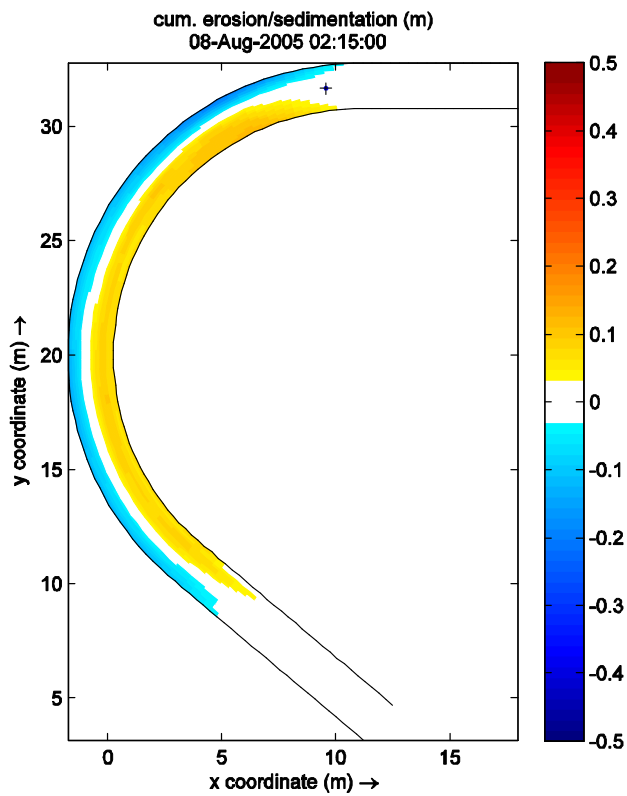
Figuur 4-3. Vergelijking tussen als invoer opgegeven afvoertijdreeks en afvoertijdreeks in model.

4.3 Resultaten

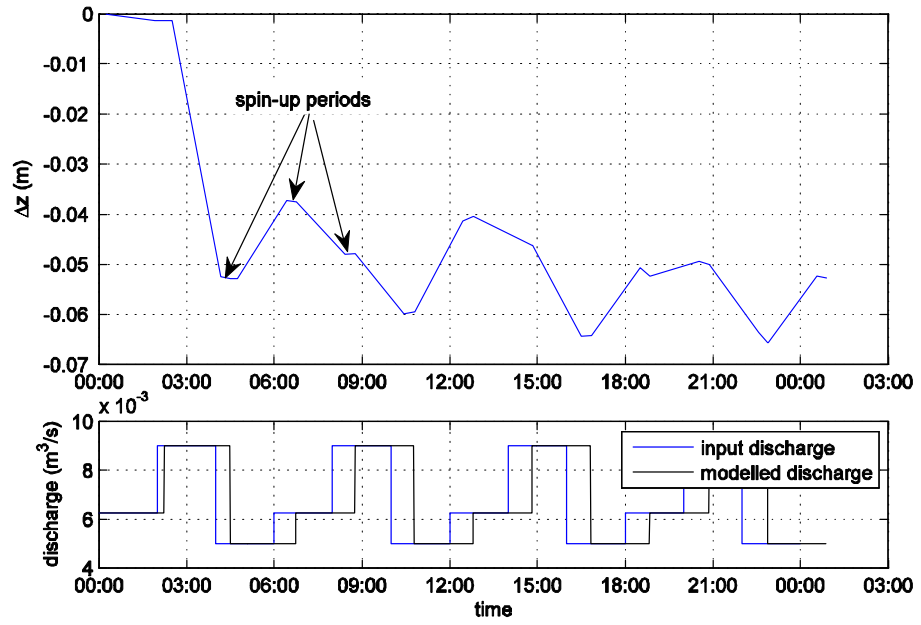
Figuren Figuur 4-1 en Figuur 4-2 geven voorbeelden van resultaten uit de testen van de functionaliteit van de *simulation management tool*. Figuur 4-1 presenteert het patroon van erosie en sedimentatie aan het einde van de eerste afvoer en Figuur 4-2 toont de tijdsafhankelijke veranderingen in bodemniveau op de locatie die in Figuur 4-1 gemarkeerd is. In Figuur 4-2 is te zien dat de morfologische ontwikkeling voor iedere nieuwe afvoer onderbroken wordt door een inspeelperiode.

Dit beeld ontstaat omdat de hydrodynamische tijd gegeven wordt. Bij gebruik van de morfologische tijd vervallen de inspeelperiodes en ontstaat een ononderbroken morfologische ontwikkeling.

De *simulation management tool* heeft de testen succesvol doorstaan. Inmiddels is uit een andere opdracht bekend dat deze nieuwe *tool* ook goed werkt in berekeningen voor bochtcorrectie in de Lek bij Vianen.



Figuur 4-1. Bodemveranderingen aan het einde van de eerste afvoer.

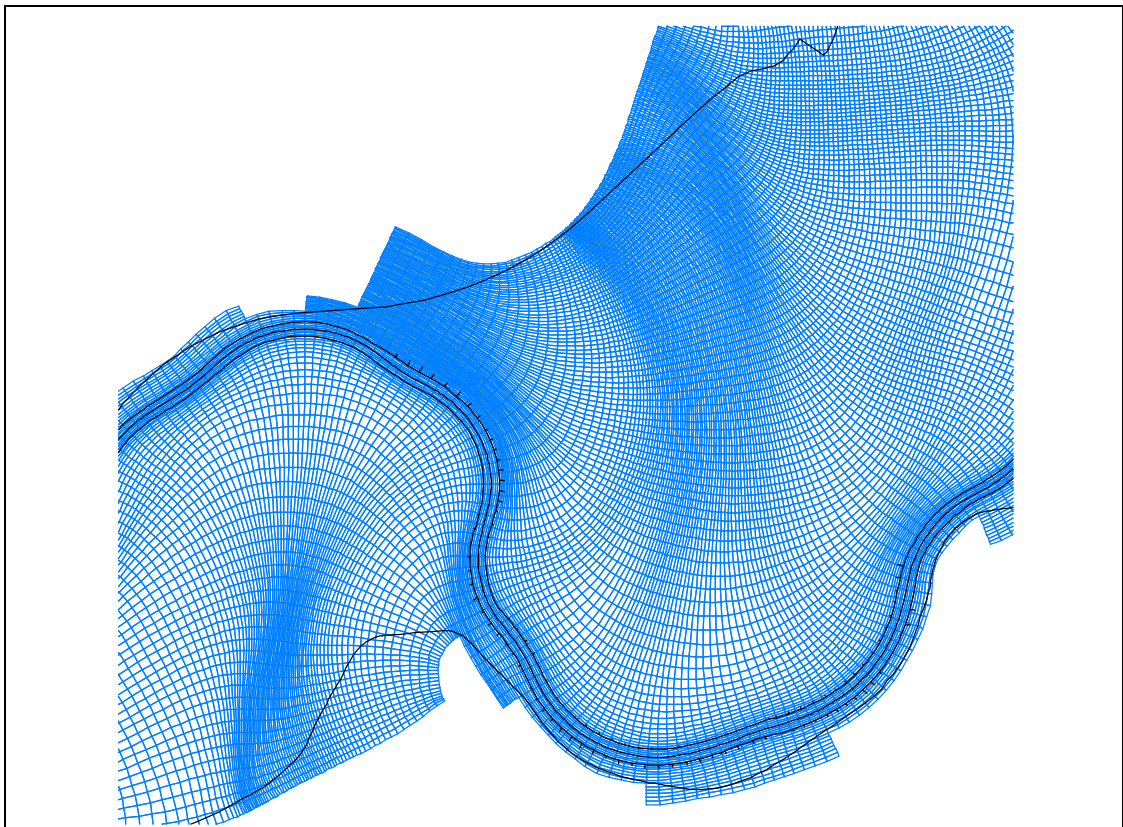


Figuur 4-2. Veranderingen in bodemniveau voor de in Figuur 4-4 gemarkeerde locatie (boven) en de bijbehorende afvoervariaties (onder).

5 Verkorting van rekestijden door grovere deeldomeinen

5.1 Beschrijving

Rekestijden zijn ook te verkorten door het aantal roosterzellen te reduceren. Hier wordt onderzocht in hoeverre dit mogelijk is door lokaal het rooster te verfijnen. Figuur 5-1 laat zien dat de eis van roosterlijnen langs de normaallijnen van het zomerbed ertoe leidt dat het rooster extreem fijn wordt op uiterwaarden in de binnenbocht van grote meanders. Omdat een dergelijk hoge resolutie daar niet nodig is, worden fijne delen van het rooster hier met behulp van domeindecompositie vervangen door grovere roosters.

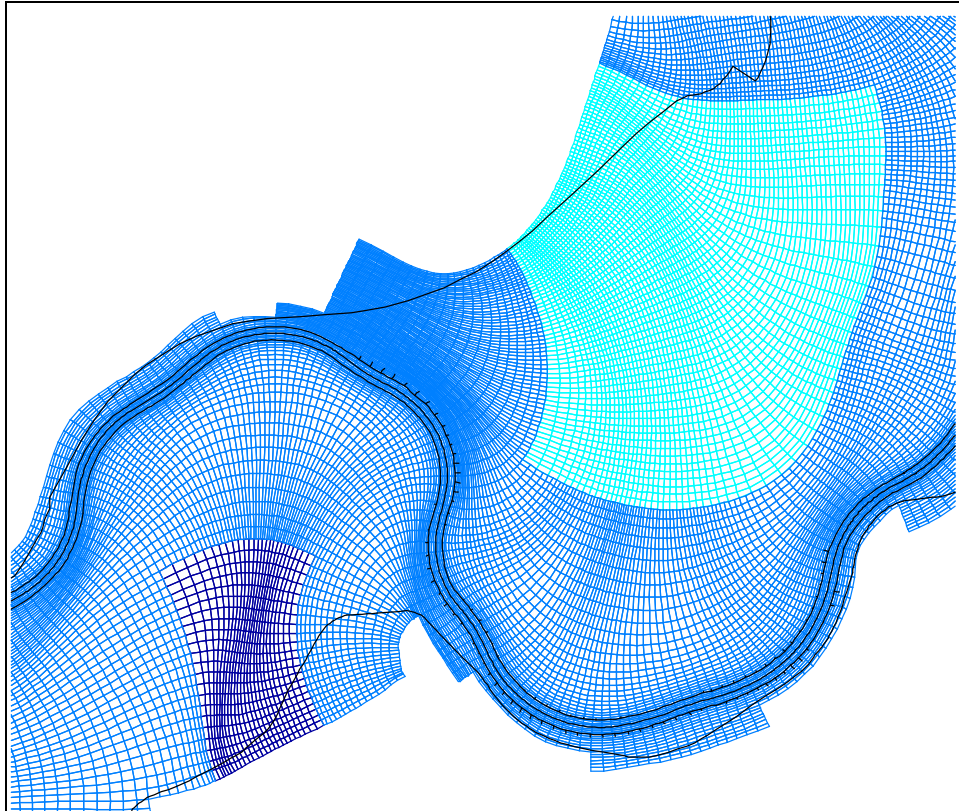


Figuur 5-1. Voorbeeld van ongewenst fijn rekenrooster op uiterwaarden in binnenbochten van grote meanders van de IJssel.

5.2 Testen

Twee stukken van het rekenrooster van de IJssel in Figuur 5-1 zijn met behulp van domeindecompositie vervangen door grovere roosters als aangegeven in Figuur 5-2. Het linker domein reduceerde het aantal rekencellen van 8024 naar 4012, het rechter domein van 1344 naar 672.

Voor beide roosters werd een hydrodynamische berekening uitgevoerd waarbij alle overige instellingen en parameterwaarden gelijk gehouden werden. De simulatie was relatief kort (12 uur hydrodynamische tijd) en werd uitgevoerd voor een constante hoogwaterafvoer van $11000 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Lobith. Bij deze hoge afvoer stroomde er ook daadwerkelijk water door de zones van de gewijzigde deeldomeinen.



Figuur 5-2. Lokale vergroving van het rekenrooster met behulp van deeldomeinen op uiterwaarden in binnenbochten van twee grote IJsselmeanders.

5.3 Resultaten

De modelschematisatie met deeldomeinen leidde juist tot langere in plaats van kortere rekentijden, van 71 minuten voor het oorspronkelijke rooster tot 100 minuten voor het samengestelde rooster. Blijkbaar overtreft de extra tijd voor communicatie tussen de verschillende domeinen de tijdwinst van een geringer aantal roostercellen. Het is nuttig om op te merken dat ook de tijdstappen in beide berekeningen gelijk waren. Was het rooster over de hele linie grover gemaakt, dan was een grotere tijdstap en dus een snellere berekening mogelijk geweest. In dit geval voorkwamen de twee grovere deeldomeinen echter niet dat het rooster op andere plaatsen heel fijn bleef. Die andere plaatsen waren maatgevend voor de tijdstap.

De resultaten duiden erop dat het gebruik van lokale grovere deeldomeinen moet worden afgeraden.

Naast het gevonden tijdverlies voor communicatie en de ongevoeligheid van de tijdstap, geldt deze conclusie ook omdat de desbetreffende gebieden maar beperkt aan de berekening bijdragen omdat de uiterwaarden slechts een gering deel van de tijd overstroomd zijn. Bij lage afvoeren doen deze stukken van het rekenrooster toch al niet mee.

6 Hulpmiddel voor grootschalige ijking van waterbeweging

6.1 Beschrijving

Een belangrijk criterium bij de hydrodynamische ijking is dat de verdeling van afvoeren over zomer- en winterbed correct wordt weergegeven. Daarom is een hulpmiddel ontwikkeld dat deze verdeling voor elk dwarsprofiel uit de rekenresultaten afleidt en visualiseert. In de toekomst zou het hulpmiddel uitgebreid kunnen worden naar een instrument voor automatische kalibratie, waarmee ruwheden in een aantal iteratieslagen worden aangepast totdat de berekende verdeling van afvoeren overeenkomt met een gemeten of met WAQUA berekende verdeling. De uitbreiding voor automatische kalibratie maakte echter geen deel uit van deze opdracht. Daarbij geldt de overweging van Mosselman et al (2005) dat een bestaand soortgelijk instrument voor WAQUA-berekeningen niet zonder meer kan worden overgenomen, omdat hoogwaterberekeningen met WAQUA worden afgeregeld met de zomerbedruwheid, terwijl het huidige DVR-model vraagt om een afregeling met de winterbedruwheid.

Omdat de roosterlijnen de normaallijnen van het zomerbed volgen, kan de verdeling van afvoeren over zomer- en winterbed eenvoudig worden afgeleid. De enige lichte complicatie is het versprongen rekenrooster (*staggered computational grid*), waardoor stroomsnelheden en afvoercomponenten met een bepaald rangnummerpaar niet precies voor dezelfde locatie gelden als bodemliggingen en waterstanden met hetzelfde rangnummerpaar. Tijdens een hydrodynamische simulatie worden de gemiddelde afvoercomponenten in de richtingen van de lokale roosterlijnen berekend en gemiddeld over de laatste in de communicatiefile geschreven tijdstap. Voor elke cel worden de afvoercomponenten berekend in dezelfde punten als de stroomsnelheidscomponenten. De celafvoeren in de hoofdrichting kunnen tussen twee lijnen gesommeerd worden. De som over het hele dwarsprofiel geeft de totale afvoer. De som tussen de normaallijnen levert de afvoer door het zomerbed. De afvoer door het winterbed volgt uit het verschil tussen de totale afvoer en de zomerbedafvoer.

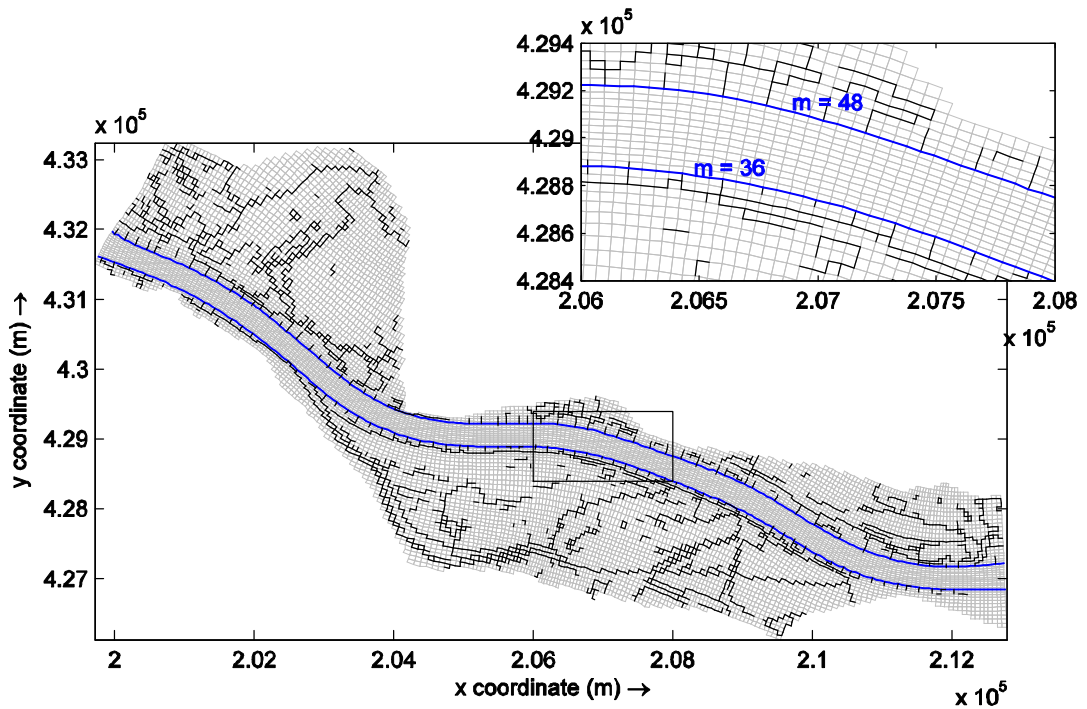
Voor iedere riviertak zijn de rangnummers m bepaald van de roosterlijnen die overeenkomen met de normaallijnen van het zomerbed.

Tabel 6-1 geeft hiervan een overzicht en Figuur 6-1 een illustratie.

Tabel 6-1. Rangnummers van roosterlijnen die overeenkomen met normaallijnen van het zomerbed.

Riviertak (deeldomein)	Rangnummer van roosterlijn overeenkomend met normaallijn	
	links	rechts
Bovenrijn	36	48
Waal	64	80
Pannerdensch Kanaal	41	49
IJssel	84	92

Nederrijn	44	53
-----------	----	----

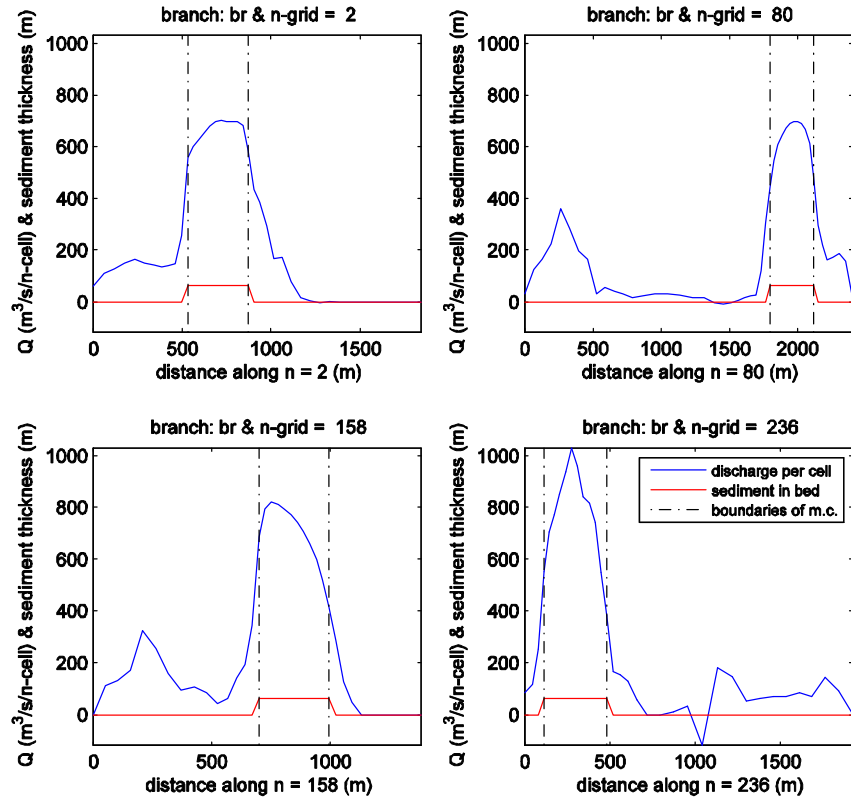


Figuur 6-1. Illustratie van roosterlijnen die samenvallen met normaallijnen van het zomerbed (Bovenrijn).

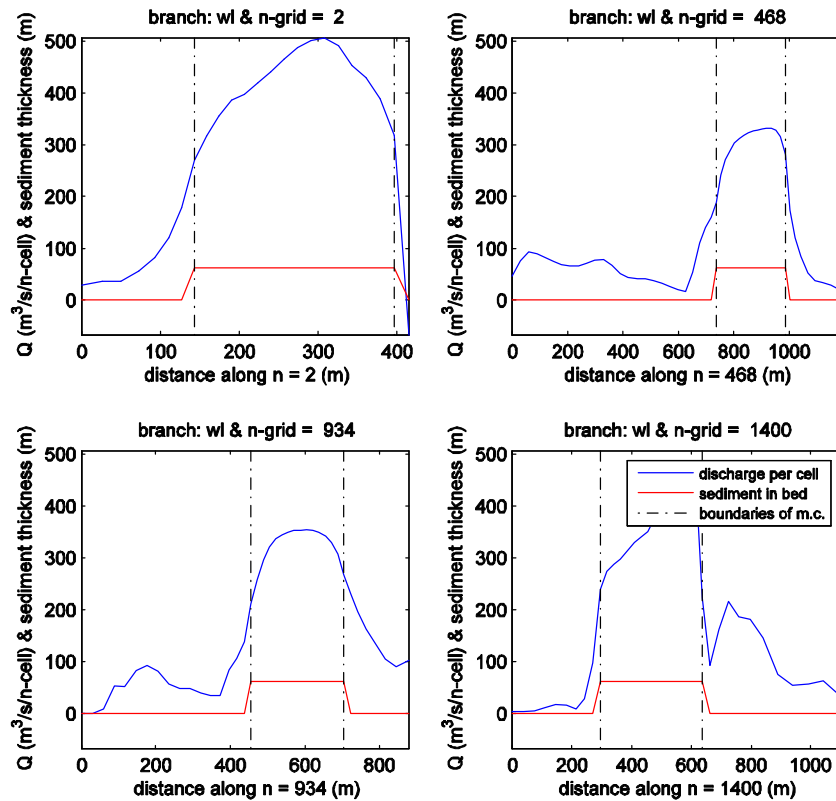
6.2 Testen

Om het hulpmiddel te testen, zijn tevens sedimentdikten en posities van de normaallijnen voor verschillende dwarsprofielen uit het model afgeleid. Omdat alleen het zomerbed alluviaal is, zijn de sedimentdikten in het winterbed gelijk aan nul. Figuren 6-2 tot en met 6-6 laten zien dat de verschillende verdelingen en de posities van de normaallijnen onderling consistent zijn.

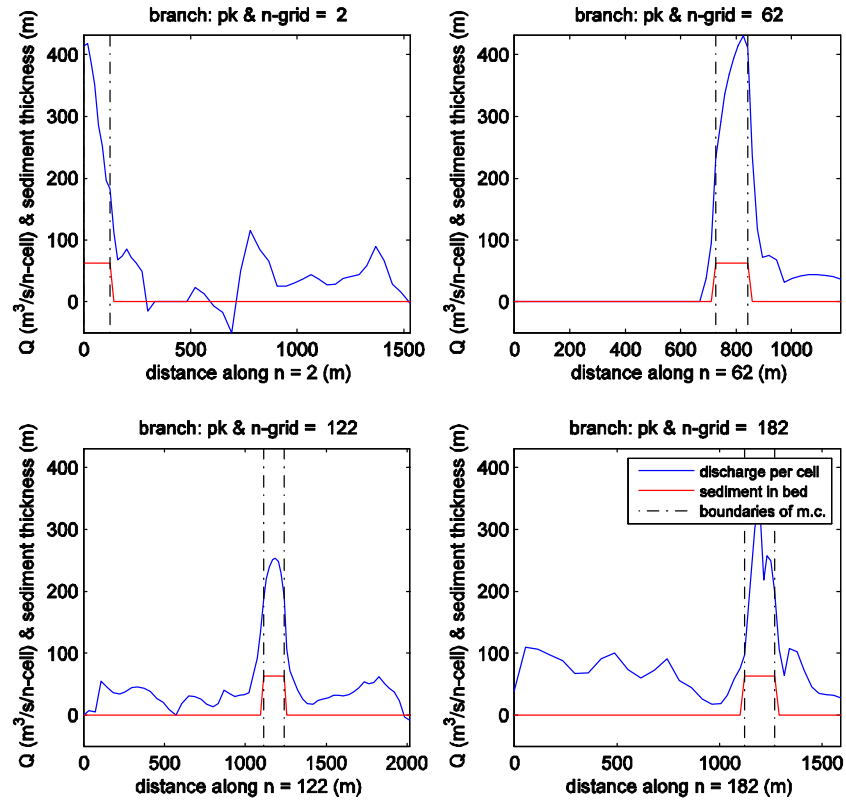
Geverifieerd is verder dat de totale afvoer door het eerste dwarsprofiel na de bovenrand gelijk is aan de afvoer die als randvoorwaarde is opgegeven.



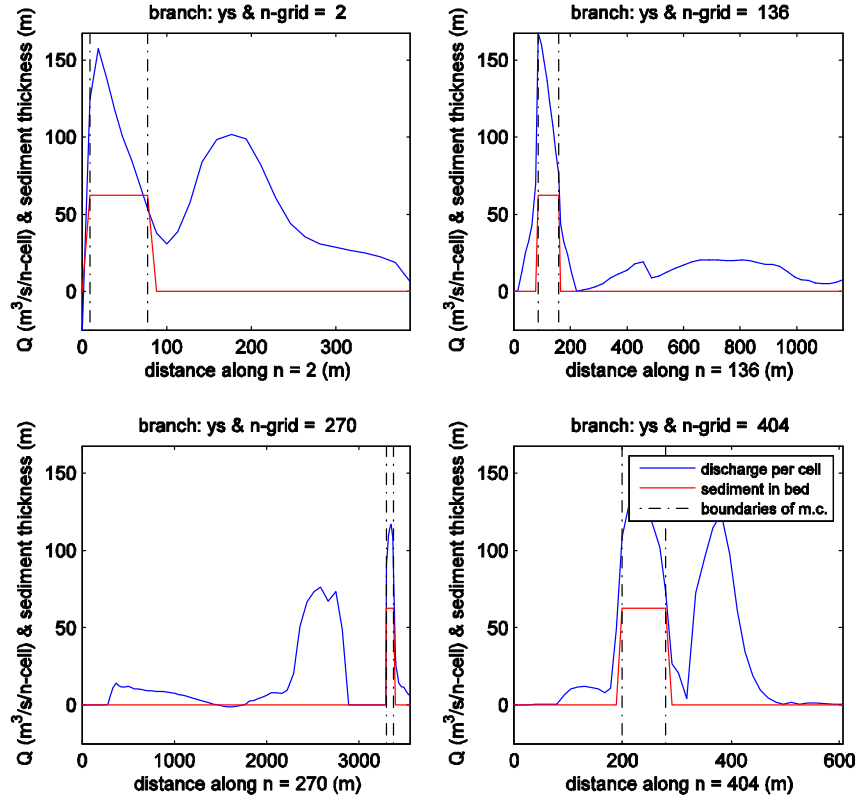
Figuur 6-2. Verdelingen van afvoeren en sedimentdikten over dwarsprofielen als controle dat de grenzen tussen zomer- en winterbed correct behandeld worden (Bovenrijn).



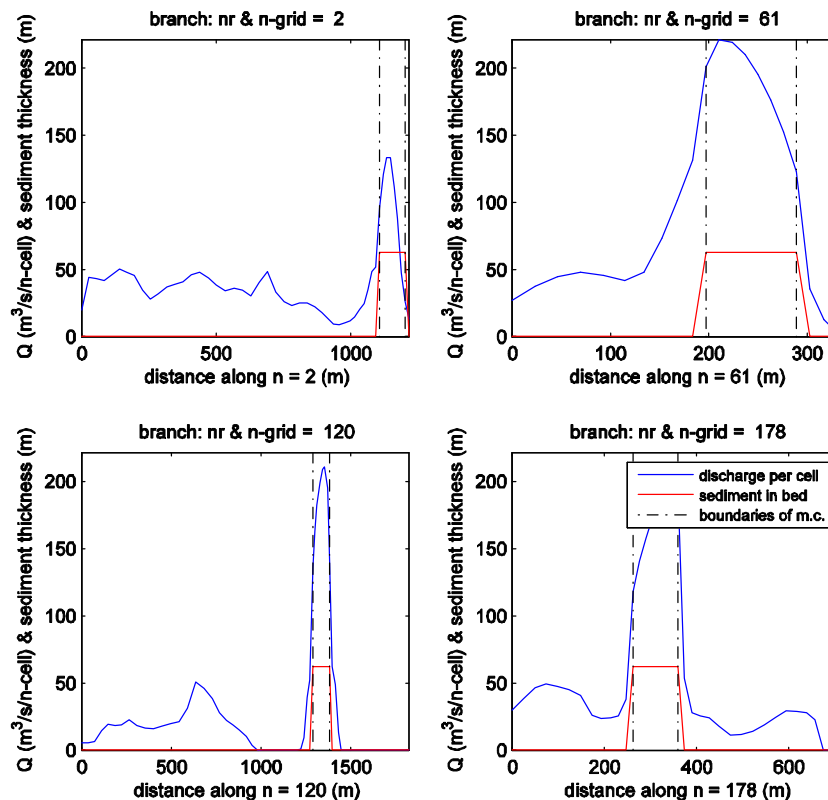
Figuur 6-3. Verdelingen van afvoeren en sedimentdikten over dwarsprofielen als controle dat de grenzen tussen zomer- en winterbed correct behandeld worden (Waal).



Figuur 6-4. Verdelingen van afvoeren en sedimentdikten over dwarsprofielen als controle dat de grenzen tussen zomer- en winterbed correct behandeld worden (Pannerdensch Kanaal).



Figuur 6-5. Verdelingen van afvoeren en sedimentdikten over dwarsprofielen als controle dat de grenzen tussen zomer- en winterbed correct behandeld worden (IJssel).



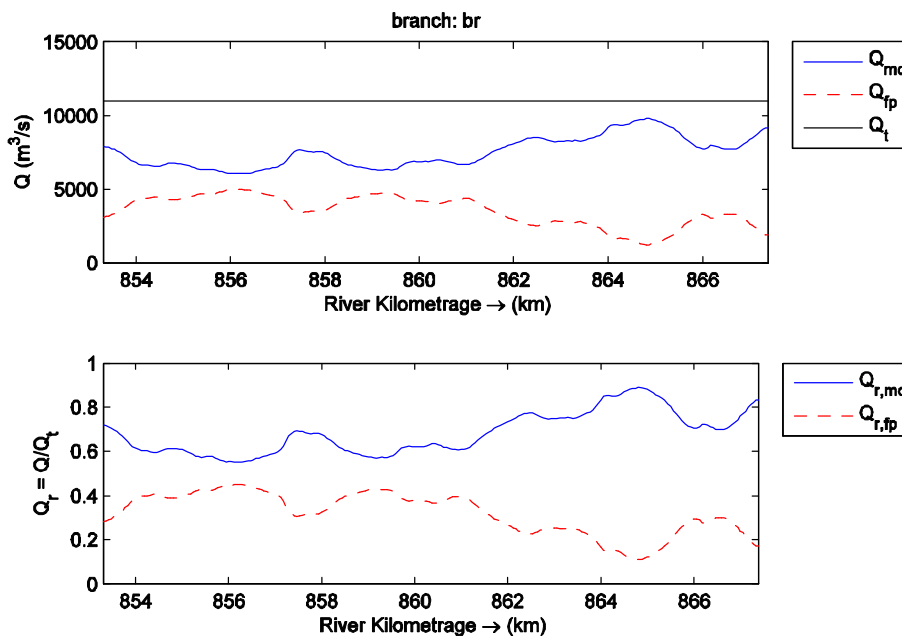
Figuur 6-6. Verdelingen van afvoeren en sedimentdikten over dwarsprofielen als controle dat de grenzen tussen zomer- en winterbed correct behandeld worden (Nederrijn).

6.3 Resultaten

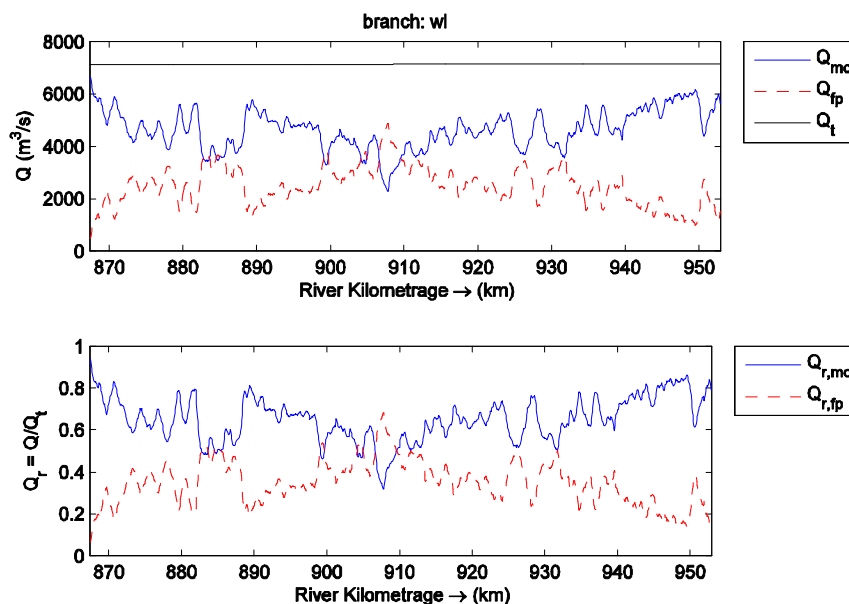
Het hulpmiddel voor grootschalige ijking van waterbeweging is toegepast op een simulatie met een constante hoogwaterafvoer van 11000 m³/s bij Lobith. De resultaten voor de verschillende takken of deeldomeinen zijn weergegeven in de Figuren 6-7 tot en met 6-11. Deze figuren laten ook zien dat de totale afvoer van een tak in elk dwarsprofiel gelijk is. Bij nadere beschouwing treden variaties van minder dan 0,1% op, zoals Figuur 6-12 laat zien voor de Waal. Dit lijkt toe te schrijven aan kleine onnauwkeurigheden in het bepalen van afzonderlijke afvoeren per cel die vervolgens gesommeerd worden. Vermeldenswaard is overigens dat dit soort fouten groter kan worden in een morfodynamische berekening, omdat elke bodemverandering impliciet neerkomt op het toevoegen of weghalen van een klein volume water. Praktisch gesproken blijven dergelijke fouten echter verwaarloosbaar klein.

De Figuren 6-13 tot en met 6-17 vergelijken de resultaten van het hulpmiddel met die van een vergelijkbaar hulpmiddel van Rijkswaterstaat op basis van WAQUA-resultaten. Bepaalde afwijkingen treden op omdat de berekeningen op verschillende rekenroosters zijn uitgevoerd. Verder zijn er beduidende afwijkingen in de Waal bij Nijmegen (km 882-889) en in de Boven-IJssel (km 879-882) waar Delft3D gerekend heeft met de rivierverruiming Veur Lent en Hondsbroeksche Pleij die niet in de WAQUA-berekeningen waren aangebracht. Op basis van de testen en de vergelijkingen kan geconcludeerd worden dat het nieuw ontwikkelde hulpmiddel goed voldoet. Het is verder flexibel in het gebruik en gemakkelijk aan eventuele nieuwe eisen aan te passen.

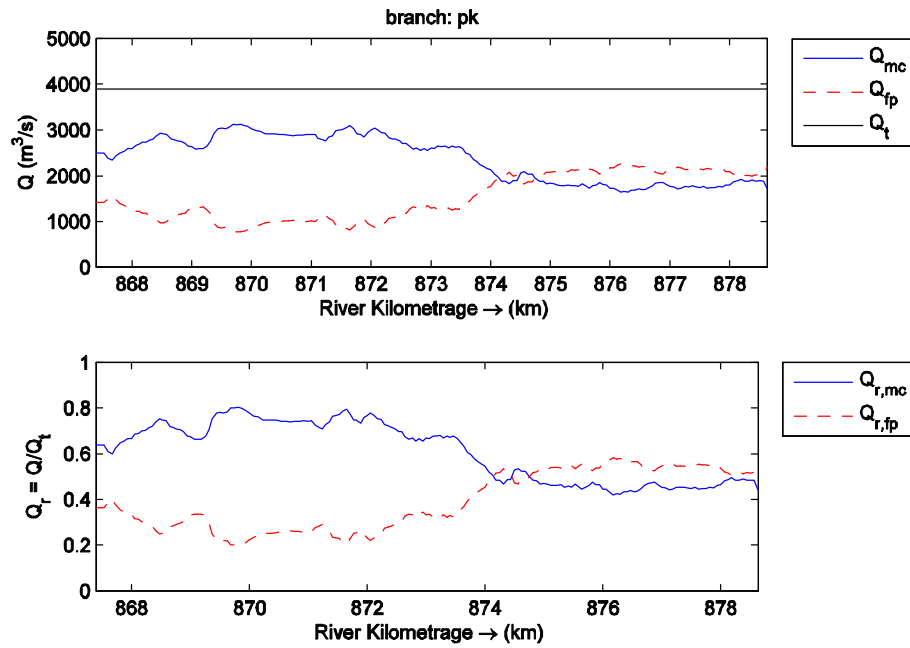
Het hulpmiddel zou gebruikt kunnen worden in een automatische kalibratie op de afvoerverdeling tussen zomer- en winterbed. De afvoerverdeling zou dan echter niet moeten worden afgeregeld door variatie van de zomerbedruwheid, maar door variatie van de winterbedruwheid (Mosselman, Sloff & Jagers, 2005). Door de verschillende trachytopen (zones van een bepaalde ruwheidsklasse) en overlaten kent de winterbedruwheid dermate veel vrijheidsgraden, dat met de huidige kennis niet goed te overzien is hoe de kalibratie het beste geautomatiseerd kan worden. Aanbevolen wordt om eerst enkele handmatige kalibraties uit te voeren voordat een methode voor automatische kalibratie ontworpen wordt.



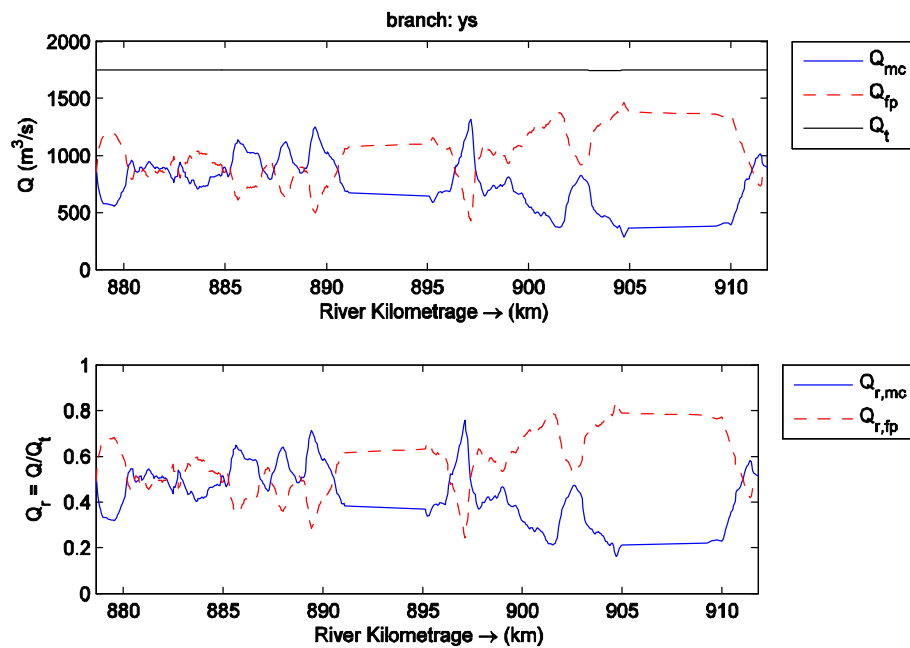
Figuur 6-7. Langsprofiel van verdeling van afvoeren over zomer- en winterbed, boven in absolute zin en onder in relatieve zin ten opzichte van de totale afvoer (Bovenrijn).



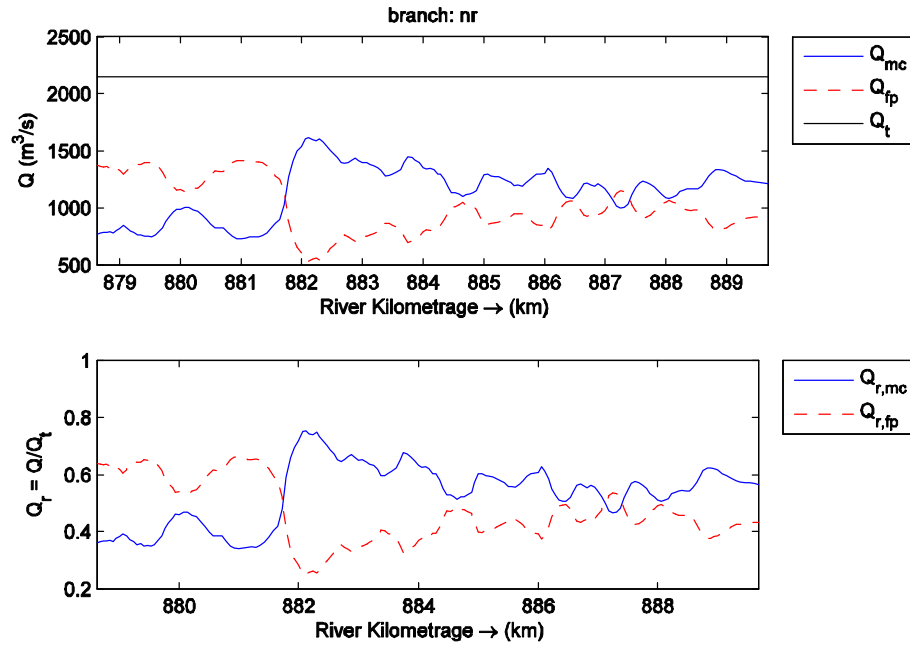
Figuur 6-8. Langsprofiel van verdeling van afvoeren over zomer- en winterbed, boven in absolute zin en onder in relatieve zin ten opzichte van de totale afvoer (Waal).



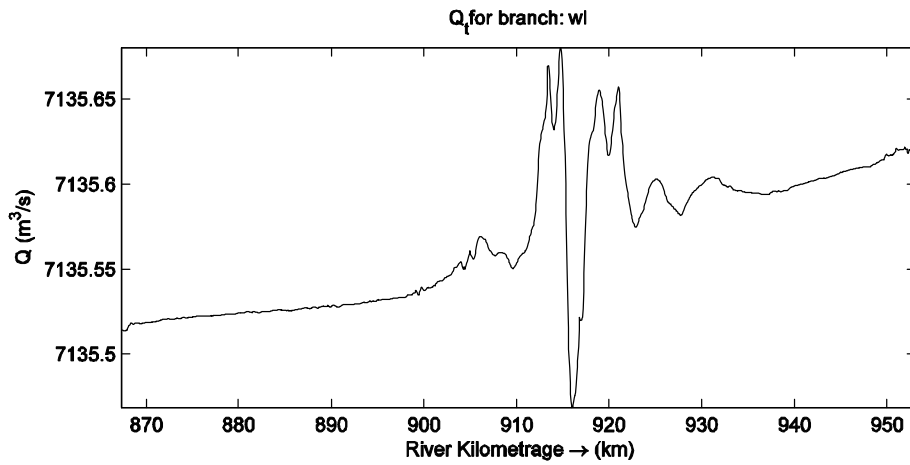
Figuur 6-9. Langsprofiel van verdeling van afvoeren over zomer- en winterbed, boven in absolute zin en onder in relatieve zin ten opzichte van de totale afvoer (Pannerdensch Kanaal).



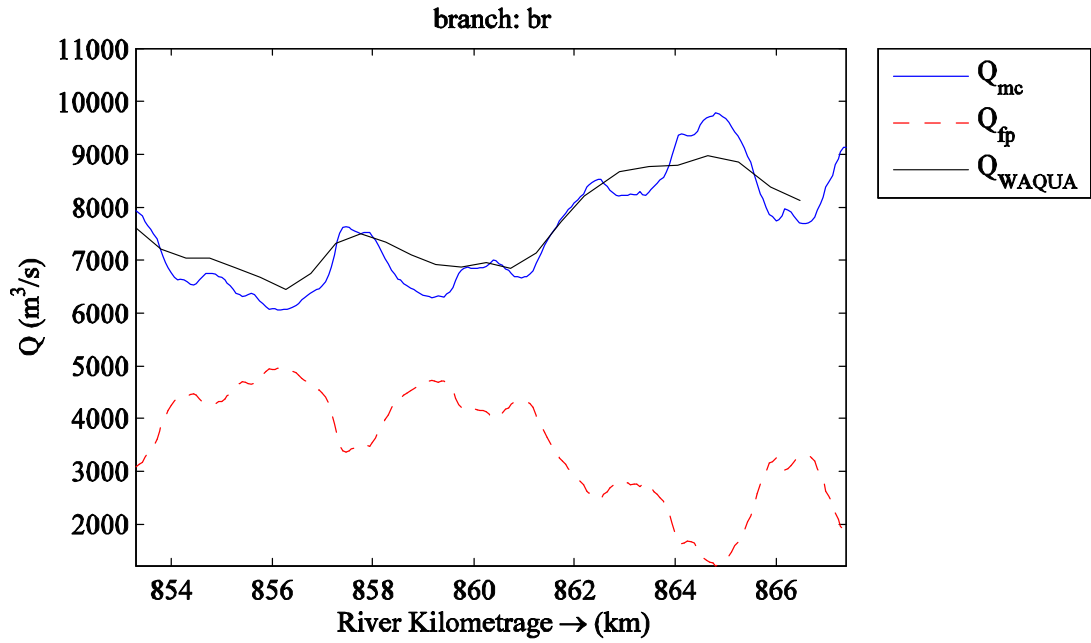
Figuur 6-10. Langsprofiel van verdeling van afvoeren over zomer- en winterbed, boven in absolute zin en onder in relatieve zin ten opzichte van de totale afvoer (IJssel).



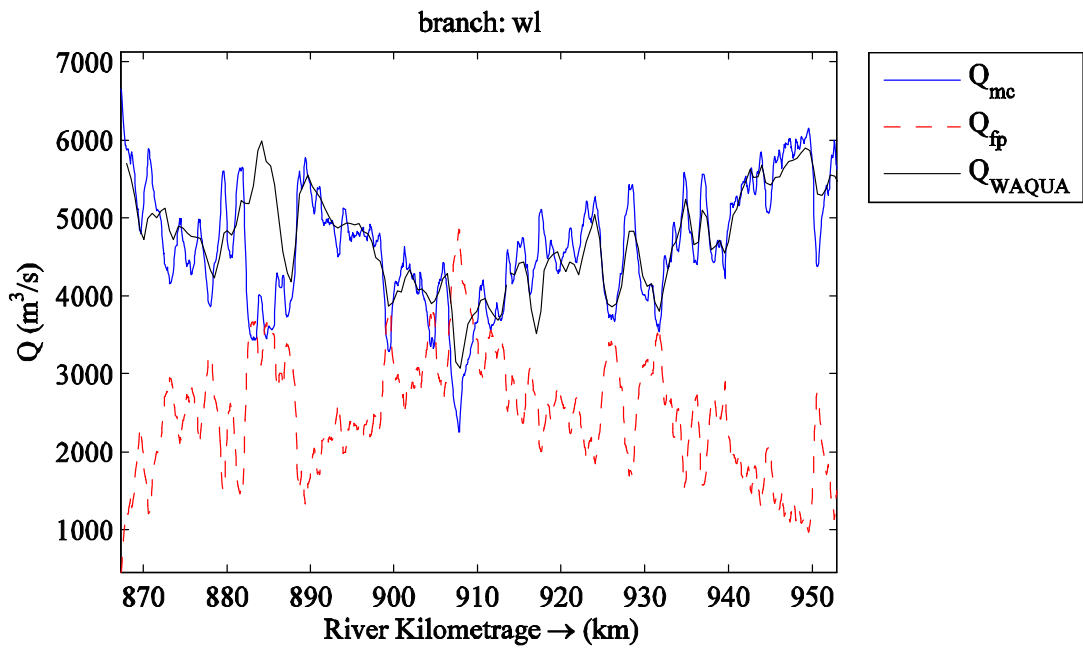
Figuur 6-11. Langsprofiel van verdeling van afvoeren over zomer- en winterbed, boven in absolute zin en onder in relatieve zin ten opzichte van de totale afvoer (Nederrijn).



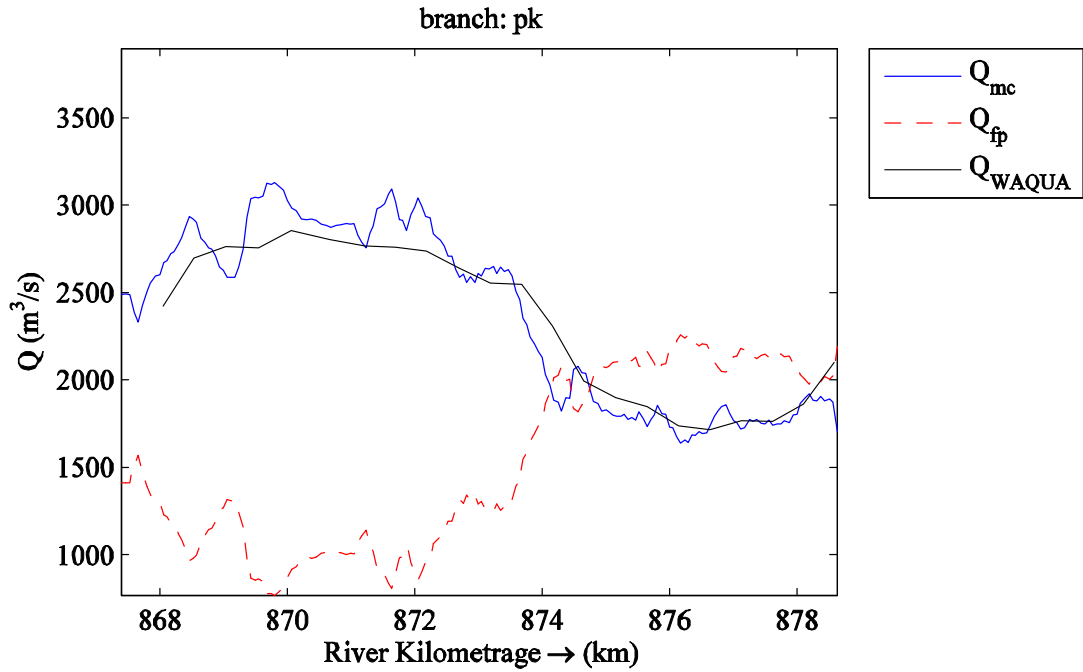
Figuur 6-12. Langsprofiel van totale afvoeren door de Waal op een schaal die de onnauwkeurigheden in de berekening aan het licht brengt.



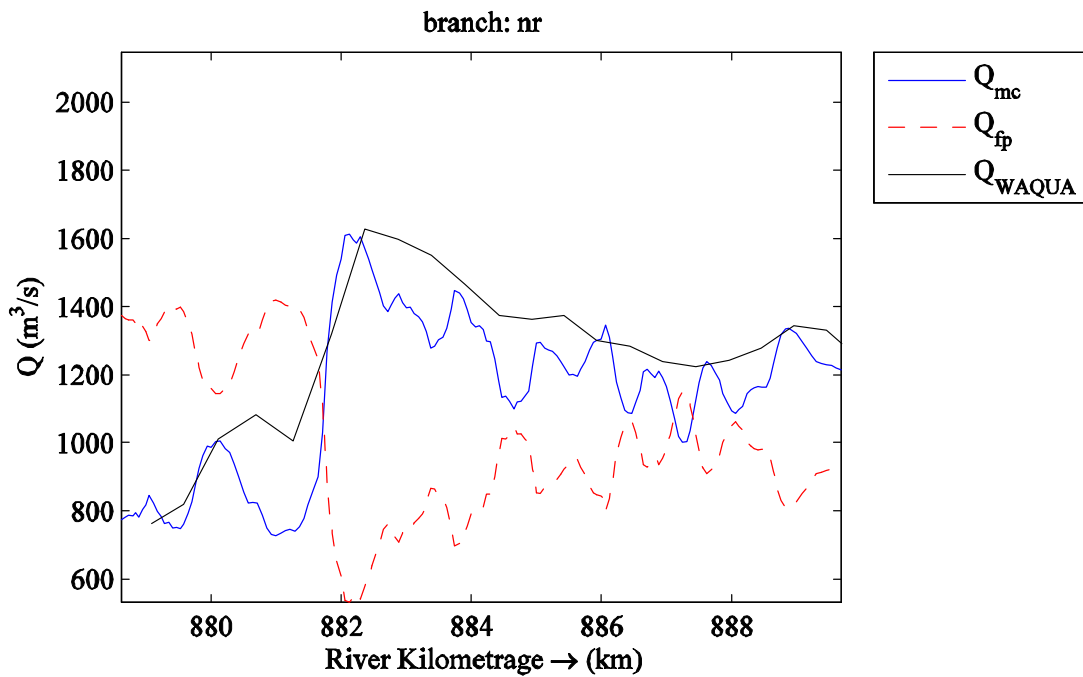
Figuur 6-13. Vergelijking tussen verdelingen van afvoeren over zomer- en winterbed in de Bovenrijn volgens het ontwikkelde hulpmiddel en een vergelijkbaar hulpmiddel van Rijkswaterstaat.



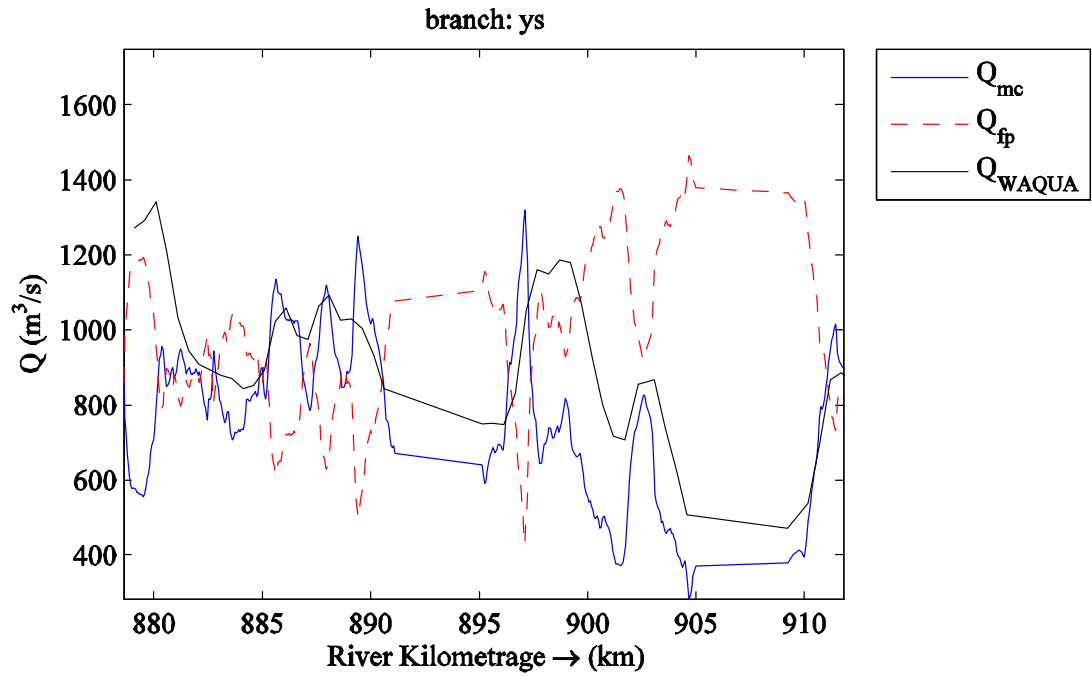
Figuur 6-14. Vergelijking tussen verdelingen van afvoeren over zomer- en winterbed in de Waal volgens het ontwikkelde hulpmiddel en een vergelijkbaar hulpmiddel van Rijkswaterstaat.



Figuur 6-15. Vergelijking tussen verdelingen van afvoeren over zomer- en winterbed in het Pannerdensch Kanaal volgens het ontwikkelde hulpmiddel en een vergelijkbaar hulpmiddel van Rijkswaterstaat.



Figuur 6-16. Vergelijking tussen verdelingen van afvoeren over zomer- en winterbed in de Nederrijn volgens het ontwikkelde hulpmiddel en een vergelijkbaar hulpmiddel van Rijkswaterstaat.

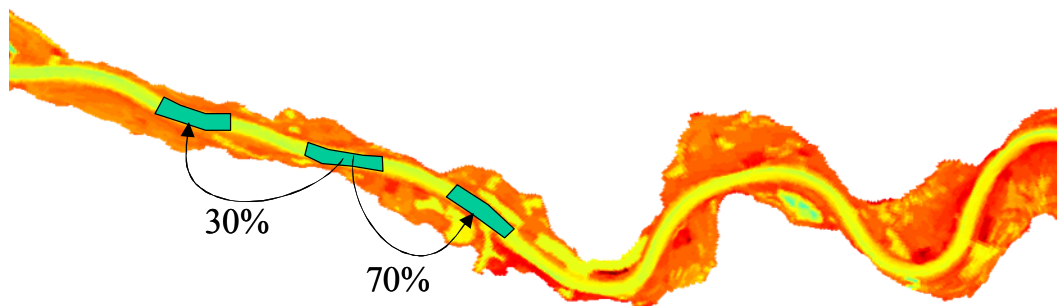


Figuur 6-17. Vergelijking tussen verdelingen van afvoeren over zomer- en winterbed in de IJssel volgens het ontwikkelde hulpmiddel en een vergelijkbaar hulpmiddel van Rijkswaterstaat.

7 Functionaliteit voor baggeren en storten

7.1 Beschrijving

Baggeren en storten zijn voornamelijk ingrepen voor duurzame verruiming van de vaarweg. Deze ingrepen zijn te optimaliseren door te onderzoeken welke hoeveelheden, locaties en tijdstippen het meest effectief zijn. Een belangrijke eis aan het voorspelinstrument is daarom dat dit voldoende functionaliteit bezit om allerlei strategieën van baggeren en storten flexibel te simuleren. De functionaliteit van de bestaande versie van Delft3D-3DMOR is beperkt. Polygonen beschrijven de bagger- en stortzones, zie bijvoorbeeld Figuur 7-1. In iedere baggerzone wordt de bodem verlaagd tot een door de gebruiker opgegeven diepte. Voor elke rekencel binnen een baggerzone wordt deze verlaging uitgevoerd en het bijbehorende baggervolume bepaald. Het totale baggervolume, dat gelijk is aan de som over alle rekencellen, kan worden verdeeld over stortzones in door de gebruiker opgegeven verhoudingen (Figuur 7-1). Het bijbehorende materiaal wordt binnen een stortzone gelijkmatig over de rekencellen verdeeld. Het oude Delft3D-MORSYS kende naast vergelijkbare functionaliteit ook opties op basis van door de gebruiker opgegeven baggervolumes, te handhaven bodemniveaus, te handhaven waterdiepten en beperkingen in periodes voor baggerwerkzaamheden.

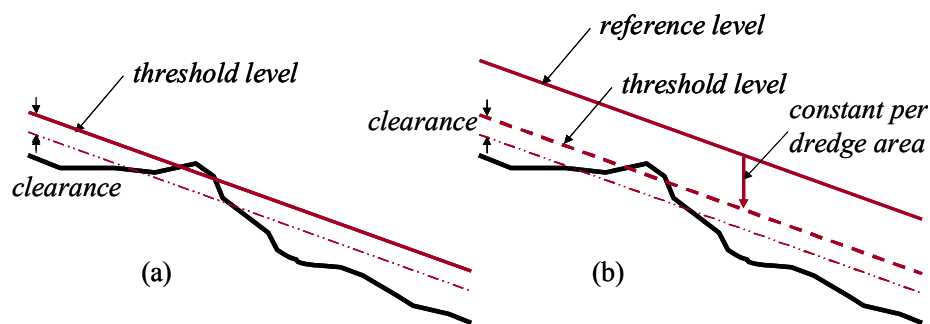


Figuur 7-1. Voorbeeld van polygonen voor een baggerzone en twee stortzones, met een door de gebruiker opgegeven verhouding voor de verdeling van baggerspecie over de stortzones.

Om het instrumentarium flexibeler te maken is de functionaliteit voor baggeren en storten in het kader van deze opdracht vergroot. Allereerst is het mogelijk gemaakt dat bagger- en stortzones elkaar overlappen. Verder is het mogelijk gemaakt om een maximum te stellen aan de baggersnelheid in m^3/s . Tenslotte zijn mogelijkheden ingebouwd om te kiezen hoe de bodemveranderingen door baggeren en storten binnen een bagger- of stortzone ruimtelijk verdeeld worden. De in het oude Delft3D-MORSYS geboden mogelijkheid om ook specifieke periodes voor baggerwerkzaamheden te specificeren is hier echter niet geïmplementeerd.

De gebruiker kan een strategie voor baggeren en storten definiëren aan de hand van verschillende criteria en opties. De criteria betreffen voorwaarden die baggerwerkzaamheden in gang zetten (*triggers*). De volgende criteria zijn geïmplementeerd:

1. Bodemniveau boven een drempelwaarde (*threshold*):
 - a) Voorgeschreven drempelwaarde voor bodemniveau boven een horizontaal referentievlak, bijvoorbeeld NAP (Figuur 7-2a). Deze drempelwaarde kan een constante zijn of een ruimtelijk variërende grootte;
 - b) Voorgeschreven drempelwaarde voor diepte beneden een referentie-waterspiegel, bijvoorbeeld OLR (Figuur 7-2b). Deze drempelwaarde is voor iedere baggerzone een constante.
2. Maximale baggersnelheid. Dit criterium hangt af van de beschikbare baggercapaciteit en van overwegingen van numerieke stabiliteit.

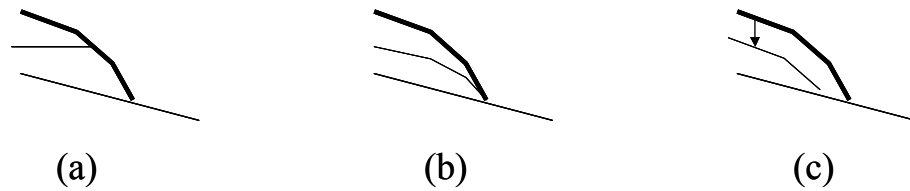


Figuur 7-2. Baggercriteria; (a) drempelwaarde voor bodemniveau, (b) drempelwaarde voor diepte beneden referentie-waterspiegel. Baggerwerk wordt uitgevoerd met een zekere overdiepte (*clearance*) ten opzichte van de drempelwaarde (*threshold*).

Om te garanderen dat niet bij het minste of geringste weer voldaan wordt aan het criterium om te gaan baggeren, moet ook een overdiepte worden opgegeven. Dit is een constante waarde voor het hele modeldomein, waarvan vervolgens per baggerzone lokaal kan worden afgeweken.

De volgende opties zijn geïmplementeerd voor het baggeren:

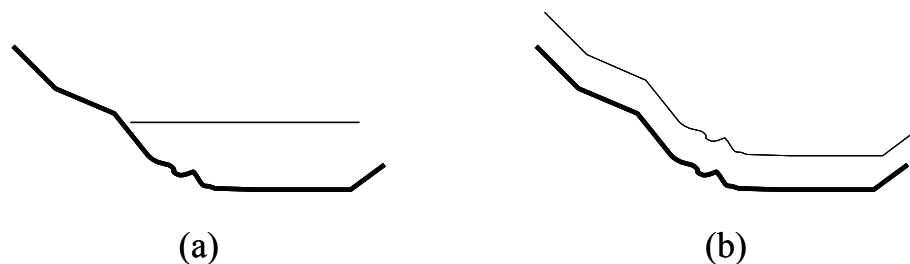
1. Bagger alle punten in de baggerzone tot een niveau dat met de opgegeven overdiepte onder de drempelwaarde ligt;
2. Voer binnen een tijdstap slechts een deel van het benodigde baggerwerk uit indien de maximale baggersnelheid de mogelijkheid van optie 1 beperkt. In dat geval zijn er de volgende subopties:
 - a) Bagger eerst de grootste ondiepten binnen de baggerzone (Figuur 7-3a);
 - b) Bagger de gehele baggerzone over een hoogte die evenredig is met het lokale verschil tussen actuele bodemligging en beoogde bodemligging, waarbij de beoogde bodemligging overeenkomt met een niveau dat met de opgegeven overdiepte onder de drempelwaarde ligt (Figuur 7-3b);
 - c) Bagger gelijkmatig over de gehele baggerzone (Figuur 7-3c);
3. Bagger naar keuze wel of niet ook de drooggevallen punten binnen de baggerzone;
4. Bagger naar keuze wel of niet verder wanneer een niet-erodeerbare laag geraakt wordt;
5. Bagger selectief verschillende korrelgroottes van het sediment.



Figuur 7-3. Baggeropties; (a) eerst de grootste ondiepten, (b) evenredig met het teveel aan sediment, (c) gelijkmatig.

De volgende opties zijn geïmplementeerd voor het storten:

1. Stort eerste de grootste diepten binnen de stortzone vol (Figuur 7-4a);
2. Stort gelijkmatig over de gehele stortzone (Figuur 7-4b).

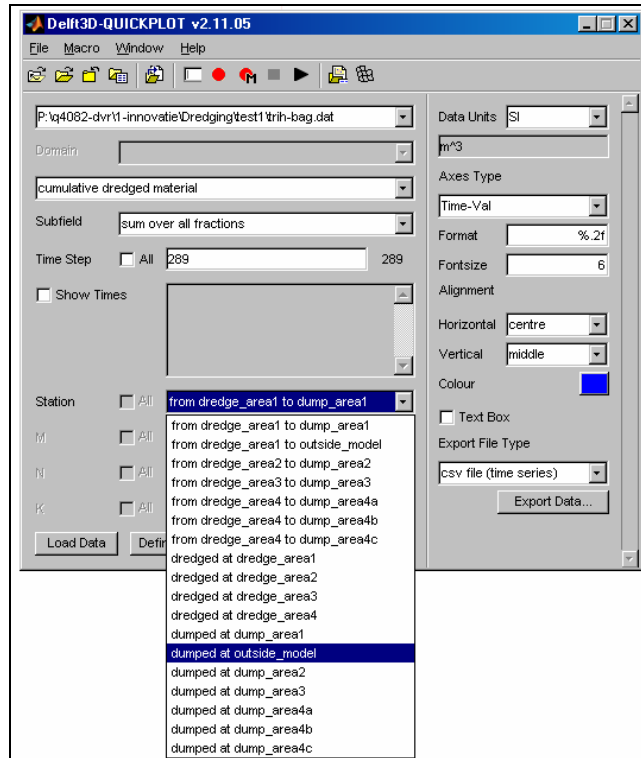


Figuur 7-4. Stortopties; (a) eerst de grootste diepten, (b) gelijkmatig.

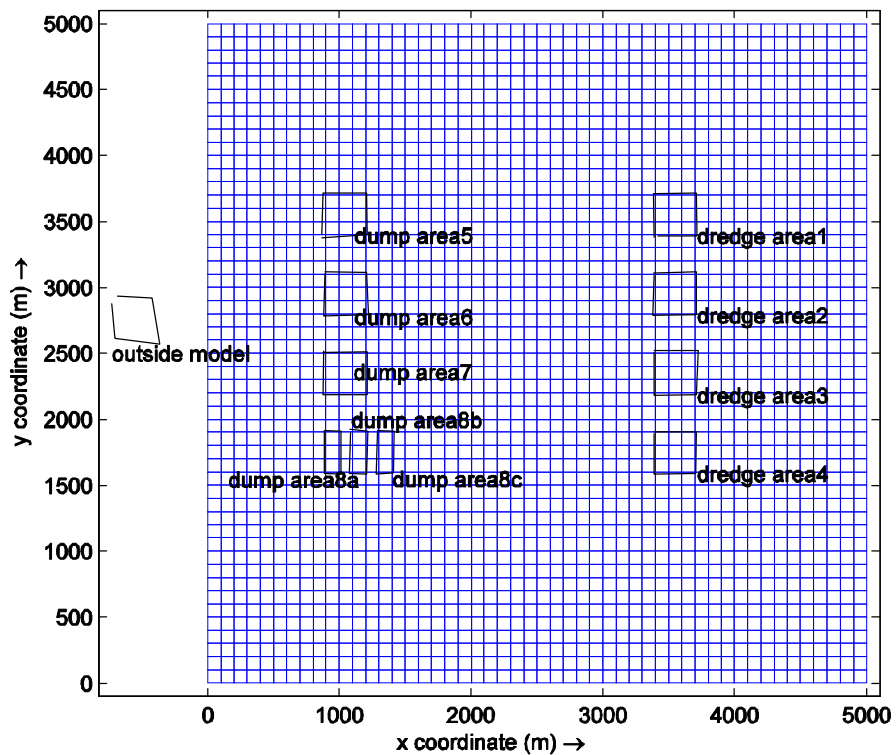
Tijdens berekeningen van baggeren en storten wordt per zone de totale hoeveelheid gebaggerd of gestort materiaal bijgehouden. Ook wordt voor elke baggerzone bijgehouden welke percentages van de baggerspecie in andere zones gestort zijn. Figuur 7-5 geeft hiervan een voorbeeld.

7.2 Testen

De functionaliteit voor baggeren en storten is getest voor een eenvoudig vierkant modeldomein (Figuur 7-6). Tabel 7-1 geeft de specificaties van de geteste strategie. Om interpretatieproblemen te voorkomen is stilstaand water gebruikt, zodat morfologische veranderingen uitsluitend zijn toe te schrijven aan baggeren en storten.



Figuur 7-5. Voorbeeld van boekhouding van gebaggerde hoeveelheden.



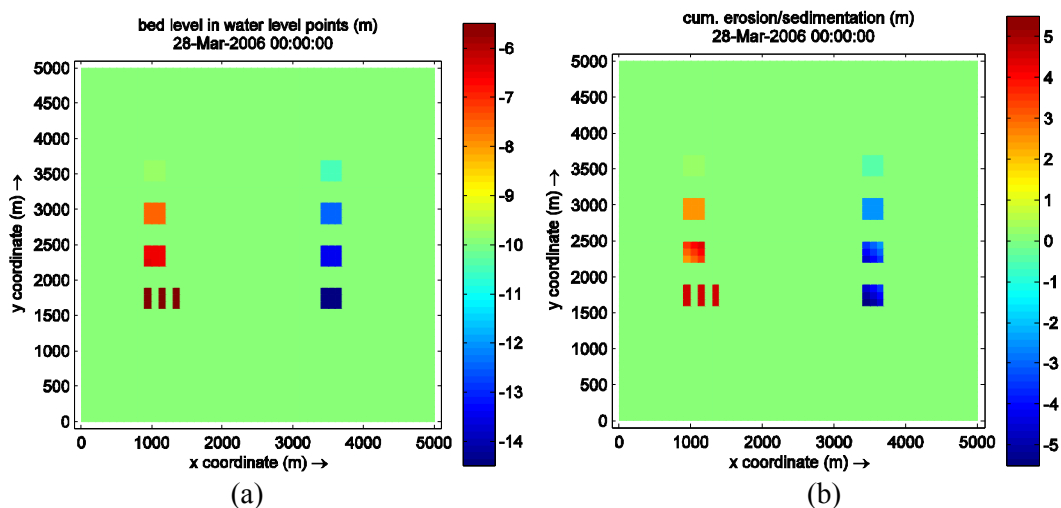
Figuur 7-6. Vierkant modeldomein met rechthoekig rekenrooster en verschillende bagger- en stortzones voor het testen van de functionaliteit voor baggeren en storten.

Tabel 7-1. Overzicht van geteste strategie voor baggeren en storten (basiswaarde voor overdiepte 1 m, referentie-waterspiegel 0,5 m boven horizontaal referentievlak).

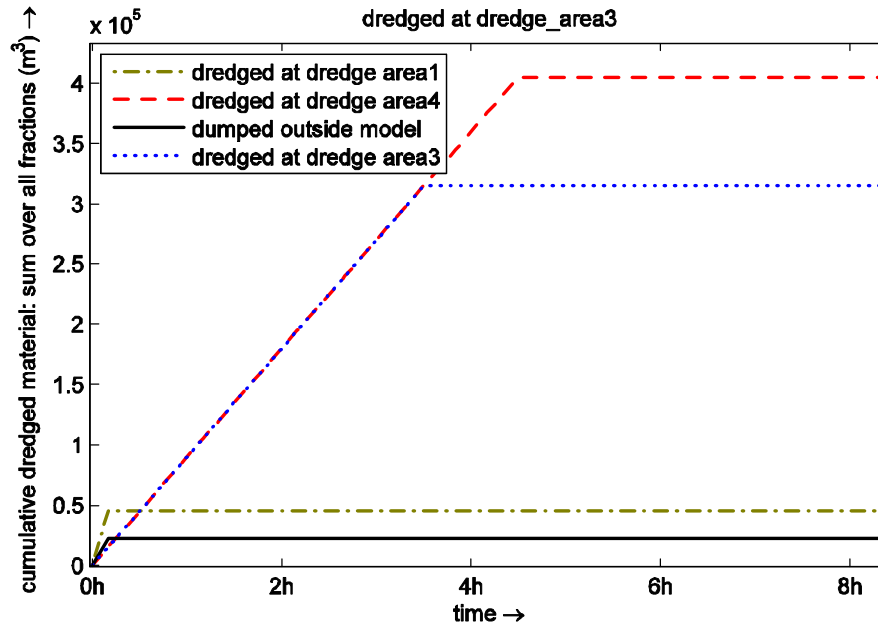
Baggerzone	Baggerregels	Stortzone	Stortregels
dredge area1	<ul style="list-style-type: none"> • Baggerdiepte 11,00 m onder referentie-waterspiegel • Overdiepte 0,0 m • Verdeling evenredig met het teveel aan sediment 	dump area5	<ul style="list-style-type: none"> • 0% Fractie 1 • 100% Fractie 2 • Eerst de grootste diepten
		outside model	<ul style="list-style-type: none"> • 100% Fractie 1 • 0% Fractie 2 • Eerst de grootste diepten
dredge area2	<ul style="list-style-type: none"> • Baggerdiepte 12,00 m onder referentie-waterspiegel • Maximale baggersnelheid 788,4 miljoen m³/jaar • Gelijkmatische verdeling over zone 	dump area6	<ul style="list-style-type: none"> • 100% • Eerst de grootste diepten
dredge area3	<ul style="list-style-type: none"> • Baggerdiepte 13,00 m onder referentie-waterspiegel • Maximale baggersnelheid 788,4 miljoen m³/jaar • Gelijkmatische verdeling over zone 	dump area7	<ul style="list-style-type: none"> • 100% • Gelijkmatische verdeling over zone
dredge area4	<ul style="list-style-type: none"> • Baggerdiepte 14,00 m onder referentie-waterspiegel • Maximale baggersnelheid 788,4 miljoen m³/jaar • Eerst de grootste ondiepten 	dump area8a	<ul style="list-style-type: none"> • 33,3% • Eerst de grootste diepten
		dump area8b	<ul style="list-style-type: none"> • 33,3% • Eerst de grootste diepten
		dump area8c	<ul style="list-style-type: none"> • 33,3% • Eerst de grootste diepten

7.3 Resultaten

Resultaten van de test zijn weergegeven in Figuren 7-7 en 7-8. Figuur 7-7 toont de situatie aan het einde van de simulatie, terwijl Figuur 7-8 het verloop in de tijd presenteert voor enkele geselecteerde locaties. De resultaten stemmen overeen met de verwachtingen.



Figuur 7-7. Resulterende bodemligging (a) en cumulatieve erosie en sedimentatie (b) aan het einde van een simulatie van bagger- en stortwerkzaamheden.



Figuur 7-8. Verloop van cumulatieve volumina van baggeren en storten voor geselecteerde locaties.

7.4 Toetsing aan gebruikswensen

7.4.1 Inleiding

De functionaliteit voor baggeren en storten is vergroot op basis van enkele bij aanvang van de opdracht bekende gebruikswensen en het voorbeeld van de functionaliteit in het oude Delft3D-MORSYS. Tijdens de uitvoering van de opdracht kwam echter een uitgebreidere definitie van de gebruikswensen beschikbaar (Sieben, 2006). In deze paragraaf wordt getoetst in hoeverre de nu ingebouwde functionaliteit al aan deze gebruikswensen voldoet.

7.4.2 Criteria en opties voor baggeren

De basiswens is dat tijdens de berekening gecontroleerd wordt of het bodemniveau voldoet aan een criterium om baggerwerkzaamheden in gang te zetten. Wordt aan het criterium voldaan, dan wordt gebaggerd tot een niveau dat met een zekere overdiepte onder de voorgeschreven drempelwaarde ligt. Hieraan voldoet de ingebouwde functionaliteit. Een aanvullende gebruikswens is om alleen te baggeren bij waterstanden die beneden een bepaalde grens liggen. Dit zou eventueel geformuleerd kunnen worden als een voorschrift om alleen in bepaalde periodes te baggeren. Deze mogelijkheid is hier niet geïmplementeerd.

Verder geldt de wens dat het tempo van het baggeren vrij te kiezen is. Hierin wordt voorzien door de mogelijkheid om een maximale baggersnelheid te specificeren.

7.4.3 Criteria en opties voor storten

Voor het storten zijn de volgende opties gewenst:

1. Storten binnen of buiten de normaallijnen;
2. Storten in een diepte die zich minstens 1,5 km bovenstrooms van de gebaggerde ondiepte bevindt;
3. Storten in een diepte die zich minstens x km bovenstrooms van de gebaggerde ondiepte bevindt;
4. Storten in een diepte benedenstrooms van de gebaggerde ondiepte;
5. Mogelijkheid om het streefpeil en het startpeil ten opzichte van een referentiepeil vrij te kiezen;
6. Mogelijkheid om het controle-interval (minimale periode tussen eventuele ingrepen) vrij te kiezen;
7. Mogelijkheid om het tempo van het storten vrij te kiezen;
8. Mogelijkheid om tijdens een berekening op een andere stortzone over te stappen: Als een aanvankelijk geselecteerde diepte onvoldoende stortcapaciteit heeft, wordt, afhankelijk van de strategie, de volgende bovenstroomse of benedenstroomse diepte gebruikt.

De opties 1 tot en met 4 worden gerealiseerd door op de gewenste plaatsen polygonen voor stortzones te definiëren, die administratief verbonden worden met baggerzones als bronnen voor de te storten specie. In opties 5, 6 en 7 is niet voorzien, omdat het storten in deze implementatie volledig gestuurd wordt door de baggerwerkzaamheden en de bijbehorende criteria. Ook optie 8 is niet gerealiseerd. Sieben (2006) geeft bij optie 8 overigens de toelichting dat de stortcapaciteit in het prototype altijd wel voldoende is, maar dat in het model misschien een ventiel nodig is voor het geval dat alle stortcapaciteit benut is. Dat kan gebeuren als het oppervlak van de aangewezen stortzones te klein is.

7.4.4 Bijdrage van bodemvormen aan vaardiepte

Het is gewenst om naast de gemiddelde bodemligging ook de invloed van bodemvormen (duinen) op de vaardiepte te kunnen beschouwen, inclusief het bijbehorende te baggeren volume. Hiervoor voert WL | Delft Hydraulics momenteel een afzonderlijke opdracht uit voor Rijkswaterstaat RIZA (bestelnummer 4500034944).

7.4.5 Verdere afbakening

Sieben (2006) stelt als afbakening verder voor:

1. Baggeren en storten vinden alleen plaats voor afvoeren kleiner dan zomerbedvullend;
2. Baggeren, verplaatsen en storten geschiedt instantaan ten opzichte van de morfologische ontwikkelingen;
3. Bodemvormen passen zich na baggeren en storten instantaan aan ten opzichte van de morfologische ontwikkelingen;
4. Het gebaggerde volume kan voorlopig alleen binnen dezelfde tak worden teruggestort;

5. Baggeren en storten vinden plaats in eenheden van het zomerbed;
6. De bodemverandering door baggeren en storten kan worden geïntroduceerd door
 - a) een uniforme bodemverandering van alle rekencellen binnen de eenheid;
 - b) het afvlakken van uitsluitend rekencellen met bodemligging boven streefpeil en het tot gelijk niveau opvullen van rekencellen met de grootste diepte;
7. Het referentievlak (zoals OLR) waarmee een streefpeil en een startpeil worden gedefinieerd, wordt in het model met een vast interval berekend en geactualiseerd.

Bepaling 1 om alleen te baggeren bij afvoeren die beneden een bepaalde grens liggen, zou eventueel geformuleerd kunnen worden als een voorschrift om alleen in bepaalde periodes te baggeren. Deze mogelijkheid is hier niet geïmplementeerd. Aan bepalingen 2 en 4 is voldaan. Bepaling 3 hangt af van de lopende afzonderlijke opdracht voor Rijkswaterstaat RIZA (bestelnummer 4500034944). Bepaling 5 stemt overeen met de aanpak op basis van polygonen voor onderscheiden bagger- en stortzones. Aan de bij bepaling 6 genoemde opties voor de ruimtelijke verdeling van bodemveranderingen binnen een bagger- of stortzone is eveneens voldaan. Bepaling 7 daarentegen is niet gerealiseerd. Het referentievlak moet vooralsnog tevoren door de gebruiker worden gespecificeerd.

7.4.6 Presentatie van resultaten

Het is gewenst om voor elk tijdstip de volgende grootheden te registreren:

- locatie, volume en samenstelling van het gebaggerde materiaal;
- locatie, afgelegde afstand, volume en samenstelling van het gestorte materiaal;
- locatie en grootte van minimale diepte.

Deze mogelijkheid is gerealiseerd, met dien verstande dat de afgelegde afstand niet door het model berekend wordt. De afgelegde afstand kan echter eenvoudig worden afgeleid uit de ligging van de bagger- en stortzones. Aanbevolen wordt om de afstand ook in de toekomst niet te laten berekenen door het model, maar in een nabewerking af te leiden uit de rekenresultaten.

Verder is het gewenst om, naast lengteprofielen van bodemligging en bodemsamenstelling, ook lengteprofielen te presenteren van de bevaarbare breedte en diepte bij OLR, met en zonder bijdrage van bodemvormen (duinen). Aangenomen wordt dat hiervoor, in een nabewerking van de resultaten, *scripts* uit het BOS Baggeren gebruikt kunnen worden. Tevens is het gewenst om een kaart te produceren van de berekende bathymetrie ten opzichte van OLR, met aanvullende informatie over de vaargeul (vaargeullijnen, etc.). Ook hiervoor wordt aangenomen dat *scripts* uit het BOS Baggeren gebruikt kunnen worden.

8 Functionaliteit voor morfologische randvoorwaarde

8.1 Beschrijving

In de bestaande versie van Delft3D kan de bodemligging als bovenstroomse randvoorwaarde alleen worden opgegeven in de vorm van een constant niveau. Dit constante niveau wordt vervolgens bereikt door aan de bovenrand dusdanige sedimenttransporten aan te nemen, dat er geen transportgradiënten ontstaan tussen de eerste en de tweede dwarslijn van het rekenrooster. De algehele “autonome” bodemdaling in de Rijn vraagt echter om de mogelijkheid om in langjarige berekeningen een veranderende bodemligging op te geven. Deze mogelijkheid is daarom in het kader van deze opdracht geïmplementeerd. Er zijn nu verschillende opties beschikbaar die zijn aan te roepen door een parameter *IBedCond* een passende waarde te geven:

- $IBedCond = 0$: vrije bodemligging, waarbij de bodemveranderingen op de rand de bodemveranderingen binnen het rekendomein volgen. Gebruik van deze randvoorwaarde wordt niet aanbevolen.
- $IBedCond = 1$: vaste bodemligging, een optie die ook bij verstek wordt aangenomen als de gebruiker niets specificeert (*default option*).
- $IBedCond = 2$: voorgeschreven tijdreeks van bodemliggingen (m), met parameternaam ‘depth’. Daarbij verwijzen de tijdstippen naar de hydrodynamische tijd.
- $IBedCond = 3$: voorgeschreven tijdreeks van snelheden van bodemdaling of –stijging (m/s), met parameternaam ‘depth change’. Daarbij verwijzen de tijdstippen van de tijdreeks naar de hydrodynamische tijd, maar worden de snelheden van bodemverandering gebaseerd op de morfologische tijd.
- $IBedCond = 4$: voorgeschreven tijdreeks van sedimentvrachten per eenheid van breedte inclusief poriën (m^2/s), met parameternaam ‘transport incl pores’. De sedimentvrachten kunnen voor iedere fractie van een sedimentmengsel worden opgegeven.
- $IBedCond = 5$: voorgeschreven tijdreeks van sedimentvrachten per eenheid van breedte zonder (m^2/s), met parameternaam ‘transport excl pores’. De sedimentvrachten kunnen voor iedere fractie van een sedimentmengsel worden opgegeven.

Een aanvullende randvoorwaarde voor de samenstelling van het bodemsediment is geïmplementeerd ten behoeve van berekeningen met gegradeerd sediment. De volgende opties zijn beschikbaar:

- $ICmpCond = 0$: vrije bodemsamenstelling, waarbij de veranderingen in de samenstelling op de rand de veranderingen binnen het rekendomein volgen.
- $ICmpCond = 1$: vaste bodemsamenstelling die gelijk is aan de beginwaarde. Deze optie wordt ook bij verstek aangenomen als de gebruiker niets specificeert (*default option*).

- $ICmpCond = 2$: voorgeschreven tijdreeks van sedimentfracties op basis van massa (-), met een parameter genaamd 'mass fraction' waaraan voor iedere fractie waarden toegekend moeten worden.
- $ICmpCond = 3$: voorgeschreven tijdreeks van sedimentfracties op basis van massa (-), met een parameter genaamd 'volume fraction' waaraan voor iedere fractie waarden toegekend moeten worden.

8.2 Testen

De morfologische randvoorwaarden zijn getest met hetzelfde model van de Olesengoot als in Hoofdstuk 2. De resultaten hiervan worden gepresenteerd in Paragraaf 8.3.

8.3 Resultaten

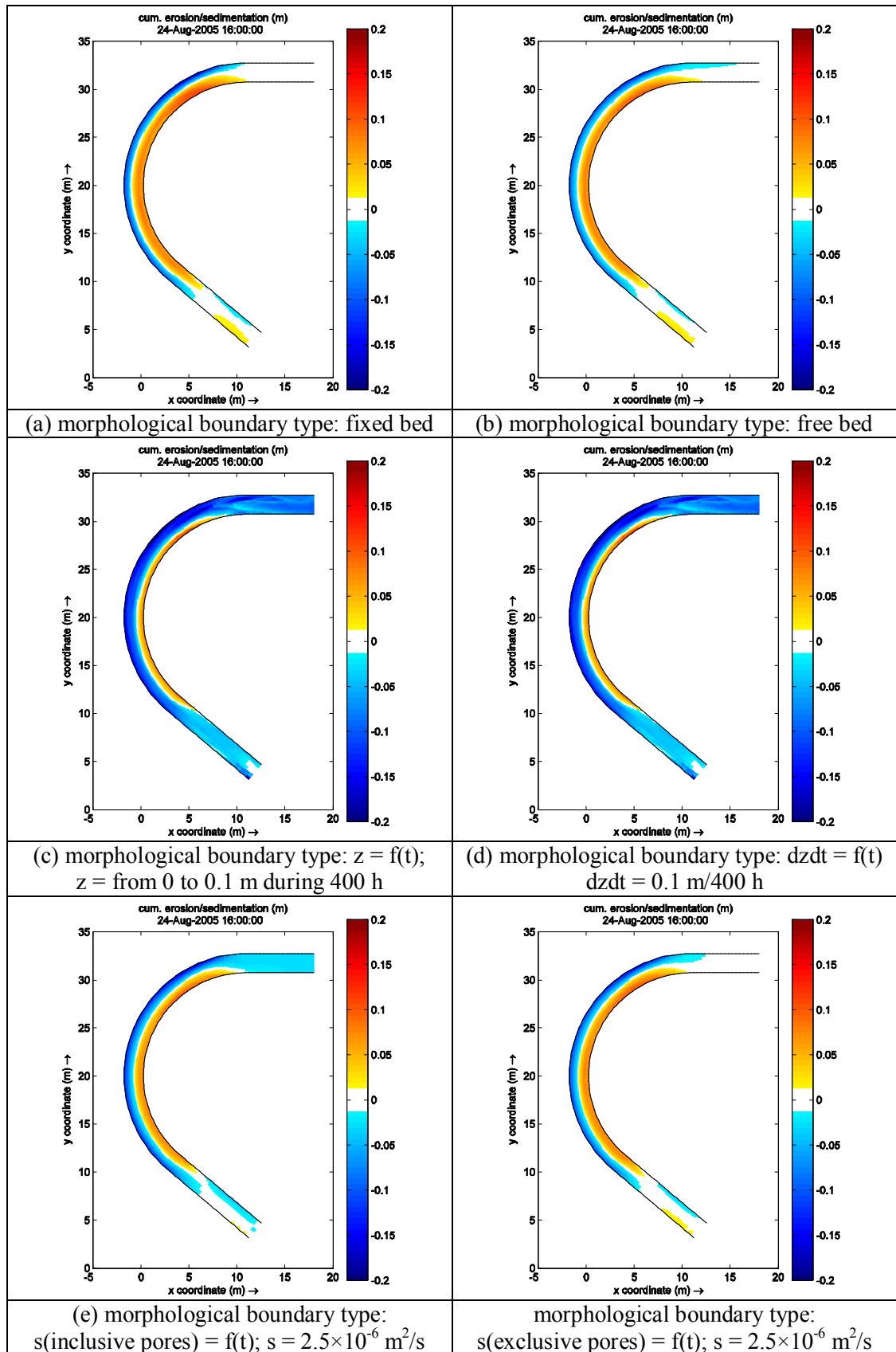
Figuur 8-1 geeft een overzicht van het effect van verschillende morfologische randvoorwaarden op de situatie die na 400 uur ontstaat. Meer details geven Figuren 8-2 en 8-3, die het verloop laten zien van de bodemligging en het transport van de fijne sedimentfractie in het midden van het eerste dwarsprofiel na de bovenrand.

Figuren 8-2 en 8-3 bevestigen dat een vrije randvoorwaarde ($IBedCond = 0$ of $ICmpCond = 0$) leidt tot een onvoorspelbaar gedrag dat beter vermeden kan worden.

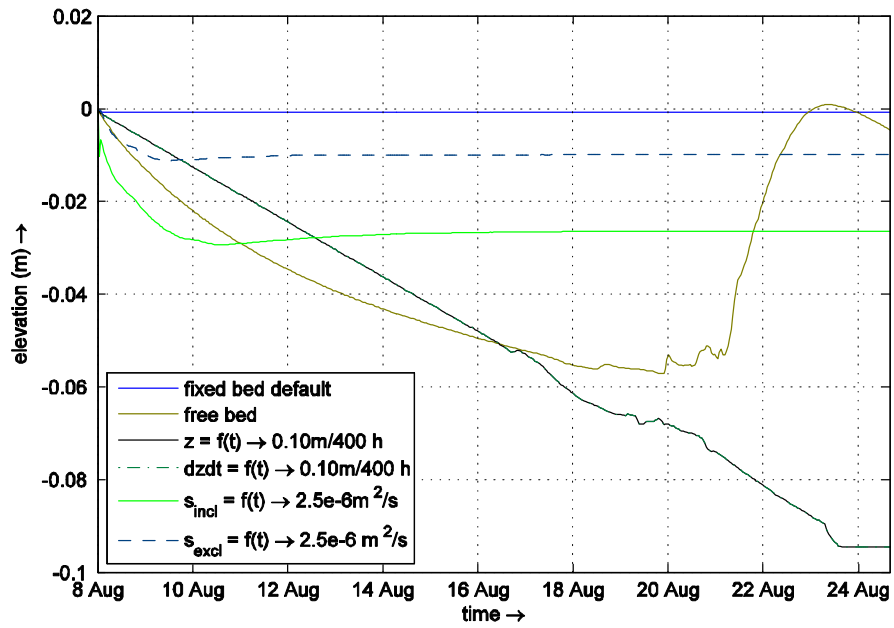
De voorwaarde van een vaste bodemligging ($IBedCond = 1$) komt overeen met de reeds bestaande morfologische voorwaarde die feitelijk de transporten op de eerste dwarslijn na de bovenrand kopieert naar de bovenrand, zodat er geen transportgradiënten ontstaan tussen de eerste en de tweede dwarslijn van het rekenrooster. Figuur 8-2 laat zien dat het gedrag van de bodem dan overeenkomt met de verwachtingen.

Het effect van de voorgeschreven bodemliggingen ($IBedCond = 2$) en bodemveranderingen ($IBedCond = 3$) is getest door in beide gevallen een constante bodemdaling op te leggen die overeenkomt met een totale daling van 0,1 m over de periode van de simulatie. Figuur 8-2 laat zien dat de bodem aanvankelijk perfect de opgelegde daling volgt. Na circa 200 uur ontstaan afwijkingen, die naar alle waarschijnlijkheid zijn toe te schrijven aan invloeden van benedenstroms.

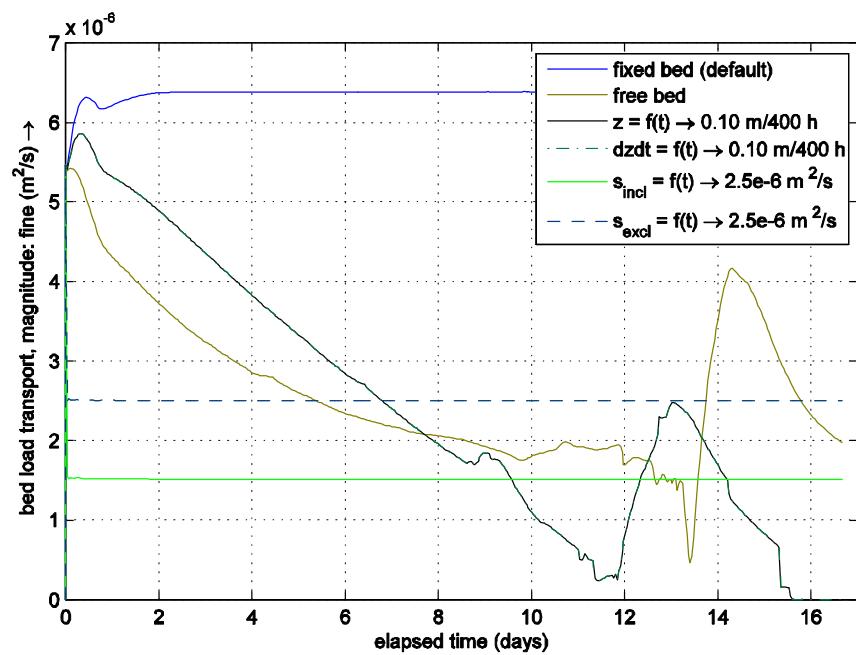
Het effect van voorgeschreven sedimentvrachten ($IBedCond = 4$ en 5) is getest met minder sedimenttoevoer dan gevonden werd voor een vaste bodemligging ($IBedCond = 1$). Dit is zichtbaar in Figuur 8.3. Figuur 8.2 laat zien dat de bodem aanvankelijk erodeert en zich uiteindelijk op een lager niveau stabiliseert.



Figuur 8.1. Patronen van erosie en sedimentatie na 400 uur voor verschillende morfologische randvoorwaarden op de bovenrand.



Figuur 8.2. Effect van verschillende morfologische randvoorwaarden op de bodemontwikkeling in de tijd ter plaatse van het midden van het eerste dwarsprofiel na de bovenrand.



Figuur 8.3. Effect van verschillende morfologische randvoorwaarden op de ontwikkeling van het sedimenttransport in de tijd ter plaatse van het midden van het eerste dwarsprofiel na de bovenrand.

9 Conclusies en aanbevelingen

Een vergelijking tussen rekenresultaten en resultaten van experimenten in de Olesengoot laat zien dat berekeningen met domeindecompositie goed verlopen, mits de rangnummers van de deeldomeinen in stroomafwaartse richting oplopen. Deze afhankelijkheid van de telrichting is een tekortkoming die uiteindelijk wel zal moeten worden opgelost, maar buiten het kader van deze opdracht. In het 2D model van het splitsingspuntengebied wordt de afhankelijkheid van de telrichting in dwarsrichting geminimaliseerd door de domeingrenzen bij de splitsingen tegen de splitsingskop te leggen, zodat zijdelingse sedimentuitwisseling tussen naastgelegen deeldomeinen verwaarloosbaar is. Aanbevolen wordt om de in de tweede helft van 2006 met het model uit te voeren *case studies* zoveel mogelijk te baseren op afzonderlijke, ontkoppelde deeldomeinen. Tevens wordt geadviseerd om het model pas grootschalig te ijken als de resterende problemen met domeindecompositie zijn opgelost.

De functionaliteit voor het effect van vaste lagen is getest aan de hand van *multi-beam* peilingen in 1999. Het sedimenttransport over de vaste laag bij St. Andries werd goed gesimuleerd als een waarde in de orde van 1 m werd aangenomen voor de maximale laagdikte van alluvium waarbij de vaste laag het transport nog beïnvloedt. Op basis van bestaande theorieën lijkt deze dikte te groot, maar recente inzichten uit de morfologische modellering met gegradieerd sediment wijzen erop dat de bestaande theorieën waarschijnlijk de laagdikte onderschatten. Geadviseerd wordt om voorlopig de laagdikte van 1 m te handhaven.

Ter verkorting van de reketijden is een *simulation management tool* geïmplementeerd waarmee een quasi-stationaire aanpak gevolgd kan worden op basis van een in discrete stappen geschematiseerde afvoerreeks en een database waarin berekende stroombeelden worden opgeslagen. Dankzij deze opslag behoeft het inspelen van een stromingsberekening bij een afvoerovergang niet telkens herhaald te worden. De *simulation management tool* heeft de testen succesvol doorstaan. Inmiddels is uit een andere opdracht bekend dat deze nieuwe *tool* ook goed werkt in berekeningen voor bochtcorrectie in de Lek bij Vianen.

Bij lange reketijden bieden lokale grovere deeldomeinen geen soelaas. Deze deeldomeinen vergen extra tijd voor communicatie met het hoofdprofiel, leiden niet tot een grotere tijdstap en dragen bovendien maar beperkt bij aan de berekening omdat de uiterwaarden slechts een gering deel van de tijd overstroomd zijn. Lokale grovere deeldomeinen worden daarom afgeraden.

Er is een hulpmiddel ontwikkeld dat voor elk dwarsprofiel de verdeling van afvoeren over zomer- en winterbed berekent. Dit hulpmiddel kan gebruikt worden bij een grootschalige ijking van de waterbeweging. Op basis van de testen en de eerste toepassing kan geconcludeerd worden dat het hulpmiddel goed voldoet. Het is nu echter nog te vroeg om de kalibratie op de afvoerverdeling op basis van dit hulpmiddel te automatiseren. Aanbevolen wordt om eerst enkele handmatige kalibraties uit te voeren voordat een methode voor automatische kalibratie ontworpen wordt.

Er is functionaliteit ontwikkeld waarmee strategieën voor baggeren en storten op een flexibele manier in modelberekeningen meegenomen kunnen worden. De testen wijzen uit dat de functionaliteit goed geïmplementeerd is. Wat nog ontbreekt is de mogelijkheid om specifieke periodes voor baggerwerkzaamheden te specificeren. Omdat een deel van de gebruikswensen pas in de loop van de uitvoering van de opdracht beschikbaar kwam, is de geïmplementeerde functionaliteit nog niet compleet. Aanbevolen wordt dat Rijkswaterstaat en WL | Delft Hydraulics in onderling overleg nader specificeren welke functionaliteit in een vervolgoopdracht ontwikkeld zal worden.

Verschillende mogelijkheden zijn geïmplementeerd om aan de bovenrand morfologische voorwaarden op te leggen. De testen wijzen uit dat de effecten op de eerste dwarslijn na de bovenrand overeenstemmen met wat op basis van redeneringen en eerdere ervaringen verwacht mag worden.

10 Literatuurverwijzingen

- Barneveld, H.J. & K. Vermeer (2005), Voorspelinstrument duurzame vaarweg; Calibratie en verificatie. Rapport PR956.10, HKV Lijn in Water.
- 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.
- Eerden, H.A.P. (2001), Project Vaste Laag St. Andries, Beslisdocument uitvoeringsfase. Rijkswaterstaat Directie Oost Nederland, Afdeling Nieuwe Werken, PW-SA.01001 ON, 15 januari 2001.
- Mosselman, E. (redactie, 2003), Interactie tussen ligging en samenstelling van de bodem rond de Pannerdensch Kop. Rapport Q3178, WL | Delft Hydraulics.
- Mosselman, E., C.J. Sloff & H.R.A. Jagers (2005), Voorspelinstrument duurzame vaarweg; Voorbereiding. Rapport Q3963.00, WL | Delft Hydraulics.
- Mosselman, E. & C.J. Sloff (2005), The importance of floods for bed sediment composition. Unpublished paper presented at Gravel Bed Rivers, Lienz, Austria, September 2005 (een publicatie is in voorbereiding).
- Rijkswaterstaat (1993), Toekomstvisie Waal Hoofdtransportas. Nota III, Eindrapportage, Rijkswaterstaat Directie Gelderland, Projectbureau Waal.
- Sieben, J. (2004), De Waalbodem in de peiling. Werkdocument 2004.186x, Rijkswaterstaat RIZA.
- Sieben, J., M.H.I. Schropp & E.H. van Velzen (2005), Voorspelinstrument duurzame vaarweg; Functioneel ontwerp. Werkdocument 2005.085x, Rijkswaterstaat RIZA.
- Sieben, J. (2006), Baggeren en storten en het 2D morfologie-model van DVR. WRR memo 2006-010, Rijkswaterstaat RIZA, Afdeling Rivieren, 7 april 2006.
- Sloff, C.J., E. Mosselman & J. Sieben (2006), Effective use of non-erodible layers for improving navigability. Artikel geaccepteerd voor River Flow 2006, Lissabon, 6-8 september 2006.
- Smedes, R.H. (2005), Toekomstige Waal; Duurzame vaardiepte Rijndelta. Projectplan, Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland.
- Struiksmā, N. (1999), Mathematical modelling of bedload transport over non-erodible layers. Proc. IAHR Symp. River Coastal and Estuarine Morphodynamics, Genova, 6-10 Sept. 1999, Vol.I, pp.89-98.
- Van der Zwaard, J.J. (1974a), Ruwheidsonderzoek Waal: invloed van bodemtransport op de ruwheid van een vaste laag. Verslag modelonderzoek, Waterloopkundig Laboratorium, Rapport M988.
- Van der Zwaard, J.J. (1974b), Roughness aspects of sand transport over a fixed bed. Delft Hydr. Lab. Publ. No.118.
- Van Vuren, S., E. Mosselman, K. Sloff & B. Vermeulen (2006), Voorspelinstrument duurzame vaarweg; Initiële modelbouw en demonstratieberekeningen. Rapport Q4082.00, WL | Delft Hydraulics.
- Wilbers, A.W.E. (2000), Bodemtransport naast vaste laag St. Andries: haalbaarheid Dune Tracking in bochtsituaties. Rapport Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie, juli 2000.
- WL (1987), Werking grondkribben ten behoeve van vaarwegverbreding in rivierbochten: werking van grondkribben, schermen en een vaste laag in een gekromde goot met beweeglijke bodem. Verslag verschijnselonderzoek, Rapport Q98, Waterloopkundig Laboratorium.



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**

